

ANALISI FUNZIONALE DELLE CORDE VOCALI IN RELAZIONE ALLA FATICA VOCALE

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

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

1. Introduzione

Molte figure professionali sottopongono ad eccessivo sforzo il proprio organo fonatorio. Tra le categorie professionali a rischio, quella degli insegnanti (di diverso ordine e grado, compresi gli insegnanti di educazione fisica e musicale), rappresenta una delle più colpite. La maggior parte dei disturbi della voce è determinata da condizioni croniche e ricorrenti che derivano da comportamenti scorretti nell'uso della voce o da cattive condizioni acustiche degli ambienti di lavoro.

Esiste una dosimetria per l'organo della fonazione, come esiste per quello dell'udito. Tramite un dispositivo biomedico, denominato Ambulatory Phonation Monitor (APM), si ottengono la frequenza fondamentale ed una stima del livello di pressione sonora a 10 cm dalla bocca del parlatore attraverso i quali è possibile calcolare indici legati alla qualità vocale in un lungo periodo, in particolare il *Vocal Load Index*, il *Time dose*, il *Distance dose*, l'*Energy dissipation dose* e il *Radiated energy dose* [1]. Dall'esame spettroacustico della voce, effettuato prima e dopo le ore lavorative, è possibile, inoltre, definire la qualità del suono prodotto prendendo in considerazione i parametri legati alla fonazione ottenuti dal Multi-Dimensional Voice Program [2], già in uso per l'indagine di possibili patologie vocali.

In questo lavoro, si discutono i risultati di misurazioni di parametri vocali su alcuni insegnanti di scuola primaria. L'articolo riporta i risultati ottenuti nell'analisi di 20 casi, e analizza le possibili relazioni tra loro.

2. Parametri vocali

I due parametri vocali analizzati sono stati il livello di pressione sonora (SPL) e la frequenza fondamentale. Questi due parametri sono stati misurati con il dispositivo APM 3200 della KayPentax, il quale consiste in un accelerometro posizionato sulla fossa sopra lo sterno del parlatore e da un hardware che processa il segnale dell'accelerometro, restituendo la frequenza fondamentale ed una stima del SPL (anecoico, a 15 cm dalla bocca) durante la fonazione con un campionamento di 50 ms.

Attraverso queste due quantità è possibile calcolare 5 differenti dosi vocali [1]: il **Time dose (D_t)**, che misura il tempo durante il quale le corde vocali hanno vibrato sul tempo si misura; il **Vocal Loading Index (VLI)**, correlato al tempo di fonazione ed alla frequenza fondamentale; il **Distance dose (D_d)**, che quantifica la distanza totale accumulata dalle corde vocali nella vibrazione; l'**Energy dissipation dose (D_e)**, ottenuto dall'integrazione della potenza dissipata dal tessuto vibrante delle corde durante il periodo di osservazione e il **Radiated energy dose (D_r)**, relativo all'energia dissipata dalle corde vocali in funzione dell'energia acustica irradiata in prossimità della bocca.

Dall'analisi del suono vocalico effettuata con il MDVP si ricavano i seguenti parametri: **F₀** (F₀ media), **T₀** (Periodo medio), **F_{hi}** (F₀ più alta), **F_{lo}** (F₀ più bassa), **STD** (deviazione standard della F₀), **PFR** (range della fonazione in semitoni), **Fftr** (frequenza del tremore nella F₀), **Jita** e **Jitt** (media delle differenze della durata di periodi successivi adiacenti rispetto al valore medio del periodo fondamentale assoluto ed in %), **RAP** (perturbazione media relativa), **PPQ** (quoziente di perturbazione del tono), **vF₀** (variazione di F₀), **ShdB** e **Shim** (media delle differenze dell'ampiezza di periodi successivi adiacenti rispetto al valore medio dell'ampiezza assoluto ed in %), **APQ** (quoziente di perturbazione in ampiezza), **vAm** (variazione di ampiezza di picco), **NHR** (rapporto rumore-armoniche), **VTI** (indice di turbolenza), **SPI** (indice di fonazione sommessata), **FTRI** (indice di profondità del tremore in frequenza).

3. Metodo

Le misurazioni sono state condotte in una scuola elementare del comune di Torino. Le maestre testate sono state 15, delle quali 5 hanno ripetuto la prova per due giornate lavorative. I rilevamenti sulla voce delle insegnanti testate sono durati circa 4 ore in maniera continuativa, ovvero per l'intero turno lavorativo dei soggetti.

All'inizio del periodo di osservazione, è stata effettuata una procedura di calibrazione attraverso la quale è stato possibile correlare il SPL, prelevato a 15 cm dalla bocca da un microfono di riferimento, con il segnale acquisito dal sensore accelerometrico. Attraverso tale calibrazione si ottiene una stima del SPL durante tutto il periodo di osservazione. Inoltre, è stata effettuata la registrazione di una vocale sostenuta attraverso un laringofono, posizionato sul collo del soggetto, collegato ad un registratore digitale. Il vantaggio nell'utilizzo del laringofono consiste nel fatto che non risulta sensibile al rumore di fondo, ma preleva direttamente il segnale vocale prodotto dal soggetto. Durante tutta la giornata lavorativa i soggetti indossano l'APM e alla fine della giornata vengono ripetute le prove con il laringofono.

4. Analisi e risultati

Per valutare quali tra i parametri calcolati con il MDVP dall'analisi del suono vocale risulta significativamente modificato prima e dopo la giornata lavorativa, è stato effettuato un test ANOVA. I p-values risultati sono riportati nella Tabella 1. Tali p-values sono i risultati ricavati testando l'ipotesi per la quale i risultati ottenuti prima e dopo la giornata lavorativa dalle 15 insegnanti appartengono alla stessa distribuzione.

I parametri che risultano essere significativamente variati, con un rischio d'errore inferiore al 5 %, sono la frequenza fondamentale ed il periodo medio, la frequenza fondamentale più alta e più bassa, media delle differenze della durata di periodi successivi adiacenti rispetto al valore medio del periodo fondamentale ed il rapporto rumore-armoniche.

Tabella 1 - Significatività statistica nelle differenze tra i differenti parametri del MDVP prima e dopo la giornata lavorativa

Parametro	F ₀	To	Fhi	Flo	STD	PFR	Fftr	Jita	Jitt	RAP
p-value	<u>0,02</u>	<u>0,02</u>	<u>0,01</u>	<u>0,01</u>	0,06	0,76	0,58	<u>0,01</u>	0,15	0,20
Parametro	PPQ	vFo	ShdB	Shim	APQ	vAm	NHR	VTI	SPI	FTRI
p-value	0,24	0,59	0,64	0,16	0,23	0,41	<u>0,00</u>	0,14	0,25	0,73

L'MDVP fornisce il cosiddetto vocaligramma, un grafico attraverso il quale è possibile valutare in maniera visiva i valori parametrici in soglia o che eccedono la normalità. In Figura 1 si riporta, ad esempio, un vocaligramma di una delle insegnanti indagate, prima e dopo lo sforzo vocale. La circonferenza esterna della corona rappresenta i limiti normativi di soglia dei diversi parametri. Questi sono individuati dai raggi che riportano, al loro limite esterno, i rispettivi acronimi. I valori sperimentali calcolati per ciascun parametro cadono nell'intersezione del proprio raggio col perimetro esterno di un'area che presenta un colorito marrone se il valore stesso è inferiore al valore di soglia, o rosso se eccede la normalità. I parametri che risultano significativamente variati, prima e dopo lo sforzo vocale, non sono fuori dai limiti previsti dal vocaligramma, mentre gli unici due parametri che risultano essere oltre i limiti previsti sono vAm (variazione di ampiezza di picco) e vFo (variazione di F₀).

Nella Tabella 2 vengono riportate la media e la deviazione standard delle dosi accumulate dalle maestre testate durante la giornata lavorativa. Ttali dosi sono state normalizzate rispetto al tempo di fonazione, la cui dose D_t, viene riportata in percentuale sul tempo totale di analisi con l'APM.

Nella Tabella 3 si riporta una matrice di correlazione tra le differenze dei parametri sopracitati del MDVP e le Dosi vocali accumulate durante la giornata lavorativa. L'unica correlazione riscontrata risulta essere tra vF₀ e VLI.

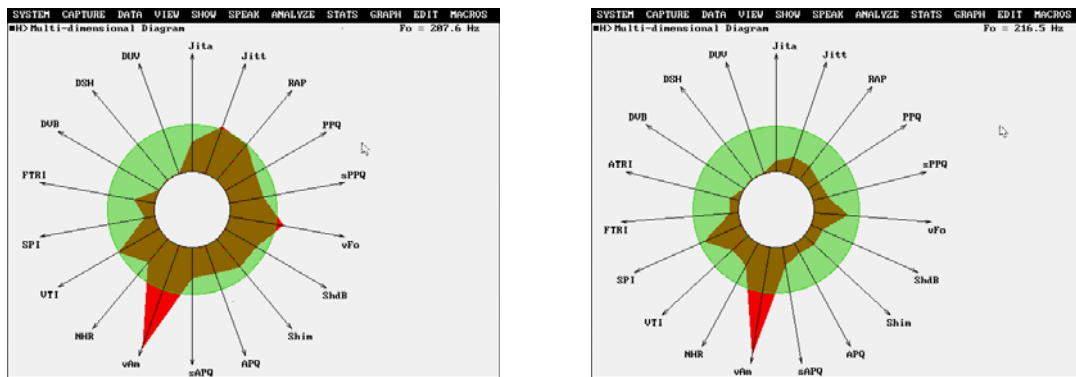


Figura 1 - Vocaligramma di una delle insegnanti indagate, prima e dopo lo sforzo vocale

Tabella 2 - Media e deviazione standard delle dosi accumulate dalle maestre

Dose	D _t %	VLI_norm	D _d _norm	D _e _norm	D _r _norm
Unità di misura.	[-]	[kcicli/s]	[m/s]	[mJ/cm-3s]	[mJ/s]
Media	33	0.258	0.930	1.699	13
Dev.ST	1.5	0.012	0.095	0.369	5.0

Tabella 3 - Matrice di correlazione tra le variazioni dei parametri del MDVP e le Dosi vocali accumulate durante la giornata lavorativa dalle maestre

Matrice di correlazione		D _t _%	VLI_norm	D _d _norm	D _e _norm	D _r _norm
F ₀	Peason Index	0.06	-0.18	-0.32	-0.35	-0.21
	p-value	0.82	0.47	0.18	0.15	0.39
Jita	Peason Index	-0.01	-0.18	0.32	0.40	0.09
	p-value	0.96	0.48	0.18	0.09	0.71
NHR	Peason Index	-0.23	-0.18	0.31	0.33	0.04
	p-value	0.35	0.46	0.20	0.16	0.87
vFo	Peason Index	0.10	<u>-0.52</u>	-0.30	-0.18	0.47
	p-value	0.67	<u>0.02</u>	0.22	0.45	0.04
vAm	Peason Index	0.30	0.21	-0.02	-0.15	-0.20
	p-value	0.22	0.40	0.93	0.55	0.42

5. Conclusioni

Dal presente studio possono essere tratte le seguenti conclusioni:

- i parametri del MDVP, che risultano significativamente variati prima e dopo il periodo di fonazione, con un rischio d'errore inferiore al 5 %, risultano essere la frequenza fondamentale ed il periodo medio, la frequenza fondamentale più alta e più bassa, la perturbazione della frequenza fondamentale a breve termine ed il rapporto rumore-armoniche.
- Gli unici due parametri che risultano essere oltre i limiti previsti dal MDVP sono vAm (variazione di ampiezza di picco) e vFo (variazione di F0).
- L'unica correlazione riscontrata tra i parametri del MDVP e le dosi vocali è relativa a vF₀ e VLI.

6. Bibliografia

- [1] Titze, I.R.; Švec, J.G.; Popolo, P.S. *Vocal dose measures: quantifying accumulated vibration exposure in vocal fold tissues*, Journal of Speech, Language and Hearing Research, **46** (2003), pp. 919–932
- [2] Ricci Maccarini A., De Colle W, Lucchini E., Casolino D. *L'esame spettroacustico della voce*. Relazione Ufficiale LXXXIX Congresso Nazionale SIO 2002:150-82.

PRESENTAZIONE

L'ANALISI FUNZIONALE DELLE CORDE VOCALI IN RELAZIONE ALLA FATICA VOCALE

IMPIEGO DEL LARINGOFONO NELLA DOSIMETRIA VOCALE

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

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

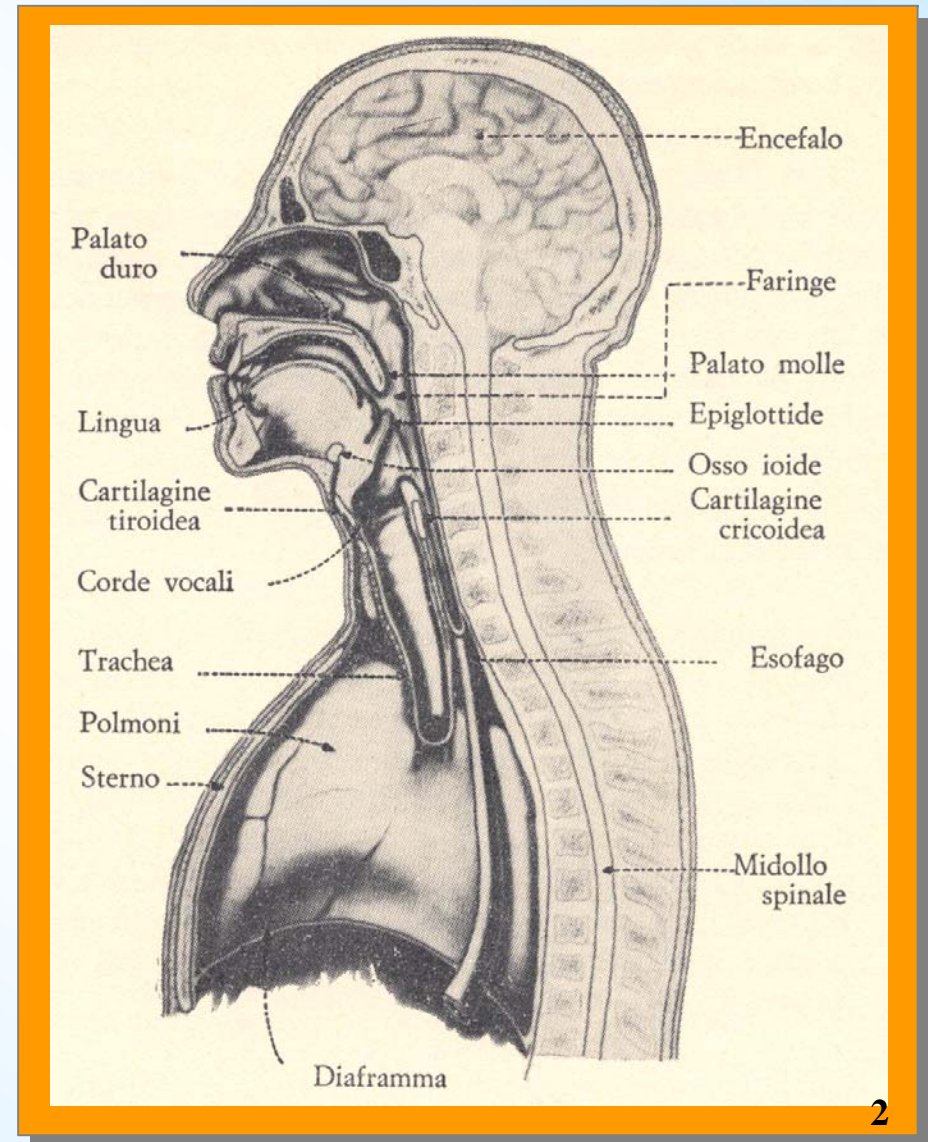
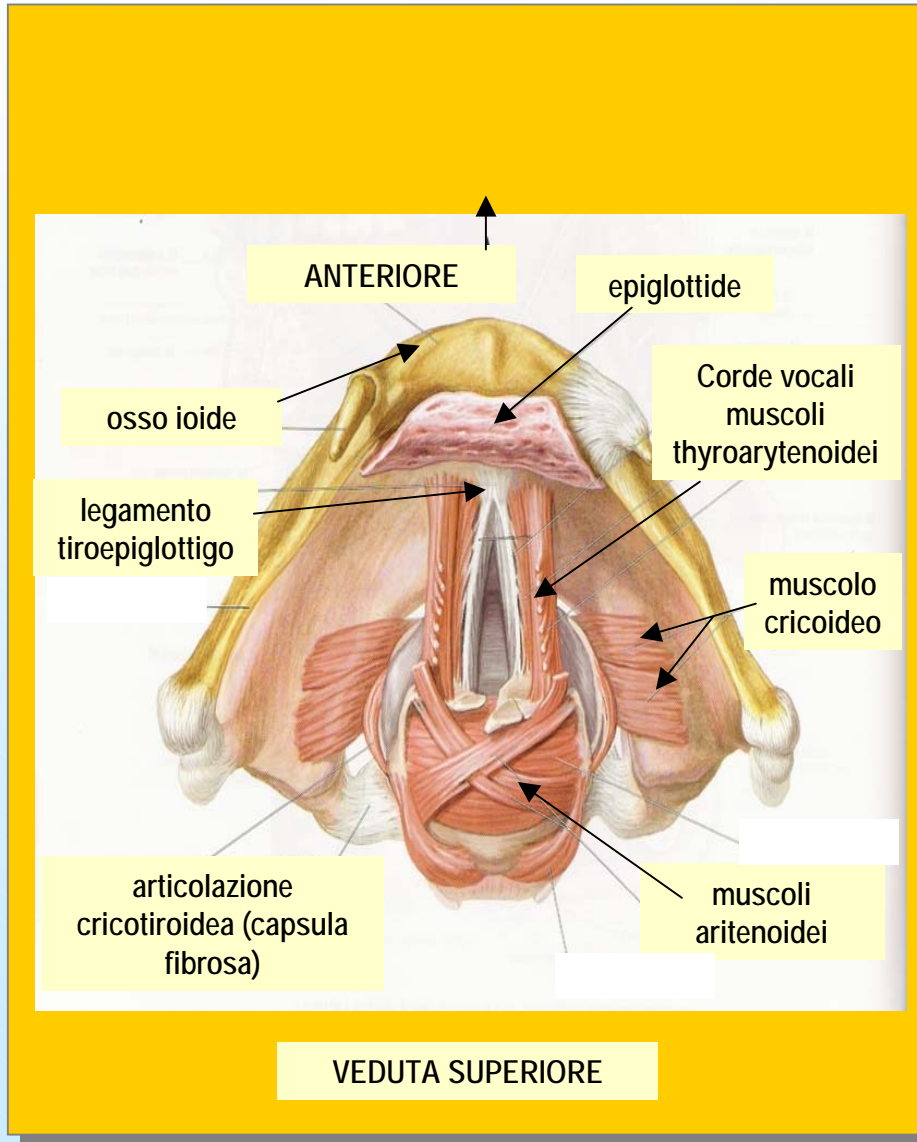
(2) Politecnico di Torino, Dipartimento di Energetica, gruppo TEBE



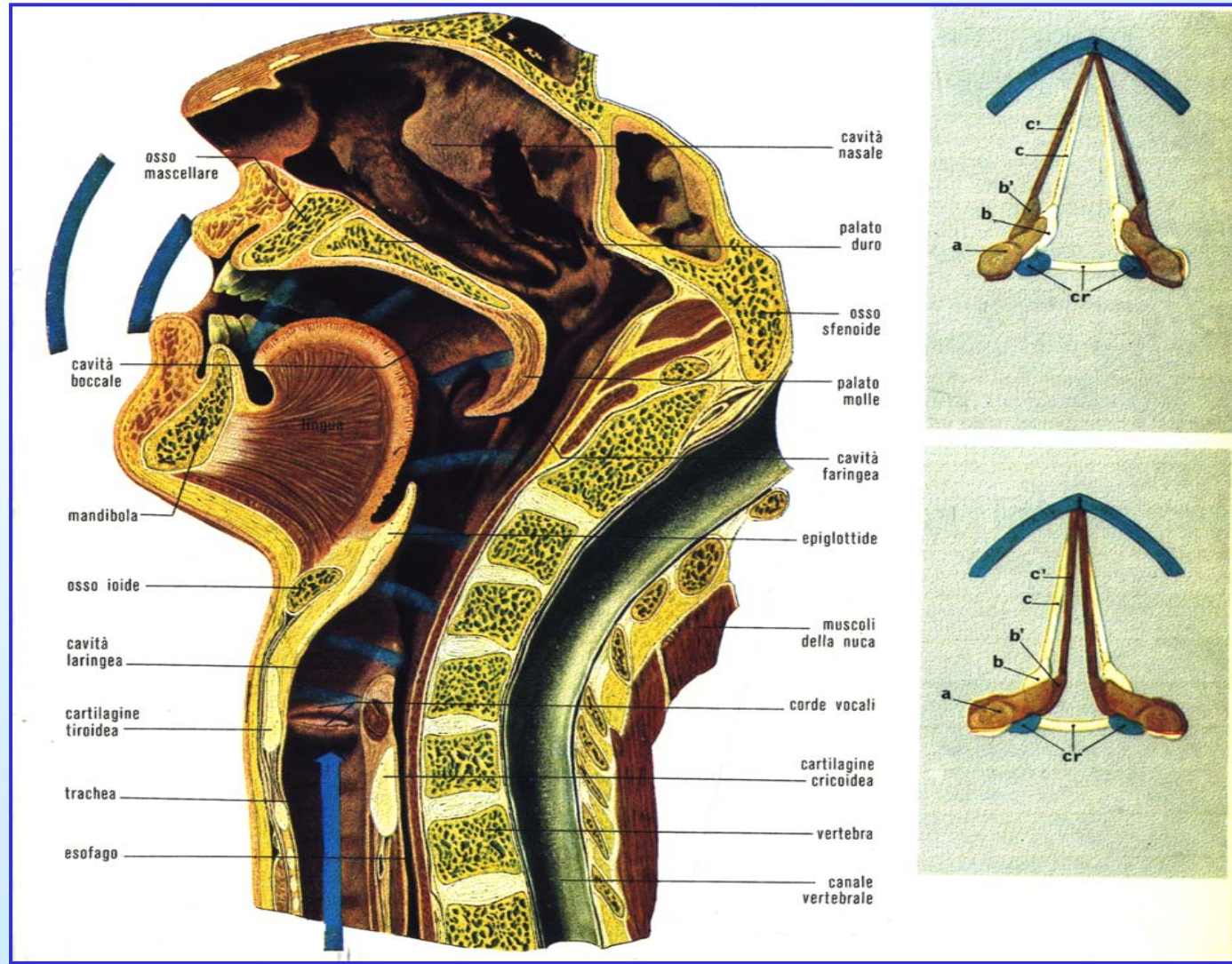
Studio di Ingegneria Acustica
Via Cav. di Vittorio Veneto, 8
10098 RIVOLI (TO)
Tel. 011-9566871 Fax 011-9561261
e-mail sia.pisani@tin.it



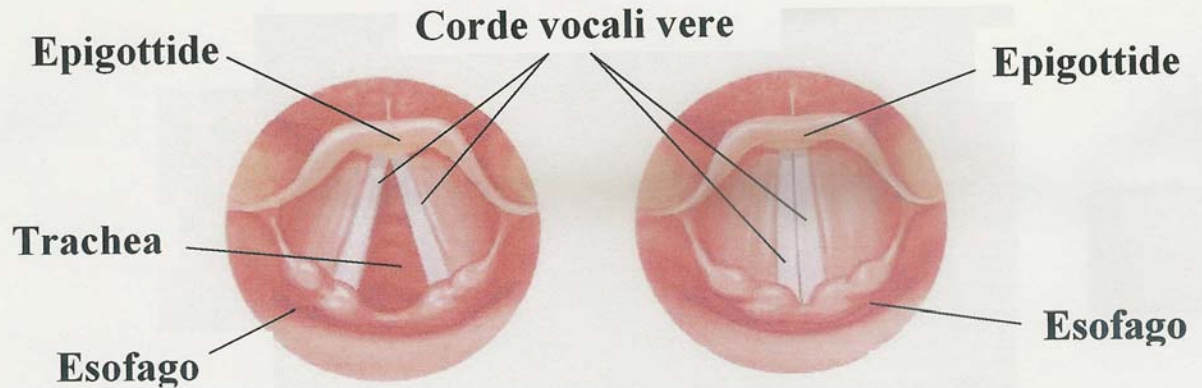
Anatomia dell'apparato fonatorio



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

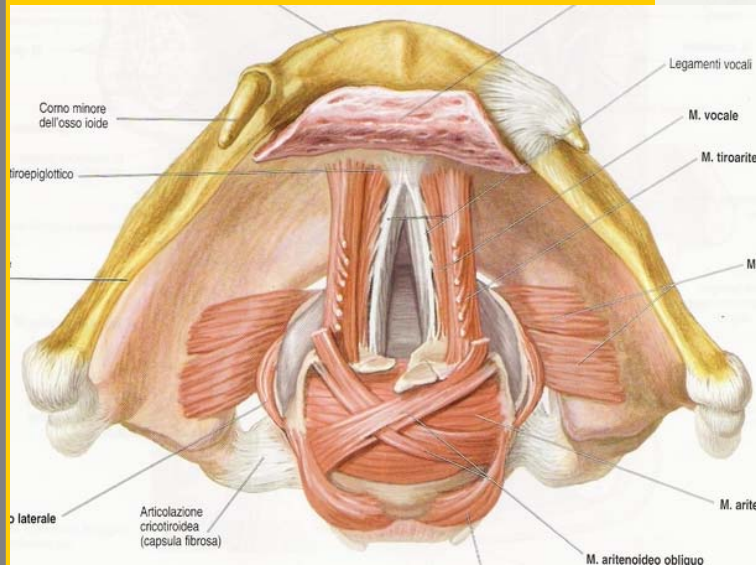


Il movimento delle corde vocali è determinato anche dalla tensione e rilassamento dei muscoli afferenti



Laringe normale durante l'inspirazione

Laringe normale durante l'emissione di suoni

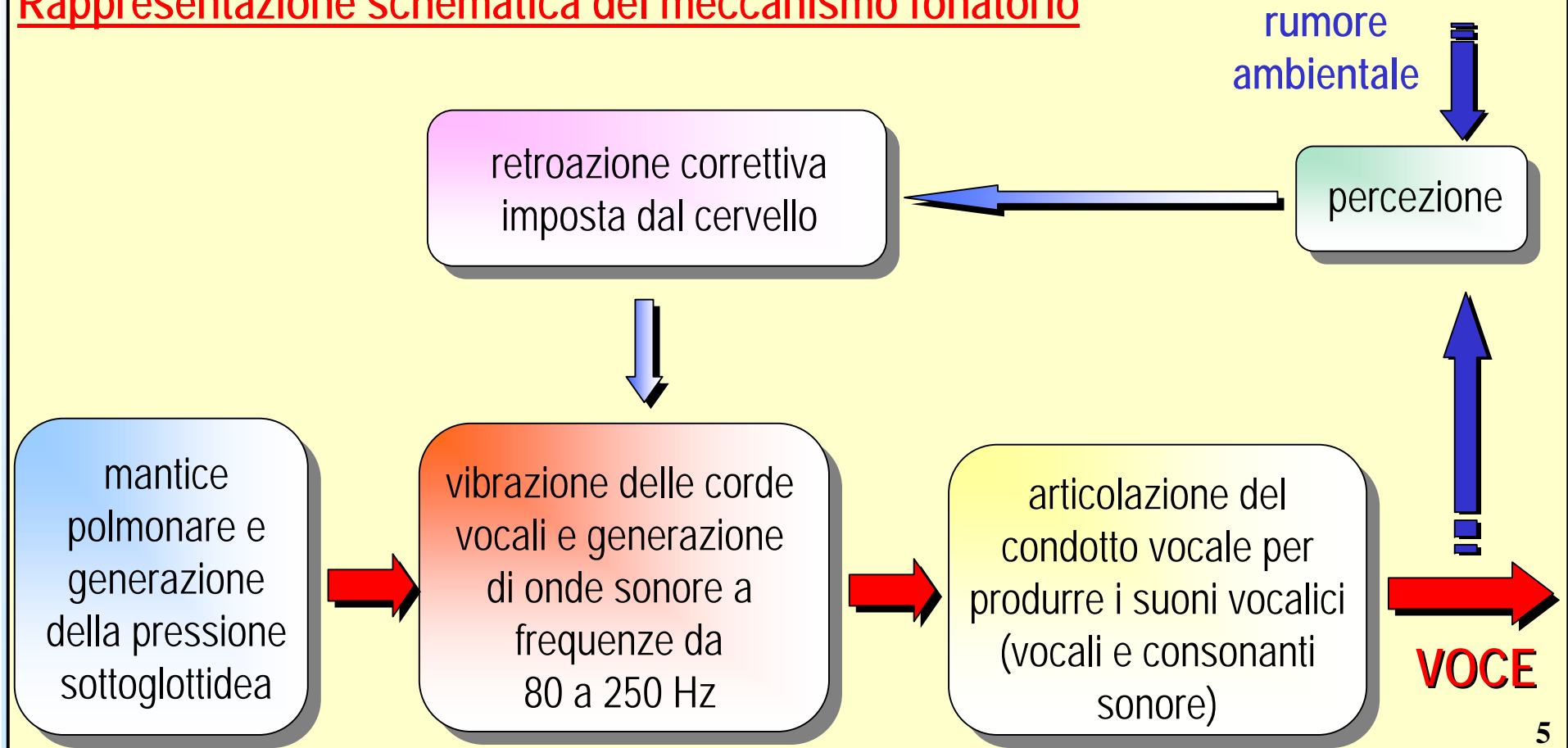


Muscoli tensori delle corde vocali (cricotiroideo tiroaritenideo)

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

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)

Rappresentazione schematica del meccanismo fonatorio



I professionisti che utilizzano la voce (cantanti, attori, insegnanti, etc.) sono soggetti a patologie dell'apparato fonatorio se la loro attività professionale impone all'organo della fonazione sollecitazioni oltre la normale attività fonatoria quotidiana.

Sforzi vocali sono anche rilevabili su soggetti che sono costretti a parlare in ambienti rumorosi. In questo contesto il livello di fonazione viene elevato, con un conseguente aumento della frequenza fondamentale (effetto *Lombard*).

Al fine di quantificare la sollecitazione dell'apparato fonatorio su un lungo periodo, non è possibile utilizzare un microfono. Si può utilizzare:

1. un accelerometro a contatto con la pelle del collo
2. un laringofono a contatto del collo in corrispondenza del laringe

DOSIMETRIA

Il dosimetro vocalico commerciale denominato APM (Ambulatory Phonation Monitor) utilizza un accelerometro e ricava i parametri a lungo periodo (ore di fonazione) che caratterizzano la dosimetria vocalica.

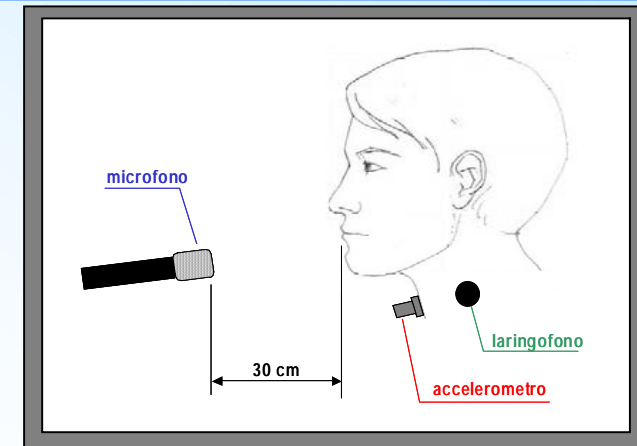
L'apparecchio elabora la frequenza fondamentale F_0 e rapporta i valori misurati ad indici specifici.

ANALISI PARAMETRICA FUNZIONALE

Per scopi di ricerca è più utile impiegare un laringofono a contatto del collo in corrispondenza del laringe che consente la registrazione dell'intero segnale vocale con apparecchiatura portatile. Si ricavano numerosi parametri legati alla frequenza fondamentale F_0

Analisi della frequenza fondamentale F_0

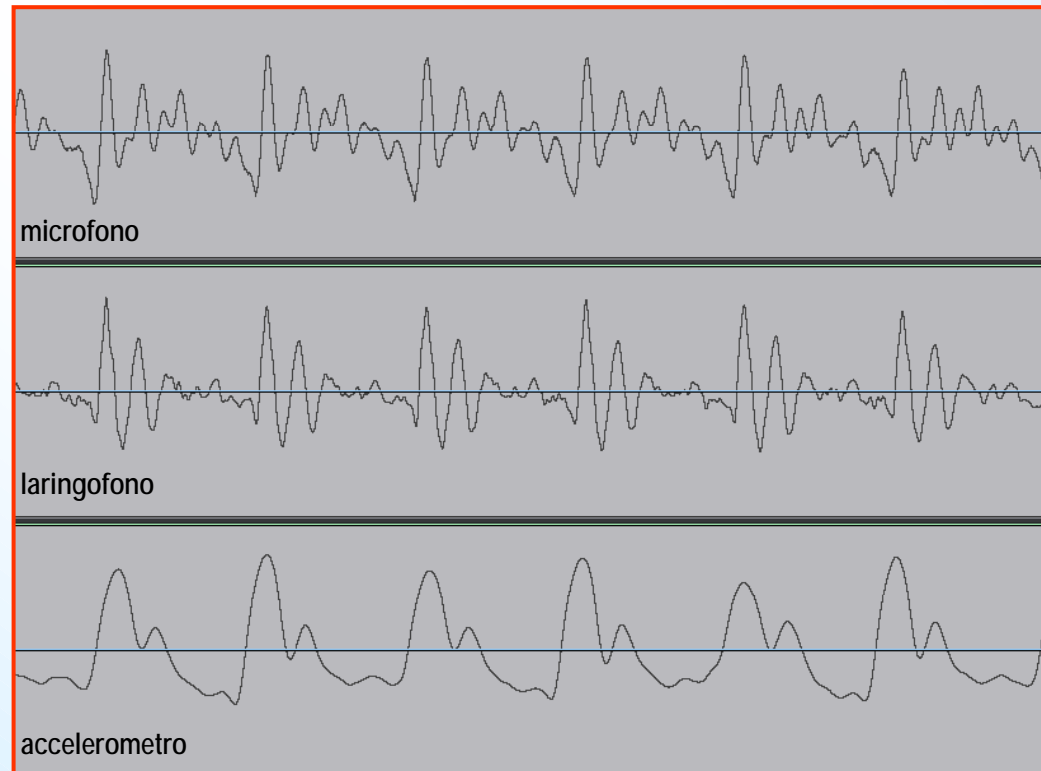
La forma d'onda dei tre segnali acquisiti evidenzia il vantaggio di utilizzare il segnale accelerometrico per estrarre la frequenza fondamentale F_0 .



Vocale sostenuta: /a/

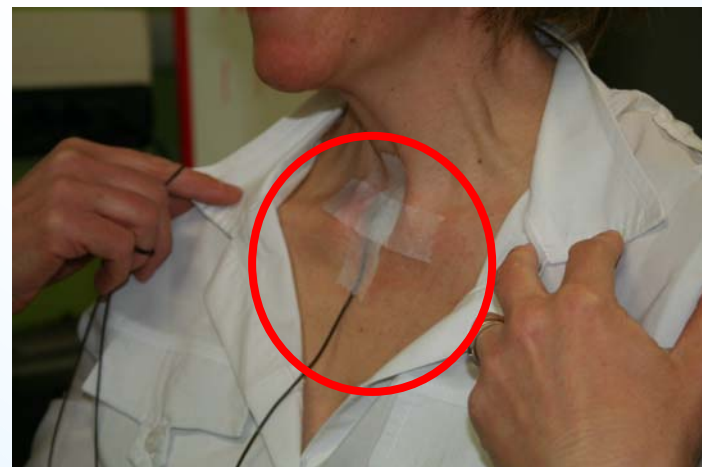
Forma d'onda dei tre segnali acquisiti contemporaneamente.

Il soggetto pronuncia una /a/ sostenuta per alcuni secondi



APM 3200

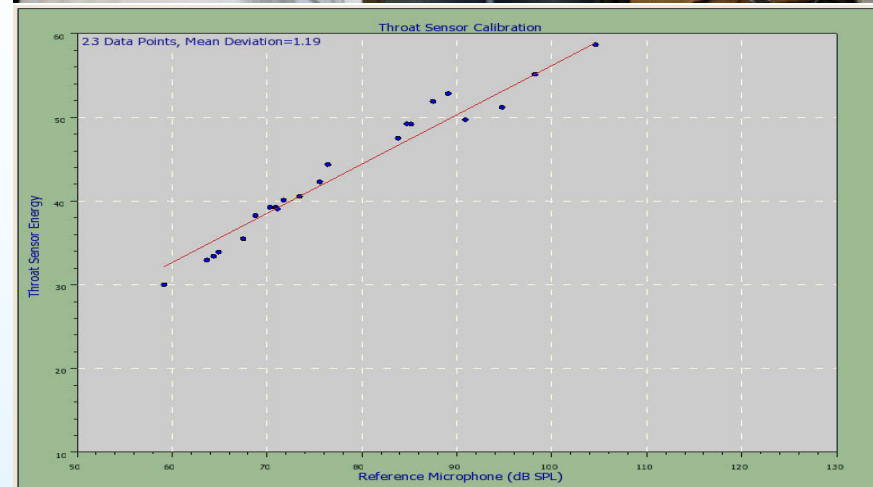
Lo strumento permette di analizzare i parametri acustici vocali partendo dalla vibrazione delle corde vocali misurata attraverso un accelerometro. I parametri analizzati sono la **frequenza fondamentale** e una stima del **livello di pressione sonora** a 15 cm dalla bocca del parlatore.



Calibrazione dell' APM

Per ottenere la stima del livello di pressione sonora si effettua una calibrazione che correla il SPL misurato con un microfono a 15 cm dalla bocca con l'ampiezza del segnale prelevato dall'accelerometro.

In ascissa del grafico si riporta il livello di pressione sonora misurato da un microfono in ordinata quello del segnale accelerometrico.



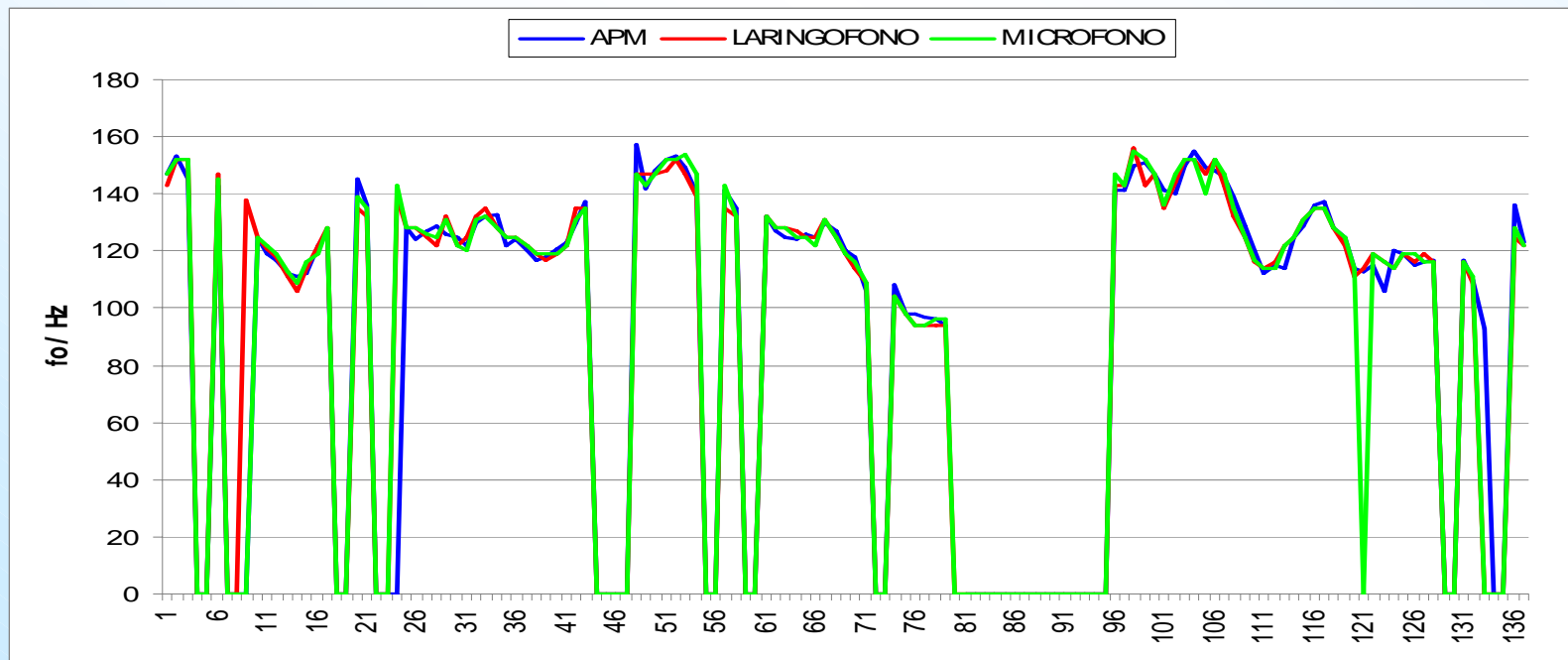
Laringofono

Il laringofono è un microfono a contatto. Per la sua struttura fisica è **adatto a captare la voce in ambienti rumorosi**. I microfoni tradizionali, infatti, oltre alla voce sono sensibili anche al rumore d'ambiente.

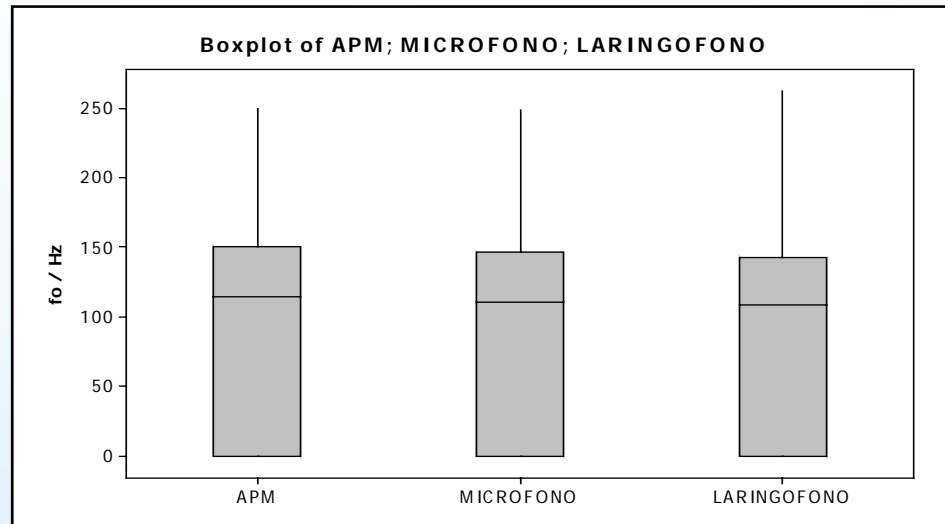


Confronto Microfono-Laringofono-APM (1)

Attraverso il laringofono è possibile ottenere gli stessi parametri ottenibili dall'APM, tenendo memoria anche del segnale audio con una qualità del parlato sufficiente per ulteriori analisi elettroacustiche.

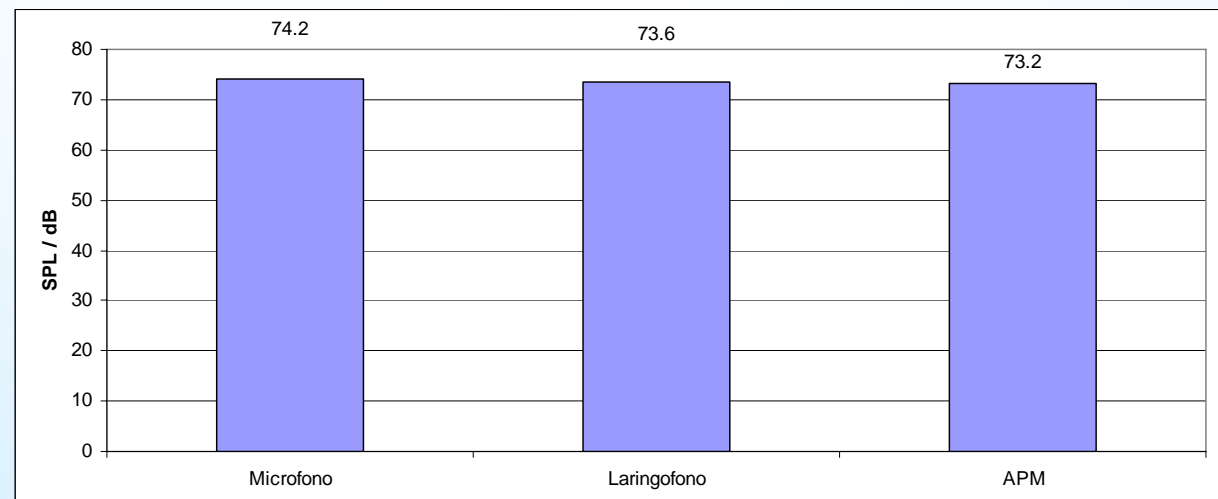


Confronto Microfono-Laringofono-APM (2)



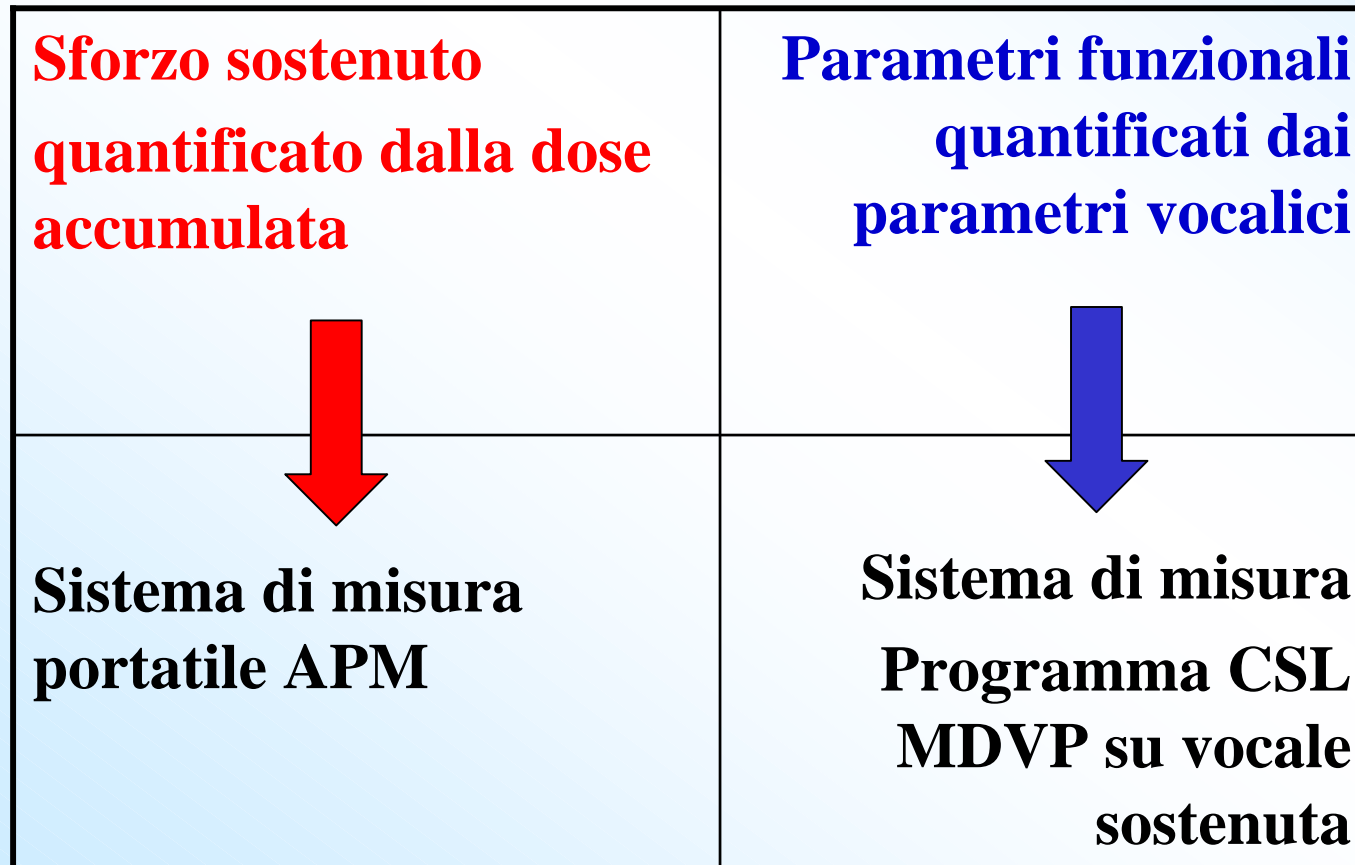
Rilievo della frequenza fondamentale con i tre sensori utilizzati:
Accelerometro, microfono e laringofono.

Rilievo del livello di pressione sonora con i tre sensori utilizzati.



Scopo del Lavoro

Si vuole correlare lo sforzo sostenuto dal parlatore durante la sua attività fonatoria relativa all'attività lavorativa con i parametri funzionali dell'apparato fonatorio.



Si considerano 17 insegnanti delle scuole elementari. Per ciascuno di essi si esegue la dosimetria vocalica per 4 ore di lezione. Si attua il seguente programma

analisi della
/a/ sostenuta
PRIMA
dello sforzo vocale

analisi dell'INTERO
impegno vocale 4 ore

analisi della
/a/ sostenuta
DOPO
lo sforzo vocale

Estrazione dei parametri MDVP

Multidimensional Voice parameter

Mediante dosimetria vocalica
eseguita con l'impiego dell'
Ambulatory Phonation Monitor APM

Estrazione dei parametri MDVP

Multidimensional Voice parameter



C
O
N
F
R
O
N
T
O



Dosi vocali

- Partendo dal livello di pressione sonora misurato a 50 cm dalla bocca del soggetto e dalla frequenza fondamentale è possibile calcolare le dosi vocali proposte da Titze ed altri.
- Il livello di pressione sonora rappresenta l'intensità della voce del soggetto. La sua integrazione nel tempo fornisce la dose accumulata per irradiare l'energia sonora corrispondente.
- La frequenza fondamentale, frequenza di vibrazione delle corde vocali, rappresenta l'intonazione della voce. Ogni periodo corrisponde ad un ciclo di apertura e chiusura delle corde vocali, cioè ad una loro collisione.

DOSIMETRIA su 4 ore di fonazione

Si considerano i seguenti parametri dosimetrici da APM

- D_t : Time Dose (s) - *Quantifica il tempo complessivo di vibrazione delle corde vocali durante tutta la lezione*
- VLI : Vocal load index (kcicli) - *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 durante l'intero periodo di fonazione*
- D_d : Distance dose (m) - *Quantifica la distanza totale accumulata dalle corde vocali nella ampiezza delle proprie oscillazioni.*
- D_e : Energy dissipation dose (J/m^3) – è l'energia dissipata dalle corde vocali durante la fonazione. E' ottenuta integrando la potenza meccanica dissipata dal tessuto vibrante delle corde vocali
- D_r : Radiated energy dose (J) - è l'energia sonora irradiata dalla bocca durante la fonazione. Si deduce dalla misura del livello di pressione sonora ad una distanza R dalla bocca

Per l'analisi funzionale si considerano i seguenti parametri estratti dalla pronuncia della **vocale /a/ sostenuta**

Parametro	Descrizione	Riferimento
ATRI	Amplitude Tremor Intensity Index (profondità di modulazione)	4,37 %
VAM	Coefficient of – Amplitude Variation (scarto tipo delle ampiezze)	8,20 %
SAPQ	Smoothed Amplitude Perturbation Quotient (variabilità dell'ampiezza)	4,23 %
SHIM	Shimmer (variabilità dell'ampiezza pp tra periodo e periodo)	3,81 %
VF0	Fundamental Frequency Variation (scarto tipo della F0)	1,10 %
SPPQ	Smoothed Pitch Perturbation Quotient (variabilità del periodo a breve)	1,02 %
PPQ	Pitch Perturbation Quotient (variabilità del periodo a breve 5 periodi)	0,84 %
RAP	Relative Average Perturbation (variabilità del periodo a breve 3 periodi)	0,68 %
JITT	Jitter (variabilità del periodo a breve termine: tra periodo e periodo)	1,04 %
DSH	Degree of Sub harmonics (stimata rispetto a F0)	1,00 %
NHR	Noise to Harmonic Ratio (Rumore generato da una non perfetta adduzione delle corde vocali rapportato all'ampiezza delle armoniche)	0.14

Soggetti	Dt_% =	VLI_norm =	Dd_norm =	De_norm =	Dr_norm =
Ca	25	0.227	0.620	0.292	4.80
Co	31	0.260	0.763	0.482	20.54
DiS	44	0.215	0.441	0.126	0.33
Fo	40	0.309	0.731	0.392	4.72
Fr	24	0.327	0.462	0.162	1.00
Fra	19	0.233	0.825	0.463	11.01
Frc	39	0.233	0.481	0.241	14.30
Gr	34	0.159	0.248	0.073	4.06
Ma	36	0.243	0.878	0.561	23.84
Mar	21	0.202	0.458	0.291	31.38
Men	29	0.248	0.696	0.378	10.66
Pa	34	0.249	0.698	0.319	2.73
Pra	40	0.263	0.498	0.168	1.29
Si	34	0.384	0.892	0.530	11.75
Sin	38	0.342	0.702	0.421	17.21
To	33	0.229	0.369	0.107	0.75
Tr	32	0.220	0.273	0.087	2.13
media	33	0.255	0.590	0.300	9.56
dev.st	2	0.014	0.049	0.039	2.25

Analisi della varianza sui parametri vocalici in cui si considera come fattore incidente il fatto che la misura sia stata effettuata prima o dopo la giornata lavorativa.

Parametro	p-value*
F ₀	<u>0,02</u>
To	<u>0,02</u>
Fhi	<u>0,01</u>
Flo	<u>0,01</u>
STD	0,06
PFR	0,76
Fftr	0,58
Jita	<u>0,01</u>
Jitt	0,15
RAP	0,20
PPQ	0,24
vFo	0,59

ShdB	0,64
Shim	0,16
APQ	0,23
vAm	0,41
NHR	<u>0,00</u>
VTI	0,14
SPI	0,25
FTRI	0,73

(*p-value, cioè stima del grado in cui il risultato è rappresentativo della popolazione).

Come si rileva risulta significativa la differenza tra i valori medi della fondamentale, massimi e minimo della fondamentale, la differenza tra le perturbazioni Jitta della F₀ e del rapporto rumore armoniche.

Le più significative variazioni dei parametri vocalici a seguito di uno sforzo vocalico sostenuto per molte ore sono ottenute correlando i parametri dosimetrici con i parametri vocalici.

I parametri dosimetrici considerati sono:

- **Indice di carico vocale VLI** (kcicli)
- **Dose di distanza Dd** (m)
- **Dose di energia dissipata dalle corde vocali De** (J/m^3)
- **Dose di energia irradiata Dr** (J)

La variazione funzionale del laringe è significativamente caratterizzata dai seguenti 5 parametri sui 20 parametri che caratterizzano le differenze per la stessa vocale tenuta /a/:

Frequenza fondamentale F_0

Perturbazione del periodo Jita

rapporto rumore-armoniche NHR cioè

Variazione di F_0 cioè vF_0

Variazione di Ampiezza cioè vAm

Matrice di correlazione tra le differenze dei parametri vocalici rilevati prima e dopo lo sforzo vocale e le dosi accumulate durante la fonazione per un periodo di 4 ore

	$D_t\%$	VLI_nor	$D_d\text{--}nor$	$D_e\text{--}nor$	$D_r\text{--}nor$
F_0	0,153	0,355	0,012	0,197	0,462
Jita	0,075	0,056	-0,318	0,245	0,118
NHR	-0,325	-0,029	-0,154	-0,008	0,206
vFo	0,179	<u>0,516</u>	0,378	0,349	-0,141
vAm	<u>-0,540</u>	-0,196	0,038	0,108	0,162

Il livello di significatività relativo alla correlazione di vF₀ e VLI, e vAm e Dt risulta molto elevato (p-value <0,02) mentre lo è meno per i parametri non correlati (p-value >0,02)

Conclusioni

I parametri funzionali che variano significativamente prima e dopo il periodo di fonazione, con un rischio d'errore inferiore al 5 %, sono:

- **la frequenza fondamentale;**
- **la perturbazione della frequenza fondamentale a breve termine (Jitta);**
- **il rapporto rumore-armoniche (NHR).**

Le correlazioni riscontrate tra i parametri funzionali e le dosi vocali sono maggiori per:

- **La perturbazione della frequenza fondamentale a breve termine (vF_0) e l'indice di carico vocale (VLI);**
- **La perturbazione di ampiezza (vAm) e il tempo di fonazione (Dt).**