

POLITECNICO DI TORINO

Laura magistrale in Ingegneria biomedica

Corso: strumentazione biomedica



TESI DI LAUREA MAGISTRALE

VALUTAZIONE DEI FATTORI DI RISCHIO A CARICO DELL'APPARATO FONATORIO DEGLI INSEGNANTI TRAMITE MONITORAGGIO SU CAMPO

Relatore:

Prof. Alessio Carullo

Correlatore:

Prof. Alberto Vallan

Candidata:

Paglia Lina

ANNO ACCADEMICO 2022/2023

***<<Non arrenderti mai. Sicuramente oggi è difficile e domani
sarà ancora peggio, ma presto risplenderà il sole.>>***

(Jack Ma)

***<<Le difficoltà non stanno lì per fermarti, ma per farti capire
quanto vuoi davvero portare avanti la tua missione. Le difficoltà
servono a fare selezione, ti rendono degno dell'obiettivo che vuoi
raggiungere. Le difficoltà sono lì per fermare gli altri.>>***

(Salvatore Brizzi)

Non smetterò mai di ringraziare i miei genitori, Michele e Michela, per aver reso possibile l'inizio di un nuovo corso di studi universitario. Grazie per avermi sostenuta in ogni mio traguardo o piccolo fallimento, per avermi fatta crescere in modo educato e rispettoso nei confronti del prossimo.

Grazie a mia sorella Viviana, compagna di vita a casa ed anche in parte del mio percorso universitario. Senza i suoi preziosi aiuti e consigli la mia vita sarebbe stata differente. Sorella minore, ma di maturità ed intelligenza immane. Tra i vari litigi è sempre riuscita a tendermi la mano ogni volta che è stato necessario.

Ai miei nonni, paterni, Lina e Rocco, distanti quasi 1000 km, ma sempre in pensiero per la mia salute ed il mio andamento universitario. Non hanno mai esitato a telefonare in qualsiasi circostanza.

E grazie anche alla mia nonna materna Concetta, che oramai da un anno mi guarda da lassù. Sono sicura che è sempre accanto a me e che è fiera del traguardo che sono riuscita finalmente a raggiungere.

Ringrazio il mio ragazzo, Davide, con cui ho festeggiato per l'esito del mio ultimo esame in triennale e con cui festeggerò indubbiamente questo nuovo traguardo. È sempre stato accanto a me in ogni momento di sconforto e non ha mai smesso di incoraggiarmi a proseguire.

Ringrazio le mie due colleghe, Giulia e Sara, compagne di viaggio conosciute in questo percorso finale di studi. Grazie del supporto e dei consigli forniti, senza il vostro aiuto e la vostra presenza questo percorso non sarebbe stato lo stesso. Una di loro, Giulia, condivide questo momento con me.

Un ringraziamento speciale al mio relatore Alessio Carullo, per la sua immensa pazienza, per i suoi indispensabili consigli, per la sua infinita disponibilità a rispondere ad ogni mio dubbio. Per le conoscenze trasmesse durante tutto il percorso

di stesura dell'elaborato. Grazie per avermi aiutata in qualsiasi momento ci sia stata necessità.

E ringrazio poi me stessa per non aver ceduto a tutti i momenti di sconforto e per essermi impegnata a proseguire sempre con costanza e dedizione, pensando a ciò che questo studio avrebbe portato poi in un futuro.

Ringrazio infine tutti gli amici, i colleghi conosciuti ed i parenti che sono stati al mio fianco in questi anni di studio e crescita personale e professionale.

Grazie di vero cuore. A tutti.

INDICE

1. INTRODUZIONE.....	1
1.1 Il meccanismo della fonazione.....	1
1.2 Classificazione e caratteristiche dei suoni.....	4
1.3 SOS disfonia.....	5
1.3.1 L'insegnante, una professione a rischio.....	5
1.3.2 Cause e conseguenze di un cattivo uso della voce nell'insegnante.....	6
1.3.3. Le patologie della voce e l'attività lavorativa come insegnante.....	7
1.3.4. Circolo vizioso dello sforzo vocale.....	10
1.3.5. Aree di intervento e prevenzione dei disturbi di voce.....	11
1.4 Lezioni online, a rischio la voce degli insegnanti.....	15
2. MATERIALI E METODI.....	17
2.1 Descrizione metodologia.....	17
2.2 Gli effetti del rumore sull'apprendimento.....	18
2.3 I requisiti acustici.....	21
2.4 Campione di studio.....	30
2.5 Materiale utilizzato.....	33
2.6 Parametri fondamentali.....	45
2.6.1 Smoothed Cepstral Peak Prominence (CPPS).....	45
2.6.2 Lo shimmer locale.....	47
2.6.4 Frequenza fondamentale (f_0).....	48
2.6.5. Il livello di pressione sonora (SPL: Sound Pressure Level).....	51
2.6.6 Il tempo di fonazione percentuale (PPT: Percentual Phonation Time) o Dose Temporale (Dt%).....	54
3. ANALISI DEI RISULTATI.....	58
3.1 Parametri estratti dalla vocale /a/.....	58
3.2 Andamento nel tempo dei parametri e confronti tra di loro.....	60
3.3 I parametri SPL e f_0	66
3.4 Caratterizzazione acustica dei parametri.....	73
3.5 I periodi di voce e di silenzio.....	81
3.6. SPL equivalente.....	88
4. CONCLUSIONI.....	94
5. BIBLIOGRAFIA E SITOGRAFIA.....	97

INDICE FIGURE, TABELLE E GRAFICI

FIGURE

<i>Figura 1.1: La laringe e le vie aeree superiori [3].</i>	2
<i>Figura 1.2: Rappresentazione ingrandita dell'osso ioide e della cartilagine tiroidea [10].</i>	3
<i>Figura 1.3: Raffigurazioni possibili delle corde vocali all'interno della glottide.[3]</i>	4
<i>Figura 2.1: Rappresentazione grafica del rumore diretto ed indiretto [26].</i>	19
<i>Figura 2.2: Tipiche sorgenti di rumore all'interno ed all'esterno dell'edificio scolastico [6].</i>	20
<i>Figura 2.3: Confronto tra intelligibilità e rapporto segnale/rumore [3].</i>	23
<i>Figura 2.4: Determinazione dei tre possibili tempi di riverberazione sulla curva di decadimento [7].</i>	26
<i>Figura 2.5: Esempi di misure da adottare per ridurre il tempo di riverberazione [3].</i>	29
<i>Figura 2.6: A sinistra la classe 1° ed a destra la classe 3° della scuola primaria di San Marzano Oliveto.</i>	29
<i>Figura 2.7: Elementi del kit del Vocal Holter [11].</i>	33
<i>Figura 2.8: Pannello frontale dell'unità DAP [11].</i>	35
<i>Figura 2.9: Pannello posteriore dell'unità DAP [11].</i>	35
<i>Figura 2.10: A sinistra, la parte posteriore ed a destra, la parte anteriore dell'unità DAP [10].</i>	36
<i>Figura 2.11: L'interfaccia web del Vocal Holter [11].</i>	37
<i>Figura 2.12: Microfono in aria dell'unità DAP accoppiato con un calibratore di pressione [11].</i>	38
<i>Figura 2.13: Corretto posizionamento del soggetto durante la taratura del microfono a contatto [11].</i>	38
<i>Figura 2.14: Funzione di taratura identificata correttamente ed indicazioni dell'interfaccia web quando la funzione di taraturaraggiunge il punteggio di "minima linearità" impostato [11].</i>	39
<i>Figura 2.15: Le indicazioni dell'interfaccia web alla fine del processamento dei dati della vocale sostenuta [11]</i>	40

<i>Figura 2.16: In alto, i dati, per un monitoraggio breve, riportati dall'unità DAP quando si seleziona 'Download parameters' e poi 'Standard file'. In basso, quelli selezionando 'Download data' [11].</i>	41
<i>Figura 2.17: Messaggio sull'interfaccia web che mostra l'inizio della valutazione a lungo termine [11].</i>	41
<i>Figura 2.18: File riportato dall'unità DAP selezionando 'Download parameters' e poi 'Standard file' per un monitoraggio lungo [11].</i>	42
<i>Figura 2.19: File riportato dall'unità DAP selezionando 'Download Parameters' e poi 'Tab-separated file' per un monitoraggio lungo [11].</i>	43
<i>Figura 2.20: File riportato dall'unità DAP selezionando 'Download Parameters' e poi 'Tab-separated file (46 ms)' per un monitoraggio lungo [11].</i>	44
<i>Figura 2.21: Spettri vocali (ad 1/3 di ottava) in base allo sforzo rispettivamente per uomini, donne e bambini [16].</i>	50
<i>Figura 2.22: Scala in decibel con le varie soglie possibili del livello di pressione sonora [19].</i>	52

GRAFICI

<i>Grafico 3.1: Andamento nel tempo dei primi 6 parametri del file tabulato ogni 1.15 minuti ottenuto dal Vocal Holter per il soggetto 00M.</i>	60
<i>Grafico 3.2: Andamento nel tempo dal 7° al 12° parametro del file tabulato ogni 1.15 minuti ottenuto dal Vocal Holter per il soggetto 00M.</i>	61
<i>Grafico 3.3: Andamento nel tempo degli ultimi 6 parametri del file tabulato ogni 1.15 minuti ottenuto dal Vocal Holter per il soggetto 00M.</i>	62
<i>Grafico 3.4: Andamento nel tempo dei parametri ottenuti dal file tabulato ogni 1.15 minuti del Vocal Holter per un soggetto della scuola primaria per il soggetto 04FSM.</i>	63
<i>Grafico 3.5: Confronto per il soggetto 00M tra SPL mean e BNL LAF90 per baseline, lezione 1 e lezione 2 in un caso normale.</i>	64
<i>Grafico 3.6: Confronto per soggetto 00M tra f_0 mean e BNL LAF90 per baseline, lezione 1 e lezione 2 in un caso normale.</i>	65
<i>Grafico 3.7: Confronto tra SPL mean e BNL LAF90 per baseline, lezione 1 e lezione 2 per il soggetto 01M.</i>	65
<i>Grafico 3.8: Confronto tra f_0 mean e BNL LAF90 per baseline, lezione 1 e lezione 2 per il soggetto 01M.</i>	66
<i>Grafico 3.9: Istogrammi di occorrenze relative di SPL e f_0 per 2 docenti universitari e 2 insegnanti della scuola primaria, rispettivamente un uomo e una donna per ognuno. Nell'ordine si ha 01M, 03F, 01MSM e 03FSM.</i>	68
<i>Grafico 3.10: Grafico che confronta le differenze tra ogni lezione e la baseline in funzione del rumore di fondo medio e dell'SPL medio per i docenti del Politecnico. ...</i>	76

<i>Grafico 3.11: Grafico che confronta le differenze tra ogni lezione e la baseline in funzione del rumore di fondo medio e dell'SPL medio per gli insegnanti della scuola primaria di San Marzano Oliveto.....</i>	<i>77</i>
<i>Grafico 3.12: Grafico che confronta le differenze tra ogni lezione e la baseline in funzione del rumore di fondo medio e della f_0 media per i docenti del Politecnico.....</i>	<i>78</i>
<i>Grafico 3.13: Grafico che confronta le differenze tra ogni lezione e la baseline in funzione del rumore di fondo medio e della f_0 media per gli insegnanti della scuola primaria di San Marzano Oliveto.....</i>	<i>78</i>
<i>Grafico 3.14: Grafico che confronta le differenze tra ogni lezione e la baseline in funzione del tempo di riverbero e dell'SPL medio per i docenti del Politecnico di Torino.</i>	<i>80</i>
<i>Grafico 3.15: Grafico che confronta le differenze tra ogni lezione e la baseline in funzione del tempo di riverbero e della f_0 media per i docenti del Politecnico di Torino.</i>	<i>80</i>
<i>Grafico 3.16: Grafico che confronta ogni lezione in funzione del tempo di riverbero e del rumore di fondo BNL LAF90 medio per i docenti del Politecnico di Torino.....</i>	<i>81</i>
<i>Grafico 3.17: Grafico delle occorrenze relative dei periodi di voce e di silenzio per i soggetti 00M, 06F, 01M e 03F. I primi 2 hanno svolto lezione in un'aula adeguata dal punto di vista acustico, mentre gli ultimi due no.....</i>	<i>83</i>
<i>Grafico 3.18: Grafico delle accumulazioni dei periodi di voce e di silenzio per i soggetti 00M, 06F, 01M e 03F. I primi 2 hanno svolto lezione in un'aula adeguata dal punto di vista acustico, mentre gli ultimi due no.....</i>	<i>84</i>
<i>Grafico 3.19: Grafico delle occorrenze relative dei periodi di voce e di silenzio per i soggetti 01MSM e 03FSM.</i>	<i>85</i>
<i>Grafico 3.20: Grafico delle accumulazioni dei periodi di voce e di silenzio per i soggetti 01MSM e 03FSM.</i>	<i>86</i>
<i>Grafico 3.21: Andamento nel tempo di SPL equivalente per tutti gli uomini del Politecnico di Torino con due monitoraggi.....</i>	<i>88</i>
<i>Grafico 3.22: Andamento nel tempo di SPL equivalente per tutte le donne del Politecnico di Torino con due monitoraggi.....</i>	<i>88</i>
<i>Grafico 3.23: Andamento nel tempo di SPL equivalente per i docenti del Politecnico di Torino con una sola lezione.....</i>	<i>89</i>
<i>Grafico 3.24: Andamento nel tempo di SPL equivalente per tutti gli insegnanti della scuola primaria di San Marzano Oliveto.</i>	<i>89</i>
<i>Grafico 3.25: Grafico con valori di SPL equivalente per gli uomini del Politecnico di Torino con due lezioni.</i>	<i>91</i>
<i>Grafico 3.26: Grafico con valori di SPL equivalente per le donne del Politecnico di Torino con due lezioni.</i>	<i>91</i>
<i>Grafico 3.27: Grafico con valori di SPL equivalente per i docenti del Politecnico di Torino con una sola lezione.....</i>	<i>92</i>

<i>Grafico 3.28: Grafico con valori di SPL equivalente per gli insegnanti della scuola primaria di San Marzano Oliveto.....</i>	<i>92</i>
---	-----------

TABELLE

<i>Tabella 2.1: Tempi di riverberazione ottimali per diversi ambienti [3].</i>	<i>28</i>
<i>Tabella 2.2: Docenti del Politecnico ed aule rispettive di svolgimento delle lezioni...31</i>	
<i>Tabella 2.3: Insegnanti della scuola primarie ed aule rispettive di svolgimento delle lezioni.....32</i>	
<i>Tabella 2.4: Esempi di suoni percepibili dall'orecchio umano [19].</i>	<i>52</i>
<i>Tabella 3.1: Valori dei parametri della vocale /a/ ricavati dal Vocal Holter per i docenti del Politecnico.</i>	<i>58</i>
<i>Tabella 3.2: Valori dei parametri della vocale /a/ ricavati dal Vocal Holter per gli insegnanti della scuola primaria.....</i>	<i>59</i>
<i>Tabella 3.3: Statistiche di SPL dei vari soggetti per la baseline.</i>	<i>69</i>
<i>Tabella 3.4: Statistiche di FO dei vari soggetti per la baseline.....</i>	<i>70</i>
<i>Tabella 3.5: Statistiche di SPL dei vari soggetti per la lezione 1.</i>	<i>70</i>
<i>Tabella 3.6: Statistiche di FO dei vari soggetti per la lezione 1.....</i>	<i>71</i>
<i>Tabella 3.7: Statistiche di SPL dei vari soggetti per la lezione 2. La '/' indica che non si hanno dati perché la lezione non è stata svolta.....</i>	<i>72</i>
<i>Tabella 3.8: Statistiche di FO dei vari soggetti per la lezione 2. La '/' indica che non si hanno dati perché la lezione non è stata svolta.....</i>	<i>73</i>
<i>Tabella 3.9: Dati della caratterizzazione acustica delle aule del Politecnico di Torino oggetto di studio. La '/' indica che l'aula non si è riuscita a caratterizzare.</i>	<i>74</i>
<i>Tabella 3.10: Volumi delle aule della scuola primaria di San Marzano Oliveto.</i>	<i>75</i>
<i>Tabella 3.11: Valori del tempo di fonazione percentuale (PPT) per la baseline (IN), la lezione 1 (1) e la lezione 2 (2) per i docenti del Politecnico di Torino. La '/' indica che il valore non è presente perché la lezione non è stata monitorata.....</i>	<i>87</i>
<i>Tabella 3.12: Valori del tempo di fonazione percentuale (PPT) per la baseline (in), la lezione 1 (1) e la lezione 2 (2) per gli insegnanti della scuola primaria di San Marzano Oliveto.</i>	<i>87</i>
<i>Tabella 3.13: Valori di SPL equivalente dei soggetti del Politecnico di Torino per la baseline (in), la lezione 1 (1) e la lezione (2). La '/' indica che il valore non è presente perché la lezione non è stata monitorata.....</i>	<i>90</i>
<i>Tabella 3.14: Valori di SPL equivalente dei soggetti della scuola primaria di San Marzano Oliveto per la baseline (in), la lezione 1 (1) e la lezione (2).</i>	<i>90</i>

ABSTRACT

L'abuso della voce nel mondo lavorativo può causare patologie che rappresentano un rischio per chi la utilizza come principale strumento, tra cui centralinisti, cantanti, giornalisti ed insegnanti. Questi ultimi sono l'oggetto della tesi poiché la letteratura dimostra che insegnare ha effetti negativi sulla salute della voce.

Il campione dello studio coinvolge 13 professori, uomini e donne, del Politecnico di Torino, scelti su base volontaria e 6 maestre ed un maestro della scuola primaria di San Marzano Oliveto (AT).

Gli sviluppi tecnologici hanno reso possibile il monitoraggio delle lezioni mediante il dispositivo Vocal Holter (VH), progettato presso il Politecnico di Torino. Questo si compone di un'unità che permette di acquisire ed elaborare i dati ed un microfono a contatto, che indossato intorno al collo, rileva le vibrazioni indotte dalle corde vocali durante la fonazione. I segnali vocali analizzati includono l'emissione della vocale /a/ sostenuta per circa 10 s, un eloquio breve e due monitoraggi lunghi durante le lezioni.

I file ottenuti contengono sia parametri ambientali, quali umidità e temperatura, che acustici. Si hanno: tempo di fonazione percentuale (PPT), frequenza fondamentale (f_0) e livello di pressione sonora (SPL) con le corrispondenti statistiche di media, mediana, deviazione tipo, 5° e 95° percentile e, infine, rumore di fondo (BNL) equivalente, 50°, 75° e 90° percentile.

Il VH crea due file: nel primo si hanno le statistiche dei parametri ogni 75 s e nel secondo i valori di f_0 e SPL ogni frame da 46 ms. Un'elaborazione con scripts Matlab ha permesso di analizzare l'andamento nel tempo, ogni 75 s, di alcuni parametri. f_0 e SPL sono rappresentati anche in funzione del numero di occorrenze; il loro valore medio, ogni 75 s, è correlato con il 90° percentile del BNL (livello di rumore superato per 90% del tempo).

Sono calcolate le durate dei periodi di voce e silenzio del parlato continuo visualizzando sia il numero delle occorrenze relative che quello delle accumulazioni (durate totali) ogni 46 ms.

Si sono inoltre confrontati gli andamenti nel tempo dei parametri delle varie acquisizioni di ogni soggetto e quelli tra i soggetti, per una o più registrazioni. Per minimizzare la soggettività dei risultati, i parametri acquisiti sono analizzati in termini di differenza tra i

due monitoraggi lunghi e quello breve in condizioni di comfort, che funge perciò da *baseline* per ogni soggetto.

I monitoraggi si sono svolti in aule di dimensioni differenti in modo tale da evidenziare come al variare dell'ambiente il segnale rilevato risultava diverso. Si sono caratterizzate le aule del Politecnico da un punto di vista acustico rilevando parametri normati dalla UNI 11532-2: BNL e tempo di riverbero (RT), che influenza sia il periodo di fonazione che il PPT.

Si è rilevato che SPL medio è influenzato sia dal rumore di fondo che da RT, in quanto un suo aumento fa alzare il rumore legato all'attività degli allievi.

Mediante scripts Matlab, si sono valutate sia le statistiche di SPL e f_0 che SPL equivalente, normato dalla UNI EN ISO 9921, per la durata della lezione e per intervalli di 75 s. La norma evidenzia che valori superiori a 78 dB indicano una condizione di rischio elevato per l'apparato fonatorio e ciò suggerisce il ricorso a specialisti della voce, quali logopedisti e foniatri. Dai risultati non si evidenzia tale situazione: SPL equivalente è tra 49.9 dB e 69.5 dB. Circa metà dei soggetti presentano, in una o due lezioni, valori superiori a 65 dB, classificati come "raised".

1. INTRODUZIONE

Si può utilizzare la definizione di “professionista vocale” ogni qual volta ci si trova davanti ad un soggetto che utilizza come strumento principale la propria **voce** per poter lavorare. La categoria di persone che può essere definita in tal modo è molto vasta: insegnanti, cantanti, attori, centralinisti e tutti quei professionisti che nella vita di ogni giorno si trovano a dover svolgere un tipo di lavoro che è quasi esclusivamente di tipo vocale.

In questi casi specifici, la voce rappresenta un fondamentale strumento, poiché senza di essa non si potrebbe svolgere il proprio lavoro. Per capire meglio il vero significato di questa frase si può pensare ad esempio ad un insegnante che si trovi in una giornata con una totale assenza della voce; in questo caso, esso, con molta probabilità, non riuscirà a svolgere le proprie mansioni, quali interrogazioni, spiegazioni e qualsiasi tipo di colloquio [1].

1.1 Il meccanismo della fonazione

L'apparato fonatorio rappresenta il gruppo delle strutture dell'anatomia che l'individuo impiega per poter parlare. Esso è sostanzialmente costituito da organi che generalmente sono impegnati nello svolgimento di altre funzioni, come ad esempio la digestione e la respirazione. Questi organi si differenziano in:

- mobili: le labbra, la mandibola, la lingua e le corde vocali;
- fissi: i denti, il palato duro, gli alveoli dentati ed il palato molle (detto anche velo palatino).
- organi da cui proviene l'aria che viene espirata: i polmoni, la laringe, la faringe ed il naso.

Di particolare interesse in questa trattazione è la laringe, poiché è l'organo che viene maggiormente coinvolto nello sforzo vocale e che subisce più facilmente lesioni. Essa è una sorta di condotto mobile, situato nel collo, inferiormente alla faringe e superiormente alla trachea, si trova alla base della cosiddetta cartilagine cricoidea ed è sostenuta tramite

i legamenti del cosiddetto osso ioide che si trova alla base della lingua, come mostrato sia in Figura 1.1 che in Figura 1.2, che riportano una rappresentazione anatomica della laringe e delle vie aeree superiori.

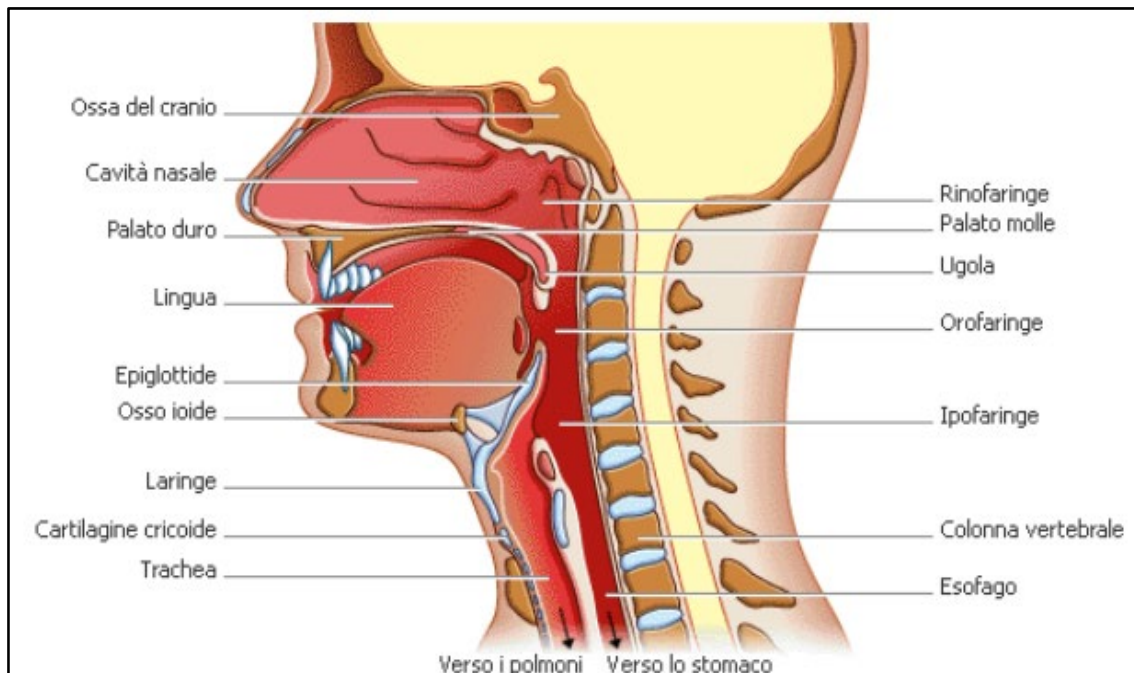


Figura 1.1: La laringe e le vie aeree superiori [3].

Affinché la laringe non venga chiusa, la sua parete presenta zone fatte di cartilagine. Nel momento in cui avviene la deglutizione, la laringe si alza andando a premere sull'epiglottide e sulla radice della lingua in modo tale da evitare che gli alimenti ingeriti possano andare a finire all'interno delle vie aeree. Leggermente al di sotto dell'epiglottide si ha la cosiddetta cartilagine tiroidea, che è costituita da due lamine poste verticalmente che vanno ad unirsi nella zona davanti al collo formando negli uomini una protuberanza denominata **pomo d'Adamo**, visibile nella sottostante Figura 1.2 [3].

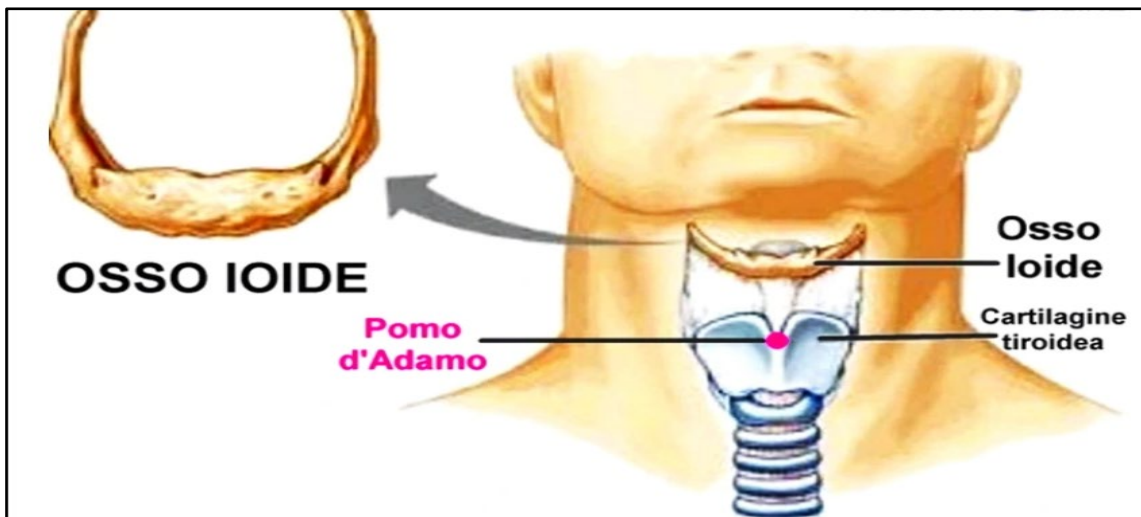


Figura 1.2: Rappresentazione ingrandita dell'osso ioide e della cartilagine tiroidea [10].

La laringe è il mezzo mediante il quale l'aria passa dalle vie aeree inferiori alla trachea dove, una volta arrivata, fa vibrare le corde vocali e fa sì che si riescano ad emettere dei suoni. Essa non permette solo all'aria di passare, ma è anche la sede dell'organo che permette la fonazione.

Le corde vocali sono situate nella laringe, all'interno di una zona denominata glottide che può avere una lunghezza variabile dai 14 mm ai 25 mm in base al sesso del soggetto. Le corde vocali sono 4, due si trovano superiormente e due si trovano inferiormente ed esse hanno una struttura ed una funzione totalmente opposte: le prime sono più sottili e quasi senza una muscolatura, hanno una funzione protettiva e quindi non sono utili nel momento in cui si canta o parla perché se stimolate emettono un suono che si presenta sordo e rauco mentre le seconde sono più spesse, hanno dei fasci muscolari che sono importanti e svolgono una funzione di tipo fonatorio.

Le corde vocali, visivamente somigliano a delle strisce di tessuto, come rappresentato nella Figura 3: esse, quando rilevano il passaggio dell'aria che viene espirata, iniziano a vibrare e generano suoni a diverse frequenze.

La fonazione viene garantita grazie al distanziamento tra le due corde vocali che formano una sorta di fessura, di ampiezza variabile a seconda della circostanza, la glottide, che permette di far passare l'aria che si respira e che garantisce lo svolgimento della fonazione.

Inizialmente, la glottide si presenta chiusa e si apre unicamente con il passaggio dell'aria che viene espirata dai polmoni che genera su di essa una certa pressione facendo divaricare le due corde vocali: più è grande questa pressione, più alto sarà il tono di voce

che si genererà. Ad un certo punto, la pressione all'interno della glottide diminuirà e questo farà avvicinare nuovamente le due corde vocali in attesa poi di un nuovo allontanamento.

I due stadi appena discussi sono rappresentati nella sottostante Figura 1.3: il movimento delle corde vocali è circolare perché esse possono muoversi in tutte le direzioni (da un lato all'altro e dall'alto verso il basso).

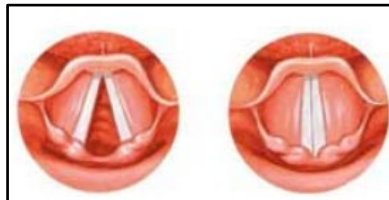


Figura 1.3: Raffigurazioni possibili delle corde vocali all'interno della glottide.[3]

Nella generazione di suoni articolati non partecipano solo le corde vocali, che costituiscono la parte vibrante, ma si ha una collaborazione con altri organi che arricchiscono il suono e generano un tono di voce personale:

- le vie aeree superiori e i seni paranasali creano un effetto di risonanza;
- la cavità della bocca modula il suono.

Infine, i polmoni intervengono per dare forza alla voce.

In questo caso, infatti, si parla di *coordinazione pneumo-fonica*, che è il modo in cui viene espulsa l'aria dai polmoni che fa vibrare le corde vocali.

1.2 Classificazione e caratteristiche dei suoni

I suoni possono essere classificati in due tipi:

- sonori: nel momento in cui l'aria raggiunge le corde vocali, esse si attivano rendendo il suono periodico e quindi l'onda sonora che viene fuori è quindi armonica;
- sordi: al passaggio dell'aria, esse non entrano in funzione.

I cosiddetti **fon** sono generati dal contatto tra due organi che sono mobili o anche solo dal contatto tra un organo che è mobile ed uno che è invece fisso. Anch'essi possono essere classificati in due tipi:

- vocali: sono sempre e solo sonore e non vengono mai ostacolate quando vengono prodotte; questo avviene perché l'aria che viene espirata nel momento in cui si pronuncia una vocale porta alla vibrazione delle corde vocali, ma non viene bloccata dagli organi che sono mobili. Le vocali possono avere diverse configurazioni che dipendono unicamente da quella che è l'altezza della lingua all'interno del canale orale e dal posizionamento della bocca.
- consonanti: possono essere sia sorde che sonore. Esse si generano per la presenza di un ostacolo che viene forzato dall'aria.

Una caratteristica del suono è il grado di **acutezza**: esso sarà più acuto tanto più le corde sono in tensione, mentre sarà meno acuto tanto più le corde hanno una massa grande. Generalmente, le corde vocali hanno una lunghezza compresa tra 2 cm e 3 cm, ma nell'uomo sono sempre un po' più lunghe rispetto alla donna e questo gli permette di generare una voce più profonda.

Un'altra caratteristica è il **timbro** del suono, che è influenzato da diversi elementi: dalla morfologia della laringe e delle corde vocali dell'individuo che è variabile da persona a persona, ma anche dai cosiddetti *ventricoli del Morgagni* che sono un gruppo di piccole cavità situate all'interno della laringe; inoltre, dipende dalla faringe, dalle fosse del naso e dai seni paranasali che sono delle cavità situate all'interno del cranio.

Si ha poi ancora il **tono** di un suono che dipende dai muscoli che permettono la rotazione delle cartilagini della laringe che si contraggono volontariamente.

Infine, un'ultima caratteristica è l'**intensità** di un suono che dipende da quanta pressione genera l'aria che si trova inferiormente alle corde vocali: per avere una pressione maggiore si devono avvicinare sempre più polmoni e diaframma e cercare di circoscrivere maggiormente le corde vocali [3].

1.3 SOS disfonia

1.3.1 L'insegnante, una professione a rischio

Come già anticipato, l'insegnante rientra nella definizione di professionista vocale e quindi la sua professione è a rischio poiché, secondo quanto affermato da *Vilkman E.* nel 2000, essi hanno la più alta incidenza di disturbi vocali tra le professioni e rappresentano le figure lavorative a **rischio** più elevato di **patologie vocali**.

Nel 2021, dal Policlinico di Milano, è stato stimato che il 30% degli insegnanti soffre di disturbi cronici delle **corde vocali**, il 50% lamenta disturbi che sono occasionali ed infine il 20% non presenta un affaticamento o alterazioni delle **corde vocali**.

Infine, secondo uno studio sulla rivista “*Johns Hopkins School of Medicine*” i professori hanno le stesse probabilità dei cantanti di subire danni alle **corde vocali**; questo dato rilevante fa comprendere meglio quanto incida il carico vocale che sostiene ogni giorno un **insegnante** [1].

1.3.2 Cause e conseguenze di un cattivo uso della voce nell’insegnante

Nonostante si sia appena detto che gli insegnati possono essere assimilati ai cantanti dal punto di vista del carico vocale, c’è una differenza fondamentale che li differenzia poiché gli insegnanti hanno il compito di dover impostare la voce in modo tale da riuscire ad interagire con gli alunni, coinvolgerli e fare in modo che essi partecipino in modo attivo ed ordinato, senza far prevalere la propria voce su quella degli altri e creare quindi uno stato di confusione perché lo sforzo vocale che l’insegnante deve sostenere è più alto tanto più alto è il volume del rumore di fondo.

Quest’ultimo è infatti una delle **cause** principali di un uso scorretto o di un abuso della voce, come ad esempio il mormorio degli alunni e gli impianti di climatizzazione presenti all’interno dell’aula. Altre cause sono l’insufficiente acustica dell’aula a causa della mancanza di adeguate superfici che permettano di attenuare il brusio presente e i rumori provenienti dall’esterno, quali ad esempio il traffico veicolare, il suono delle campane, di un clacson o di un campanello o ancora il rumore di altri bambini che stanno svolgendo delle attività all’esterno della scuola o in una classe aderente alla propria.

Ci sono anche altri fattori da dover considerare che sono dovuti all’**attitudine** del singolo insegnante; tra questi, si ha ad esempio una voca usata in maniera errata, una respirazione non corretta, l’essere poco idratati, il fumo o ancora l’eventuale presenza di una possibile malattia dovuta al reflusso esofageo.

Se si usa erroneamente la propria voce, si può incorrere in **conseguenze** di tipo sia emotivo e motivazionale che finanziario ed economico perché quando un insegnante si ritrova senza la sua voce non riesce più a compiere il suo mestiere ed è quindi costretto a mettersi in malattia.

Secondo uno studio di Smith et al. del 1997, se un insegnante presenta un problema di voce, quest'ultimo si ripercuote sulla classe portando ad avere una diminuzione della comprensione di ciò che si sta dicendo, ma anche sull'attenzione e su ciò che gli studenti riescono a sentire ottenendo quindi un apprendimento non adeguato [1].

1.3.3. Le patologie della voce e l'attività lavorativa come insegnante

La voce scaturisce dal coordinamento dei diversi organi che formano il sistema pneumo-fono-articolatorio con quella che è la risposta che si riceve dal punto di vista acustico e con le peculiarità interiori di ogni individuo [3].

Le disfonie sono definite come alterazioni, sia qualitative che quantitative, della voce che consistono in una modifica della frequenza, dell'intensità e del timbro vocale [1].

La disfonia è causata sempre da più fattori messi insieme e mai da una singola circostanza: ci possono essere fattori di tipo psicologico, un generale affaticamento, un'esposizione a polveri o vapori che risultano irritanti, un disturbo di tipo neurologico, una malformazione fisica, ecc. [3].

Esse sono classificate in due grandi categorie non esclusive:

1. Le **disfonie organiche**: caratterizzate da lesioni presenti fin dalla nascita o acquisite nel corso del tempo che alterano il modo in cui viene emessa la voce.

Esse possono essere causate da:

- una possibile insufficienza respiratoria;
- un'inflammazione o un'infezione alla laringe sorta a causa di una presenza di batteri o virus o conseguenti ad un'allergia: in questo caso, non si ha solo la produzione di catarro, ma si può avvertire bruciore alla gola e notare un po' di gonfiore in prossimità di essa;
- farmaci che portano ad avere la mucosa secca;
- una malformazione o un'alterazione della zona della glottide o del tratto vocale;
- un trauma;
- disturbi alla possibilità di muoversi, come la paresi;
- disturbi di tipo neurologico, come ad esempio la malattia di Parkinson;

- disturbi ormonali, come ad esempio una situazione di gravidanza, menopausa o l'avere il diabete;
 - malattie muscolari, come ad esempio la distrofia;
 - un tumore delle corde vocali che non riescono più a vibrare correttamente [1,2,3].
2. Le **disfonie funzionali o non organiche**: non si hanno lesioni, ma la laringe è anatomicamente integra. Esse si dividono ulteriormente in:
- disfonie *primarie*: dovute ad un'impostazione della voce difettosa che porta ad avere uno sforzo vocale, dette anche *fonoponosì*. Esse si manifestano ad esempio quando si insegna per molte ore e quindi si usa eccessivamente la voce o quando si parla nel rumore e quindi si abusa della voce: vengono ulteriormente aggravate se accompagnate da una tecnica respiratoria non appropriata, una postura scorretta, l'esposizione a fattori che risultano essere irritanti o infiammazioni alla laringe.
 - Disfonie *secondarie*: disturbi della voce dovuti ad uno stato nevrotico o a conflitti interni di tipo psichico (ad esempio la depressione), dette anche *fononevrosi*. Un esempio di questa disfonia è il disturbo da conversione che si manifesta principalmente nelle donne e che ha un riscontro positivo perché consiste in una sorta di meccanismo di difesa in cui viene spostata inconsciamente l'ansia dalla sfera mentale a quella somatica ed in questo modo il conflitto non viene vissuto come una sofferenza di tipo psichico e si riescono ad evitare sgradevoli situazioni oltre a non attirare in questo modo l'attenzione delle persone che si hanno intorno [1,3].

Esistono inoltre anche forme miste associate in vario grado [1].

Alcune lesioni possono apparire come effetto di qualche disfonia funzionale persistente, altre possono nascere sulla base di una lesione che è presente dalla nascita, ma che si manifesta dopo anni [2].

In generale, tra i fattori di aggravamento si ha:

1. **l'inquinamento sonoro**: esaminando i dati sulla rumorosità è stato constatato che i soggetti lavoratori che sono più spesso indotti ad alzare la voce per riuscire a farsi sentire sono coloro che lavorano nell'industria (35,2% contro l'11,9% del settore terziario). Nelle attività di lavoro in cui vengono svolti ragionamenti astratti, come ad esempio la creazione di programmi dal punto di vista informatico, o in quelle in cui ci si relaziona con il pubblico, si è soggetti invece

ad un livello sonoro che solo nell'8-12% dei casi è considerato eccessivo. È stato inoltre stimato che un ambiente rumoroso è abbastanza fastidioso, con una percentuale che va dal 27% al 37% delle situazioni.

Infine, il rumore è particolarmente fastidioso quando vengono svolti compiti che richiedono di memorizzare delle informazioni o ricordarne alcune già memorizzate in precedenza.

Negli anni passati, secondo quanto si legge anche dal sito INCA Osservatorio Medico-Legale, sono stati svolti degli studi su quanto siano esposti al rumore gli insegnanti ed in particolare nel 1999 è stato constatato che in una classe senza allievi si ha un livello sonoro pari a 33 dB, misurato da Sapienza con finestre chiuse e pari a 75 dB, misurato da Rodriguez, dottorando della Sapienza, con finestre aperte [2].

2. L'igrometria, le polveri e gli inquinanti dispersi nell'aria: rendono l'aria secca causando non solo disfonia, ma risultando pericolose per coloro che soffrono di asma.
3. Le condizioni ambientali: notevoli sono le conseguenze dovute a possibili impianti di aria condizionata presenti, il riscaldamento e le stufe. Infatti, un ambiente che viene raffreddato porta ad una diminuzione dell'umidità presente nell'aria e di conseguenza ad avvertire una sensazione di secchezza all'interno del tratto vocale che porta a far sì che le corde vocali non vibrino più nel modo ottimale poiché la laringe non è ben idratata. Ambienti freddi ed umidi possono inoltre causare infezioni respiratorie che non permettono di parlare nel modo corretto. [3]
4. L'organizzazione del lavoro: è importante il numero di ore svolta da un insegnante ogni giorno, ma anche ogni settimana.
5. Luogo di lavoro: è stato verificato che coloro che insegnano nella scuola materna ed elementare sono più a rischio per le disfonie rispetto ad insegnanti di scuole di altri ordini e gradi perché essi cercano di portare la loro frequenza fondamentale del parlato il più possibile vicina a quella dei loro alunni ed anche perché vogliono attirare l'attenzione dei bambini unicamente parlando e non scrivendo. A tal proposito, un po' più a rischio si trova chi insegna lingue straniere perché per spiegare si esprime prevalentemente in modo orale. Lo sforzo vocale può inoltre aumentare a causa dei bambini che gridano o piangono.

Infine, solo chi insegna educazione fisica presenta anche una fonazione a glottide chiusa che porta ad aumentare la pressione all'interno della laringe con conseguente creazione di polipi vocali e questo è dovuto anche alle brutte qualità acustiche presenti nei luoghi, come avviene ad esempio nelle palestre e nelle piscine [2].

1.3.4. Circolo vizioso dello sforzo vocale

Generalmente, senza accorgersi, quando non si sente bene il suono della propria voce si tende ad alzarla e forzarla in modo tale da avvertire un suono più adeguato; questa tecnica porta effettivamente ad incrementare l'efficacia, ma comporta un eccessivo sforzo che tende man mano a far abbassare il rendimento della voce. Spesso, l'aumento della voce rischia di diventare un'abitudine portando quindi ad avere delle distorsioni a lungo termine del meccanismo di fonazione. Gli ambiti che potrebbero necessariamente indurre a fare ciò sono i seguenti:

- obblighi di tipo sociale o professionale in cui si deve parlare o cantare (o eventualmente, anche gridare);
- situazioni difficili dal punto di vista emotivo;
- uso frequente di alcool, tabacco o droghe;
- incapacità di controllo della propria voce;
- spiegazione in ambienti rumorosi o pieni di polvere, vapori che potrebbero irritare, aria condizionata o stufe;
- situazioni precedenti con problemi ai polmoni [3].

È bene in ognuno di questi casi evitare però di arrivare in circoli viziosi in cui non si riesce più ad uscire e cercare quindi di correggersi ogni qual volta ci si rende conto che si sta esagerando troppo con l'uso della propria voce, perché altrimenti si rischiano disfonie e problemi alla voce sempre più gravi.

1.3.5. Aree di intervento e prevenzione dei disturbi di voce

In base a quanto detto finora, si fornisce qualche informazione utile per poter prevenire adeguatamente i problemi alla voce che un insegnante può presentare, che possono portare all'insorgere di lesioni organiche se non vengono prevenute adottando tecniche di comportamento della voce che siano corrette.

Per prevenire lo sviluppo di una patologia da *malmenage* (uso scorretto) o *surmenage* (abuso) vocale si deve fare in modo che ogni professionista della voce venga sottoposto a programmi adeguati per potere prevenire i problemi che possono incorrere nella voce.

Il primo passo per una **prevenzione** efficace è il riconoscimento dei sintomi di **affaticamento vocale**:

- raucedine: abbassamento della voce;
- bruciore: sensazione di corpo estraneo in gola;
- tosse secca e stizzosa;
- necessità di schiarire spesso la voce;
- tensione e dolore al collo ed alle spalle.

Per poter intervenire immediatamente ed efficacemente si deve essere in grado di distinguere tempestivamente i possibili sintomi.

Per poter contribuire a migliorare la salute della voce dell'insegnante si potrebbero eseguire diversi accorgimenti per evitare di arrivare ad avere problemi vocali, quali la disфонia o alterazioni del timbro della voce che possono essere più o meno severe e portare ad avere delle lesioni ad organi della corda vocale come ad esempio i noduli, i polipi o le cisti [1].

I *noduli* sono in generale bilaterali, ma a volte anche monolaterali: sono causati da un aumento dello spessore dell'epidermide della mucosa delle corde vocali dovuto ad un eccessivo o sbagliato uso vocale. Essi sono quindi molto frequenti in tutte le professioni che utilizzano principalmente la propria voce per poter lavorare: attori, cantanti, insegnanti, oratori. Essi sorgono però anche a causa di un uso scorretto della voce come ad esempio nel momento in cui si urla. La terapia più adatta in questi casi è farsi seguire da un logopedista, ma a volte serve anche un intervento chirurgico.

I *polipi* nascono a causa di un'inflammatione delle corde vocali conseguentemente ad un uso eccessivo della voce. Oltre ad avvertire la disфонia, quando i polipi raggiungono dimensioni molto grandi, si avverte una sensazione di soffocamento. In questo caso, a

differenza dei noduli, la terapia più adatta è quasi sempre di tipo chirurgico, seguita poi da una terapia logopedica.

Infine, le *cisti* sono dovute all'eccessiva presenza di liquido in un tessuto e nascono dalla presenza di ghiandole che non sono più in grado di far arrivare all'esterno ciò che producono e questo porta ad un rigonfiamento della ghiandola. Esse in genere coinvolgono altre zone della laringe, ma raramente sono localizzate anche sulle corde vocali in cui una volta che il liquido si è accumulato è difficile che riesca poi a fluire esternamente; in questo caso, si parla di **edema di Reinke** che sorge a causa di infiammazioni del naso, sinusiti e soprattutto per il fumo della sigaretta praticato insieme all'uso eccessivo della voce. La terapia più adatta in quest'ultimo caso è sia chirurgica che foniATRica [3].

Esempi di accorgimenti da poter adottare sono:

1. Abbassare il rumore di fondo (anche esterno) perché esso porta necessariamente a far alzare il tono della voce all'insegnante: evitare in ogni caso di parlare a lungo in ambienti con troppo rumore perché è dannoso.
2. Parlare da vicino, ma essendo sicuri di essere visti da tutti coloro che ascoltano e di riuscire a vedere tutti in modo tale da far sì che la lettura delle labbra possa entrare in aiuto in caso di incomprensioni: ciò riduce lo stress vocale e migliora i rapporti interpersonali.
3. Fare attenzione al clima presente nei luoghi al chiuso, cercando di evitare ambienti secchi;
4. Evitare di avere atteggiamenti dal punto di vista della postura non ergonomici (ad esempio, avere un'errata postura del corpo, una posizione sbagliata della testa relazionata al tronco, evitare di sopportare troppo a lungo contrazioni situate nella zona del collo o in prossimità degli organi articolari, prolungate sensazioni di dolore nella zona del collo o del torace, tenere la testa inclinata a lungo, la tensione dei muscoli della faccia avendo la bocca completamente chiusa, tenere gli occhi spalancati, sbattere continuamente le sopracciglia, stare con le spalle troppo diritte o girate, ecc,...) nel momento in cui si parla perché essi possono portare ad avere uno squilibrio che con il passare del tempo può diventare pericoloso. È meglio fare in modo che il corpo sia libero di muoversi nel momento in cui si parla usando gesti o espressioni facciali che aiutino la comprensione.
5. Capire quando smettere di utilizzare la voce, come ad esempio in situazioni in cui si sente il bisogno di raschiare spesso la gola, si riesce a stento ad arrivare alla fine della giornata scolastica parlando, la voce si presenta rauca o si avverte la

necessità di tossire nel momento in cui si esegue la fonazione perché questi atteggiamenti contribuiscono a peggiorare la situazione in cui si trova la propria laringe e a ritardare il momento della guarigione. In questi casi, è bene quindi cercare di parlare per il minor tempo possibile.

6. Evitare di parlare nel momento in cui si sta eseguendo uno sforzo fisico o nel momento immediatamente successivo, perché l'uso della voce e lo sforzo fisico non sono compatibili e quindi vanno eseguiti separatamente. Questo è particolarmente utile in ambito scolastico soprattutto per coloro che insegnano educazione fisica ed essi dovranno prima spiegare l'esercizio e poi eseguire la dimostrazione e viceversa, in modo tale da non mescolare le due situazioni.
7. Evitare di parlare in modo rapido e per lungo tempo cercando di scandire bene ogni singola parola pronunciata.
8. Evitare di sussurrare/bisbigliare perché questo implica un maggiore sforzo per la voce.
9. Evitare di discutere animatamente o urlare, perché, questi atteggiamenti, prolungati nel tempo, portano inizialmente ad un abbassamento della voce a causa di un'inflammatione localizzata all'interno delle corde vocali, ma successivamente possono sfociare anche in lesioni nella stessa zona.
10. Ridurre conversazioni telefoniche troppo lunghe.
11. Cercare di avere una normale respirazione non aprendo la bocca.
12. Non ridere in modo forte o imitare la voce altrui perché questo può comportare dei rischi per la gola.
13. Indossare un abbigliamento adeguato che non copra eccessivamente e non premi le zone del collo, torace ed addome che sono coinvolte durante lo sforzo vocale.
14. Seguire un'alimentazione sana per evitare di indurre il diaframma, che è un organo essenziale per poter respirare, ad avere una difficoltà a muoversi a causa di cibi o condimenti troppo grassi ed inoltre evitare di causare il reflusso gastro-esofageo che porterebbe ad irritare anche la laringe. Infatti, ogni qual volta ci si deve sottoporre ad una prova canora o che richiede l'uso prolungato della voce è bene mangiare pasti di facile digestione e non troppo abbondanti.
15. Non bere né mangiare cose troppo calde o fredde, perché il grande sbalzo termico può indurre ad aumentare il muco all'interno delle corde vocali.

16. Non assumere troppa caffeina perché essa porta ad avere poca idratazione all'interno delle corde vocali; al contrario avere sempre a portata di mano una bottiglietta di acqua naturale a temperatura ambiente.
17. Utilizzare strumenti alternativi alla voce (battere le mani, fischiare, ecc,...) in momenti di estrema confusione quali la ricreazione, la mensa o durante il gioco.
18. Fare attenzione ai farmaci che si assumono perché possono portare a peggiorare la propria voce.
19. Imparare a capire quando si è troppo affaticati e non sforzarsi ulteriormente [3].

Quando un insegnante si trovi ad avere uno o più sintomi tra quelli sopra elencati per oltre 10 giorni non basta solo cercare di prevenirli tramite gli accorgimenti appena visti per evitare di avere lesioni organiche alle corde vocali, ma, per non peggiorare ulteriormente la situazione in cui ci si trova, è anche bene iniziare un cammino di prevenzione insieme ad uno specialista della voce, ossia un foniatra o un logopedista [1]: il primo è un medico che si occupa di diagnosticare il disturbo o il tipo di patologia della voce, del linguaggio scritto, della comunicazione e della deglutizione, mentre il secondo è un personale sanitario, ma non medico, che si occupa di far svolgere terapie per la riabilitazione della voce [3]. È noto infatti che dopo due mesi di “cammino” insieme a quest'ultimi, gli insegnanti imparano a percepire autonomamente i sintomi e diventano consapevoli delle possibili patologie e rischi, ottenendo in questo modo una diminuzione dei sintomi pari a circa il 30% ed una comunicazione decisamente migliore con gli alunni [1].

È inoltre utile rivolgersi al foniatra ogni volta che si percepisce anche solo una voce rauca e secca con annessi dolori al collo o bruciore alla gola, perché sarà suo compito verificare se si tratta di una possibile patologia o meno ed in caso affermativo prescrivere una terapia logopedica atta a risolvere principalmente il problema della coordinazione della respirazione con i movimenti delle corde vocali. La terapia consiste in una sequenza di esercizi, ripetuti in 10 differenti sedute della durata di circa 1 ora ogni settimana, mirati ad ‘educare’ ed impostare nuovamente la respirazione in modo tale da correggere impostazioni sbagliate nell'uso delle corde vocali e degli organi utilizzati nella fonazione. Attualmente, il costo di una seduta dal foniatra tramite l'ASL è pari a circa 18 euro, mentre l'intero ciclo di sedute dal logopedista ammonta a circa 36 euro, prezzi quindi non eccessivi e che dovrebbero incentivare a svolgere queste visite.

Spesso la logopedia è richiesta anche in seguito ad un'operazione chirurgica di polipectomia, ossia l'asportazione di polipi, in modo tale da agevolare il recupero nell'utilizzo delle corde vocali [3].

1.4 Lezioni online, a rischio la voce degli insegnanti

Oltre alle conseguenze in termini di morti, malati ricoverati in ospedale in terapia intensivo o semplicemente soggetti contagiati in maniera leggera ma costretti a isolarsi nella propria casa, il *lockdown* ha contribuito a peggiorare la situazione dello sforzo della voce anche per gli insegnanti. Infatti, essi hanno dovuto svolgere mesi di lezioni e didattica online, parlando davanti allo schermo di un computer ed un microfono faticando più del solito per riuscire a spiegare ed interrogare gli alunni, perché essi non avevano nessun tipo di percezione fisica della reale distanza che si aveva tra sé stessi e gli alunni oltre a non riuscire a comprendere quanto effettivamente il tono della propria voce giungesse agli alunni che erano dall'altra parte dello schermo.

Svolgere lezioni da remoto potrebbe non sembrare una cosa così dannosa se svolta nel breve tempo, ma con il perdurare del tempo può portare a problemi molto seri sia dal punto di vista del timbro che della fluidità della voce. Questo è un problema di cui non ci si accorge facilmente e che tende ad essere trascurato, ma che è molto presente nella vita delle insegnanti. Si deve essere consapevoli di tutto ciò in modo tale da prevenire la nascita di conseguenti patologie acute, che richiederebbero l'intervento di un chirurgo o che potrebbero cronicizzarsi portando ad avere un peggioramento della qualità del tono della voce dell'individuo interessato.

Infatti, "la voce - dice la dr.ssa Ferrucci, operatrice di un centro di riabilitazione- è il prodotto dell'attività delle corde vocali che vibrano al passaggio dell'aria espirata ed è il principale mezzo di comunicazione e di espressione di cui l'uomo è dotato. Un'alterazione funzionale o organica di uno o più apparati coinvolti nella produzione della voce causa una disfonia. Per il professionista vocale, in primis l'insegnante, il rischio di incorrere in tali problematiche è molto elevato" [4].

"La chiusura di Scuole ed Università a seguito dell'emergenza Covid-19 - continua la dr.ssa Ferrucci - ha portato alla rapida attivazione di Servizi di didattica *online* essenziali per la prosecuzione delle attività scolastiche; per l'insegnante ciò si è tradotto nella necessità di apportare cambiamenti anche alle proprie modalità comunicative. La voce, quindi, risulta il mezzo più efficace per "raggiungere" l'interlocutore e, a maggior ragione per un professionista vocale, è importante comprendere come rispettarla e come prendersene cura" [4].

"Ricerche effettuate dal *"Voice care Network"* nel Regno Unito - continua la dr.ssa Ferrucci - su persone con problemi di voce, dimostrano che il 12% dei pazienti è rappresentato dalla categoria degli insegnanti; inoltre, le donne sono più frequentemente colpite degli uomini, con un rapporto di 6:4" [4]. L'analisi di diversi studi ha infatti mostrato come i problemi alla voce siano, dal punto di vista delle percentuali, maggiori nelle donne che si trovano con la presenza di sintomi quali la raucedine, la fatica a parlare, la difficoltà a cantare e l'afonia [5].

Queste percentuali sono aumentate ulteriormente con l'adozione delle lezioni a distanza, a causa dell'emergere della pandemia del Covid-19. Questo perché insegnare davanti lo schermo di un computer senza avere fisicamente la classe davanti non è per niente facile e non si riesce a comprendere effettivamente se l'alunno stia seguendo e stia capendo la lezione. La difficoltà nella spiegazione da parte degli insegnanti e dell'apprendimento da parte degli alunni si fa maggiormente evidente nel momento in cui sono coinvolte materie scientifiche, perché esse risultano più difficili da insegnare in DaD.

Un problema emergente da parte delle insegnanti è anche quello di sforzare maggiormente la propria voce perché non riuscendo a percepire visivamente l'espressione dei ragazzi tendono ad alzare il tono della propria voce, nonostante siano consapevoli della presenza di un microfono interno al computer che garantisce facilmente la percezione di ciò che si sta dicendo. Un ulteriore peggioramento sorge nel momento in cui si ha una connessione ad Internet assente o scarsa, sia da parte dell'insegnante che dell'alunno perché questo porta a rallentare l'andamento della lezione e l'insegnante ingenuamente tende ad alzare la voce sperando che questo oltrepassi il problema di scarsa connessione.

In merito a questi problemi, diversi centri hanno organizzato dei webinar per supportare gli insegnanti riguardo le tecniche da usare per evitare di abusare della voce e conseguentemente evitare la nascita di patologie a carico del proprio apparato fonatorio [4].

2. MATERIALI E METODI

2.1 Descrizione metodologia

Per poter analizzare i fattori di rischio a carico dell'apparato fonatorio dei docenti si sono analizzati due fattori principali: da un lato i parametri ricavati dallo strumento di registrazione dei dati vocali della voce, dall'altro quelli inerenti alla caratterizzazione acustica dell'aula in cui era stata svolta la lezione.

I primi parametri riguardano principalmente l'intensità e la frequenza della voce con diverse statistiche, tra le quali le occorrenze e le accumulazioni dei periodi di silenzio e di voce ed il tempo di fonazione percentuale.

Tra i parametri utili per la caratterizzazione acustica delle aule si ha il volume, il rumore di fondo, e il tempo di riverberazione (o riverbero).

I primi parametri saranno analizzati nel dettaglio nei prossimi capitoli, mentre ora ci si sofferma sui parametri acustici.

È però fondamentale comprendere l'importanza che hanno tutti questi parametri, perché utilizzando solo il primo tipo di parametri non si potrebbero trarre conclusioni corrette sulle effettive condizioni delle corde vocali dei soggetti presi come campione in questo studio. Questo perché le dimensioni fisiche e i materiali di un ambiente influiscono (positivamente o negativamente) sull'emissione di parole e/o frasi di un soggetto facilitando o meno la comprensione del discorso agli studenti o a chiunque si trovi a dover ascoltare .

Quando si caratterizza dal punto di vista acustico un'aula è importante verificare la presenza di possibili materiali fonoassorbenti e di impianti tecnologici rumorosi, quali gli impianti di raffrescamento presenti soprattutto nei locali universitari, perché essi possono influire sul valore del rumore di fondo presente nell'aula. È bene ricavare i valori in presenza di ambienti vuoti perché gli studenti possono far incrementare il livello del rumore di fondo percepito.

Una caratteristica delle aule e di tutti gli ambienti scolastici, quali i laboratori di informatica e di musica, la palestra, ecc,... è l'avere una speciale inclinazione alla comunicazione che rappresenta il fondamento dei processi che riguardano l'apprendimento. In questi casi, la funzionalità delle aule è compromessa in presenza di

eccessivi livelli di rumore e di un elevato tempo di riverbero che ne pregiudicano la funzionalità.

In Italia, i locali in cui viene svolta la didattica risultano principalmente insoddisfacenti per quanto riguarda i requisiti acustici minimi che li renderebbero idonei a svolgere in modo adeguato la loro funzione. A risentire delle condizioni acustiche non adeguate sono coloro che trascorrono parte del loro tempo in questi ambienti, ovvero le insegnanti e gli studenti.

I livelli di rumore di fondo accettabili che permettono di avere un corretto svolgimento delle lezioni sono differenti da adulti e bambini; infatti, i primi tollerano una soglia di rumore maggiore rispetto agli ultimi, che hanno invece bisogno di requisiti che siano più stringenti per poter comprendere le parole e per concentrarsi adeguatamente durante l'esecuzione di un esercizio o lo svolgimento di una verifica. Il rumore diminuisce quindi il rendimento scolastico dell'alunno [6].

2.2 Gli effetti del rumore sull'apprendimento

Il rumore che può essere presente in un'aula scolastica può provenire dall'esterno dell'edificio oppure può essere prodotto internamente. Spesso, infatti, non si ha solo il rumore dovuto al traffico urbano esterno di auto, motorini, aerei, treni, presenza di cantieri stradali, bambini che giocano all'esterno, ma esso è causato anche dagli alunni stessi mentre stanno svolgendo l'attività didattica perché essi sono ignari delle conseguenze che il rumore può causare sul loro percorso scolastico.

Non si ha però solo un rumore di fondo, ma anche un rumore che può essere generato dalle attività svolte dal punto di vista scolastico, come ad esempio il rumore generato dalla spiegazione stessa del docente e quello causato da possibili strumenti o attrezzature presenti o ancora quello conseguente ad attività sportive o musicali quali il canto o il suono di qualche strumento.

In questi ultimi casi, il rumore che si crea all'interno della stanza è di due diversi tipi:

- **diretto:** raggiunge direttamente il soggetto che ascolta;
- **indiretto (o riverberato):** un rumore che prima di raggiungere l'ascoltatore subisce una riflessione attraverso le strutture che costituiscono l'ambiente. Esso è attenuato se sono presenti materiali fonoassorbenti mentre crea un disturbo in

presenza di superfici che hanno una grossa capacità di riflessione. Un suono riflesso viene ricevuto in ritardo rispetto ad uno diretto.

Nella figura 2.1 si ha una rappresentazione di questi due tipi di rumore, in diverse situazioni. Questo rumore influisce nel determinare il tempo di riverberazione [3].

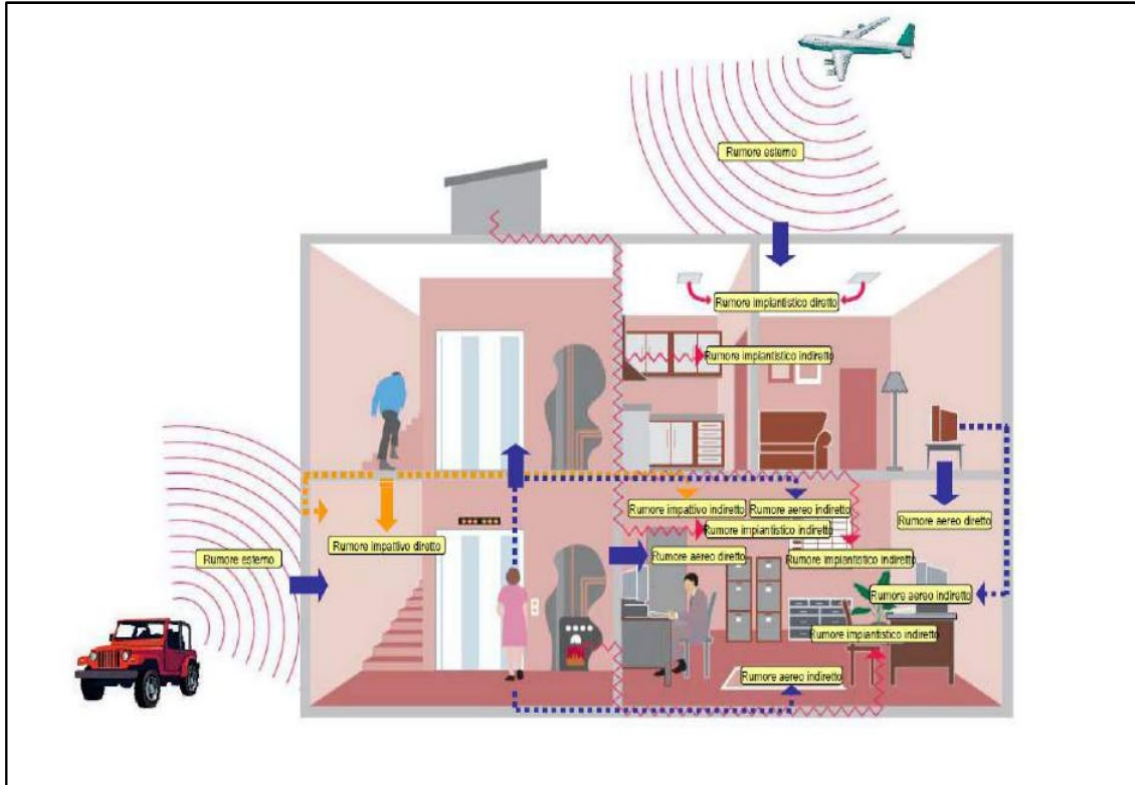


Figura 2.1: Rappresentazione grafica del rumore diretto ed indiretto [26].

In particolare, è stato dimostrato da alcuni studi che nelle scuole situate vicino ad una zona ferroviaria o ad un aeroporto si sono verificati eventi differenti a seconda delle aule: in quelle poste a stretto contatto con essa si è rilevato un rumore di fondo pari a 89 dB, mentre in quelle più isolate e silenziose si è notato un miglioramento nella lettura ed un abbassamento del rumore di fondo. Tuttavia, le scuole che si trovano nella situazione appena illustrata sono davvero poche e la maggioranza è collocata in zone soggette unicamente al traffico dei veicoli [6].

Diversi anni fa, è stata inoltre fatta una ricerca in una scuola circondata spesso dal traffico urbano e situata a Bordeaux: parlando da un altoparlante e considerando un rumore di fondo di circa 50 dB, la percentuale di parole non comprese correttamente dai bambini era pari a circa il 4.3%, mentre aprendo la finestra si arrivava ad avere un rumore di fondo pari a 60 dB e conseguentemente gli errori salivano al 15%. Invece, in un'aula nascosta al traffico con finestre chiuse si avevano errori irrilevanti, mentre con

finestre aperte la percentuale di parole incomprese restava in ogni caso basso e si collocava intorno al 2% [3].

Nella figura 2.2 sono raffigurati gli specifici rumori che interessano un ambiente scolastico.

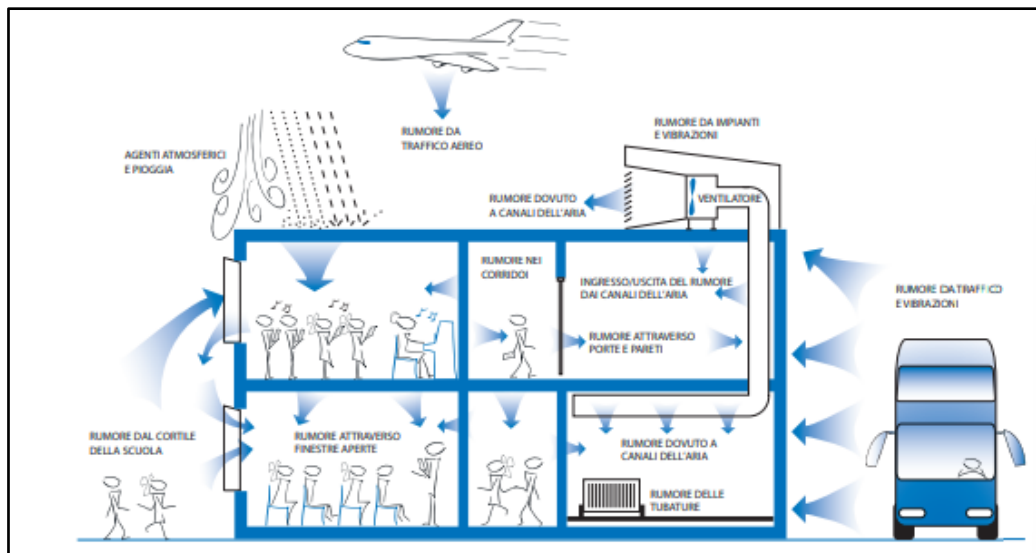


Figura 2.2: Tipiche sorgenti di rumore all'interno ed all'esterno dell'edificio scolastico [6].

È stato stimato che il rumore di fondo generato dagli studenti che chiacchierano tra loro è la principale fonte di rumore che ha un valore di 56 dB se si sta eseguendo un'attività didattica che è silenziosa ed arriva a 77 dB nel momento in cui vengono svolti lavori di gruppo. Infine, il livello di rumore medio quando gli allievi sono seduti al proprio banco ed interagiscono tra di loro è pari a 65 dB.

Si sono analizzati dei bambini campione e si è evidenziato che circa il 40% dei bambini della scuola primaria riporta danneggiamenti al proprio udito che possono essere sia di tipo temporaneo, per la presenza di un'infezione all'orecchio o per il raffreddore, sia di tipo permanente e quindi più pericolosi.

Le scarse condizioni acustiche inoltre influiscono maggiormente sui bambini stranieri, con problemi di udito e su quelli che hanno disturbi dal punto di vista del linguaggio e dell'attenzione. Essi quindi faticeranno più di tutti nell'apprendere le nozioni insegnate. Tolti questi casi particolari, la sensibilità al riverbero e al rumore è però più elevata negli allievi più grandi perché essi, fin da piccoli, sono esposti al rumore prolungato. In questi casi, si dovrebbe cercare di spiegare garantendo un elevato rapporto tra segnale e rumore

(SNR) ossia fare in modo che la voce del docente si distingua dal livello di rumore e quindi si abbia una grossa differenza tra i due valori corrispondenti.

In questi casi, una buona soluzione per far sì che si abbiano migliori requisiti dal punto di vista acustico negli ambienti scolastici consiste nell'instaurare all'interno di essi dei sistemi di amplificazione del suono che portano vantaggio non solo ai bambini e agli adulti che hanno problematiche dal punto di vista dell'udito o della lingua, ma a tutti coloro si trovano nella classe.

Questa non può però essere definita la soluzione che risolve il problema perché affinché vada tutto per il verso giusto ci devono essere anche delle buone caratteristiche acustiche nelle aule. [6]

2.3 I requisiti acustici

Il processo di apprendimento scolastico è lungo e delicato e la sua efficacia non è garantita solo dalla capacità degli insegnanti, ma anche dalle condizioni fisiche dell'ambiente in cui viene svolta la lezione, che devono essere tali da riuscire a garantire un buon apprendimento.

Infatti, aule con pessime caratteristiche acustiche possono avere ripercussioni negative sia per gli allievi che faticeranno ad apprendere sia per gli insegnanti che spiegheranno con più difficoltà, sforzando maggiormente le proprie corde vocali affaticandole [3].

Per progettare un edificio scolastico, si hanno diversi requisiti da rispettare tra cui quelli acustici. I principali sono due:

1. il rumore di fondo;
2. il tempo di riverberazione o riverbero.

Se questi due parametri hanno un valore elevato, si ha difficoltà a comprendere ciò che è stato detto: l'Organizzazione Mondiale della Sanità ha stimato che i valori medi di rumore tollerabili dall'orecchio sono pari a 55 dB durante il giorno e 45 dB per la notte. Quest'ultimi valori rappresentano comunque un rumore molto alto [27]. Per il tempo di riverberazione invece si consigliano valori ottimali inferiori ad 1 secondo.

A questi due se ne aggiunge un terzo che è la distanza a cui ogni alunno si trova rispetto all'insegnante. Da uno studio svolto in una classica aula scolastica negli Stati Uniti su alunni con un'età al di sotto dei 15 anni, senza problemi uditivi, si è scoperto che più la distanza tra docente e studente aumentava più le parole e/o frasi risultavano di difficile

comprensione. Infatti, coloro che si trovavano ad una distanza di 2 metri percepivano correttamente circa il 95% delle parole, mentre ad una distanza di 8 metri questa percentuale diminuiva drasticamente arrivando a circa il 50%. I soggetti più distanti sono quindi svantaggiati e questo provoca uno sforzo maggiore nell'ascoltare arrivando ad avvertire una sensazione di stanchezza molto prima di tutti gli altri che sono più vicini; questo implica che il bambino per riuscire a farsi sentire alzerà la voce e come conseguenza lo faranno poi anche tutti gli altri compagni generando confusione.

Per limitare questo problema, una buona soluzione da parte degli insegnanti sarebbe quella di girare tra i banchi per quanto possibile per facilitare la comprensione anche a coloro che si trovano nei banchi delle ultime file. Questo problema si presenta anche nelle università, ma spesso viene attenuato dall'utilizzo di un microfono da parte del professore e da un sistema di altoparlanti distribuiti in modo opportuno in tutta l'aula.

Il rumore di fondo

Il rumore di fondo (*BNL: Background Noise Level*), detto anche rumore residuo, nominato in più parti nel paragrafo precedente, è rappresentato dall'insieme dei rumori provenienti dall'esterno dell'edificio scolastico e da quelli generati direttamente all'interno di esso. Esso rappresenta il più comune ed importante fattore "d'inquinamento" acustico e può essere definito come una "*qualsiasi perturbazione sonora che dia luogo ad una sensazione acustica giudicata soggettivamente molesta, sgradevole e fastidiosa*" [3].

Il rumore influisce sulle parole pronunciate rendendo la comprensione più difficile e generando fastidio nell'ascolto. In particolare, si definisce **intelligibilità** di una parola la percentuale di frasi e/o parole che vengono comprese in modo corretto da chi ascolta rispetto alla totalità delle frasi e/o parole che sono pronunciate da chi parla. Il rumore ed in generale pessime caratteristiche acustiche contribuiscono a ridurre l'intelligibilità. Quest'ultima non dipende però solo dal rumore, ma anche da quelle che sono le caratteristiche con cui viene emessa la voce, tra cui l'intensità che a sua volta dipende dallo sforzo vocale di chi parla.

Per valutare l'intelligibilità tra i soggetti che parlano e quelli che ascoltano si usano parole e/o frasi che fanno rima tra di loro e successivamente, usando i parametri correlati al rumore di fondo ed al riverbero si calcolano i valori che sono gli indici di intelligibilità. Le migliori condizioni d'intelligibilità si calcolano analizzando l'aula d'interesse e l'effettiva attività che verrà svolta una volta che ci saranno gli studenti [6].

In particolare, nella figura 2.3 è rappresentato come varia l'intelligibilità (in percentuale) in funzione del rapporto segnale/rumore (SNR) (in dB) che è determinato, come anticipato in precedenza, dalla differenza tra il livello della voce del soggetto e quello del rumore di fondo presente nell'aula oggetto di studio. La figura rappresenta le frasi, le parole e le sillabe pronunciate e da essa si può notare che più è elevato l'SNR, ossia più la voce dell'insegnante si distacca da quella del rumore, più l'intelligibilità aumenta e quindi le frasi, le parole e le sillabe diventano di più facile comprensione [3].

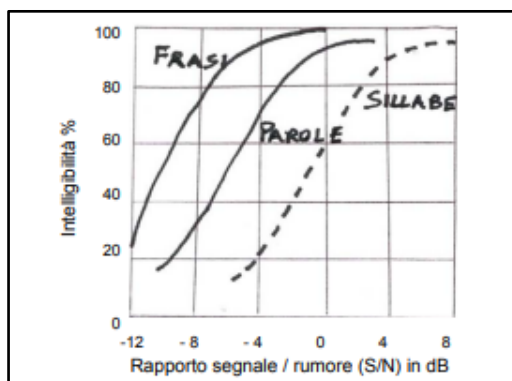


Figura 2.3: Confronto tra intelligibilità e rapporto segnale/rumore [3].

A volte, una parola può essere compresa, nonostante l'elevato rumore di fondo, osservando visivamente l'insegnante che spiega, cioè seguendo il suo labiale e la sua espressione ed eventualmente, se utilizzate, anche le sue gestualità [3].

Le conseguenze di una scarsa intelligibilità sono diverse a seconda della fascia di età degli utenti ascoltatori: i bambini più piccoli, fino a 15 anni, risultano essere degli ascoltatori meno efficienti rispetto agli studenti di fasce di età maggiori; questo avviene anche perché non possiedono ancora delle basi culturali che possano aiutarli a comprendere e ricostruire il significato delle frasi e delle parole pronunciate dall'insegnante.

A conferma di quanto appena detto, è stato fatto un test su un campione di bambini che non presentavano problemi di udito e che si collocavano nella fascia di età appena descritta ed è stato riscontrato che la percentuale di parole effettivamente comprese oscillava tra il 75% ed il 95%, mentre scendeva a valori compresi tra il 35% ed il 65% in ambienti con scarse condizioni dal punto di vista acustico.

Per calcolare la percentuale di parole non comprese, si deve considerare che una frase diventa difficile da capire quando circa il 20-30% delle parole che vengono pronunciate risultano essere di difficile comprensione da parte degli alunni.

Queste percentuali peggiorano in modo drastico nel momento in cui ci si trova di fronte ad individui che presentano problemi di udito, si distraggono facilmente, sono di lingua madre diversa da quella utilizzata per la lezione hanno altre problematiche a livello intellettuale. Una grossa percentuale di questi soggetti si trova soprattutto nelle scuole con caratteristiche acustiche non ottimali, a dimostrazione del fatto che è davvero importante che l'ambiente in cui viene svolta la lezione sia adeguato non solo visivamente, ma anche e soprattutto acusticamente.

Un rumore eccessivo spingerà l'insegnante ad alzare il proprio tono di voce per cercare di farsi sentire, ma questo non solo non porta vantaggio agli studenti, ma soprattutto non lo porta all'insegnante, che affaticherà eccessivamente le proprie corde vocali.

È stato inoltre verificato che molti docenti lamentano la condizione di malessere appena descritto e ciò fa sì che essi scelgano di mettersi in malattia per questa problematica. In media, ogni insegnante, usufruisce di due giorni di malattia all'anno poiché sente la propria voce affaticata.

Poiché il rumore di fondo può compromettere seriamente la salute di un docente, si è reso necessario individuare dei valori limite di rumore da rispettare all'interno delle aule. Secondo le linee guida della normativa internazionale, in un locale scolastico, in assenza di alunni, è ammesso un valore di rumore di fondo non superiore a 35 dB. Questo può essere più facilmente soddisfatto se le aule non confinano con la strada o con zone rumorose oltre che tenendo le finestre chiuse. È bene quindi tenere conto di tutto questo quando si progetta un nuovo edificio scolastico.

Per ottenere una riduzione del rumore di fondo si hanno inoltre diversi accorgimenti:

- montare controsoffitti e/o utilizzare come rivestimento muri che siano fonoassorbenti in modo tale da riuscire a ridurre la riflessione delle onde sonore emesse. Questo da una parte garantisce un'ottima intelligibilità, ma dall'altra ha un costo estremamente elevato ed è per questo che risulta essere una scelta che viene raramente adottata.
- Migliorare l'isolamento delle pareti e delle finestre, sostituendo ad esempio i vecchi vetri con dei doppi vetri che riducono l'ingresso di rumore proveniente dall'esterno.
- Posizionare i laboratori di musica in zone che non interferiscono con le aule in cui si svolge normalmente la lezione.

- Evitare di riempire troppo le aule perché il rumore aumenta con il crescere delle persone presenti. A tal proposito, una norma tedesca, la DIN 1804, suggerisce che ci sia una persona ogni 3/6 metri cubi [3].
- Se ci si trova in aule di grandi dimensioni, diminuire la distanza che si ha tra parlatore ed ascoltatore in modo tale da far prevalere il suono diretto rispetto a quello indiretto. Nel caso in cui l'insegnante si sposti per l'aula deve sempre evitare di dare le spalle a qualche studente perché questo compromette la comprensione delle frasi. Infine, sarebbe un buon accorgimento spiegare da una posizione rialzata, come ad esempio una pedana, per riuscire a farsi vedere meglio anche da coloro che si trovano più distanti.
- Cercare di abbassare, per quanto possibile, il rumore di fondo generato dagli alunni.
- Spiegare usando correttamente la tonalità della voce e cercando di coinvolgere gli allievi in modo tale da non annoiare e generare conseguentemente un ulteriore rumore di fondo.
- In presenza di eccessivo rumore esterno, lasciare le finestre chiuse.

È inoltre conveniente svolgere frequentemente corsi di formazione e aggiornamento sul rapporto da dover instaurare con gli studenti per attirare l'attenzione e facilitare la comunicazione [3].

Il tempo di riverberazione (o riverbero)

Le superfici di un'aula, come detto in precedenza, possono riflettere o meno le onde sonore generate all'interno di essa. Se si spegne una sorgente di rumore presente in un ambiente scolastico, il livello di pressione sonora (SPL) (è una misura di quanto varia in decibel la pressione del suono e sarà analizzato in dettaglio nei prossimi paragrafi) che si ha all'interno non si annulla immediatamente, ma si genera una sorta di "coda sonora" che viene definita ***riverberazione***.

Una superficie può essere più o meno riverberante a seconda del suo volume e delle sue superfici che possono assorbire il suono a frequenze sonore differenti.

I locali troppo riverberanti non sono adeguati all'ascolto di un discorso perché si genera un'ampia coda sonora che impedisce la distinzione delle sillabe delle varie parole pronunciate.

Il tempo di riverberazione (*RT: Reverberation Time*) si calcola partendo dall'andamento nel tempo della curva di decadimento del livello di pressione sonora; da definizione, ci si

pone in un punto dell'ambiente dopo che c'è stato lo spegnimento di una sorgente sonora e quindi essa ha smesso di produrre suono. Secondo la norma, il tempo di riverbero T_{60} , che è espresso in secondi, è l'intervallo di tempo necessario affinché il livello di pressione sonora sia diminuito di 60 dB. [6].

Questo è il principale parametro che permette di capire quanto effettivamente un ambiente è riverberante [3].

La norma ISO 3382, sviluppata nel 1997, prevede altre due possibili misure per il calcolo del tempo di riverbero: il T_{20} ed il T_{30} .

Il T_{30} rappresenta il tempo necessario per far sì che il suono passi da -5 dB e -35 dB rispetto al livello stazionario mentre il T_{20} si definisce analogamente, ma utilizza come intervallo i valori compresi tra -5 dB e -25 dB.

Nei grafici, si utilizza in genere una retta di regressione corrispondente ad un decadimento pari al corrispondente valore in dB (20, 30 o 60) a seconda del tipo di tempo di riverbero utilizzato e sull'asse delle ascisse si ricava il tempo corrispondente dato dalla differenza tra i due valori di tempo riferiti ognuno ad un determinato valore di pressione che fa sì che la differenza sia pari a 20 dB, 30 dB o 60 dB. Successivamente, questa differenza di tempo viene moltiplicata per 3 in presenza di un T_{20} , per 2 in presenza di un T_{30} e resta invariata nel caso di un T_{60} . In questo modo, in tutti e tre i casi si riesce ad arrivare ai 60 dB di decadimento, come da definizione, ed i tre tempi sono confrontabili tra di loro [7]. Quindi, si considera sempre il tempo necessario a far decadere il suono di 60 dB, ma solo T_{60} è misurato su questo effettivo decadimento che è irrealizzabile, mentre gli altri due tempi vengono estrapolati da questo e sono misurabili facilmente.

Nel caso ideale, con decadimento perfettamente rettilineo si ha che i tre tempi coincidono, ma nella realtà, a causa della presenza di rumore, questo non accade.

Nella figura 2.4 si ha la rappresentazione grafica dei tre possibili tempi di riverberazione considerando un'eventuale curva di decadimento [7].

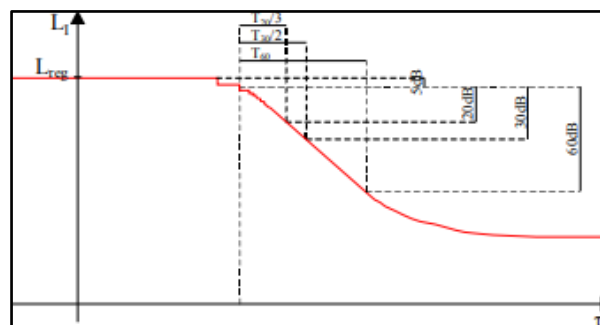


Figura 2.4: Determinazione dei tre possibili tempi di riverberazione sulla curva di decadimento [7].

Spesso, nelle aule scolastiche ed universitarie si ha un eccessivo rumore di fondo e quindi si utilizza il T_{20} . Quest'ultimo parametro è proprio quello che è stato misurato nella caratteristica acustica delle aule universitarie oggetto di questa tesi.

Un altro modo per ottenere il tempo di riverbero è posizionarsi in un punto di ricezione da parte di una sorgente sonora ed usare la risposta all'impulso che, da definizione, rappresenta l'andamento nel tempo della pressione sonora in seguito all'emissione di un impulso di durata molto breve (nel caso ideale, la durata dovrebbe essere nulla, ma nella realtà è impossibile garantire questo) [6].

In genere, a quest'ultima definizione del tempo di riverberazione, si preferisce però la prima.

È importante precisare che ogni aula ha il suo tempo di riverbero ottimale, che viene calcolato considerando i materiali, le superfici e le dimensioni di cui essa è costituita.

La formula del T_{60} ottimale è la seguente:

$$T_{60} = 0.16 \cdot \frac{V}{A} , \quad (1)$$

di cui V rappresenta il volume della stanza, espresso in metri cubi mentre A indica l'assorbimento totale del locale dato dalla sommatoria dei coefficienti di assorbimento acustico di ogni superficie presente nell'ambiente e ciascuno moltiplicato per l'area di quella specifica superficie, espressa in metri quadri.

Valori troppo alti rispetto al valore ottimale creano un'eccessiva riverberazione rendendo quasi incomprensibile la percezione del parlato, perché si ha un lento decadimento oltre che una sovrapposizione dei diversi suoni pronunciati; questo avviene in aule che sono troppo riverberanti. Allo stesso modo, un valore troppo basso, tipico soprattutto delle cosiddette *camere anecoiche*, fa sì che la parola pronunciata non arrivi all'ascoltatore in modo indiretto per via del riverbero troppo basso.

Lo stesso discorso vale sia per il T_{30} che per il T_{20} . Di quest'ultimo, oggetto dello studio di questa tesi, ci sarà nei risultati raggiunti il grafico corrispondente alle aule universitarie analizzate.

È stato stimato che per valori del T_{60} superiori ai 2 secondi si ha un ambiente molto riverberante, mentre per quelli inferiori ad 1 secondo si ha un ambiente molto 'asciutto'. Si deve quindi trovare un compromesso tra questi 2 valori considerando l'aula d'interesse [3].

Nella tabella 2.1, si ha un riassunto del tempo di riverberazione T_{60} migliore in base all'ambiente:

Utilizzo	T_{60} ottimale
Aula piccola	0,5 s
Aula grande	1,0 s
Cinema	0,7s + 0,8 s
Teatro d'epoca	1,3s + 1,5 s
Chiesa	8,0s + 10 s

Tabella 2.1: Tempi di riverberazione ottimali per diversi ambienti [3].

In particolare, l'Organizzazione Mondiale della Sanità (OMS), oltre che le diverse legislazioni e normative nazionali, stabiliscono per gli ambienti scolastici un tempo di riverberazione compreso tra 0.6 s e 0.8 s. Più ci si allontana da questi valori, più si peggiora l'efficacia delle frasi pronunciate una volta che hanno raggiunto lo studente.

Per poter ridurre il tempo di riverberazione si possono adottare le seguenti misure:

- richiedere un restauro dei locali che si trovano in condizioni acustiche più svantaggiose, come avviene spesso per le palestre. Questo ha però un costo molto elevato.
- Posizionare alle finestre o sulle pareti dei grossi tendoni costituiti da pieghe in modo tale da riuscire a ridurre le code sonore. Questo perché dal punto di vista acustico il vetro e le superfici lisce sono particolarmente riflettenti.
- Se ci sono i giusti requisiti, come anticipato in precedenza, posizionare un impianto di amplificazione all'interno dell'aula.
- Nelle aule scolastiche in cui sono già presenti muri abbastanza alti, l'unica soluzione possibile consiste nell'apporre un controsoffitto costituito da pannelli fonoassorbenti. In questo modo, riducendo il volume si contribuisce a ridurre anche il tempo di riverbero, come evidenziato dalla relazione (1).
- Se possibile, collocare gli appendiabiti all'interno dell'aula e non nel corridoio perché questo porta a interrompere la continuità delle pareti e conseguentemente a diminuire il riverbero. Infatti, una camera vuota ha un maggior tempo di riverberazione rispetto ad una che è ricca di oggetti. Per eliminare anche il riverbero dovuto al battito dei piedi, si potrebbero inserire dei pannelli fonoisolanti.
- Avere stanze con geometrie adeguate: sono sicuramente da evitare le forme circolari ed ellissoidali.

Nella figura 2.5 si forniscono due esempi di accorgimenti utilizzati per avere questa riduzione: nell'immagine a sinistra, si ha una sala conferenza le cui pareti sono state coperte con tendoni a pieghe ed il soffitto è stato rivestito con materiali fonoisolanti, mentre nelle altre due immagini si ha una palestra in cui le pareti (l'immagine al centro) ed il soffitto (l'immagine a destra) sono stati rivestiti con pannelli fonoassorbenti [3].



Figura 2.5: Esempi di misure da adottare per ridurre il tempo di riverberazione [3].

La caratterizzazione delle aule del Politecnico oggetto di questo studio è stata eseguita mediante un “clappatore” (dispositivo che simula un battito delle mani) ed un fonometro, che hanno permesso di ricavare il valore del rumore di fondo e del tempo di riverbero.

Nella scuola primaria, questo non è stato possibile e ci si è limitati a constatare l'eventuale presenza di materiale fonoassorbente: l'unico caso riscontrato è stato nelle classi 2° e 3° in cui in fondo, dalla parte opposta della cattedra, si ha una parete fonoassorbente.

Nella figura 2.6, la fotografia della classe 1° e 3°: la prima, a sinistra, senza pareti fonoassorbenti mentre la seconda, a destra, ne presenta una in fondo.



Figura 2.6: A sinistra la classe 1° ed a destra la classe 3° della scuola primaria di San Marzano Oliveto.

2.4 Campione di studio

L'utilizzo della voce nel mondo del lavoro sta diventando un fattore fondamentale nell'ambito della Salute di un individuo. Per questo motivo, nel campo medico è sorto un settore destinato alla medicina assicurativa che si occupa non solo delle classiche patologie ed infortuni che possono insorgere nella vita lavorativa di un individuo, ma anche dei problemi che possono presentarsi alla voce. Quest'ultimo tipo di patologia è sempre più frequente in tutti coloro che la utilizzano come strumento principale per riuscire a svolgere il proprio lavoro.

Questi specialisti visitano le persone ed esaminano le loro capacità funzionali in modo tale da poter determinare se il soggetto riesce a riprendere la normale attività dopo che è stato soggetto ad un infortunio o ad una malattia. In caso contrario, essi si occupano di accertarsi dell'eventuale necessità di ulteriori terapie o esami particolari necessari affinché il paziente possa ritornare a svolgere il proprio lavoro normalmente. In caso positivo, essi li rimandano ai medici competenti perché quelli in campo assicurativo non effettuano alcun tipo trattamento, ma sono unicamente dei consulenti [9].

Lo scopo di questa tesi è fornire uno sguardo generale sulle nozioni di "Monitoraggio vocale" e "Dosimetria vocale", ponendo l'attenzione soprattutto nell'importanza che essi rivestono nell'ambito della salute e delle possibili patologie che possono svilupparsi a causa del proprio lavoro.

La voce viene utilizzata quotidianamente da ognuno di noi, ma quando si chiacchiera di persona o al telefono con un amico si fa un uso differente rispetto a quando ci si trova davanti agli studenti e si ha lo scopo di far comprendere la propria lezione. In quest'ultimo caso, a volte non ci si sente all'altezza a causa del brusio generato che fa pensare di non essere adeguati in ciò che si sta facendo e questo genera una sensazione di stress e malessere influenzando in modo negativo sulla propria abilità di insegnare efficacemente.

Il campione di studio di questa tesi coinvolge 13 professori universitari del Politecnico di Torino, (9 uomini, 4 donne) selezionati su base volontaria, ognuno dei quali ha svolto le lezioni in aule che sono state selezionate in base alle loro caratteristiche acustiche.

Successivamente, si è deciso di estendere l'analisi anche a 6 maestre ed un maestro della scuola primaria di San Marzano Oliveto, situata in provincia di Asti. In questo caso, sono state utilizzate tutte le cinque aule disponibili durante il monitoraggio delle lezioni.

L'analisi di questi due gruppi campione ha permesso di determinare alcuni parametri per ogni soggetto, che permettono di evidenziare eventuali differenze tra la voce di un professore universitario e quella di un maestro di scuola primaria.

Ogni soggetto universitario analizzato è stato identificato con un'etichetta formata da due campi: uno numerico progressivo a due cifre e l'altro con una lettera che identifica il genere (M: maschile, F: femminile). I soggetti del Politecnico analizzati sono stati etichettati come: "00M", "01M", "02M", "03M", "05M", "06M", "07M", "08M" e "09M" (uomini) e "01F", "02F", "03F" e "06F" (donne).

Ognuno di essi ha svolto lezioni in aule scelte in precedenza perché differenti dal punto di vista acustico, come visibile dalla tabella 2.2:

DOCENTE	AULA IN CUI È STATA SVOLTA LA LEZIONE
00M	4N-5N
01M	1B
01F	8C
02M	R4B
02F	13B
03M	5s
03F	9T
05M	2T
06F	3P
06M	2P-1P
07M	5s
08M	2N
09M	2I

Tabella 2.2: Docenti del Politecnico ed aule rispettive di svolgimento delle lezioni.

La scelta dei nomi da assegnare agli insegnanti della scuola primaria ha seguito la stessa logica, con l'unica differenza che al campo identificativo è stata aggiunta alla fine la sigla 'SM', che indica la scuola primaria di San Marzano (SM). L'unico maestro presente è stato etichettato come "01MSM", mentre per le maestre si hanno quindi i seguenti identificativi: "01FSM", "02FSM", "03FSM", "04FSM", "05FSM" e "06FSM".

In questo caso, i soggetti hanno svolto lezioni nelle 5 aule disponibili nella scuola:

DOCENTE	AULA IN CUI È STATA SVOLTA LA LEZIONE
01MSM	5°-4°
01FSM	4°-1
02FSM	2°-5°
03FSM	5°
04FSM	3°-4°
05FSM	3°
06FSM	1°

Tabella 2.3: Insegnanti della scuola primarie ed aule rispettive di svolgimento delle lezioni.

Ognuno di questi soggetti è stato sottoposto a diversi monitoraggi:

- ripetizione della vocale /a/ continua e sostenuta con la stessa tonalità per un tempo massimo di 12 s;
- **Baseline**: lettura di un brano o breve chiacchierata su un argomento a scelta per un tempo di circa 5 minuti in condizioni di comfort.
- una o due lezioni.

Tutti i maestri hanno in realtà dati per due differenti lezioni svolte e lo stesso vale per i professori universitari, con l'unica eccezione di un uomo (05M) ed una donna (02F), che ne hanno svolta solo una.

In questo caso, l'unica differenza tra professori universitari e maestri è data dalla durata delle due lezioni: i primi hanno monitoraggi di lezioni della lunghezza di un'ora e mezza e/o tre ore, mentre i secondi hanno tutti una lezione da 45 minuti (la prima) ed una da 1 ora e mezza (la seconda). Questo perché le durate di una spiegazione sono molto differenti da un'università ad una scuola elementare.

Avere dati sulla *baseline* di ognuno è molto importante perché essa rappresenta una condizione di comfort vocale da parte dell'individuo, a differenza delle lezioni in cui molto probabilmente la voce viene sforzata per compensare il rumore di fondo presente e per fare in modo che la propria spiegazione giunga anche a coloro che sono seduti più distanti. Più nelle lezioni ci si discosta dalla *baseline* più si stanno sforzando le proprie corde vocali.

Per eliminare la soggettività nell'abitudine vocale e ricavare dati generali, per alcuni parametri è stata valutata la differenza tra le due lezioni e la *baseline*.

2.5 Materiale utilizzato

Scopo della tesi è quello di occuparsi del monitoraggio e della dosimetria vocale, ossia della misura del carico e dello stress a cui è sottoposta la voce ogni volta che si parla con una determinata intensità. Il carico vocale dipende dallo sforzo vocale che è una quantità fisiologica che varia da una persona all'altra; quest'ultimo varia a sua volta in base alla distanza che si ha rispetto a chi ascolta ed al rumore di fondo (sia interno che esterno) presente. Lo sforzo a cui è sottoposta la voce dipende principalmente dalla pressione che si ha al di sotto della glottide, da quanto sono tese le corde vocali e dall'apertura della mascella ed è relazionato con il carico vocale [9].

Il monitoraggio vocale è stato reso possibile anche grazie allo sviluppo di innovazioni tecnologiche. In questo caso, il dispositivo specifico scelto ed utilizzato per registrare i dati acustici di ogni soggetto è il Vocal Holter (VH), progettato dal Politecnico di Torino. Esso si basa sulla cosiddetta tecnologia 'Voice Care' ossia letteralmente 'cura della voce'. Il suo obiettivo è quello di essere utile come dispositivo elettromedicale di prevenzione primaria oltre che come strumento diagnostico, poiché dall'analisi dei dati si riesce a capire se si tratta di un soggetto sano dal punto di vista vocale, con possibile rischio nel futuro o già a rischio.

Questo strumento si compone di 3 elementi principali, rappresentati nella figura 2.7 [11]:

1. *Unità di acquisizione ed elaborazione dei dati (DAP: Data Acquisition and Processing)*: ha dimensioni pari a circa 9 x 8 x 4 cm e contiene al suo interno un microfono in aria ed un distanziatore;
2. *Microfono a contatto* (modello hx-505-1-1);
3. *Adattatore e cavo di alimentazione* per la ricarica .

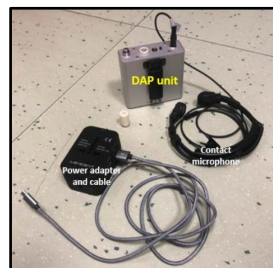


Figura 2.7: Elementi del kit del Vocal Holter [11].

Il microfono a contatto misura le vibrazioni della pelle generate dall'attività delle corde vocali durante l'eloquio. Esso, al momento del monitoraggio, deve essere posizionato intorno al collo facendo in modo che i suoi due lembi aderiscano il più possibile sulle corde vocali. Poiché ogni soggetto è diverso da un altro anche fisicamente, il microfono è dotato di un perno che può scorrere su un altro permettendo di allargarlo o stringerlo a seconda delle dimensioni del proprio collo. Si deve fare in modo che il microfono, una volta posizionato, risulti comodo, in modo tale da non spostarlo più per l'intero tempo di registrazione vocale.

Il microfono a contatto può essere utilizzato solo quando l'unità DAP non è in ricarica.

Nella figura 2.8 è mostrato il pannello frontale dell'unità DAP che è composta da:

1. *microfono in aria*: utilizzato come riferimento durante la taratura del microfono a contatto ed utile per stimare il rumore di fondo durante il monitoraggio a lungo termine;
2. *il LED (Light Emitting Diode) di funzionamento*: indica lo stato di accensione/spegnimento dell'unità DAP e fornisce informazioni inerenti alla carica della batteria ed all'operazione che è stata eseguita. Esso avrà una luce rossa quando sta per scaricarsi o c'è qualche anomalia nel dispositivo o nella registrazione dei dati, una luce gialla quando la batteria è scesa al di sotto del 50% ed una luce verde quando è quasi o completamente carico. L'autonomia della batteria è stimata intorno a 6 ore. Si ha poi ancora una luce bianca che compare dopo un doppio clic che interrompe il monitoraggio del soggetto ed una azzurra che compare quando si tiene premuto il pulsante per procedere allo spegnimento del dispositivo
3. *Il pulsante funzione*: è utile per tante attività.
 - Pressione lunga: esso viene tenuto premuto per più di 3 secondi e dopo circa 30 secondi si avrà l'accensione (se era spento) o lo spegnimento (se era acceso) del dispositivo. Questo può però anche avvenire immediatamente eseguendo un doppio clic sul pulsante subito dopo la pressione esercitata per i 3 secondi. Se il processo di spegnimento venisse interrotto a metà è sufficiente eseguire un unico clic. Al momento dell'accensione, alcuni dispositivi emettono anche un suono, mentre altri si trovano ad avere solo il LED che lampeggia, segno che il dispositivo è stato acceso in modo corretto.

- Doppio click: termina il monitoraggio dell'attività ed accende il trasmettitore Wi-Fi dell'unità DAP in modo tale da riuscire ad individuare il dispositivo dal computer e scaricare i dati.
 - Singolo click: mostra lo stato di carica della batteria tramite il LED di funzionamento.
4. *L'antenna telescopica*: viene estratta totalmente durante la taratura del microfono di contatto andando a poggiarsi sul mento e fungendo quindi da distanziatore.
 5. *Il connettore jack femmina*: al suo interno va inserito il connettore jack maschio del microfono di contatto.

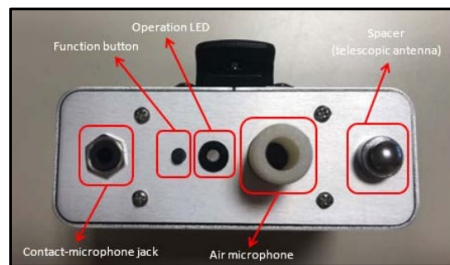


Figura 2.8: Pannello frontale dell'unità DAP [11].

Nella figura 2.9 è mostrato invece il pannello posteriore dell'unità DAP, costituito da:

- *un connettore USB*: per ricaricare la batteria mediante l'alimentatore;
- *un LED di ricarica e di stato*: durante la ricarica della batteria è arancione e diventa verde nel momento in cui si è raggiunta la ricarica completa. Quando il dispositivo è in uso, esso diventa rosso ad indicare che la batteria sta per scaricarsi.



Figura 2.9: Pannello posteriore dell'unità DAP [11].

Il dispositivo è poi dotato nella parte laterale posteriore di una clip che va fissata alla cintura, ai pantaloni o in qualsiasi posto si trovi comodo in modo tale da tenerlo fermo per l'intera durata del monitoraggio. Infine, nella parte laterale anteriore si ha un foro in corrispondenza di un sensore interno che permette di misurare la temperatura e l'umidità relativa dell'ambiente in cui viene svolto il monitoraggio.

Queste ultime due parti sono rappresentate nella figura 2.10.



Figura 2.10: A sinistra, la parte posteriore ed a destra, la parte anteriore dell'unità DAP [10].

Eventuali situazioni di grave rischio possono essere segnalate in tempo reale mediante l'emissione di un suono, ma quest'evento fortunatamente non si è manifestato per nessuno dei soggetti campione studiati.

Questo strumento permette di valutare diversi dati e parametri vocali che possono essere successivamente scaricati in modo facile mediante una qualsiasi interfaccia web. In questo caso, è stato utilizzato un personal computer [11].

Per poter utilizzare in modo corretto il dispositivo si devono seguire diversi passaggi:

1. collegare il microfono di contatto all'unità DAP ed indossarlo intorno al collo nella posizione corretta e comoda;
2. accendere l'unità DAP in modo tale che possa essere individuabile e collegarla al proprio computer tramite la Wi-Fi e mediante l'inserimento di una password, specifica per ogni dispositivo di questo tipo esistente. Esso è in genere individuabile come VHM_N, con N che è un numero intero e rappresenta il dispositivo specifico in utilizzo.

Successivamente, si deve aprire un *Web browser* (preferibilmente Firefox o Chrome) e digitare l'indirizzo IP del Vocal Holter.

3. Eseguire la taratura del microfono a contatto.
4. Eseguire i monitoraggi necessari: a breve e/o lungo termine. Una volta terminati, la registrazione viene interrotta con un doppio clic.
5. Rimuovere il microfono di contatto dal collo.
6. Scaricare i parametri utili: è bene farlo il prima possibile perché quando si inizia un nuovo monitoraggio, i dati precedenti andranno persi. In ogni caso, il dispositivo, quando si sceglie di iniziare un nuovo monitoraggio, avverte sempre

della possibilità di perdita di dati precedenti che potrebbero non essere stati salvati.

7. Spegner la DAP, se non serve per altri monitoraggi.

L'interfaccia web che si apre seguendo i passaggi scritti al punto 2 è rappresentata nella figura 2.11. Essa si compone di 4 diverse parti:

1. la sezione di taratura: per la taratura del microfono a contatto e del microfono in aria;
2. la sezione di valutazione: a breve o lungo termine, a seconda di ciò che si intende fare;
3. la sezione ambientale e di sistema: si hanno i valori effettivi di temperatura e di umidità relativa ed inoltre il livello di carica della batteria;
4. la sezione download: si possono scaricare i parametri, i dati rappresentati come istogrammi ed i campioni vocali. Quest'ultima opzione è però disattivata nei monitoraggi che sono stati svolti ed essa si attiva solo quando vengono svolti monitoraggi in cui si sceglie di registrare l'audio del soggetto.

Si ha poi un'ultima sezione che serve unicamente per eventuali aggiornamenti o per le impostazioni di sistema. Nei paragrafi successivi, si hanno nel dettaglio le prime due sezioni.

Da notare che il dispositivo ha un'incertezza nella misura del livello di pressione sonora SPL pari a di 2.7 dB.

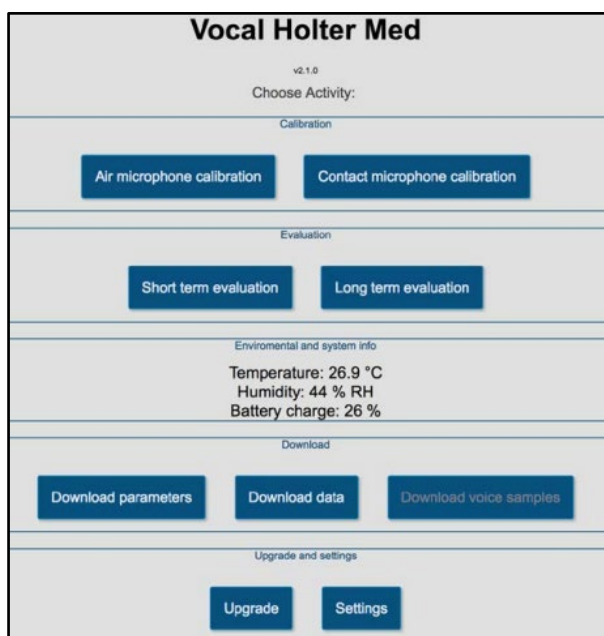


Figura 2.11: L'interfaccia web del Vocal Holter [11].

Sezione di taratura

La taratura del microfono in aria viene fatta con l'ausilio di un calibratore di pressione, come mostrato nella figura sottostante:



Figura 2.12: Microfono in aria dell'unità DAP accoppiato con un calibratore di pressione [11].

La taratura del microfono a contatto viene fatta scegliendo innanzitutto dall'interfaccia del computer l'opzione di una linearità minima pari ad 80% (le altre due opzioni disponibili sono 60% e 70%). Più è alto il valore di linearità, più basso sarà l'errore quadratico medio atteso, ma nello stesso tempo la taratura dovrà essere svolta con più precisione.

Durante questa procedura, il microfono a contatto deve essere indossato e restare in una posizione fissa che è quella che viene scelta inizialmente. Prima di iniziare la taratura, si deve estrarre completamente l'antenna e posizionarla contro il mento, come rappresentato nella figura 2.13. A questo punto, la procedura può essere avviata dal computer premendo l'opportuno comando: si deve restare in silenzio per i primi 5 secondi fino a che non si avverte un suono di allarme (alcuni dispositivi non hanno l'audio, ma contando nella mente il tempo necessario si può procedere ugualmente) e successivamente si può procedere con la ripetizione sostenuta della vocale /a/ ad intensità crescente fino a quando la barra di avanzamento è completa.

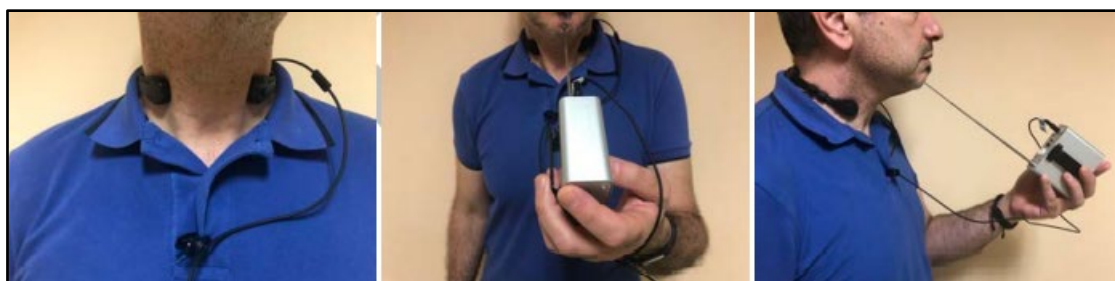


Figura 2.13: Corretto posizionamento del soggetto durante la taratura del microfono a contatto [11].

Se la taratura è eseguita correttamente (i punti ottenuti formano quasi una retta) viene mostrato un messaggio che fornisce informazioni relative alla linearità stimata in base alla retta costruita con la taratura svolta, la pendenza della retta e l'errore quadratico medio tra i valori sperimentali e quelli ottenuti dalla taratura. Nella figura 2.14 si ha il messaggio che compare e la retta che viene costruita quando viene svolta la calibrazione [11].

Se invece la taratura non è eseguita correttamente poiché i punti costruiti sono troppo dispersi nello spazio e non si riesce a costruire una retta e rispettare le condizioni di linearità, la taratura non funziona e l'interfaccia web mostrerà un messaggio di avviso con l'indicazione “Calibration failed”.

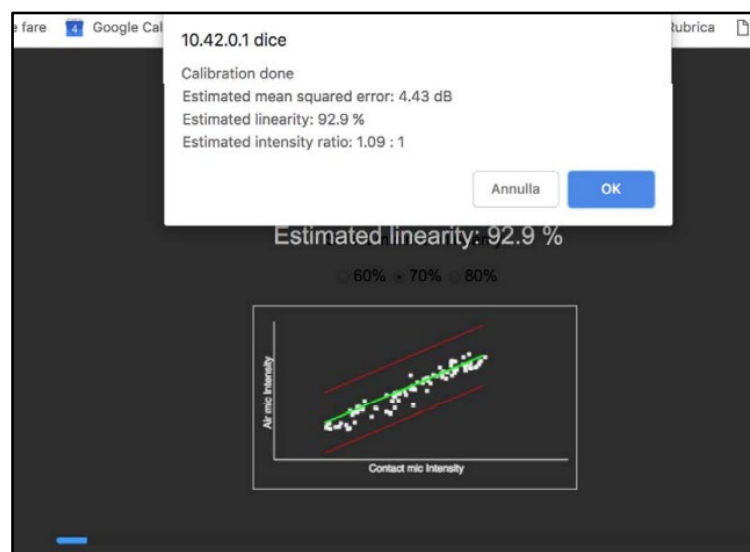


Figura 2.14: Funzione di taratura identificata correttamente ed indicazioni dell'interfaccia web quando la funzione di taratura raggiunge il punteggio di “minima linearità” impostato [11].

La taratura del microfono a contatto vale fino a quando il dispositivo non viene spento: se uno stesso soggetto verrà sottoposto a differenti valutazioni nella stessa giornata non serve quindi ripetere la taratura, ma essa si ripeterà solo nel caso si stia monitorando un soggetto differente o se il dispositivo si è spento a causa di un inutilizzo per un certo periodo di tempo; in quest'ultimo caso, servirà ripetere la taratura anche se si sta analizzando lo stesso soggetto di prima.

Sezione di valutazione

Si possono fare due tipo di valutazioni:

1. *a breve termine (short-term evaluation)*: viene utilizzata nell'emissione continua della vocale /a/. In caso il soggetto esegua più di una vocalizzazione nel tempo complessivo della registrazione, solo la prima parte verrà elaborata. Alla fine della vocalizzazione, l'unità DAP esegue l'elaborazione dei dati e viene mostrato una finestra di messaggio con il valore di diversi parametri (saranno descritti nel dettaglio più avanti) che sono memorizzati nella memoria intera dell'unità DAP:
 - **frequenza fondamentale f_0** (espressa in hertz);
 - **jitter locale** (espresso in percentuale);
 - **shimmer locale** (espresso in percentuale);
 - **mediana del CPPS (Cepstral Peak Prominence Smoothed)** (espressa in decibel);
 - **deviazione tipo del CPPS** (espressa in decibel).

Nella figura 2.15 è mostrato un esempio della schermata che compare al termine di un monitoraggio a breve termine:

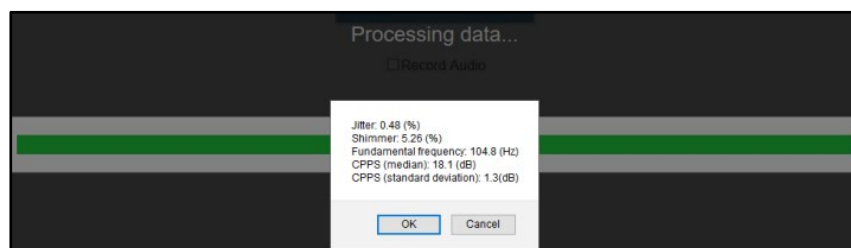


Figura 2.15: Le indicazioni dell'interfaccia web alla fine del processamento dei dati della vocale sostenuta [11]

I dati scritti nella memoria interna dell'unità DAP possono essere letti scegliendo l'opzione 'scarica parametri' ('Download parameters') che contiene tre tipi di file scaricabili ('Standard file', 'Tab-separated file' e 'Tab-separated file (46 ms)' o 'scarica dati' ('Download data') sull'interfaccia che si aprirà sul computer. Nella valutazione a breve termine gli unici 2 file scaricabili sono 'Standard file' presente all'interno di 'Download parameters' e 'Download Data': nel primo caso, i dati sono restituiti nella forma indicata nella figura 2.16, in alto, dove si hanno gli stessi cinque parametri visti in precedenza con in aggiunta informazioni inerenti data ed ora del monitoraggio, carica della batteria, temperatura (°C) ed umidità relativa (%RH); nel secondo caso, i dati sono restituiti nella forma mostrata in

figura 2.16, in basso, dove sono riportati gli istogrammi dei parametri f_0 (Hz), SPL (dB) e CPPS (dB).

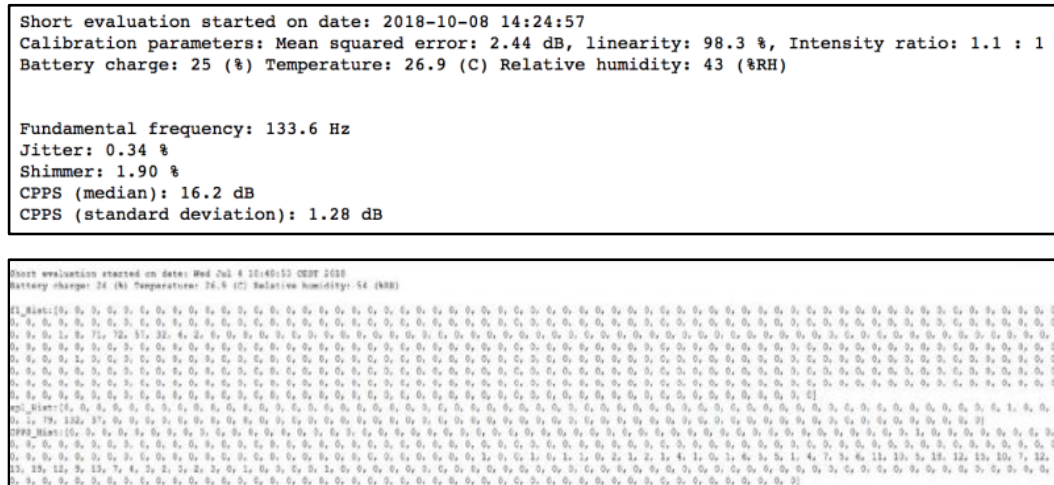


Figura 2.16: In alto, i dati, per un monitoraggio breve, riportati dall'unità DAP quando si seleziona 'Download parameters' e poi 'Standard file'. In basso, quelli selezionando 'Download data' [11].

2. *a lungo termine (long-term evaluation)*: è stata utilizzata sia per la *baseline*, cioè il monitoraggio di 5 minuti in cui al soggetto è stato chiesto di fare una breve chiacchierata o di leggere parti di un libro, sia nel monitoraggio delle lezioni. In questo monitoraggio, il microfono di contatto deve restare fisso nella stessa posizione per l'intera durata di monitoraggio. Durante la registrazione, il trasmettitore Wi-Fi dell'unità DAP è spento ai fini del risparmio energetico e sullo schermo del PC comparirà la schermata mostrata nella figura 20, in cui sono spiegate le istruzioni per riattivare il trasmettitore Wi-Fi al termine della valutazione a lungo termine, ossia fare un doppio clic dopo il quale comparirà una luce bianca ed il dispositivo potrà nuovamente essere connesso alla rete con la stessa procedura iniziale.

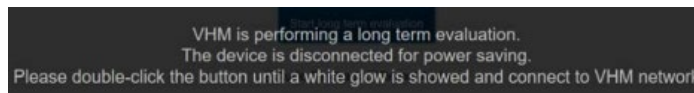


Figura 2.17: Messaggio sull'interfaccia web che mostra l'inizio della valutazione a lungo termine [11].

In questo caso, si possono scaricare tutti e 4 i tipi di file detti in precedenza. Se si seleziona 'Download data' si avrà un file come quello visto nella figura 19 in basso, mentre con 'Download parameters' e poi 'Standard File' i dati vengono

restituiti nella forma indicata nella figura 2.18, in cui le prime due righe forniscono informazioni iniziali: nella prima si hanno data ed ora di inizio monitoraggio, la carica della batteria, la temperatura (°C) e l'umidità relativa (%RH) e nella seconda invece parametri di taratura. Gli altri dati restituiti forniscono i diversi parametri stimati che vengono aggiornati con un intervallo di tempo di circa 75 s:

- per **il rumore di fondo (BNL)** si hanno le statistiche LAF90, LAF75, LAF50 e Leq, misurati in dB;
- per l'attività vocale si ha **il tempo di fonazione percentuale (Dt%)**;
- per **il livello di pressione sonora (SPL)** si hanno le statistiche di media, mediana, deviazione tipo, 5° e 95° percentile, misurati anch'essi in dB;
- per **la frequenza fondamentale (f₀)** si hanno le statistiche di media, mediana, deviazione tipo, 5° e 95° percentile, in Hz.

Il parametro SPL si riferisce ad una distanza d_0 di 22 cm, che è la distanza fissata dal distanziatore presente all'interno dell'unità DAP rispetto alla bocca del soggetto. Per esprimere il parametro *SPL* alla generica distanza d , si usa la seguente espressione:

$$SPL_d = SPL_{d_0} + 20 \log_{10}\left(\frac{d_0}{d}\right), \quad (2)$$

dove d è la distanza specifica d'interesse e d_0 è 22 cm.

```
Long evaluation started on date: 2018-10-08 07:52:08
Calibration parameters: Mean squared error: 8.55 dB, linearity: 86.1 %, Intensity ratio: 1.21 : 1
Battery charge: 74 (%) Temperature: 22.1 (C) Relative humidity: 68 (%RH)
New values: 2018-10-08 07:58:42
Battery charge: 75 (%) Temperature: 22.7 (C) Relative humidity: 61 (%RH)
Background noise (LAF90, LAF75, LAF50, Leq): 49.3 51 55.9 68.4 dB
Percentage phonation time: 5 %
SPL (mean, median, 5° percentile, 95° percentile, standard deviation):74.7 73.5 70.0 85.0 4.8 (dB)
Fundamental frequency (mean, median, 5° percentile, 95° percentile, standard deviation):243.1 228 97 401 98.5 (Hz)
New values: 2018-10-08 08:04:49
Battery charge: 74 (%) Temperature: 23.4 (C) Relative humidity: 59 (%RH)
Background noise (LAF90, LAF75, LAF50, Leq): 53.7 65.8 63.7 77.3 dB
Percentage phonation time: 2 %
SPL (mean, median, 5° percentile, 95° percentile, standard deviation):72.6 72.5 69.5 78.5 2.7 (dB)
Fundamental frequency (mean, median, 5° percentile, 95° percentile, standard deviation):391.6 401 374 401 40.5 (Hz)
New values: 2018-10-08 08:10:58
Battery charge: 76 (%) Temperature: 24.1 (C) Relative humidity: 60 (%RH)
Background noise (LAF90, LAF75, LAF50, Leq): 56.7 82.3 89.1 69.7 dB
Percentage phonation time: 0 %
SPL (mean, median, 5° percentile, 95° percentile, standard deviation):72.8 72.0 70.0 79.0 3.5 (dB)
Fundamental frequency (mean, median, 5° percentile, 95° percentile, standard deviation):199.9 145 81 401 134.0 (Hz)
New values: 2018-10-08 08:17:06
Battery charge: 71 (%) Temperature: 24.8 (C) Relative humidity: 60 (%RH)
Background noise (LAF90, LAF75, LAF50, Leq): 67.7 72.2 96 76 dB
Percentage phonation time: 2 %
SPL (mean, median, 5° percentile, 95° percentile, standard deviation):73.6 74.0 70.0 79.0 2.8 (dB)
Fundamental frequency (mean, median, 5° percentile, 95° percentile, standard deviation):257.5 254 88 401 123.1 (Hz)
```

Figura 2.18: File riportato dall'unità DAP selezionando 'Download parameters' e poi 'Standard file' per un monitoraggio lungo [11].

I dati vengono restituiti nella forma mostrata in figura 2.19 quando viene utilizzando il comando 'Download parameters' e poi 'Tab-separated-file' in cui i dati vengono acquisiti ogni circa 1 minuto e 15 secondi e si hanno un totale di 19

colonne: nella prima colonna si ha l'ora, seguita nell'ordine dalla percentuale di batteria del dispositivo, dalla temperatura, dall'umidità e poi dalle quattro statistiche del rumore di fondo BNL (LAF90, LAF75, LAF50 e Leq), dal tempo di fonazione percentuale, dalle cinque statistiche del livello di pressione sonora *SPL* e infine dalla frequenza fondamentale f_0 (media, mediana, 5° e 95° percentile e deviazione tipo). In questo caso, le prime tre righe sono le stesse di quelle che si hanno in 'Standard file'.

Long evaluation started on date: 2018-10-08 07:52:08 Calibration parameters: Mean squared error: 8.55 dB, linearity: 66.1 %, Intensity ratio: 1.21 : 1 Battery charge: 74 (%) Temperature: 22.1 (C) Relative humidity: 68 (RH)													
Time	Battery(%)	T(C)	RH(%)	BNL_LAF90(dBA)	BNL_LAF75(dBA)	BNL_LAF50(dBA)	BNL_Leq(dBA)	FPT(%)	SPL_mean(dB)	SPL_median(dB)	SPL_5perc(dB)	SPL_95perc(dB)	SPL_SDV(dB)
07:58:34	75	22.7	61	49.3	51	55.9	68.4	5	74.7	73.5	70.0	85.0	4.8
08:04:42	76	23.4	57	53.7	45.8	63.7	77.3	2	72.6	72.5	69.5	78.5	2.7
08:10:50	76	24.1	60	56.7	82.3	89.1	69.7	0	72.8	72.0	70.0	79.0	3.5
08:16:58	71	24.8	60	67.7	72.2	96	76	2	73.6	74.0	70.0	79.0	2.8
08:23:06	70	25.5	60	65.4	74.3	77.4	73.8	0	73.3	73.5	70.0	78.0	2.6
08:29:14	69	26.2	55	65.7	74.3	75.7	73.3	2	71.8	72.0	69.5	76.5	2.1
08:35:22	69	26.2	56	80.7	76.7	70.6	72.5	15	74.1	74.5	70.0	80.0	3.0
08:41:30	66	26.2	56	58	62.8	65.4	68.7	33	73.6	74.0	70.5	78.0	2.4
08:47:38	64	26.2	56	53.3	71.7	66.9	69.3	49	74.1	74.5	70.5	79.0	2.7
08:53:47	63	26.2	56	56.2	62.7	90.7	71	50	74.5	75.0	70.5	79.0	2.5
08:59:55	61	26.2	56	53.3	63.8	94	70.1	59	74.6	75.5	70.5	79.5	2.6
09:06:04	61	26.2	56	55	67.2	65.8	69.2	46	74.6	75.0	70.5	79.5	2.7
09:12:12	58	26.2	56	58.9	83.1	79	71.6	59	74.8	75.5	71.0	79.5	2.6
09:18:21	58	26.2	55	80.8	64.3	79.9	71.6	56	75.2	76.0	71.0	80.0	2.8
09:24:29	56	26.2	55	61.2	66.3	69	73.3	58	74.9	75.5	70.5	80.0	2.8
09:30:38	58	26.9	55	57.5	68.6	69.4	71.3	57	74.8	75.5	70.5	80.0	2.9
09:36:46	55	26.9	55	59.6	68.9	71	71.1	58	75.0	75.5	70.5	80.5	3.0
09:42:55	56	26.9	55	58.6	63.3	82.1	72.5	58	75.4	76.0	71.0	81.0	3.0
09:49:03	54	26.9	54	71.1	71.4	66.8	71.5	26	74.5	75.0	70.0	80.0	3.1
09:55:12	54	26.9	53	62.7	61.9	73.5	68.3	18	74.5	75.0	70.5	80.0	3.0
10:01:20	54	26.2	53	64.1	83.3	90.8	70.6	10	73.1	73.0	70.0	78.5	2.8
10:07:29	53	26.2	54	60.7	65.4	78.4	75.9	15	74.3	74.5	70.5	80.0	2.9
10:13:37	51	26.2	55	66	87.4	66.7	72.6	12	73.0	73.5	70.0	78.0	2.4
10:19:46	50	26.9	55	52.2	56.3	61.3	67.5	21	73.0	73.0	70.0	78.5	2.6
10:25:54	48	27.6	54	54.9	59.5	67.5	70.4	6	72.2	72.0	69.5	77.0	2.5
10:32:03	49	27.6	53	51.3	60	70	67.4	4	72.0	71.5	69.5	77.5	2.7
10:38:12	47	27.6	53	55	66.7	66.3	69	15	73.8	74.0	70.0	79.5	3.1
10:44:20	45	26.2	51	52.9	57.2	75	74.3	19	73.7	74.0	70.0	79.5	2.9
10:50:29	44	26.9	54	50.1	51.6	82.2	71.3	1	74.1	73.5	70.0	82.0	3.6
10:56:38	44	27.6	53	58	62.7	76.1	71.2	0	72.5	73.0	70.0	77.0	2.4
11:02:46	41	27.6	51	53.7	65.1	83.5	68.1	1	71.2	71.5	69.5	75.0	1.9
11:08:55	41	26.9	45	53.6	62.9	69.1	66	7	72.7	73.0	70.0	77.5	2.5
11:15:04	41	25.5	51	57.1	60.1	80	70.5	9	72.4	72.5	70.0	76.5	2.1
11:21:13	44	26.2	53	55.1	71.7	66	73.6	40	72.2	72.5	70.0	77.0	2.3
11:27:21	40	27.6	49	64.1	67.5	71.1	72.6	18	73.1	73.5	70.0	77.5	2.3
11:33:30	38	27.6	50	62.2	59	72.9	70.9	16	72.3	72.5	69.5	78.0	2.5

Figura 2.19: File riportato dall'unità DAP selezionando 'Download Parameters' e poi 'Tab-separated file' per un monitoraggio lungo [11].

Infine, i dati vengono restituiti nella forma mostrata in figura 2.20 quando viene utilizzando il comando 'Download parameters' e poi 'Tab-separated file (46 ms)' in cui i dati vengono acquisiti ogni circa 46.4 ms e disposti in un file che nella prima colonna contiene i valori di f_0 e nella seconda colonna quelli di *SPL*. Questi file sono generalmente molto lunghi perché il numero di righe è all'incirca pari al valore che si ottiene dividendo la durata totale della lezione per 0.0464 s. Anche in questo caso, le prime tre righe sono le stesse di quelle che si hanno in 'Standard file'.

Long evaluation started on date: 2022-10-13 16:09:57	
Calibration parameters: Mean squared error: 3.32 dB, linearity: 101.5 %, Intensity ratio: 1.43 : 1	
Battery charge: 60 (%) Temperature: 26.2 (C) Relative humidity: 61 (%RH)	
F ₀ (Hz)	SPL(dB)
0.0	0.0
0.0	0.0
136.1	71.7
117.9	70.1
103.5	66.6
0.0	0.0
0.0	0.0
76.8	74.1
92.6	79.5
114.8	67.1
0.0	0.0
137.0	68.1
116.7	70.0
105.0	69.6
104.0	68.2
103.5	65.7
100.7	65.3
96.3	64.5
96.3	64.0
94.6	63.8
95.0	63.5
98.9	65.7
106.5	68.9
111.9	68.1
114.2	74.5
112.5	70.5
98.0	62.9
0.0	0.0

Figura 2. 20: File riportato dall'unità DAP selezionando 'Download Parameters' e poi 'Tab-separated file (46 ms)' per un monitoraggio lungo [11].

I dati utili per l'elaborazione eseguita tramite scripts Matlab opportunamente sviluppati sono quelli riportati nelle figure 22 e 23, che sono stati opportunamente modificati eliminando in entrambi i casi le prime tre righe di intestazione e le varie colonne ed inoltre nel primo caso eliminando anche la colonna 22, tramite Excel, in modo tale che fosse poi facile dare indicazioni a Matlab su come gestire questi dati tenendo conto che tra una riga e la successiva si aveva una variazione di circa 75 secondi.

2.6 Parametri fondamentali

2.6.1. Smoothed Cepstral Peak Prominence (CPPS)

Il cepstrum di un segnale è il risultato della trasformata di Fourier (FFT) applicata al modulo dello spettro in decibel di un segnale. Esso si ottiene facendo la trasformata di Fourier del logaritmo della trasformata di Fourier del segnale; per questo motivo, a volte viene definito come uno *spettro dello spettro*. Il suo nome deriva dall'anagramma della parola "spectrum".

In formule si ha:

$$X(T) = F[\ln (F[x(t)])]. \quad (3)$$

Le operazioni sul cepstrum vengono chiamate analisi di quefrenza, perché quest'ultima è la grandezza considerata.

Il cepstrum è utilizzato per separare la parte di segnale che contiene le informazioni di eccitazione (relativo all'altezza del suono e rappresentante la parte alta della quefrenza) dalla funzione di trasferimento attuata dalla laringe (contiene il timbro della voce e costituisce la parte bassa della quefrenza); questo viene fatto con un'azione di *lifter* ossia di filtraggio passa-basso nel dominio della quefrenza [13].

I parametri CPPS (*Cepstral Peak Prominence Smoothed*) e CPP (*Cepstral Peak Prominence*) sono considerate misure acustiche piuttosto valide per valutare la gravità complessiva della disfonia. Il primo si ottiene misurando la CPP su una versione mediata del cepstrum. Lo smoothing consiste in due fasi: nella prima, i cepstrum sono mediati nel tempo, mentre nella seconda lungo la quefrenza che è sempre una misura di tempo (quindi si esprime in secondi), ma non nel senso proprio di segnale che evolve nel dominio del tempo perché essa si utilizza per riconoscere i periodi delle componenti armoniche di un segnale vocale.

L'energia del segnale vocale è contenuta nella zona relativa ad una quefrenza nulla.

CPP è una misura dell'ampiezza del picco cepstrale relativo (in decibel) del segnale vocale. Si ottiene facendo la differenza tra il valore massimo di picco cepstrale che si

verifica entro i limiti delle frequenze di fonazione attese ed il valore corrispondente sulla retta di regressione costruita sul cepstrum.

La CPP è stata originariamente sviluppata per analizzare le vocali sostenute e misurare il grado di qualità armonica (cioè la periodicità) del segnale rispetto alla “rumorosità” del segnale vocale. Esso rappresenta quindi un parametro di qualità armonica della voce che viene valutato nell’emissione della vocale /a/, ma potrebbe essere valutato anche nell’eloquio.

La CPPS è una modifica della misura di CPP, in cui i singoli cepstrum sono mediati nei domini del tempo e della frequenza ed è stata sviluppata per avere una maggiore precisione di previsione, in particolare nei segnali vocali.

Le misure CPP e CPPS si sono dimostrate più affidabili rispetto alle tradizionali misure di perturbazione come il jitter, lo shimmer ed il rapporto rumore/armoniche.

Da studi clinici è stato riscontrato che le misure di questi due valori sono correlate con le valutazioni percettive della voce. Infatti, le applicazioni delle misure di CPP sono state estese all’analisi di diversi tipi di fonazione e disfonia. In particolare, è stato riscontrato che i valori di CPP sono più elevati per la fonazione normale rispetto a quella respiratoria. Questo avviene probabilmente perché nel primo caso si hanno valori della forma d’onda della glottide più ampi che portano di conseguenza ad avere anche un aumento del rumore spettrale.

Wolfe e Martin hanno considerato 10 pazienti disfonici e li hanno classificati tra le seguenti categorie: voce affannosa, voce rauca e voce tesa. Per farlo si sono basati su un modello a quattro parametri ed uno di questi era proprio il CPP. Essi hanno notato che si avevano valori di CPP più bassi per la voce rauca ed affannosa rispetto ad una voce tesa [12].

Il CPPS è raccomandato per scopi di screening vocale, perché ha un alto valore predittivo per lo stato di disturbo della voce, nonostante sia una buona misura anche quella del CPP. È stato dimostrato negli anni che più un soggetto è disfonico più il suo valore di CPP e CPPS tende ad essere basso rispetto a quello di uno non disfonico.

Come già detto più volte in precedenza, uno dei più grandi gruppi di utenti vocali professionali sono i docenti, le cui voci sono sensibili ai disturbi generati da un uso prolungato della voce e dalle condizioni di carico vocale intenso, come avviene ad esempio in presenza di una scarsa condizione ambientale o di una mancata formazione vocale. Per questo motivo, il CPPS è uno dei parametri che il Vocal Holter analizza, calcolando sia il suo valore medio che la sua deviazione tipo.

2.6.2. Lo shimmer locale

È un parametro definito solo per la vocale continua, la cui definizione è presente nel manuale d'istruzioni MDVP come “la valutazione relativa della variabilità periodo-periodo (nel brevissimo termine) dell'ampiezza picco-picco all'interno del campione vocale analizzato. Sono escluse le aree di interruzione vocale” [14]. Esso rappresenta una modificazione casuale a breve termine (detta anche micro-perturbazione) dell'ampiezza; per questo motivo, è definito parametro di stabilità in ampiezza e può essere espresso in decibel (dB) o in percentuale [15]. Il Vocal Holter riporta il risultato in percentuale ossia dividendo la media delle varie differenze in ampiezza tra periodi successivi adiacenti, presi a coppie, per il valore medio delle ampiezze.

In formule si ha:

$$Shim = 100 \cdot \frac{\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^{N-1} |A^{(i)} - A^{(i+1)}|}{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N A^{(i)}}, \quad (4)$$

dove: $A^{(i)}$ con $i = 1, 2, \dots, N$ rappresenta il dato estratto di ampiezza picco-picco e N il numero di periodi estratti.

2.6.3. Il jitter locale

È anch'esso un parametro definito solo per la vocale continua, la cui definizione è presente nel manuale d'istruzioni MVDP come “la valutazione relativa della variabilità periodo-periodo (nel brevissimo termine) dell'intonazione all'interno del campione vocale analizzato. Sono escluse le aree di interruzione vocale” [14]. Esso rappresenta una modificazione casuale a breve termine (detta anche micro-perturbazione) del periodo fondamentale e quindi della frequenza fondamentale (f_0); per questo motivo, è definito parametro di stabilità nel periodo e può essere espresso, in microsecondi (μs) o in percentuale [15]. Il Vocal Holter riporta il risultato in percentuale ossia dividendo la media delle varie differenze di durata tra periodi successivi adiacenti, presi a coppie, per il valore medio dei periodi.

In formule si ha:

$$Jitt = 100 \cdot \frac{\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^{N-1} |T0^{(i)} - T0^{(i+1)}|}{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N T0^{(i)}}, \quad (5)$$

dove: $T0^{(i)}$ con $i = 1, 2, \dots, N$ rappresenta il dato estratto del periodo di intonazione e N il numero di periodi di intonazione (PER) estratti.

2.6.4. Frequenza fondamentale (f_0)

È un parametro che rappresenta la frequenza oscillatoria delle corde vocali espressa in Hertz. Essa dipende in modo inverso da lunghezza, masse e tensioni delle corde vocali. Quindi, poiché le corde vocali degli adulti sono più lunghe e grosse rispetto alla quelle dei bambini, i primi avranno una frequenza fondamentale più bassa degli ultimi. Inoltre, poiché le corde vocali degli uomini sono di lunghezza maggiore rispetto a quella delle donne, i primi avranno una f_0 inferiore [17].

In generale, la frequenza fondamentale del timbro vocale complesso, detta anche ‘pitch’ dall’inglese, se possibile deve essere valutata durante la lettura di un testo che non susciti emozioni. Essa è compresa in un intervallo che per gli uomini va dai 100 Hz ai 120 Hz, per le donne si trova a valori che sono di circa 1/8 più alti ed infine per i bambini è pari a circa 300 Hz [16]. Questa differenza tra uomini e donne tende a diminuire dopo circa il 60° anno di età perché a questo punto la frequenza fondamentale delle donne scende mentre quella degli uomini sale.

Se si ha una f_0 troppo alta, la causa può essere la lunghezza troppo corta delle corde vocali oppure la presenza di una massa eccessivamente ridotta come avviene in presenza di malformazioni alla laringe o deficit di tipo ormonale.

Se si ha invece una f_0 troppo bassa, il problema può essere una riduzione della tensione (ad esempio, una neuropatia con conseguente riduzione della funzione del muscolo cricotiroideo che è il muscolo tensore delle corde vocali) o un aumento della massa delle corde vocali (ad esempio, la formazione di un polipo o di un edema e l’esposizione agli androgeni nelle donne).

Gli sforzi vocali variano passando da un sussurro ad un forte urlo. Inoltre, poiché ogni persona è diversa dall’altra risulta difficile assegnare un numero fisso al livello di voce.

In generale, la voce viene percepita come naturale e con la massima intelligibilità quando ci si trova a circa 1 metro rispetto al soggetto che sta parlando. Stare dietro o di lato non è quindi consigliato. Inoltre, in qualsiasi direzioni ci si trovi rispetto a colui che si è interessati a sentire, man mano che ci si avvicina ad esso, la voce aumenta il suo spettro: coloro che sono troppo vicini sentiranno un tono troppo alto e, viceversa, quelli più

distanti, uno troppo basso. Una soluzione ottimale potrebbe essere quella di far disporre gli studenti in modo più o meno uguale rispetto all'insegnante, anche se non è una cosa facile da rispettare perché se il numero di alunni è grande è difficile porli tutti sulla stessa linea, a circa 1 metro, dalla cattedra ed inevitabilmente ci sarà qualcuno più vicino ed altri più lontani. Questo è anche il motivo per cui i maestri e gli insegnanti delle scuole secondarie tendono ad alzare il loro tono di voce, per assicurarsi di essere sentiti anche dagli alunni più lontani.

Questo problema potrebbe essere risolto in ambito universitario dove viene utilizzato un microfono perché si ha sia un numero molto più elevato di alunni per ogni lezione che, spesso, una maggiore capienza dell'aula. In questo caso, si deve considerare che il microfono genera un timbro sonoro differente in base a se lo si posiziona sul petto o sul viso del docente: nel primo caso, si ha uno spettro che manca di frequenze nell'intervallo importante che è quello compreso tra 2 kHz e 4 kHz; questo comporta una ridotta intelligibilità del parlato rispetto a quanto avverrebbe posizionandolo al livello del viso. Quindi, il microfono deve essere mantenuto nella posizione da garantire la massima intelligibilità e se questo non è possibile si devono apportare opportune correzioni con un equalizzatore in modo tale da arrivare comunque alla percezione di un suono corretto [16].

Una grossa parte dello spettro delle frequenze udibili è coperta dallo spettro del discorso. Nelle lingue non tonali, come l'italiano, in cui il significato della parola non varia in base al tono con cui essa viene pronunciata, si può affermare che il discorso consiste di suoni che sono vocali ed altri che sono consonanti. Questi suoni sono generati ed eventualmente filtrati dalle corde vocali. Quando si pronuncia una vocale, si ha però anche l'intervento di alcune cavità che influenzano il flusso d'aria che passa attraverso di esse. Per questo motivo, anche se si tenderebbe a definire un sussurro privo di suono, si ha che i suoni dovuti alle vocali possono essere visti come dei sussurri. Allo stesso modo, una consonante è creata da blocchi d'aria e suoni di rumore che si formano a causa del passaggio dell'aria attraverso la gola e la bocca ed in particolare tramite la lingua e le labbra.

Dal punto di vista della frequenza, le consonanti si trovano sopra i 500 Hz e, nello specifico, tra i 2 kHz e i 4 kHz, mentre le vocali coprono un range molto ampio di frequenze e sono tali da far sì che fino a circa 1 kHz si abbia un incremento del tono di voce, mentre successivamente un suo decremento.

Nella figura 2.21 è rappresentato l'andamento degli spettri vocali in base allo sforzo per uomini, donne e bambini. Lo spettro è diviso in 1/3 di ottava, ossia ogni 3 bande di questo tipo formano una banda di ottava ed è la più utilizzata perché essa corrisponde con una buona approssimazione al sistema uditivo umano, soprattutto per le frequenze superiori ai 600 Hz. Inoltre, essa permette di fare un'analisi semplificata del rumore presente.

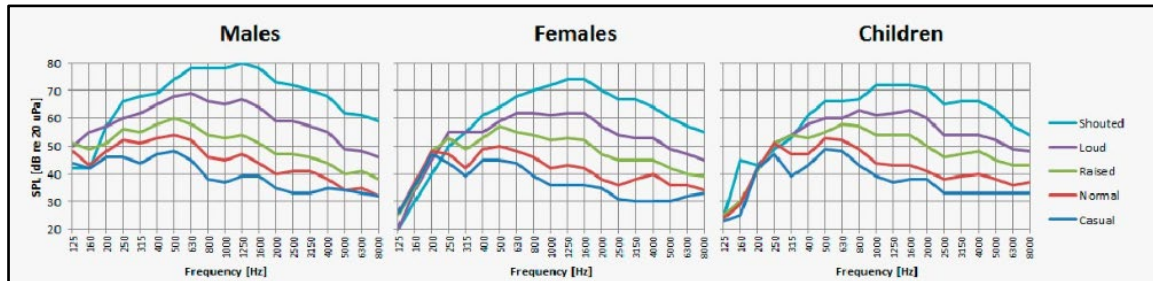


Figura 2.21: Spettri vocali (ad 1/3 di ottava) in base allo sforzo rispettivamente per uomini, donne e bambini [16].

Rilevante è il concetto secondo cui non è possibile aumentare il livello sonoro delle consonanti allo stesso modo delle vocali; questo sta a significare che l'intelligibilità di una parola non aumenta se si alza troppo il tono di voce arrivando quindi ad urlare, ma essa è migliore nelle situazioni di sforzo vocale normale che si ha spesso quando il rumore di fondo è poco significativo [16].

La frequenza fondamentale è presente sia nei parametri ricavati dalla vocale continua che in quelli estratti dalla *baseline* e dalle lezioni. Nel monitoraggio a breve termine è valutato come un parametro assoluto, mentre nei monitoraggi a lungo termine si ha un file in cui il suo valore è riportato ogni circa 46.4 ms ed un altro in cui esso ha un valore tabulato ogni circa 75 secondi per diverse statistiche della frequenza fondamentale, quali la media, la mediana, la deviazione tipo, il quinto e il novantacinquesimo percentile. Esse si trovano ognuna in una colonna differente del file 'tab' (da cui è già stata tolta la prima colonna con le ore) e vanno rispettivamente dalla 14 alla 18. Tutti i valori di queste variabili, per la *baseline* e le lezioni, sono state graficate rappresentate nel tempo, ogni 75 s, usando Matlab, mentre la frequenza fondamentale ogni 46.4 ms per la *baseline* e le lezioni è stata visualizzata tramite un istogramma in funzione delle occorrenze relative (in percentuale). Prima di farlo però è stata inserita una soglia pari a 110 Hz per le donne ed a 80 Hz per gli uomini e si sono poste pari a 0 tutte le frequenze inferiori a questi due valori; successivamente, si è ricostruita una nuova colonna di frequenze che considerasse solo

quelle diverse da 0. In quest'ultimo caso, per la *baseline* e le lezioni sono state calcolate tramite Matlab le stesse statistiche presenti nel file tabulato ogni circa 75 secondi.

2.6.5. Il livello di pressione sonora (SPL: *Sound Pressure Level*)

Il livello di pressione sonora (SPL) ad una determinata distanza dalla bocca del parlatore è il risultato delle variazioni della pressione ambientale dell'aria provocate dal raggiungimento di un'onda sonora.

Un'onda sonora produce delle variazioni di pressione differenti in base al luogo in cui ci si trova, ma anche all'istante di tempo considerato. Per questo motivo, spesso, si preferisce far riferimento ad un livello efficace, che è lo scarto quadratico medio del livello di pressione in un determinato intervallo di tempo.

La pressione sonora più bassa che può essere udita da un essere umano è definita *soglia normale dell'udito*, mentre quella più alta che si riesce a sopportare è detta *soglia del dolore*. Tra queste due soglie si ha un fattore di scala pari a un milione. [18].

Proprio, per evitare di avere problemi nell'elaborazione di numeri che possono essere davvero molto grandi, è stato scelto di passare da una scala lineare ad una logaritmica che fosse espressa in decibel (dB). In questo modo, il livello di pressione sonora più basso è pari a 0 dB mentre quello più alto varia tra 120 dB e 140 dB [18].

Il livello di pressione sonora si può calcolare come:

$$L_p = 20 \log \frac{p_1}{p_2} [dB], \quad (6)$$

In cui si ha L_p che rappresenta il livello di pressione sonora, p_1 la pressione sonora generata dalla sorgente di suono esaminata, espressa in μPa e p_2 il livello di pressione sonora presa come riferimento che rappresenta la soglia di udibilità dell'orecchio umano, che è pari a 20 μPa [19].

La tabella 2.4 riporta i livelli di SPL che l'orecchio umano è in grado di sentire e/o tollerare, in base all'ambiente in cui ci si trova.

Sorgente sonora	Pressione sonora [Pa]	Livello sonoro [dB]
Soglia assoluta dell'udito	0.00002	0
Soglia normale dell'udito		10
Fruscio di foglie	0.0002	20
Studio di registrazione		30
Appartamento silenzioso	0.002	40
Ufficio privato		50
Conversazione	0.02	60
Traffico	0.2	80
Autocarro	2	100
Rivettatrice	20	120
Soglia del dolore		135
Elicottero	200	140
Motore a reazione	2000	160
Pressione sonora a una distanza di 3 m dal luogo di detonazione di 25 kg di TNT	100000	194

Tabella 2.4: Esempi di suoni percepibili dall'orecchio umano [19].

Nella figura 2.22 è invece raffigurata la scala in decibel con le diverse soglie di udito disponibili e nella parte sovrastante degli esempi di situazioni che generano un certo tipo di rumore posizionato nella corretta posizione lungo la scala: si parte dal respiro che si colloca intorno ai 10 dB e si arriva ai fuochi d'artificio situati intorno ai 140 dB e quindi oltre la soglia del dolore.

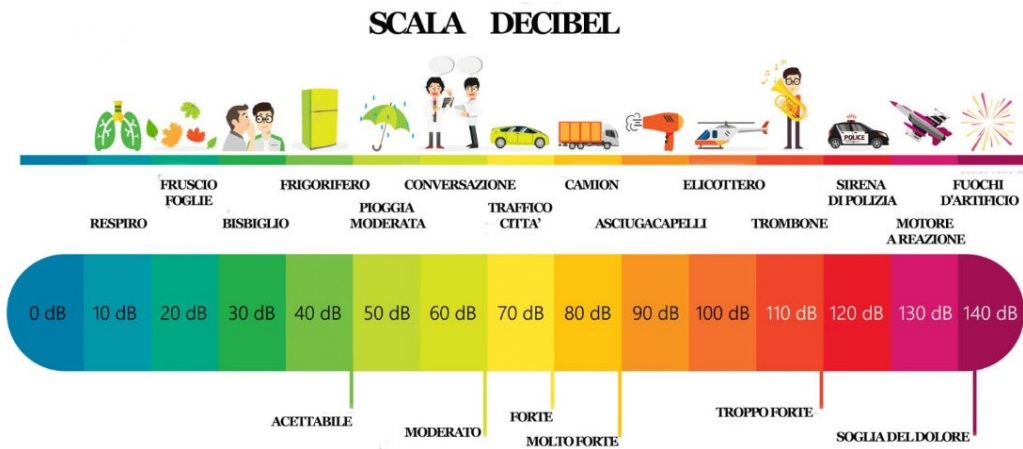


Figura 2.22: Scala in decibel con le varie soglie possibili del livello di pressione sonora [19].

In genere, il valore di SPL fornito dal Vocal Holter è un valore che considera un soggetto che si trova ad una distanza pari a 22 cm dall'ascoltatore, ma spesso è utile invece conoscerlo per una distanza pari a 1 m. Di conseguenza, il valore di SPL corretto da calcolare si basa sulla formula 2, vista in precedenza, secondo cui l'SPL ad 1 metro è dato da:

$$SPL_d = SPL_{d_0} + 20 \log_{10}\left(\frac{d_0}{d}\right) = SPL_{d_0} + 20 \log_{10}\left(\frac{0.22}{1}\right) = SPL_{d_0} - 13,15. \quad (7)$$

Il valore di SPL a 1 metro si calcola quindi conoscendo il valore di SPL alla distanza di 22 cm e sottraendo la costante 13,15 dB.

Questo valore è stato utilizzato nel file contenente valori di SPL ogni 46.4 ms: i valori di SPL presenti sono stati quelli in corrispondenza delle frequenze fondamentali superiori alla soglia ed anche in questo caso per la *baseline* e per le lezioni si è analizzato SPL in funzione delle occorrenze relative (in percentuale) ed inoltre si sono calcolate le stesse statistiche della frequenza fondamentale.

Il valore di SPL così come ricavato dal dispositivo è stato analizzato nel tempo, ogni 75 secondi, considerando le sue statistiche, presenti dalla colonna 9 alla 13, anche in questo caso avendo eliminato già in precedente la prima colonna corrispondente alle ore del monitoraggio.

Il livello di pressione sonora equivalente

Partendo dal valore di SPL per una distanza pari a 1 m, si può fare un'ulteriore elaborazione ed arrivare a calcolare il livello di pressione sonora equivalente. In Matlab, il suo valore è stato calcolato come media dei valori del livello continuo di pressione sonora per una lunghezza di 1 metro per ogni tempo di osservazione ($T=N$ -volte la durata di un singolo frame pari a 46.4 ms), ossia elemento per elemento. La relazione è la seguente:

$$SPL_{eq} = 10 \cdot \log \left[\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N 10^{0.1 \cdot SPL(i)} \right] \quad (8)$$

in cui N è l'intera lunghezza del vettore che contiene i valori di SPL a 1 m che sono considerati uno ad uno all'interno della sommatoria.

In questo modo, per la *baseline* e per ogni lezione si è ottenuto un unico valore assoluto del SPL equivalente.

Esso può essere valutato secondo delle soglie stabilite dalla norma UNI EN ISO 9921:

- un valore inferiore a 65 dB indica un soggetto che ha utilizzato voce con tono normale cioè ***NORMAL***;
- un valore compreso tra 65 dB e 71 dB indica un soggetto che ha utilizzato una voce un po' sollevata, cioè ***RAISED***;
- un valore compreso tra 71 dB e 78 dB indica un soggetto che ha utilizzato una voce alta, cioè ***LOUD***;
- un valore superiore a 78 dB indica un soggetto che ha utilizzato una voce urlata, cioè ***SHOUT***.

Generalmente, il livello di decibel con cui un essere umano parla normalmente è pari a circa 60 dB e non risulta dannoso.

La dose di rumore consigliata non deve superare i 70 dB nell'arco delle 24 ore [20].

2.6.6. Il tempo di fonazione percentuale (PPT: *Percentual Phonation Time*) o Dose Temporale (Dt%)

La dose vocale più semplice è la dose temporale (Dt) o tempo di voce o tempo di fonazione, che quantifica il tempo totale di vibrazione delle corde vocali [10]. Esso si misura in secondi e rappresenta un indicatore essenziale per la valutazione del carico vocale.

Esso è presente nell'ottava colonna del file tab con valori ogni 75 secondi, avendo opportunamente eliminato in precedenza la prima colonna relativa all'ora del monitoraggio. Infine, è stato calcolato per le lezioni ed anche nella baseline tenendo conto che esso è dato dalla percentuale del periodo totale trascorso ad esprimere la propria voce rispetto al tempo totale di esecuzione del monitoraggio.

In uno studio svolto a scuola su alcune insegnanti [21], è stato dimostrato che più un ambiente ha pessime caratteristiche dal punto di vista acustico e più si avrà rumore portando l'insegnante ad aumentare il tono della sua voce e quindi il valore dell'SPL ed

a diminuire il tempo di fonazione percentuale per ridurre la sensazione di affaticamento dovuta all'uso di livelli di voce elevati.

Un contributo importante è stato dato da Titze [22], il cui studio ha confrontato le lunghezze dei periodi di pausa e di voce su 31 insegnanti monitorati per due settimane, durante gli intervalli lavorativi e non lavorativi [21].

I ricercatori ritengono che lo sforzo vocale degli insegnanti possa essere attribuito ad una fonazione che è principalmente un monologo nel momento delle lezioni e questo comporta la quasi assenza di periodi di recupero o periodi di pausa rispetto a quelli di fonazione o di voce.

Analizzare i periodi di voce e quelli di silenzio risulta essere un buon inizio per una valutazione più precisa del carico vocale.

Da Astolfi [23] è stato dimostrato che le distribuzioni di pause e voce di insegnanti della scuola primaria, monitorate durante alcune giornate lavorative in aule con diverse caratteristiche acustiche, variano in base al tempo di riverberazione dell'ambiente ed in particolare, i periodi di fonazione aumentano all'aumentare del tempo di riverberazione portando quindi ad un aumento delle durate dei periodi di voce, a una riduzione delle pause e conseguentemente ad un maggior affaticamento vocale [21]. In questi casi, si tenderà ad avere un parlato veloce.

Ogni soggetto che parla ha lo scopo di farsi comprendere da coloro che ascoltano: la voce cambia a seconda dell'interlocutore, dell'acustica dell'ambiente, dell'eventuale presenza di rumore e del compito vocale. Inoltre, si hanno delle differenze sull'uso della voce in base all'età ed al sesso del soggetto che parla, a sue eventuali problematiche all'udito o di lingua e tra un professionista e un non professionista della voce.

L'esperimento condotto ha preso in considerazione 5 professionisti, docenti universitari madre lingua inglesi della South Bank University, monitorati in tre diverse condizioni di riverberazione (camera anecoica, riverberante e semi-riverberante) e 6 non professionisti, madre lingua italiani monitorati all'interno delle camere semi-anechoica e riverberante dell'Istituto Nazionale di Ricerca Metrologica (INRiM) di Torino [24].

Lo sforzo vocale dei soggetti è stato monitorato mediante due dispositivi portatili uno di tipo commerciale, l'Ambulatory Phonation Monitor APM Model 3200 ed uno sviluppato al Politecnico di Torino, il Voice-Care.

Questi dispositivi sono dotati di un microfono a contatto che mediante un cerotto anallergico aderisce alla fossetta del giugulo, situata tra le due clavicole, e permette di

rilevare la vibrazione delle corde vocali indotta dal parlare. I dati sono salvati da un data-logger cioè un registratore di dati [21].

Ogni monitoraggio ha avuto una durata di 5 minuti con il parlatore posto a 6 metri di distanza dall'ascoltatore seduto frontalmente. L'argomento del discorso era un argomento che fosse ben noto a chi parlava, ma non a chi ascoltava in modo tale che quest'ultimo potesse apprendere.

Coloro che si sono occupati di questo esperimento, hanno scelto di ricavare il valore di SPL, f_0 e tempo di fonazione percentuale per una lunghezza di frame pari a 50 ms e 30 ms. Questi intervalli temporali corrispondono approssimativamente ad una pausa intersillabica in un parlato normale. I periodi di voce e silenzio sono multipli di questi due intervalli e vengono rappresentati con degli istogrammi su una scala lineare. Per ognuno di questi, sono state calcolate le occorrenze totali ossia il numero totale di eventi della stessa lunghezza di tempo all'interno del monitoraggio.

Sono stati scelti dei periodi multipli di 30 ms per il Voice-Care e multipli di 50 ms per l'APM.

I risultati hanno mostrato che per i professionisti della voce, monitorati unicamente con il Voice-Care, la distribuzione dei periodi nelle diverse camere non variava per i periodi di pausa in cui il maggior numero di occorrenze si aveva per una durata pari a 90 ms, mentre per i periodi di voce si sono notate delle differenze: il maggior numero di occorrenze si aveva per tratti pari a 90 ms nel caso dei monitoraggi in camera anecoica ed aumentava con il tempo di riverbero arrivando ad un valori pari a 120 ms per la camera semi-riverberante e a 150 ms per quella riverberante.

Per i non professionisti, in entrambe le camere, si aveva lo stesso valore per i periodi di voce e silenzio: in quelli monitorati con Voice-Care, il maggior numero di occorrenze era pari a 60 ms per i periodi di pausa ed a 90 ms per quelli di voce, mentre in quelli monitorati con l'APM si avevano valori rispettivamente pari a 50 ms e 100 ms. La differenza per i non professionisti sta quindi unicamente nella diversa lunghezza di periodo base scelta nei due casi [21].

Questi risultati evidenziano come l'aumento del tempo di riverberazione porta all'aumento dei periodi di fonazione, ma anche alla diminuzione di quelli di silenzio (si fanno meno pause); questo è probabilmente dovuto anche alla percezione di una maggiore fatica dal punto di vista vocale in questi casi.

La stessa analisi di periodi di voce e silenzio è stata fatta anche per i soggetti coinvolti nel monitoraggio in questa tesi. È stato scelto un periodo pari a 46.4 ms perché è questo uno

dei valori con cui il Vocal Holter fornisce in uscita i risultati. Si sono considerati quindi quante occorrenze assolute e poi relative (dividendo le assolute per il totale delle occorrenze) si avevano in corrispondenza di ogni frame da 46.4 ms di voce e silenzio. Successivamente, sono state invece calcolate le accumulazioni di voce e silenzio moltiplicando le occorrenze assolute per il frame di tempo corrispondente e moltiplicando ancora per 0.001 per riportare il risultato in secondi. Queste accumulazioni di silenzio e voce sono state visualizzate in funzione del tempo, per ogni frame di 46.4 ms.

Infine, è stato calcolato anche il tempo di fonazione percentuale dividendo la somma delle accumulazioni di voce per le accumulazioni totali (voce più silenzio) ed il risultato è stato moltiplicato per 100.

Tutto questo è stato eseguito sia per la *baseline* che per le due lezioni eseguite da ogni soggetto.

3. ANALISI DEI RISULTATI

3.1 Parametri estratti dalla vocale /a/

I parametri estratti dal Vocal Holter e relativi ai segnali vocali dei soggetti monitorati sono stati analizzati singolarmente o anche in correlazione con altri parametri.

Innanzitutto, dalla vocale /a/ sostenuta si sono ricavati i valori dei parametri corrispondenti per ogni soggetto, che sono riassunti nella tabella 3.1 per i docenti del Politecnico e nella tabella 3.2 per gli insegnanti della scuola primaria.

	Frequenza fondamentale [hz]	Jitter [%]	Shimmer [%]	CPPS (medio) [dB]	CPPS (deviazione tipo) [dB]
00M	127,3	0,26	2,63	19,5	1,11
01F	203,2	0,21	1,38	17,3	0,72
01M	101,5	0,82	2,61	17,8	2,58
02F	174,6	0,34	1,61	18,2	2,08
03M	111,6	0,33	1,70	18,8	0,99
03F	178,7	0,29	1,20	18,0	1,73
03M	112,3	0,32	2,99	17,4	1,22
05M	94,9	0,47	3,34	16,9	1,66
06F	162,3	0,47	2,89	16,3	1,07
06M	125,3	0,31	1,59	19,2	1,16
07M	113,8	0,31	2,90	18,5	1,22
08M	154,9	0,21	1,34	18,0	0,8
09M	145,9	0,23	1,35	19,3	0,84
Media	138,9	0,35	2,10	18,1	1,32
Deviazione tipo	32,3	0,15	0,70	0,9	0,52

Tabella 3.1: Valori dei parametri della vocale /a/ ricavati dal Vocal Holter per i docenti del Politecnico.

	Frequenza fondamentale [Hz]	Jitter [%]	Shimmer [%]	CPPS(medio) [dB]	CPPS (deviazione tipo) [dB]
01MSM	129,4	0,29	2,82	16,6	1,29
01FSM	255,7	0,16	1,68	16,2	0,85
02FSM	229,8	0,37	3,11	16,0	0,98
03FSM	190,8	0,17	1,09	18,6	1,02
04FSM	166,0	0,54	3,46	19,1	1,62
05FSM	154,9	0,32	2,17	17,2	0,89
06FSM	197,4	0,28	1,49	16,4	0,85
Media	189,1	0,30	2,26	17,2	1,07
Deviazione tipo	40,4	0,11	0,82	1,1	0,26

Tabella 3.2: Valori dei parametri della vocale /a/ ricavati dal Vocal Holter per gli insegnanti della scuola primaria.

Dalle tabelle, l'unica differenza che si nota è per il parametro della prima riga; infatti, si può notare come i soggetti della scuola primaria abbiano delle frequenze fondamentali più alte rispetto ai docenti universitari; questo è confermato anche dalla rispettiva media e deviazione standard. Gli altri 4 parametri hanno invece dei range che sono abbastanza simili nei due casi, sia per la media che per la deviazione standard: il jitter, la media di CPPS e la sua deviazione standard sono parametri leggermente superiori per i docenti universitari rispetto ai maestri; viceversa, lo shimmer ha una media ed una deviazione standard un po' più grande per questi ultimi.

3.2 Andamento nel tempo dei parametri e confronti tra di loro

Per ogni soggetto, è stato anche costruito un grafico nel tempo per ciascuno dei parametri estratti dal Vocal Holter. I parametri sono 18; per questioni di comodità e di più facile visualizzazione sono stati suddivisi in tre grafici contenenti ognuno l'andamento nel

tempo di sei parametri presi dalle colonne del file, per la baseline, la lezione 1 e la lezione 2.

Considerando un qualsiasi docente universitario, di seguito nel grafico 3.1 si ha la rappresentazione grafica nel tempo dei primi 6 parametri che sono la batteria, la temperatura, l'umidità, il rumore di fondo BNL al 90° percentile, al 75° percentile ed al 50° percentile:

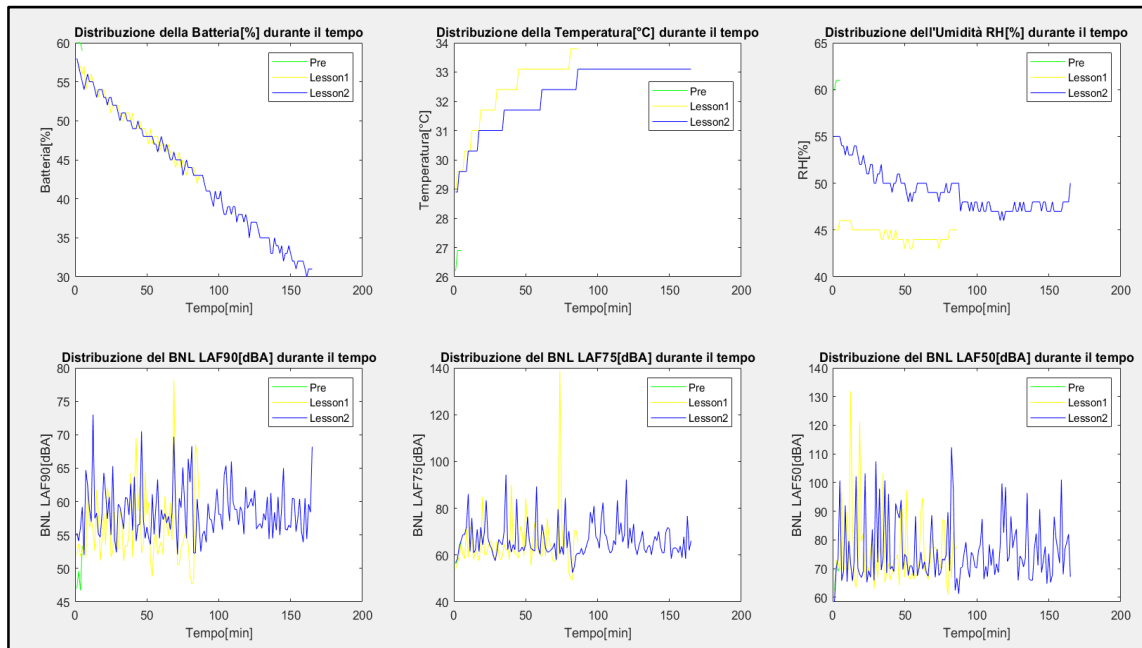


Grafico 3.1: Andamento nel tempo dei primi 6 parametri del file tabulato ogni 1.15 minuti ottenuto dal Vocal Holter per il soggetto 00M.

Come si può notare, la batteria diminuisce nel tempo perché si sta utilizzando il dispositivo per il monitoraggio. La temperatura invece aumenta sempre, ma non è un parametro a cui si può fare affidamento, in quanto il sensore di temperatura risente del riscaldamento interno del dispositivo.

Le statistiche del rumore di fondo si assestano intorno a determinati range, tranne qualche picco un po' più alto nelle lezioni dovuto ad un rumore di fondo incrementato a causa probabilmente del brusio degli studenti durante l'intervallo.

La *baseline*, anche nei successivi grafici, è solo un piccolissimo tratto iniziale perché la sua durata è di pochi minuti rispetto a quella delle lezioni.

Il grafico 3.2 riporta l'andamento nel tempo dei parametri dalla colonna 7 alla colonna 12 per il soggetto 00M

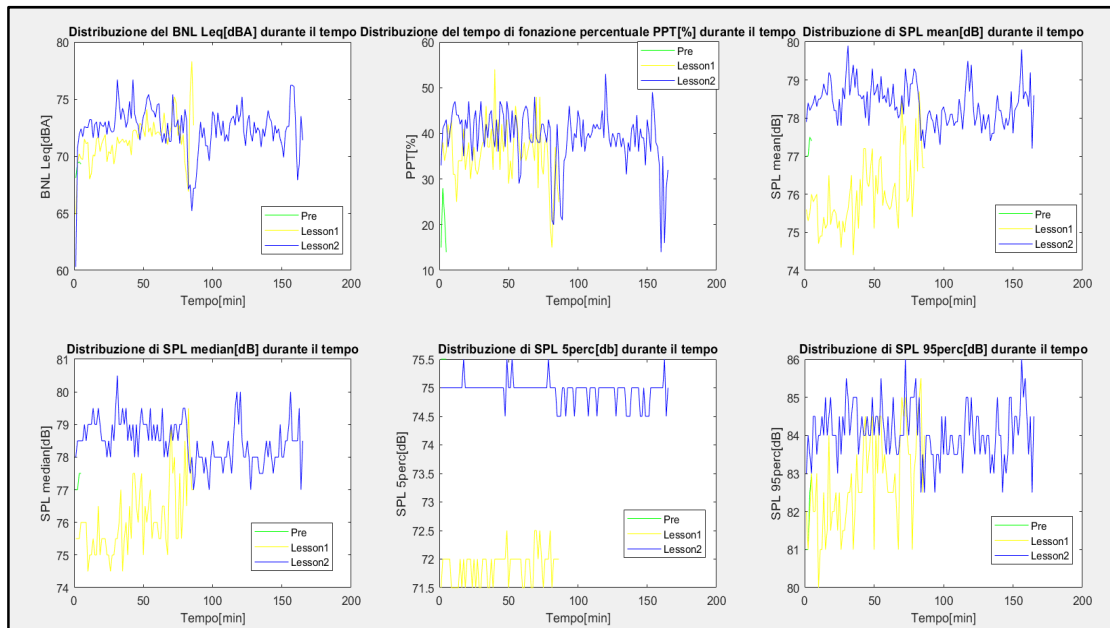


Grafico 3.2: Andamento nel tempo dal 7° al 12° parametro del file tabulato ogni 1.15 minuti ottenuto dal Vocal Holter per il soggetto 00M.

In questo caso, si sono visualizzati il rumore di fondo equivalente, il tempo di fonazione percentuale ed il valore del livello di pressione sonora SPL per diverse sue statistiche, quali la media, la mediana, il 5° ed il 95° percentile. I valori di SPL in questo caso sono quelli ad una distanza tra parlatore ed ascoltatore pari a 22 cm: si notano maggiori valori per la lezione 2 rispetto alla 1 e questo indica che il docente avrà spiegato utilizzando un tono di voce differente nelle due lezioni.

Nel grafico 3.3 si ha la rappresentazione nel tempo degli ultimi 6 parametri presenti nel file, che sono la deviazione tipo dell'SPL e le cinque statistiche di f_0 , quali media, mediana, 5° e 95° percentile e deviazione tipo.

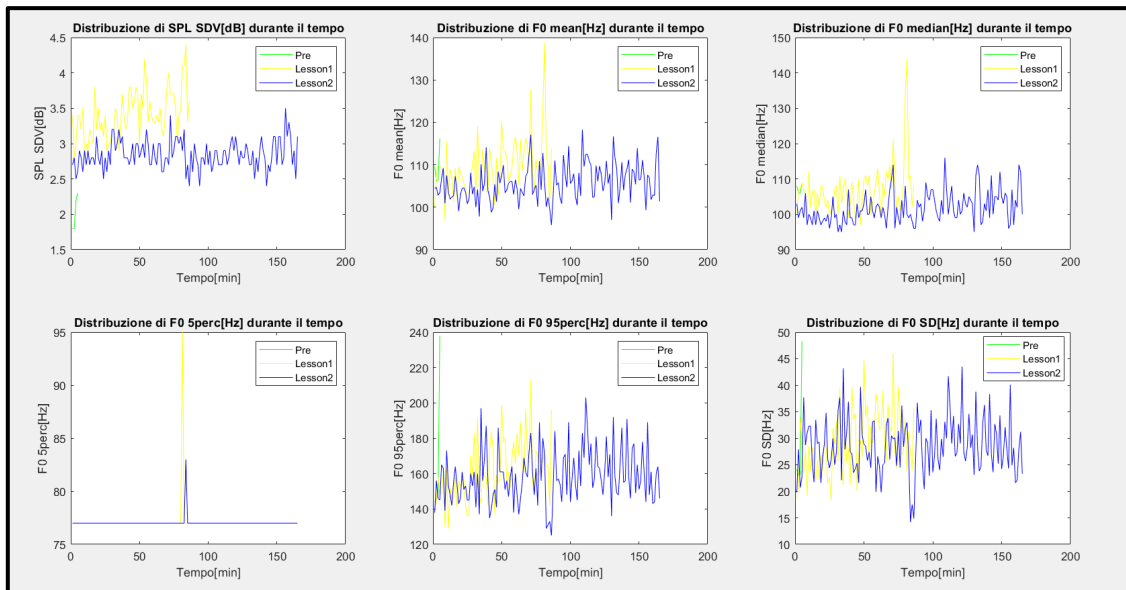


Grafico 3.3: Andamento nel tempo degli ultimi 6 parametri del file tabulato ogni 1.15 minuti ottenuto dal Vocal Holter per il soggetto 00M.

In questo caso, l'unica particolarità è nel 5° percentile della f_0 : in entrambe le lezioni per tutta la durata, escluso un unico punto, si è ottenuto lo stesso valore assoluto. La differenza nell'unico punto è visibile nel differente picco che si ha per i 2 casi. Inoltre, la *baseline* è coperta dalle lezioni. Questo è uno dei pochi soggetti che ha avuto questo tipo di andamento mentre nella maggioranza degli altri casi si sono ottenuti valori un po' differenti da un'istante di tempo all'altro.

Gli stessi grafici sono stati ottenuti anche per gli insegnanti della scuola primaria, per i quali si riporta l'esempio del soggetto 04FSM nel grafico 3.4.

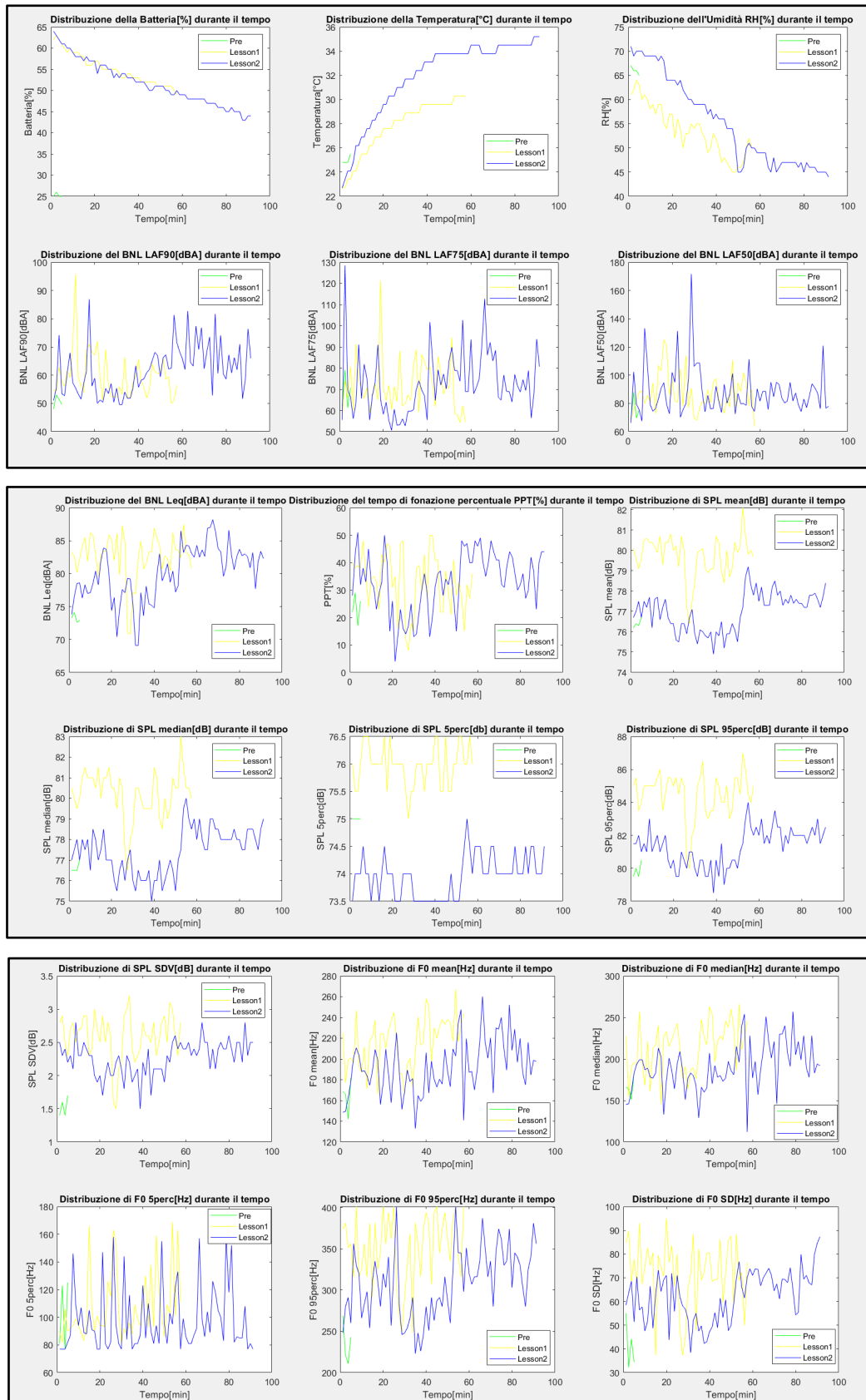


Grafico 3.4: Andamento nel tempo dei parametri ottenuti dal file tabulato ogni 1.15 minuti del Vocal Holter per un soggetto della scuola primaria per il soggetto 04FSM.

In questo caso, si può notare il rumore di fondo molto più elevato rispetto al caso del docente universitario poiché il comportamento in classe durante le spiegazioni è differente tra ragazzi e bambini. Inoltre, in questo caso è stato usato un tono della voce più alto nella lezione 1 rispetto alla 2, al contrario del caso analizzato in precedenza. Il tempo di fonazione percentuale della maestra è invece a tratti più basso rispetto a quello del docente universitario perché la modalità di spiegazione nei due casi è differente. Infine, si può vedere la differenza nel 5° percentile della frequenza fondamentale.

Procedendo nel confronto dei parametri a coppie, per ogni soggetto studiato si è analizzato nel tempo, per la baseline e per le due lezioni, sia l'andamento di SPL mean a 22 cm che quello del rumore di fondo stimato al 90° percentile BNL LAF90. Nella maggioranza dei casi, si è riscontrato che l'andamento del SPL non variava molto per l'intera durata dei monitoraggi, come evidenziato nel grafico 3.5, che si riferisce al soggetto 00M.

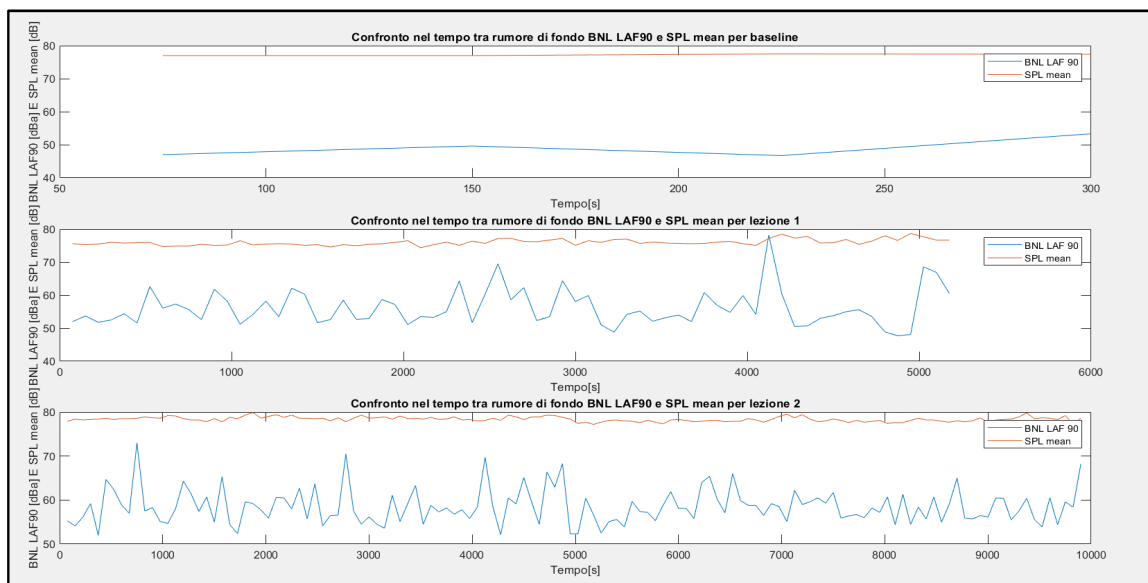


Grafico 3.5: Confronto per il soggetto 00M tra SPL mean e BNL LAF90 per baseline, lezione 1 e lezione 2 in un caso normale.

La stessa cosa è stata fatta nel grafico 3.6 confrontando anche l'andamento della media di f_0 rispetto al rumore di fondo BNL LAF 90:

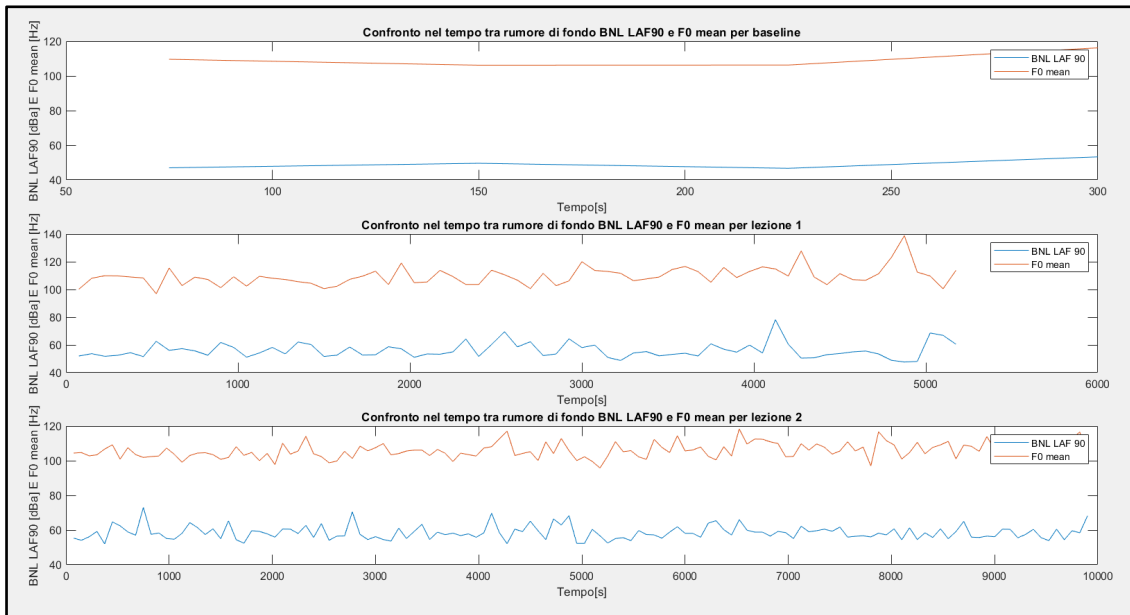


Grafico 3.6: Confronto per soggetto 00M tra FO mean e BNL LAF90 per baseline, lezione 1 e lezione 2 in un caso normale.

Un soggetto rappresentativo di un andamento dell'SPL mean un po' più fluttuante è il 01M, i cui parametri sono rappresentati nei grafici 3.7 e 3.8: nella baseline, c'è stato probabilmente qualche problema con il rumore perché essa generalmente è stata svolta in condizioni di comfort e silenzio, spesso nell'ufficio del docente specifico. Inoltre, soprattutto nella lezione due si possono notare delle derive verso il basso per l'SPL mean abbastanza evidenti in zone in cui il rumore di fondo si presentava abbastanza stabile.

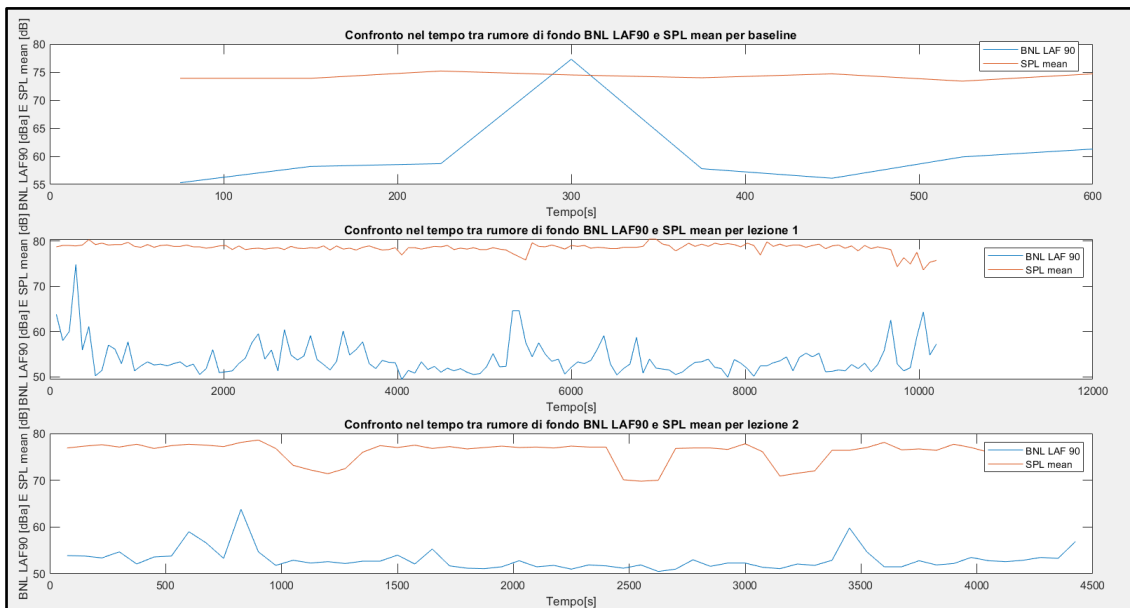


Grafico 3.7: Confronto tra SPL mean e BNL LAF90 per baseline, lezione 1 e lezione 2 per il soggetto 01M.

Allo stesso modo, considerando per questo soggetto l'andamento della relazione tra la media di f_0 e il rumore di fondo (90° percentile) si ha un andamento in cui la frequenza sembra invece comportarsi correttamente, ad eccezione dell'eccessivo picco finale nella lezione 1.

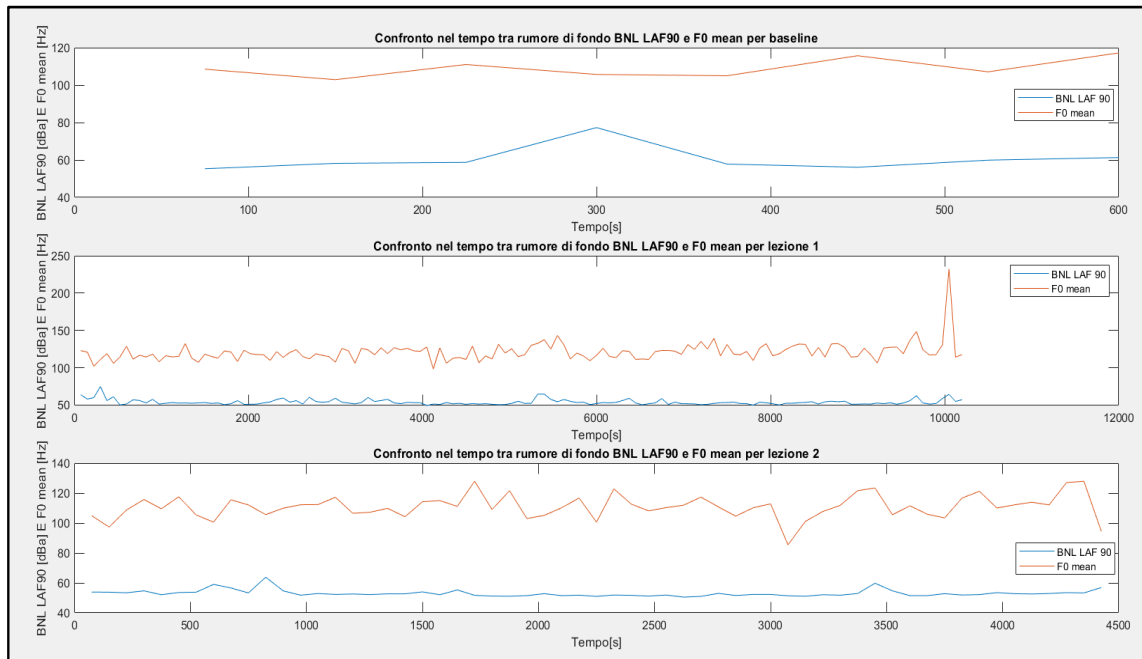


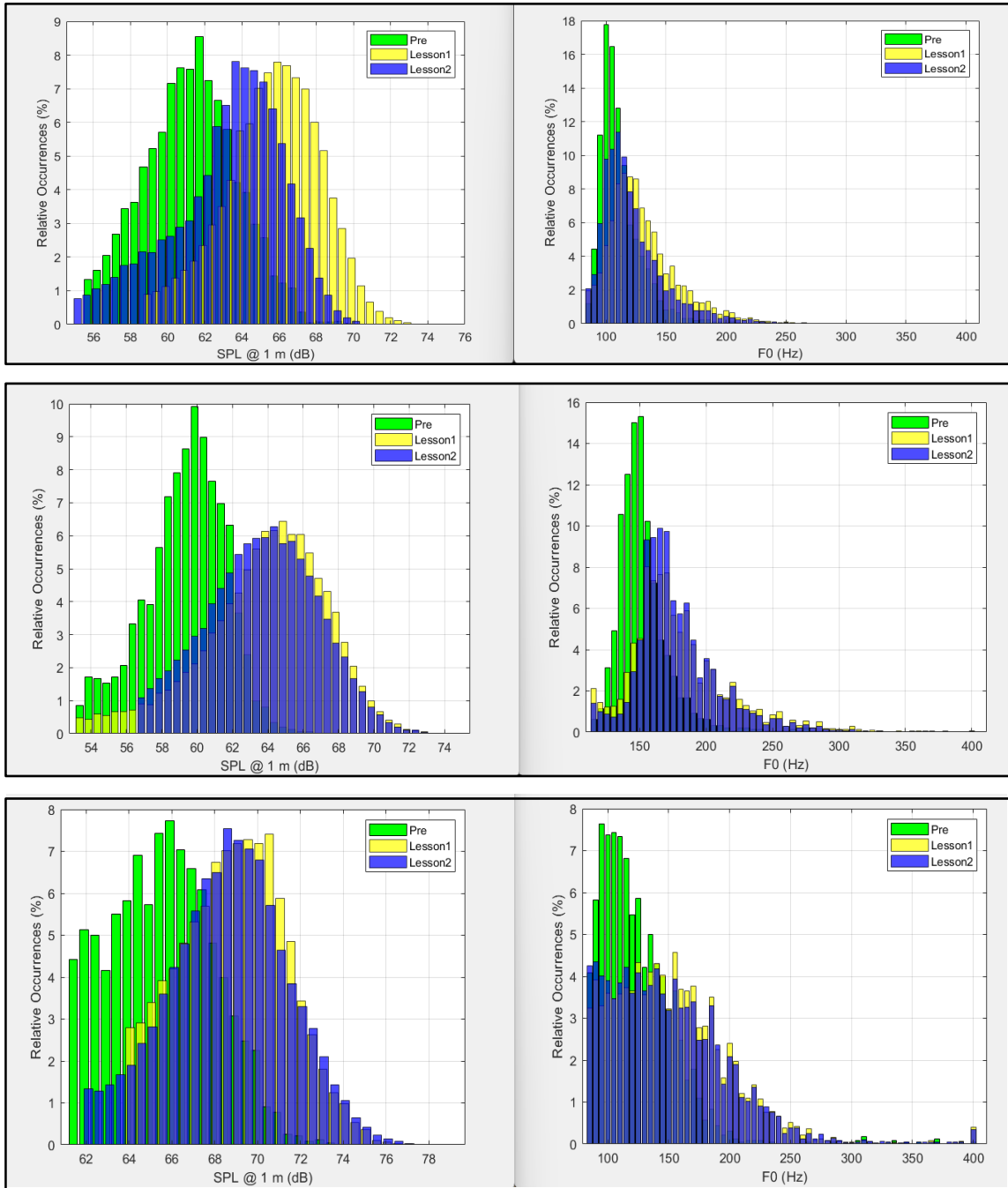
Grafico 3.8: Confronto tra f_0 mean e BNL LAF90 per baseline, lezione 1 e lezione 2 per il soggetto 01M.

Quindi, l'anomalia che in questo soggetto si presentava per l'SPL mean non è invece così accentuata per f_0 mean.

3.3 I parametri SPL e f_0

Il livello di pressione sonora SPL e la frequenza fondamentale f_0 sono i principali parametri che sono stati studiati, analizzati e visualizzati. In particolare, il file ottenuto dal Vocal Holter per ogni frame di circa 46.4 ms contiene unicamente due colonne: la prima rappresenta f_0 (espressa in Hz) e la seconda SPL (espresso in dB). Da questo file sono state eliminate le righe che presentavano un valore di frequenza fondamentale inferiore ad una certa soglia fissata: 80 per gli uomini e 110 per le donne. Si è poi riportato

l'SPL da una distanza di 22 cm rispetto ad un ascoltare ad una di 1 m, utilizzando la formula (7). A questo punto, si sono rappresentati SPL e f_0 in funzione delle occorrenze relative (in percentuale) tramite un istogramma che considerasse in contemporanea la *baseline*, la lezione 1 e la lezione 2. Ogni valore di frequenza e livello di pressione sonora è mostrato con la percentuale corrispondente con cui si è presentato nel corso del monitoraggio specifico. Nel grafico 3.9, sono visualizzati alcuni degli istogrammi ottenuti dai vari soggetti:



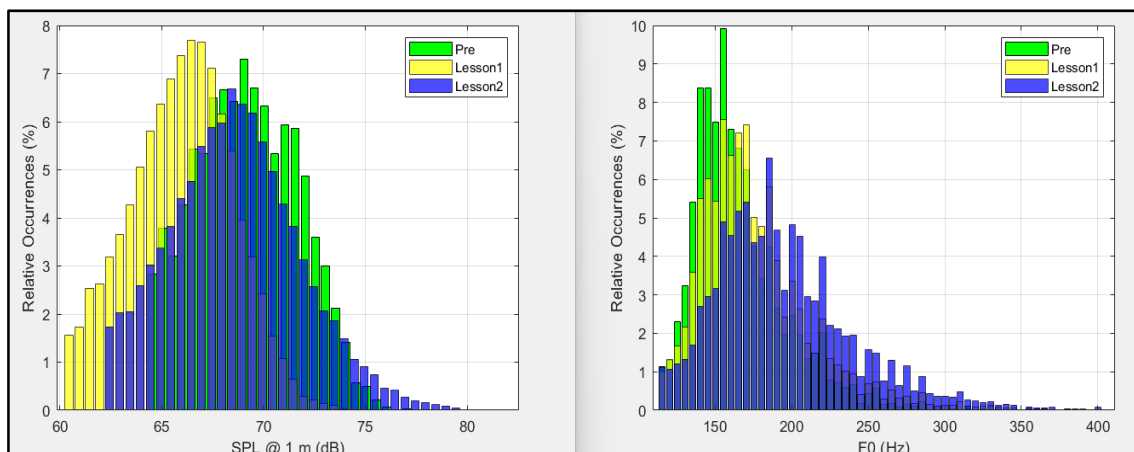


Grafico 3.9: Istogrammi di occorrenze relative di SPL e f_0 per 2 docenti universitari e 2 insegnanti della scuola primaria, rispettivamente un uomo e una donna per ognuno.

Nell'ordine si ha 01M, 03F, 01MSM e 03FSM.

Come si può notare, in genere l'istogramma delle lezioni è sempre leggermente spostato verso destra rispetto a quello della baseline. I valori dell'SPL sono compresi tra circa 50 dB e 80 dB, mentre le frequenze partono dagli 80 Hz per gli uomini e dai 110 Hz per le donne per la scelta precedentemente imposta della soglia. Si hanno valori di SPL e FO un po' più alti per i docenti della scuola primaria rispetto ai docenti universitari probabilmente perché essi tendono a spiegare tenendo un tono di voce più alto.

Per ogni soggetto sono state calcolate alcune statistiche per i due parametri f_0 e SPL a 1 m, che sono media, mediana, deviazione tipo, 5° e 95° percentile. In questo modo, si è potuto confrontare il valore calcolato tramite le elaborazioni fatte su Matlab con quello fornito dal dispositivo Vocal Holter all'interno del file tabulato ogni 75 secondi.

Per la baseline si hanno le tabelle 3.3 e 3.4:

	SPL media [dB]	SPL mediana [dB]	SPL deviazione tipo [dB]	SPL 5°percentile [dB]	SPL 95° percentile [dB]
00M	64,3	63,8	2,0	62,0	68,3
01F	61,9	61,6	2,8	58,0	67,0
01M	61,4	61,5	2,6	57,0	65,5
02F	55,6	54,9	2,7	52,6	61,2
02M	63,7	64,0	3,0	58,6	68,6
03F	59,5	59,8	2,4	54,7	62,8

03M	69,3	69,5	2,6	64,7	73,2
05F	59,8	59,9	3,7	53,2	65,5
06F	58,6	58,5	3,4	53,5	64,4
06M	61,6	61,5	2,7	57,5	66,3
07M	65,5	65,5	2,5	61,5	69,7
08M	67,4	67,1	1,5	65,6	70,1
09M	60,9	60,7	2,1	57,7	64,4
01MSM	65,6	65,7	2,5	61,6	69,9
01FSM	64,9	64,9	2,0	61,8	68,2
02FSM	63,7	63,6	2,2	60,7	67,6
03FSM	69,3	69,3	2,6	65,1	73,5
04FSM	64,3	63,8	2,0	62,0	68,3
05FSM	64,3	64,3	2,5	60,4	68,4
06FSM	64,0	63,9	1,3	62,1	66,3

Tabella 3.3: Statistiche di SPL dei vari soggetti per la baseline.

	<i>f₀</i> media [Hz]	<i>f₀</i> mediana [Hz]	<i>f₀</i> deviazione tipo [Hz]	<i>f₀</i> 5° percentile [Hz]	<i>f₀</i> 95° percentile [Hz]
00M	115	111	26	86	166
01F	195	175	40	145	259
01M	114	109	19	94	147
02F	118	174	25	150	221
02M	125	118	36	87	182
03F	155	151	22	131	190
03M	109	106	20	83	146
05F	94	92	13	81	115
06F	192	58	37	146	259
06M	126	122	23	100	171
07M	128	108	37	85	176
08M	140	140	32	87	193
09M	113	108	23	89	151
01MSM	123	117	34	83	174

01FSM	216	214	47	121	294
02FSM	249	223	65	115	320
03FSM	167	161	32	129	227
04FSM	115	111	26	86	150
05FSM	197	192	51	118	294
06FSM	163	155	1	121	231

Tabella 3.4: Statistiche di FO dei vari soggetti per la baseline.

Per la lezione 1 si hanno le tabelle 3.5 e 3.6:

	SPL media [dB]	SPL mediana [dB]	SPL deviazione tipo [dB]	SPL 5°percentile [dB]	SPL 95° percentile [dB]
00M	62,9	62,3	3,5	58,4	69,6
01F	65,1	65,7	3,8	57,7	70,2
01M	65,8	66,1	2,7	60,9	69,9
02F	62,8	61,9	4,0	57,9	70,9
02M	69,6	70,1	3,1	82,6	73,8
03F	64,0	64,5	3,6	57,1	69,1
03M	67,3	67,5	3,1	61,9	72,0
05F	65,4	59,9	2,4	61,2	69,1
06F	64,2	63,9	2,1	61,3	68,0
06M	65,7	65,4	1,2	64,4	68,0
07M	69,1	69,4	3,2	63,5	74,1
08M	67,9	68,1	3,6	61,7	73,6
09M	59,3	59,5	2,7	54,5	63,5
01MSM	69,0	69,2	2,6	64,6	69,9
01FSM	66,2	64,9	3,3	60,9	68,2
02FSM	64,6	64,3	3,3	60,0	70,5
03FSM	66,1	69,3	2,6	61,5	70,2
04FSM	62,9	62,3	3,5	58,4	69,6
05FSM	61,3	61,3	4,5	54,0	68,8
06FSM	68,8	69,0	3,1	63,3	73,2

Tabella 3.5: Statistiche di SPL dei vari soggetti per la lezione 1.

	f_0 media [Hz]	f_0 mediana [Hz]	f_0 deviazione tipo [Hz]	f_0 5°percentile [Hz]	f_0 95° percentile [Hz]
00M	117	111	28	86	166
01F	195	192	57	115	294
01M	132	127	31	90	192
02F	207	206	52	118	298
02M	150	135	61	83	272
03F	180	174	40	120	256
03M	118	112	3	63	72
05F	114	109	27	85	159
06F	233	227	46	166	315
06M	165	158	48	97	240
07M	128	108	44	84	206
08M	140	142	47	80	223
09M	123	115	31	85	187
01MSM	152	146	49	86	235
01FSM	228	223	63	125	339
02FSM	249	253	80	122	401
03FSM	178	171	37	130	248
04FSM	117	111	28	86	166
05FSM	207	193	68	119	356
06FSM	212	197	71	120	368

*Tabella 3.6: Statistiche di f_0
dei vari soggetti per la lezione 1.*

Per la lezione 2 si hanno le tabelle 3.7 e 3.8:

	SPL media [dB]	SPL mediana [dB]	SPL deviazione tipo [dB]	SPL 5°percentile [dB]	SPL 95° percentile [dB]
00M	65,3	64,9	2,9	61,5	70,7
01F	67,0	67,5	3,0	61,1	70,8
01M	63,4	64,0	3,1	57,3	67,7
02F	/	/	/	/	/
02M	68,2	68,8	3,1	61,8	72,3
03F	63,8	64,0	3,2	58,3	68,9
03M	67,8	68,0	2,5	63,4	71,8
05F	/	/	/	/	/
06F	244,8	227,7	2,5	62,4	70,5
06M	63,0	62,9	3,3	57,7	68,6
07M	71,2	71,4	1,9	67,7	74,1
08M	67,6	67,6	2,24	64,0	71,4
09M	63,3	63,3	2,15	59,8	66,8
01MSM	68,8	68,9	2,9	63,6	73,3
01FSM	67,0	67,1	3,0	61,8	71,7
02FSM	68,4	68,5	3,5	62,6	74,1
03FSM	68,7	68,7	3,2	63,4	74,3
04FSM	65,3	64,9	2,9	61,5	70,7
05FSM	59,8	59,6	4,2	53,5	67,0
06FSM	67,9	67,9	0,7	66,9	69,1

Tabella 3.7: Statistiche di SPL dei vari soggetti per la lezione 2. La ‘/’ indica che non si hanno dati perché la lezione non è stata svolta.

	f_0 media [Hz]	f_0 mediana [Hz]	f_0 deviazione tipo [Hz]	f_0 5°percentile [Hz]	f_0 95° percentile [Hz]
00M	114	108	28	84	166
01F	196	193	61	114	114
01M	123	117	29	88	179

02F	/	/	/	/	/
02M	148	134	59	82	266
03F	180	174	33	129	242
03M	119	113	30	84	168
05F	/	/	/	/	/
06F	245	223	72	166	401
06M	141	135	38	85	212
07M	127	115	43	83	214
08M	163	148	86	80	401
09M	130	119	40	89	220
01MSM	148	141	51	84	235
01FSM	222	212	64	125	350
02FSM	232	230	71	121	368
03FSM	196	189	46	131	283
04FSM	114	108	28	84	166
05FSM	208	147	63	121	345
06FSM	204	192	64	119	339

Tabella 3.8: Statistiche di f_0

dei vari soggetti per la lezione 2. La ‘/’ indica che non si hanno dati perché la lezione non è stata svolta.

3.4 Caratterizzazione acustica dei parametri

Non sono stati analizzati solo i docenti, ma anche le aule in cui è stata svolta ognuna delle due lezioni. I docenti sono stati scelti, tra quelli che si erano resi disponibili, tenendo conto dell’aula in cui essi avrebbero svolto la lezione. Questo per evitare di scegliere docenti che svolgessero lezioni in aule quasi tutte simili dal punto di vista acustico, perché altrimenti non si sarebbe potuto svolgere quest’ulteriore studio di caratterizzazione acustica.

Ogni aula è stata caratterizzata da vuota per poterne stimare meglio le sue effettive caratteristiche. I valori ricavati per ognuna sono il volume, il tempo di riverbero T_{20} ed il rumore di fondo equivalente BNL Leq.

Ogni stanza ha un tempo di riverbero ottimale ottenuto dal volume dell'aula tramite la seguente formula:

$$T_{20} = (0.37 \cdot \log V) - 0.14 \quad (9)$$

Il tempo di riverbero reale è invece ottenuto mediando i valori ottenuti dalle misure comprese tra 250 Hz e 2500 Hz secondo la definizione di T_{20} , considerando anche che per ogni frequenza le misure sono ottenute ponendosi in diverse postazioni all'interno dell'aula.

Tutti questi dati possono essere riassunti nella tabella 3.9.

AULA	VOLUME [m³]	T₂₀ MISURATO [s]	T₂₀ OTTIMALE [s]	RUMORE DI FONDO Leq [dBA]
1 B	793	1,69	0,93	37,2
5S	580	1,43	0,88	50,5
8C	/	/	/	/
13B	290	2,22	0,77	36,3
2N	490	0,98	0,86	45,5
5N	237	0,80	0,74	38,8
R4B	600	1,11	0,89	46,7
2I	351	0,84	0,80	44,3
3P	983	0,92	0,97	53,3
2P	983	1,02	0,97	53,1
2T	1115	2,88	0,99	41,9
9T	839	2,84	0,94	39,7

Tabella 3.9: Dati della caratterizzazione acustica delle aule del Politecnico di Torino oggetto di studio. La '/' indica che l'aula non si è riuscita a caratterizzare.

Osservando i risultati tabulati, si può notare che le aule ritenute adatte dal punto di vista acustico, poiché il loro valore del tempo di riverberazione misurato non si discosta troppo da quello ottimale, sono state, inserendo nell'ordine da quella che ha riportato una differenza tra i due valori più bassa alla più alta: 2I, 2P 3P, 5N, 2N e R4B. Le aule 2P e 3P sono uguali dal punto di vista acustico perché hanno la stessa differenza di tempo di

riverberazione tra quello ottimale e quello misurato. I docenti che hanno svolto le lezioni in queste aule sono quindi sicuramente stati ‘aiutati’ dalla presenza di buone caratteristiche acustiche ed avranno parlato con maggior probabilità facendo meno fatica. L’aula 8C non si è potuta caratterizzare dal punto di vista acustico a causa della presenza al suo esterno di lavori in corso. Per questo motivo, la docente 01F che ha svolto entrambe le sue lezioni in quest’aula non è stata inserita nei grafici che si basavano sul tempo di riverberazione.

Anche per quanto riguarda le aule della scuola di San Marzano non è stato possibile costruire dei grafici e procedere nello stesso modo; in questo caso, il motivo principale è rappresentato dall’impossibilità di reperire dall’Università gli strumenti necessari per poter fare le misure. Per questa ragione, sono state solamente analizzate tutte e cinque le aule presenti nella scuola ottenendo per ognuna unicamente il corrispondente valore di volume.

I dati ottenuti sono stati i seguenti:

AULA	1^G	2^G	3^G	4^G	5^G
VOLUME [m ³]	111	250	230	156	192

Tabella 3.10: Volumi delle aule della scuola primaria di San Marzano Oliveto.

A questo punto, sono stati eseguiti dei confronti tra i due parametri acustici più importanti, ossia rumore di fondo e tempo di riverberazione, ed i due parametri vocali principali che sono la frequenza fondamentale f_0 ed il livello di pressione sonora SPL.

I confronti sono stati fatti in modo puntuale calcolando il valore medio di ognuno dei due parametri per *baseline*, lezione 1 e lezione 2. Si è quindi preso il valore medio dei parametri di ogni soggetto e si è rappresentato ogni soggetto con un unico punto sul grafico corrispondente ai valori medi dei due parametri studiati. A questo punto, poiché la *baseline* di ogni individuo è stata eseguita nelle condizioni di massimo comfort e silenzio ed essa ha un andamento specifico e differente per ognuno, si sono calcolate le differenze tra ognuna delle due lezioni e la *baseline*. In questo modo si è quindi minimizzata la soggettività ed è stato più facile fare confronti.

Inoltre, anche per il rumore di fondo è stata fatta un’operazione di media in modo tale da lavorare puntualmente. È stato calcolato il valore medio del rumore di fondo di ogni soggetto in modo tale da ottenere un unico valore di rumore che rappresentasse ogni soggetto ed avere una visione globale basandosi solo sui singoli valori medi di ognuno.

In questo caso, non è stato utilizzato il valore di Leq misurato e tabulato nella tabella 11 che è già un valore medio, ma è stato adoperato quello misurato dal Vocal Holter con la statistica del 90° percentile, ossia il BNL LAF90 per il quale è stata poi ancora fatta poi fatta la media dell'intera colonna. Prima di eseguire l'operazione di media, sono stati però eliminati tutti i valori che erano inferiori al 5° percentile del rumore, perché essi erano troppo dispersi rispetto agli altri e rendevano la rappresentazione grafica più confusionaria. Infine, anche in questo caso si sono plottati i valori dei punti che corrispondevano alla differenza tra il valore della lezione specifica e quello della *baseline*. Per ognuno dei grafici ottenuti in questi casi è stato inoltre identificato un modello lineare che si adattasse al meglio ai dati sperimentali presenti nel grafico mediante la funzione di Matlab '*polyfit*'. Il risultato ottenuto è stato sovrapposto al grafico corrispondente.

Un primo confronto svolto è stato quello tra rumore di fondo e SPL.

Nei grafici dal 3.10 alla 3.16 ogni soggetto è rappresentato con un simbolo differente di colore giallo per i valori ottenuti dalla differenza tra la lezione 1 e la baseline e di colore blu per quelli tra la lezione 2 e la baseline.

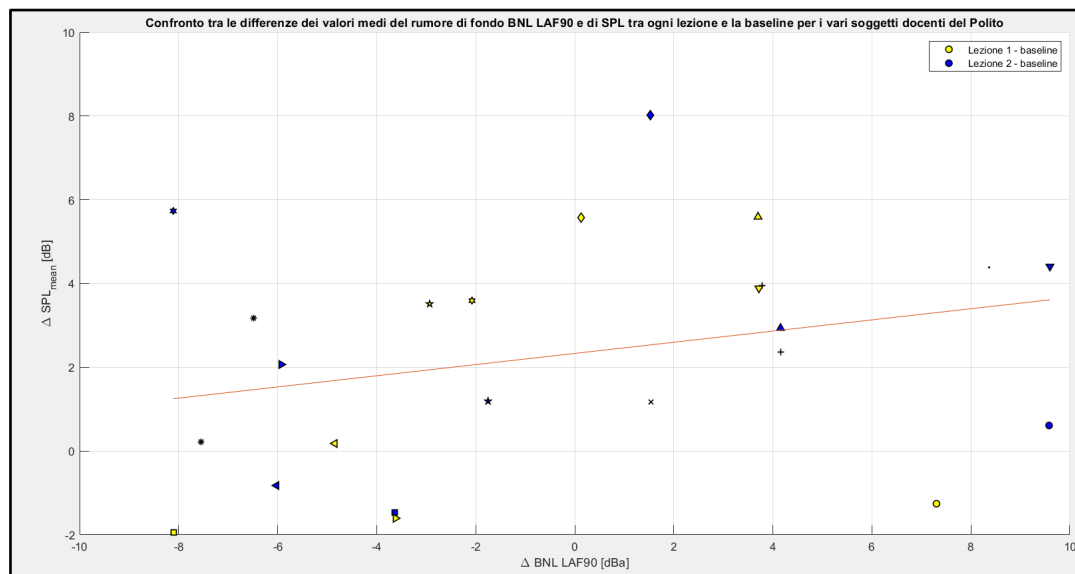


Grafico 3.10: Grafico che confronta le differenze tra ogni lezione e la baseline in funzione del rumore di fondo medio e dell'SPL medio per i docenti del Politecnico.

In questo caso, si hanno due docenti che sono stati monitorati unicamente per la lezione 1 e la *baseline*; per questo motivo, nel grafico, si ha solo una 'x' e un '.'. Tutti gli altri, sono invece presenti due volte con il colore corrispondente.

Dalla retta costruita interpolando i punti utilizzando la funzione lineare di Matlab denominata '*Polyfit*', è evidente che all'aumentare del rumore di fondo presente

all'interno dell'aula aumenta anche il livello di pressione sonora richiesto da parte del docente. In particolare, in questo caso, si ha un aumento della variazione di SPL pari a 0.13 dB per ogni variazione di BNL pari a 1 dBA.

Lo stesso andamento è visibile anche nel grafico 3.10 costruito allo stesso modo per gli insegnanti della scuola primaria. In questo caso, ognuno dei soggetti monitorati ha svolto entrambe le lezioni e quindi per ogni simbolo si ha sia il colore giallo che blu. In questo caso, si ha un aumento della variazione di SPL pari a 0.09 dB per ogni variazione di BNL pari a 1 dBA: l'aumento è quindi leggermente più lento rispetto a quello per i docenti universitari.

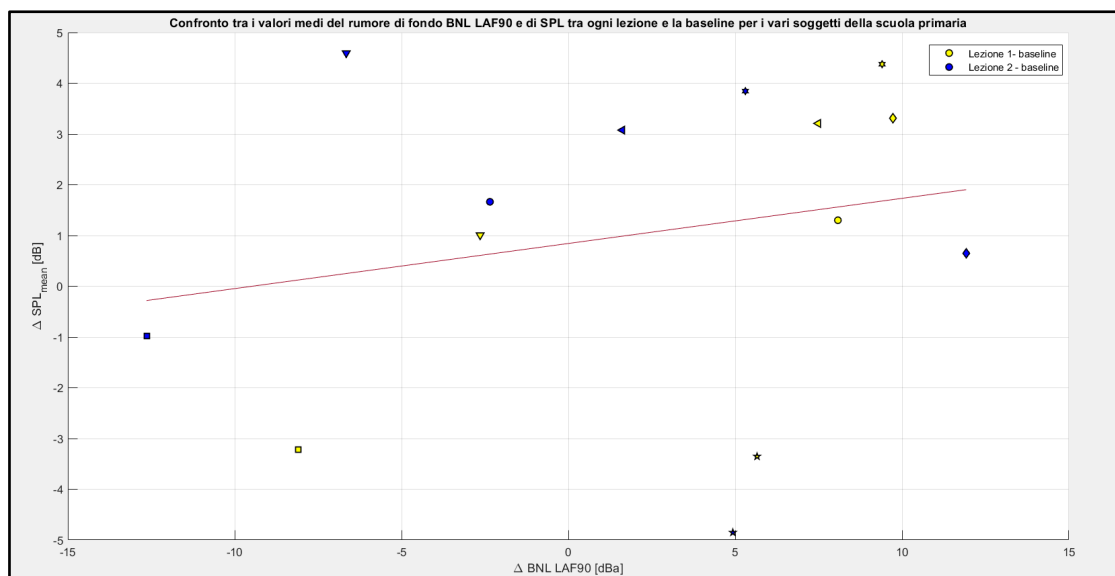


Grafico 3.11: Grafico che confronta le differenze tra ogni lezione e la baseline in funzione del rumore di fondo medio e dell'SPL medio per gli insegnanti della scuola primaria di San Marzano Oliveto.

Il rumore di fondo è stato anche confrontato con la frequenza fondamentale f_0 seguendo la stessa metodologia di rappresentazione dell'SPL. I risultati ottenuti, rispettivamente, per docenti universitari ed insegnanti della scuola primaria sono rappresentati nei grafici 3.11 e 3.12: nel primo caso c'è stato un aumento di 0.09 Hz per ogni incremento della variazione di rumore pari a 1 dBA, mentre nel secondo caso tale aumento è stato molto più evidente e pari a 0.5 dB, come confermano anche i due grafici.

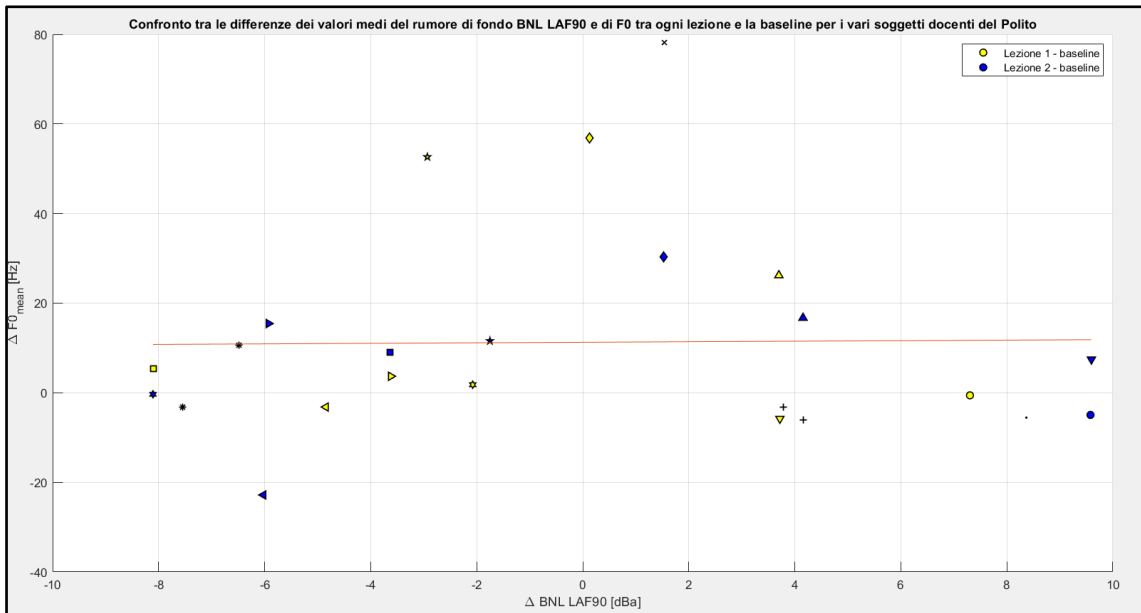


Grafico 3.12: Grafico che confronta le differenze tra ogni lezione e la baseline in funzione del rumore di fondo medio e della f_0 media per i docenti del Politecnico.

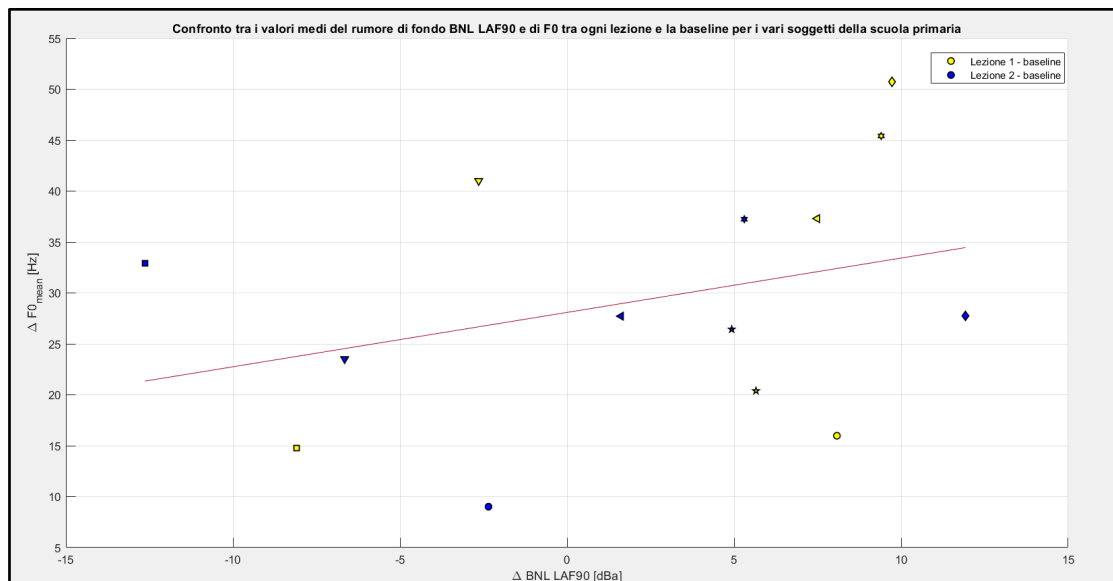


Grafico 3.13: Grafico che confronta le differenze tra ogni lezione e la baseline in funzione del rumore di fondo medio e della f_0 media per gli insegnanti della scuola primaria di San Marzano Oliveto.

Anche nel confronto tra rumore di fondo e frequenza fondamentale è visibile lo stesso andamento della retta ossia una tendenza ad aumentare la propria frequenza con l'aumentare del rumore di fondo interno all'aula. La pendenza della retta per i docenti

universitari è però molto bassa e quasi nulla a differenza di quella visibile per i maestri. Questo è dovuto alla presenza di una minore dispersione di dati nel primo caso, indice che la differenza di frequenza tra le lezioni e la baseline dei professori, variando il rumore, si attesta all'incirca intorno allo stesso range di valori cioè tra circa -10 Hz e 20 Hz, tranne pochi casi in cui tale differenza si colloca intorno a -20 Hz, 60 Hz e 80 Hz.

Sempre a dimostrazione di quanto sia importante analizzare i valori non solo da un punto di vista vocale, ma anche acustico, sono stati effettuati grafici mettendo in confronto il tempo di riverberazione misurato nelle varie aule con l'SPL medio e l' f_0 medio considerando sempre la differenza ottenuta tra ognuna delle due lezioni e la rispettiva baseline per ogni soggetto. Come anticipato in precedenza, questi grafici sono stati costruiti unicamente per i docenti del Politecnico di Torino di cui si avevano tutti i dati necessari.

In questo caso, si è sempre utilizzando il comando di Matlab polyfit, ma non più di ordine 1 come nei casi precedenti, ma di ordine 2 in modo tale da generare una parabola che rappresentasse meglio i dati sperimentali ottenuti.

Anche in questi grafici ogni docente è stato indicato con un simbolo specifico ed un colore diverso per ogni lezione. È presente un'unica 'x' ed un solo simbolo di pentagramma perché questi soggetti son stati monitorati in una sola lezione. Ogni punto sulle ascisse rappresenta il tempo di riverbero misurato per ogni aula ed i valori in corrispondenza di una stessa ascissa ma diversa ordinata indicano i soggetti che hanno effettuato la lezione nella stessa aula. Spesso, uno stesso docente ha svolto lezione nella stessa aula come si può vedere dallo stesso simbolo di colore diverso presente lungo la stessa ascissa. Alcuni professori hanno però variato aula tra una lezione ed un'altra.

Infine, c'è anche un unico caso in cui due professori diversi hanno svolto lezione in una stessa aula e per questo a parità di ascisse si avranno anche due simboli differenti.

La rappresentazione grafica del confronto tra il tempo di riverbero e la variazione del livello di pressione sonora tra le lezioni e la baseline è visibile nel grafico 3.14 in cui si nota come all'aumentare del tempo di riverberazione aumenti anche il livello di pressione sonora medio ed in particolare dal grafico si nota che si ha un aumento di 1.67 dB ogni variazione del tempo di riverbero pari ad 1 secondo.

Dal grafico sottostante sembrerebbe ci sia un unico simbolo indicato con '.', ma in realtà la differenza tra i valori di SPL medi ottenuti per le due lezioni è molto piccola e quindi i due valori nel grafico tendono a sovrapporsi.

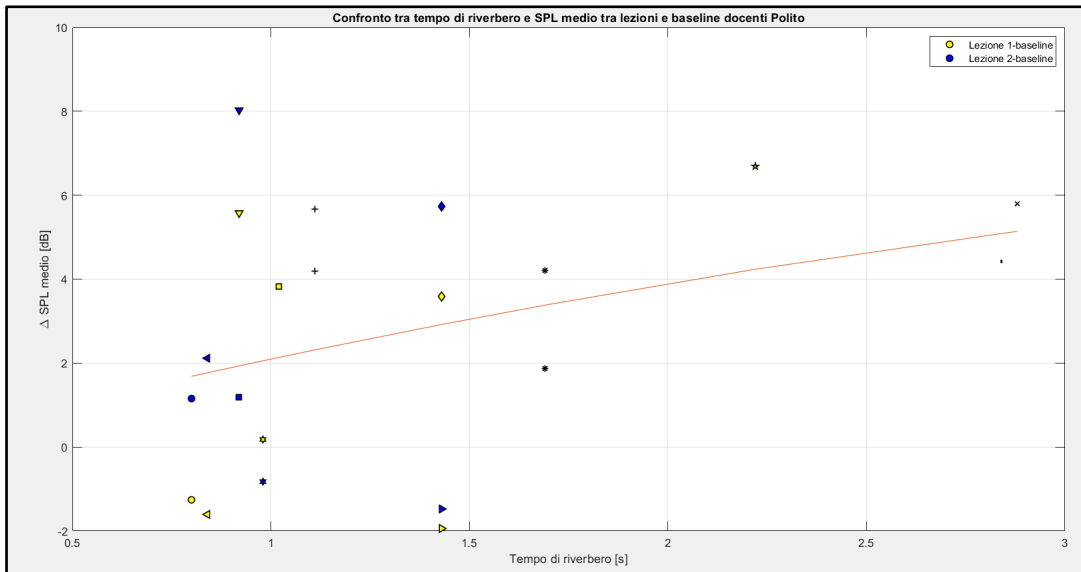


Grafico 3.14: Grafico che confronta le differenze tra ogni lezione e la baseline in funzione del tempo di riverbero e dell'SPL medio per i docenti del Politecnico di Torino.

La relazione tra il tempo di riverbero e la frequenza fondamentale è invece rappresentata da una sorta di retta decrescente contrariamente a quanto ci si aspetterebbe ed anche in questo caso il valore ottimale si colloca fuori dal grafico. La variazione è abbastanza rilevante poiché si ha una diminuzione della differenza tra i valori delle lezioni e la baseline pari a 3.27 Hz per ogni incremento del tempo di riverbero pari ad 1 secondo.

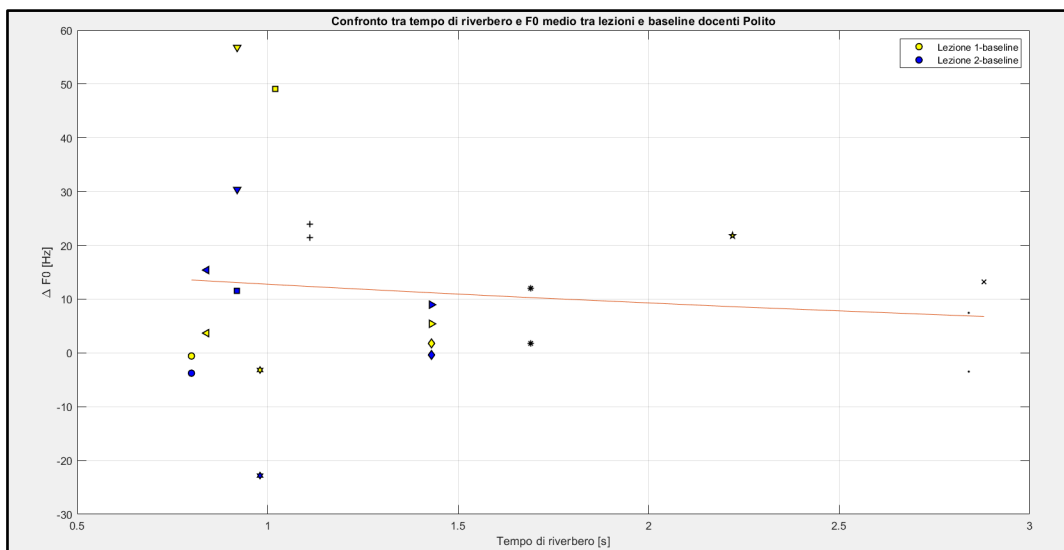


Grafico 3.15: Grafico che confronta le differenze tra ogni lezione e la baseline in funzione del tempo di riverbero e della f_0 media per i docenti del Politecnico di Torino.

Un ulteriore confronto è stato fatto sui due parametri importanti della caratterizzazione acustica ossia il tempo di riverbero ed il rumore di fondo per il 90° percentile. L'andamento ottenuto è rappresentato nel grafico 3.15; anche in questo caso è stato identificato un modello lineare che si adattasse al meglio ai dati sperimentali presenti nel grafico mediante la funzione di Matlab *'polyfit'*, nuovamente di ordine 1 e si nota la proporzionalità diretta tra i due parametri con un aumento di 3,12 dBA per ogni aumento del tempo di riverbero pari ad 1 secondo.

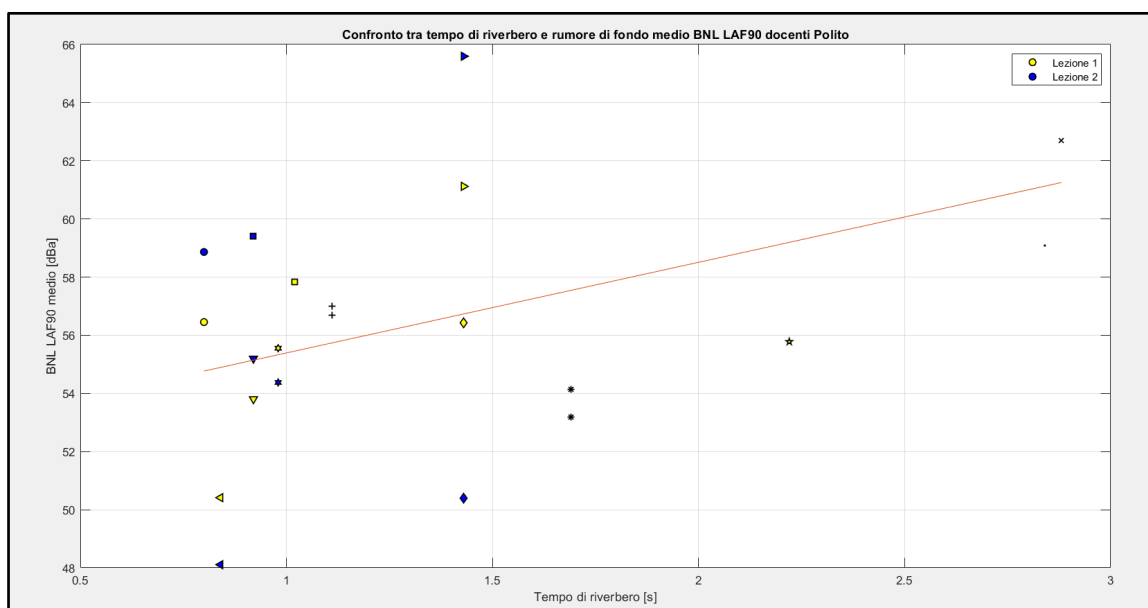


Grafico 3.16: Grafico che confronta ogni lezione in funzione del tempo di riverbero e del rumore di fondo BNL LAF90 medio per i docenti del Politecnico di Torino.

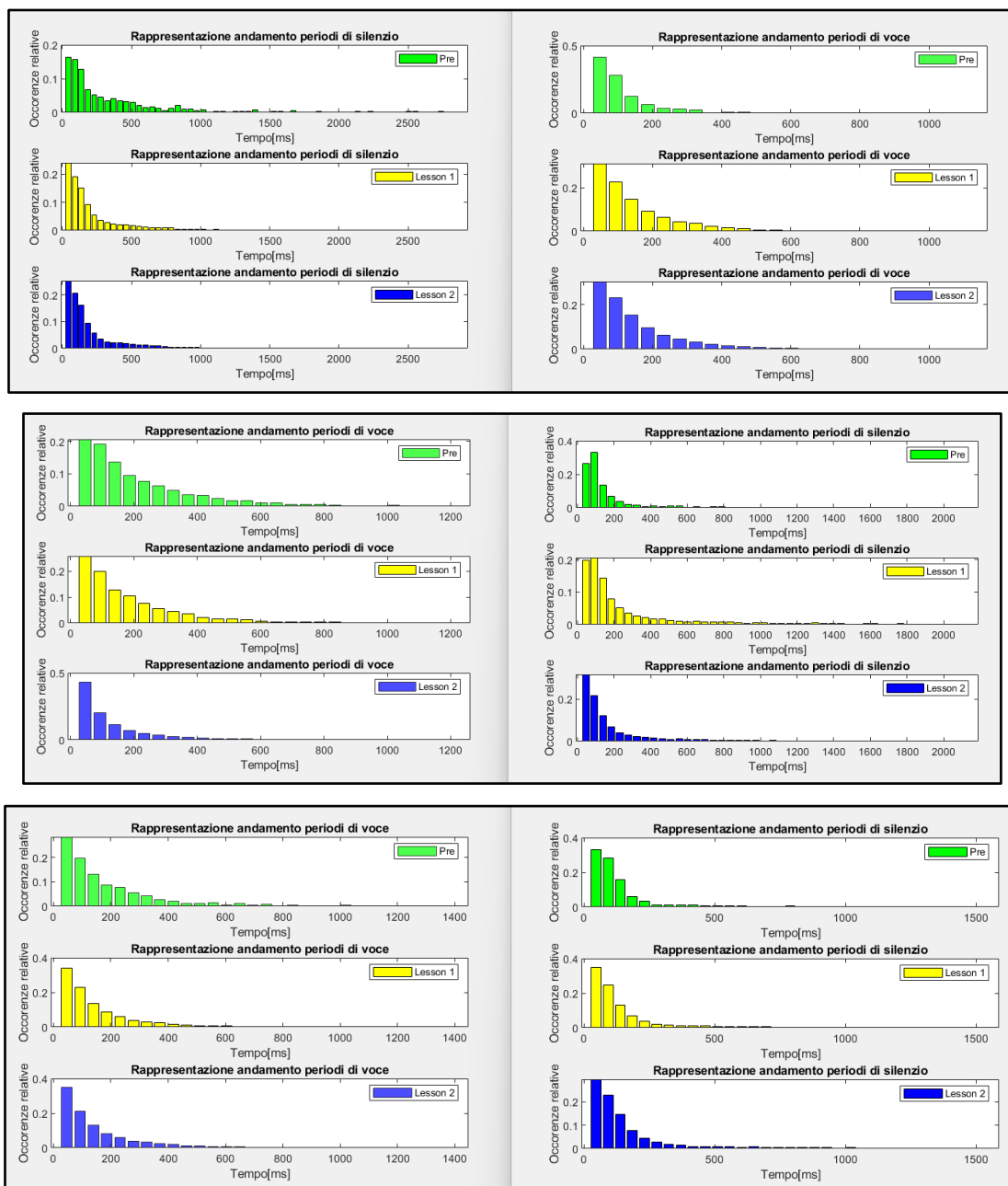
3.5 I periodi di voce e di silenzio

Un'altra importante caratteristica analizzata per ogni docente, sia universitario che della scuola primaria, è stata la valutazione delle occorrenze totali dei periodi di voce e silenzio considerando *frame* di durata pari a 46,4 ms; che è il valore utilizzato dal dispositivo Vocal Holter.

In un primo momento sono state visualizzate nel tempo le occorrenze relative (in percentuale) in funzione del numero di frame di periodo pari a 46,4 ms: per ogni frame si ha quindi la percentuale di tempo per cui si è parlato o si sono fatte pause.

Di seguito, nel grafico 3.17, si riportano i grafici delle occorrenze relative ottenuti per alcuni soggetti studiati, considerando un uomo ed una donna che hanno svolto lezione in un'aula adeguata dal punto di vista acustico ed altri due che hanno operato in un'aula non

adatta (le aule adeguate sono la 5N e la 3P con valori del tempo di riverbero rispettivamente pari a 0.80 s e 0.92 s, rumore di fondo pari a 38.8 dB e 53.3 dB ed infine volume pari a 237 m³ e 983 m³. Le aule non adeguate sono invece la 1B e la 9T con valori del tempo di riverbero rispettivamente pari a 1.69 s e 2.84 s, rumore di fondo pari a 37.2 dB e 39.7 dB ed infine volume pari a 793 m³ e 839 m³). Per tutti i soggetti, ad eccezione della lezione 2 per il soggetto 03F in cui il maggior numero di occorrenze relative si ha per frame da 92,8 ms (2 frame da 46.4 ms), in entrambi i casi si osserva un andamento generale di diminuzione dell'altezza delle barre man mano che si va avanti con i frame di tempo ed inoltre una tendenza ad avere pause più lunghe rispetto alla lunghezza di ciò che si pronuncia con la voce.



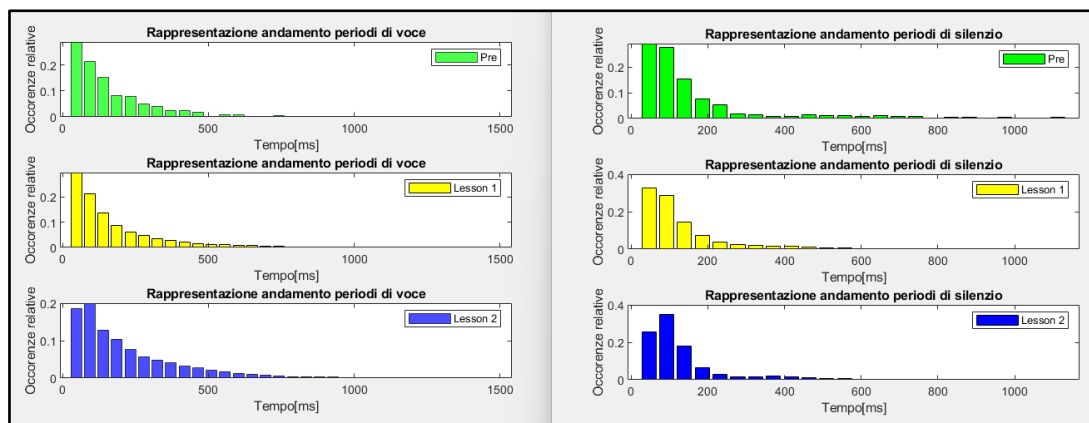
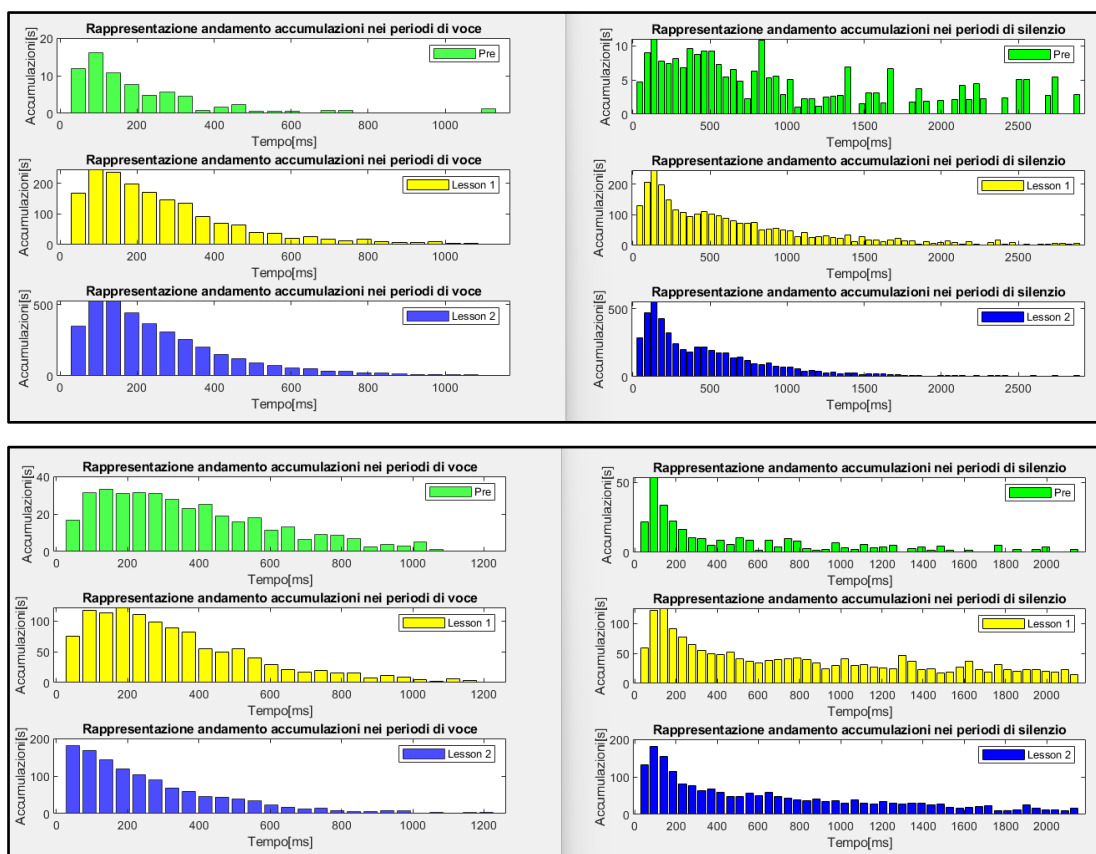


Grafico 3.17: Grafico delle occorrenze relative dei periodi di voce e di silenzio per i soggetti 00M, 06F, 01M e 03F. I primi 2 hanno svolto lezione in un'aula adeguata dal punto di vista acustico, mentre gli ultimi due no.

Dopo aver rappresentato l'andamento delle occorrenze nel tempo, nel grafico 3.18 si è visualizzato quello delle accumulazioni di voce e silenzio, ossia il periodo di tempo totale impiegato a parlare o stare in silenzio per intervalli di tempo multipli di 46.4 ms. La somma totale dei tempi per tutti i frame dei periodi di voce e silenzio doveva essere pari all'intera durata della registrazione analizzata. È stato verificato che questo fosse rispettato per tutti i soggetti analizzati nel monitoraggio.



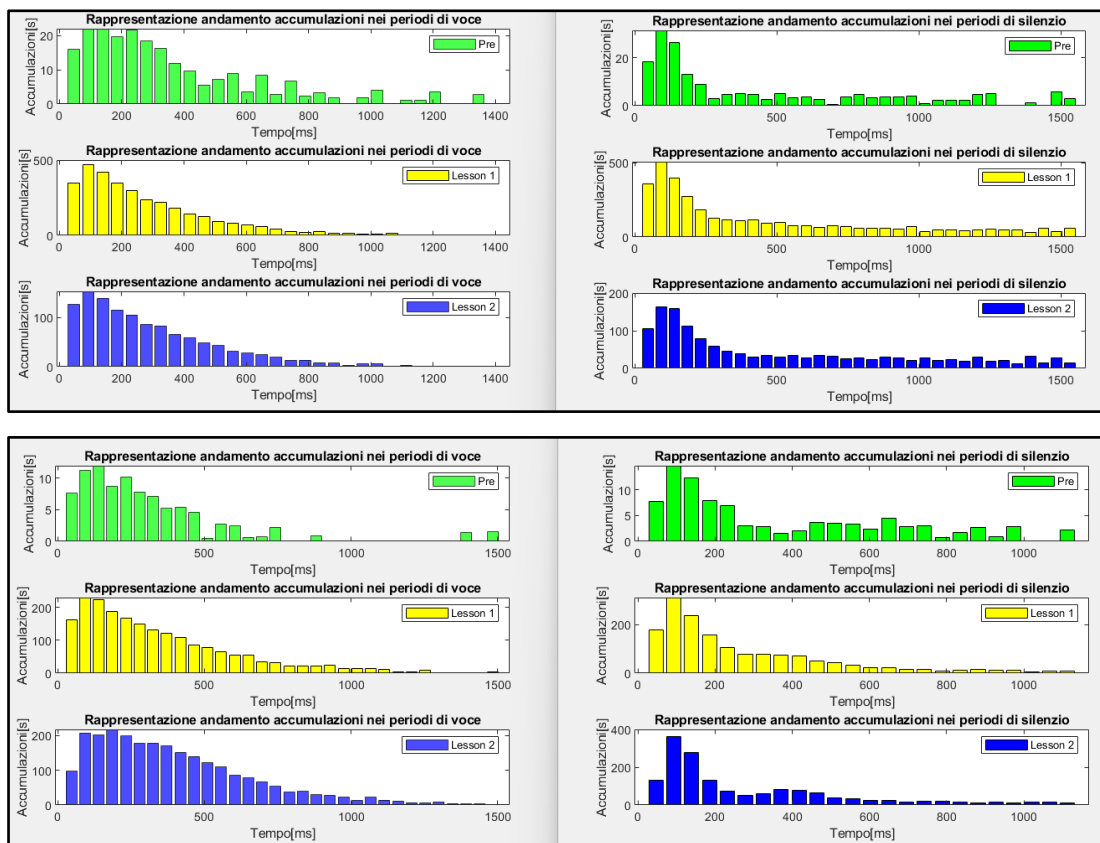


Grafico 3.18: Grafico delle accumulazioni dei periodi di voce e di silenzio per i soggetti 00M, 06F, 01M e 03F. I primi 2 hanno svolto lezione in un'aula adeguata dal punto di vista acustico, mentre gli ultimi due no.

In questo caso, la moda della distribuzione ossia il valore più alto raggiunto dalle varie barre cambia spostandosi tra i frame per i diversi docenti ed a volte anche per ognuno dei monitoraggi. In particolare, è stato riscontrato che le barre delle accumulazioni di voce rimangono alte anche per intervalli pari a 3 e/o 4 volte il frame nei soggetti che si sono trovati a svolgere lezioni in aule non adeguate dal punto di vista acustico. Gli altri soggetti hanno invece una moda che si colloca il più delle volte sul secondo frame, come è consigliato che sia per sforzare anche meno la propria voce.

Gli stessi grafici sono stati ottenuti nel grafico 3.19 anche per i maestri della scuola primaria. Di seguito, la rappresentazione ottenuta per l'unico maestro presente e per una delle maestre per cui si è riscontrato un corretto andamento decrescente nei periodi di voce mentre nei periodi di silenzio c'è stato un picco per valori di 92.8 ms (secondo frame di 46.4 ms) e poi dopo il classico andamento decrescente.

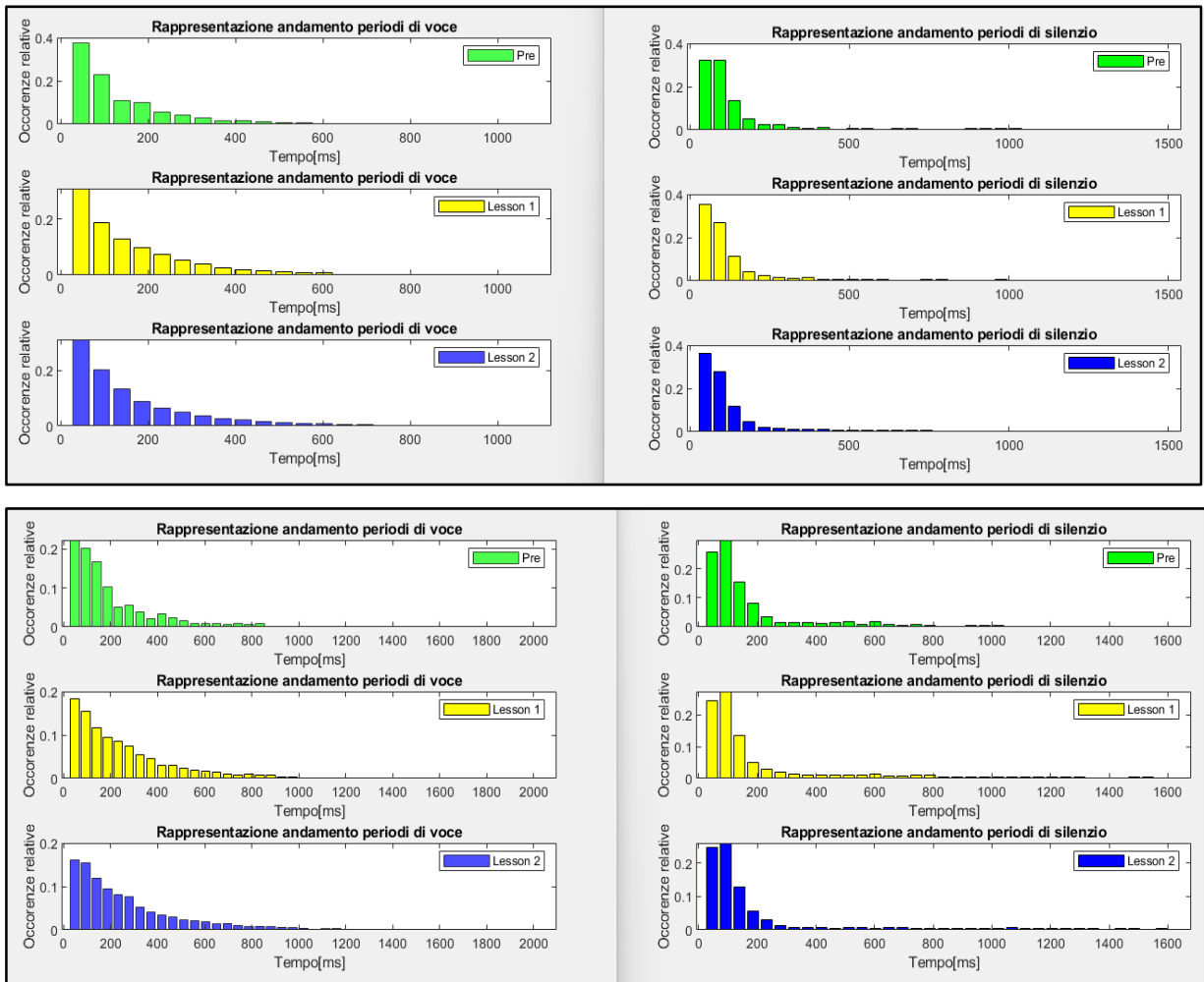
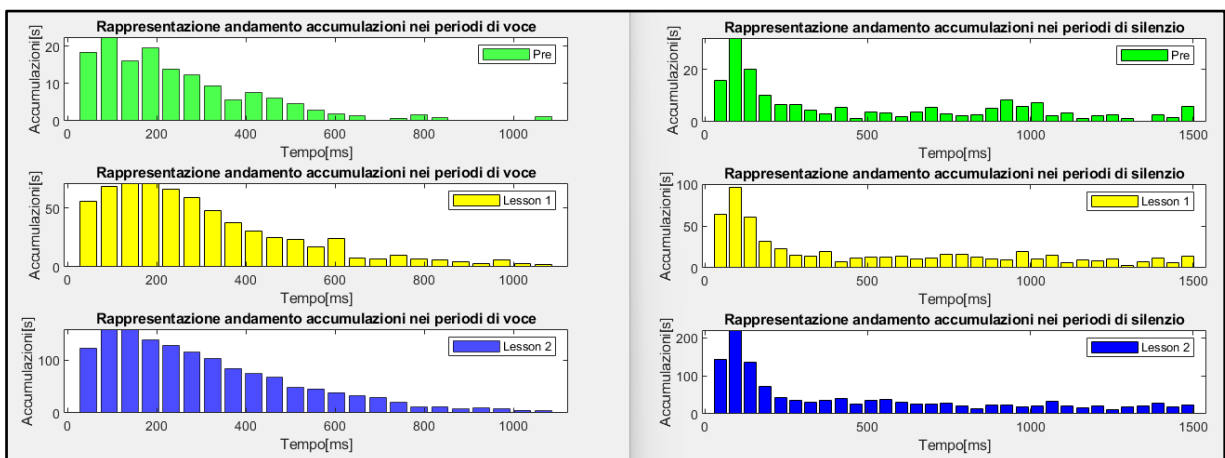


Grafico 3.19: Grafico delle occorrenze relative dei periodi di voce e di silenzio per i soggetti 01MSM e 03FSM.

Allo stesso modo, si rappresentano i grafici delle accumulazioni per i periodi di voce e silenzio per i due soggetti della scuola primaria:



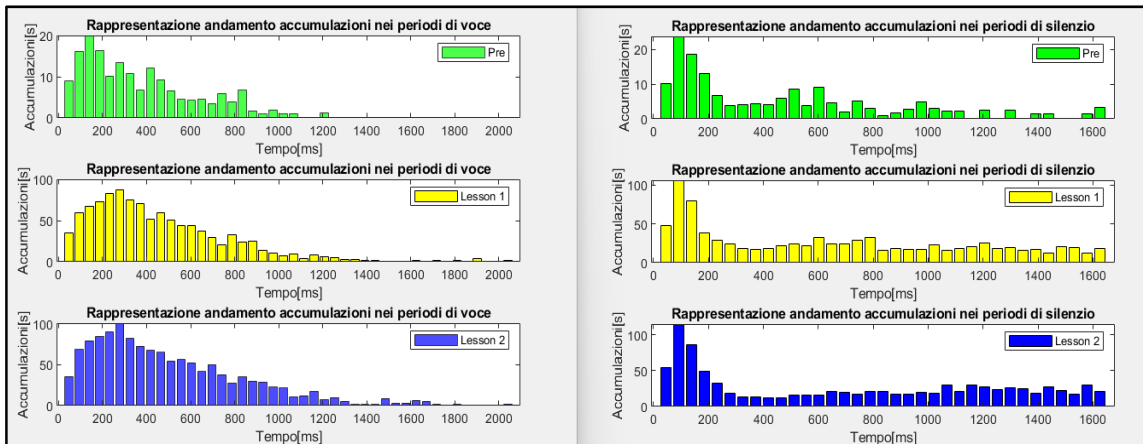


Grafico 3.20: Grafico delle accumulazioni dei periodi di voce e di silenzio per i soggetti 01MSM e 03FSM.

Anche per i docenti della scuola primaria, la moda risulta essere differente non solo in base al soggetto, ma anche in base al monitoraggio:

- il soggetto 01MSM per i periodi di voce ha la moda sul secondo frame per la baseline e la lezione 2 e sul quarto frame per la lezione 1, mentre per i periodi di silenzio ha sempre la moda sul secondo frame;
- il soggetto 03FSM per i periodi di voce ha la moda sul terzo frame per la baseline sul quinto frame per le due lezioni, mentre per i periodi di silenzio ha sempre la moda sul secondo frame. Questa maestra quindi nelle lezioni parla usando frame di voce molto lunghi.

A partire dalle accumulazioni dei periodi di voce e silenzio, si può calcolare il tempo di fonazione percentuale (PPT) considerando la durata di tempo delle accumulazioni di voce e dividendola per la durata totale data dalla somma di quella dei periodi di voce e silenzio.

Operando con Matlab, sono stati ottenuti i seguenti risultati:

	PPT IN (%)	PPT 1 (%)	PPT 2 (%)
00M	26,7	37,8	41,4
01F	56,2	58,5	58,3
01M	54,6	47,5	45,8
02F	25,7	38,2	/
02M	51,2	53,7	52,7
03F	49,8	56,5	61,3
03M	63,3	57,5	60,6

05M	60,1	51,5	/
06F	55,0	39,4	37,4
06M	50,5	22,3	47,9
07M	47,2	43,8	41,3
08M	36,2	50,2	46,0
09M	52,9	77,0	47,1

Tabella 3.11: Valori del tempo di fonazione percentuale (PPT) per la baseline (IN), la lezione 1 (1) e la lezione 2 (2) per i docenti del Politecnico di Torino. La ‘/’ indica che il valore non è presente perché la lezione non è stata monitorata.

	PPT in (%)	PPT 1 (%)	PPT 2 (%)
01MSM	44,6	52,7	52,2
01FSM	54,4	57,2	59,4
02FSM	43,9	46,0	52,9
03FSM	51,4	53,5	57,8
04FSM	29,0	50,1	47,3
05FSM	43,0	50,6	48,6
06FSM	50,3	56,4	51,9

Tabella 3.12: Valori del tempo di fonazione percentuale (PPT) per la baseline (in), la lezione 1 (1) e la lezione 2 (2) per gli insegnanti della scuola primaria di San Marzano Oliveto.

3.6. SPL equivalente

Infine, si è analizzato nel tempo, ogni circa 75 secondi, l’andamento di SPL equivalente per ognuno dei soggetti campione, raggruppando insieme in un caso gli andamenti degli uomini del Politecnico ed in un altro quelli delle donne ed infine quelli della scuola primaria. I docenti del Politecnico con una sola lezione sono stati inseriti in un grafico separato.

I risultati vengono mostrati nei grafici dal 3.21 al 3.24 in cui è evidente che l’unica soglia che viene raggiunta è la ‘Raised’, anche se la maggioranza dei docenti universitari sembra assestarsi per gran parte del tempo a livelli di soglia normale, a differenza dei maestri in cui si sta invece per più tempo nella soglia ‘Raised’. Da notare

che il soggetto 02F e 09M non hanno utilizzato il microfono nelle loro lezioni, quindi si sono comportati allo stesso modo di un maestro della scuola primaria.

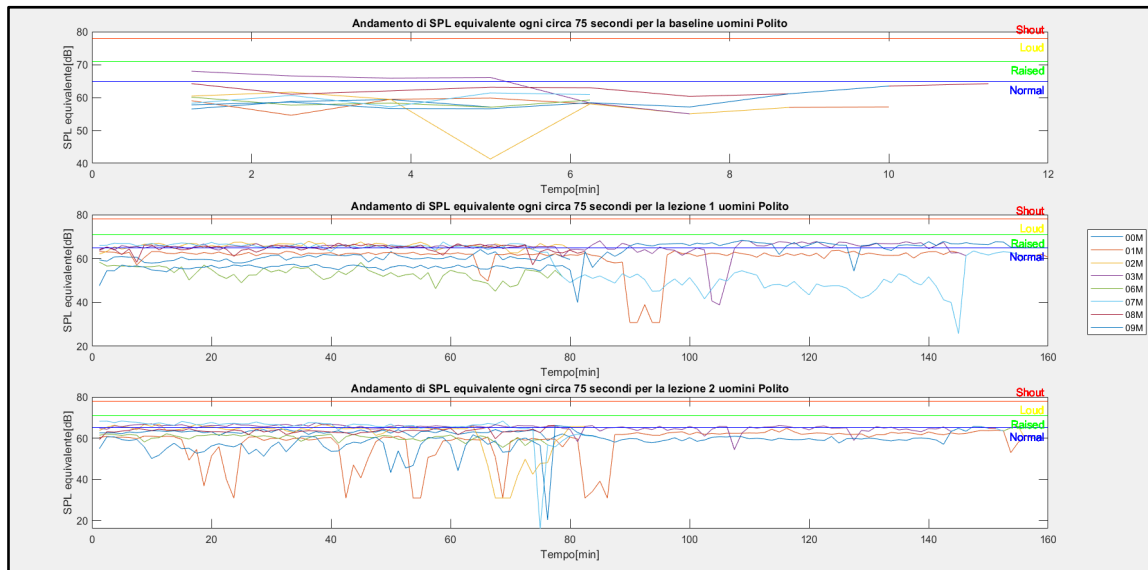


Grafico 3.21: Andamento nel tempo di SPL equivalente per tutti gli uomini del Politecnico di Torino con due monitoraggi.

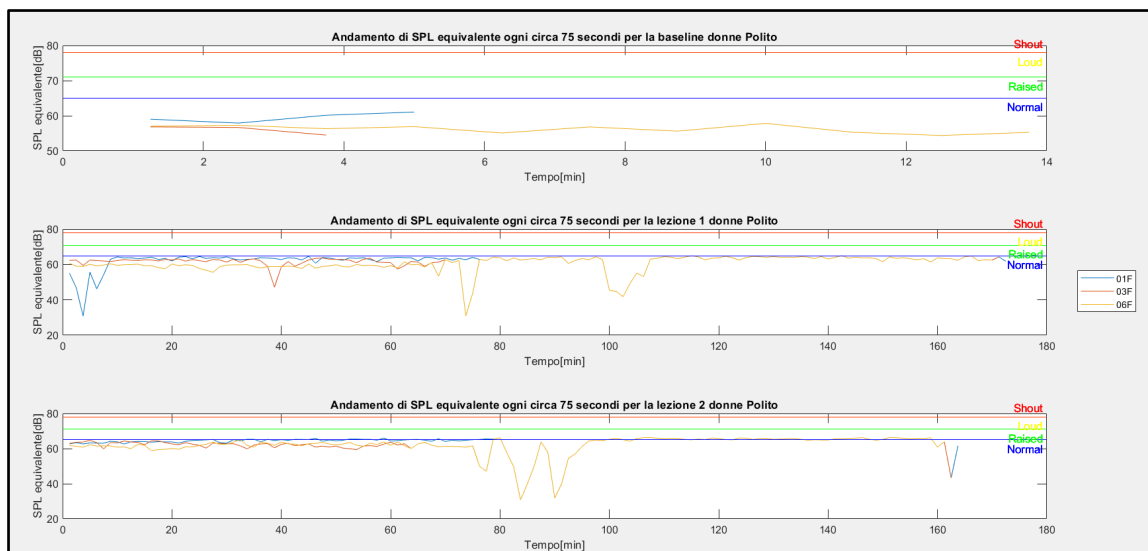


Grafico 3.22: Andamento nel tempo di SPL equivalente per tutte le donne del Politecnico di Torino con due monitoraggi.

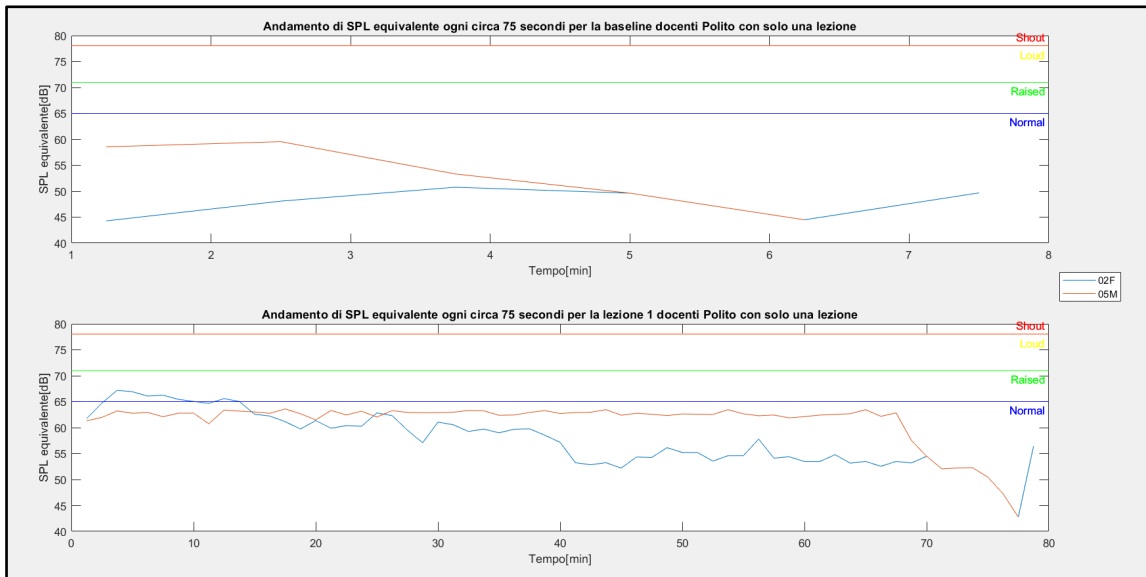


Grafico 3.23: Andamento nel tempo di SPL equivalente per i docenti del Politecnico di Torino con una sola lezione.

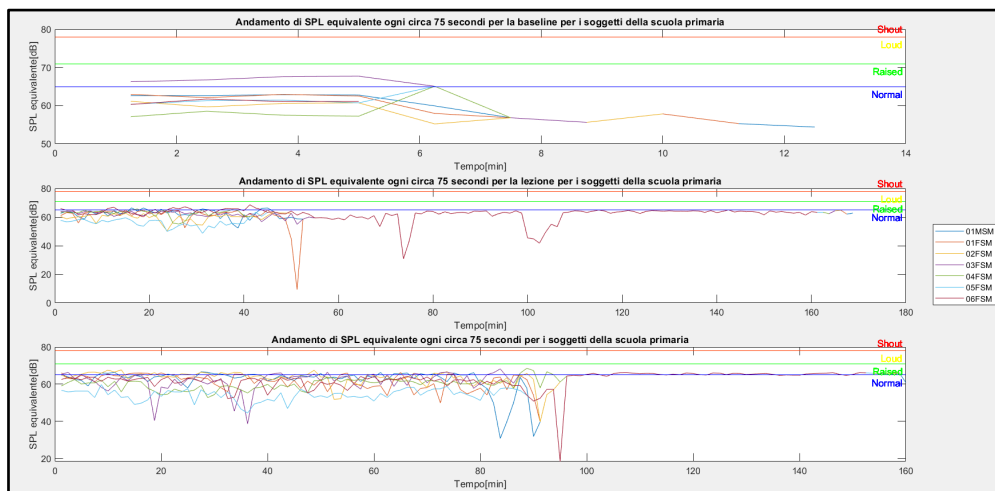


Grafico 3.24: Andamento nel tempo di SPL equivalente per tutti gli insegnanti della scuola primaria di San Marzano Oliveto.

Poiché osservare un solo numero permette di comprendere più facilmente se si tratta di un soggetto a rischio o meno dal punto di vista della voce, scopo principale di questa tesi, si sono allora calcolati i valori assoluti dell'SPL equivalente per ogni soggetto campione. I risultati ottenuti sono rappresentati nelle tabelle 3.13 e 3.14:

	SPL eq in [dB]	SPL eq 1 [dB]	SPL eq 2 [dB]
00M	58,1	66,7	63,7
01F	60,2	66,8	67,0

01M	57,7	62,7	65,9
02F	49,8	60,5	/
02M	60,6	68,4	68,0
03F	56,9	65,2	65,0
03M	66,7	68,7	68,6
05F	58,9	62,7	/
06F	56,3	63,7	64,1
06M	58,4	60,7	60,8
07M	59,8	69,2	69,3
08M	62,7	66,8	69,5
09M	57,7	59,6	59,9

Tabella 3.13: Valori di SPL equivalente dei soggetti del Politecnico di Torino per la baseline (in), la lezione 1 (1) e la lezione (2). La ‘/’ indica che il valore non è presente perché la lezione non è stata monitorata.

	SPL eq in [dB]	SPL eq 1 [dB]	SPL eq 2 [dB]
01MSM	62,7	68,4	66,1
01FSM	62,6	67,3	64,8
02FSM	60,6	67,7	65,3
03FSM	67,2	68,0	65,1
04FSM	58,1	66,7	63,7
05FSM	61,1	60,9	57,1
06FSM	61,2	68,0	65,0

Tabella 3.14: Valori di SPL equivalente dei soggetti della scuola primaria di San Marzano Oliveto per la baseline (in), la lezione 1 (1) e la lezione (2).

Poiché la parte grafica aiuta sempre meglio ad avere una visione globale, si è anche analizzato il valore di SPL equivalente per ognuno dei soggetti, evidenziando con colori diversi le varie soglie stabilite dalla norma UNI EN ISO 9921:

- *normale*: soggetto sano fino a valori pari a 65 dB;
- *raised*: soggetto che sta sollevando la voce oltre la normalità da 65 dB fino a 71 dB;

- *loud*: soggetto che parla a voce molto alta da 71 dB a 78 dB;
- *shout*: soggetto che urla sopra i 78 dB.

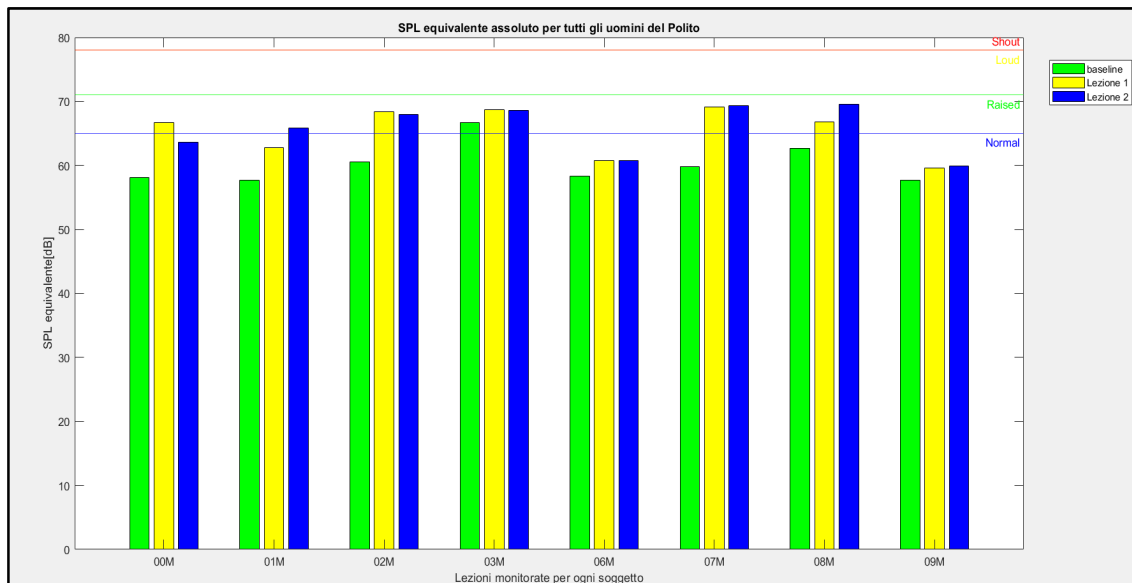


Grafico 3.25: Grafico con valori di SPL equivalente per gli uomini del Politecnico di Torino con due lezioni.

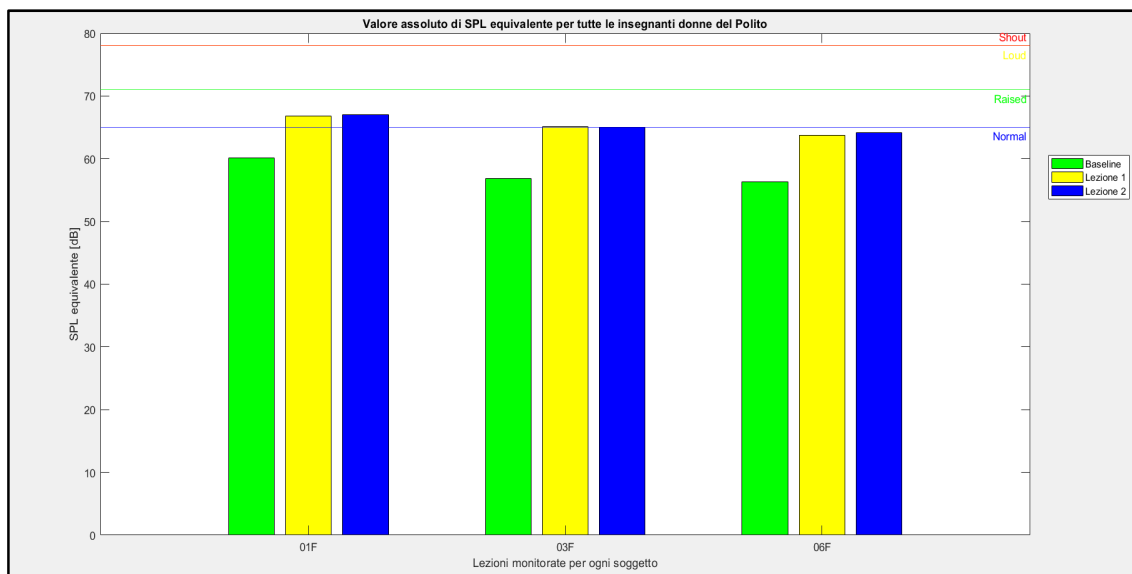


Grafico 3.26: Grafico con valori di SPL equivalente per le donne del Politecnico di Torino con due lezioni.

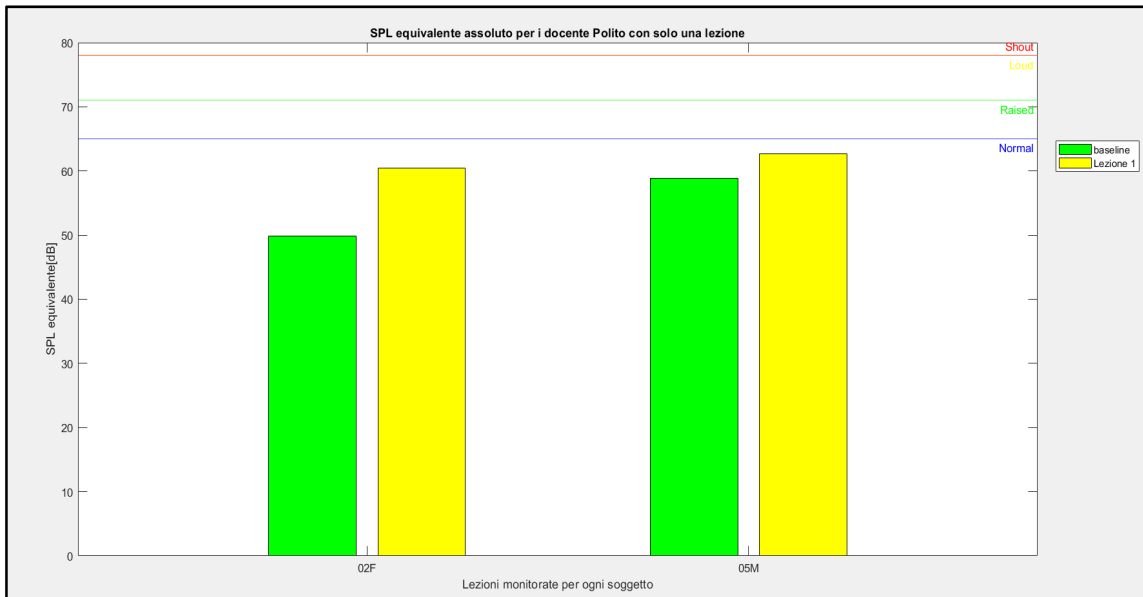


Grafico 3.27: Grafico con valori di SPL equivalente per i docenti del Politecnico di Torino con una sola lezione.

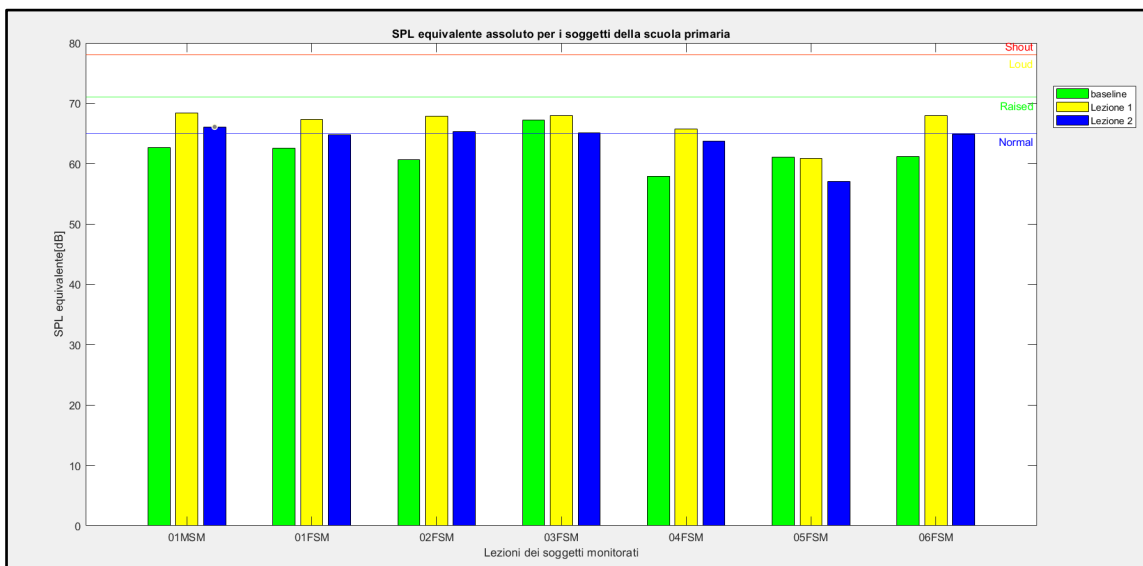


Grafico 3.28: Grafico con valori di SPL equivalente per gli insegnanti della scuola primaria di San Marzano Oliveto.

Da queste ultime figure si nota come la *baseline* è sempre al di sotto di tutte le soglie; questo a conferma del fatto che essa viene svolta in condizioni di comfort e silenzio che non portano di conseguenza il soggetto ad alzare il tono della propria voce.

A differenza dei soggetti con una sola lezione che si presentano con valori sotto le soglie, quasi tutti gli altri docenti (ad eccezione di 06F, 06M, 09M e 05FSM) presentano almeno

una delle lezioni al di sopra della soglia della normalità. Il soggetto 03F si trova al limite tra la zona della normalità e l'inizio della zona 'raised'.

Particolarmente preoccupanti sono i valori assunti dai soggetti 03M, 07M e 08M perché questi professori universitari presentano entrambe le lezioni con valori di SPL equivalenti molto alti e che non sono molti distanti dal raggiungimento della successiva soglia 'Loud'. Inoltre, tutti e 3 questi soggetti hanno svolto lezioni in aule adeguate dal punto di vista delle caratteristiche acustiche. Di conseguenza, essi rischiano nel tempo di arrivare nella zona 'Loud' e sarebbe quindi consigliata una visita da uno specialista che possa effettivamente verificare quale sia lo stato delle loro corde vocali e fornire la terapia più adeguata.

4. CONCLUSIONI

Lo scopo della tesi è consistito nella rilevazione di eventuali fattori di rischio a carico dell'apparato fonatorio dei docenti. Si è visto come il livello di pressione sonora (SPL: Sound Pressure Level) sia il principale elemento che può portare a danni alla salute vocale dei soggetti. Il docente nella spiegazione non deve usare valori superiori a 65 dB perché questo comporta uno sforzo maggiore per le proprie corde vocali e lo porta ad uscire dalla fascia 'Normale'. Non basta però solo l'impegno del docente, perché sopraggiungono diversi fattori all'aumento di questo importante parametro, tra i quali il rumore di fondo, sia quello presente all'interno che quello esterno all'aula, ed il tempo di riverbero dell'aula.

Un altro parametro importante da considerare è la frequenza fondamentale f_0 , tipica di ogni soggetto, a seconda dell'età e del sesso. In condizioni ottimali, essa deve restare il più possibile vicino al suo valore standard. Essa è compresa in un intervallo che per gli uomini va dai 100 Hz ai 120 Hz, per le donne si trova a valori che sono di circa 1/8 più alti ed infine per i bambini è pari a circa 300 Hz. Un suo aumento o diminuzione è indice di una possibile malformazione o malattia a livello delle corde vocali.

I risultati di questa tesi hanno mostrato che all'aumentare del tempo di riverbero e/o del rumore di fondo si ha un conseguente aumento del parametro SPL. In questo caso, per i docenti c'è stato un aumento della variazione di SPL pari a 0.13 dB per ogni variazione di BNL pari a 1 dBa, mentre per i maestri è stato pari a 0.0 dB ogni aumento di 1 dBa.

Anche la frequenza fondamentale f_0 varia con la presenza di rumore di fondo e tempo di riverbero. In particolare, per i docenti universitari c'è stato un aumento di 0.09 Hz per ogni incremento della variazione di rumore pari a 1 dBa, mentre per i maestri della scuola primaria tale aumento è stato molto più evidente e pari a 0.5 dB ogni incremento di 1 dBa.

Per quanto riguarda il tempo di riverbero, si ha invece una diminuzione della differenza tra i valori delle lezioni e la baseline pari a 3.27 Hz ed un aumento dell'SPL pari a 1.67 dB per ogni incremento del tempo di riverbero pari ad 1 secondo.

La soluzione è limitare il rumore di fondo il più possibile e fare in modo che il tempo di riverbero abbia un valore ottimale; anche in quest'ultimo caso variazioni superiori o inferiori a questo suo valore possono portare importanti modifiche dei parametri SPL e f_0 .

I valori di SPL e f_0 sono utili anche per la ricostruzione del tempo di fonazione percentuale, che tiene conto di quanto tempo, in percentuale, si è parlato per l'intera durata della lezione. Questo è un parametro che differenzia bene docenti universitari e maestri della scuola primaria: generalmente, la parte di spiegazione in una scuola elementare è bassa e questo fa sì che si abbia un tempo di fonazione percentuale più basso rispetto a quello che si ottiene dai docenti universitari, le cui lezioni sono caratterizzate principalmente dal professore che spiega.

Questa differenza nell'ambito della tesi non è stata così netta, perché i maestri sono stati monitorati nelle lezioni in cui hanno svolto prevalentemente spiegazione.

Un'altra grande differenza riscontrata è stata nei valori dell'SPL equivalente: quasi tutti i soggetti della scuola hanno avuto un valore più alto della soglia di normalità in entrambe le lezioni, mentre i soggetti universitari in gran parte presentavano solo una lezione oltre la soglia. In particolare, per la baseline solamente 2 soggetti hanno superato il valore della soglia di normalità pari a 65 raggiungendo la soglia 'raised' ed assumendo il soggetto universitario 03M un valore pari a 66.7 dB e la maestra 03FM un valore pari a 67.2 dB.

Per la lezione 1, quasi tutti i soggetti universitari hanno superato la soglia e si sono trovati nella fascia 'raised': i soggetti 00M, 02F, 02M, 03F, 03M, 07M e 08M hanno riportato rispettivamente valori pari a 66.7 dB, 66.8 dB, 68.4 dB, 65.2 dB, 68.7 dB, 69.2 dB e 66.8 dB. La stessa cosa è successa per i maestri: i soggetti 01MSM, 01FSM, 02FSM, 03FSM, 04FSM e 06FSM hanno riportato invece valori rispettivamente pari a 68.4 dB, 67.3 dB, 67.7 dB, 68 dB, 66.7 dB e 68 dB.

Infine, per la lezione 2 circa metà docenti universitari hanno nuovamente raggiunto la soglia 'raised': 01F, 01M, 02M, 03M, 07M e 08M con valori rispettivamente pari a 67 dB, 65.9 dB, 68 dB, 68.6 dB, 69.3 dB e 69.5 dB. Stessa situazione anche a scuola in cui i maestri 01MSM, 02FSM e 03FSM hanno riportato valori rispettivamente pari a 66.1 dB, 65.3 dB e 65.1 dB. Le ultime due maestre hanno superato la soglia di normalità per poco.

È stato però riscontrato che tre docenti del Politecnico hanno superato in una delle loro lezioni i valori assoluti dei maestri, nonostante negli ambienti universitari i professori abbiano in loro aiuto un microfono per la spiegazione e possano essere quindi agevolati nel non sforzare troppo la propria voce. Questi docenti sono il 03M, 07M e 08M perché

essi nelle lezioni hanno raggiunto valori quasi pari a 70 dB avvicinandosi alla soglia 'Loud' pari a 71 dB.

Nessun docente ha però rischiato di superare la soglia 'Shout' di 78 dB che è quella in cui si sta urlando e che è segno di gravi problemi di salute.

Merita attenzione anche il rumore di fondo, perché il comportamento in aula di bambini e ragazzi universitari è totalmente differente: i primi, ingenuamente, tendono a generare spesso brusio che peggiora la situazione per il livello di pressione sonora da generare da parte dei maestri, i secondi invece tendono a non influenzare il livello con cui in genere spiega il professore: il rumore medio universitario rilevato era compreso tra i 45 dB e i 70 dB, mentre a scuola tra i 55 dB e i 75 dB. Quindi, già solo il valor medio del rumore scolastico è più alto di quello universitario.

Infine, un'importante distinzione si ritrova nelle aule di lezione: gli ambienti universitari sono molto più ampi e grandi di quelli scolastici (l'aula primaria più grande al più arriva a 250 m³ mentre nelle università c'è addirittura un'aula, la 2T che supera i 100 m³), ma nello stesso tempo i primi sono dotati di alcuni mezzi tecnologici per facilitare la propagazione del suono che le scuole non hanno. Per capire se un'aula era adatta o meno alle sue caratteristiche acustiche si è osservato principalmente il valore del tempo di riverbero. Le aule 1B, 5s, 13B, 2T e 9T sono state quindi ritenute non adatte dal punto di vista acustico perché avevano valori di tempo di riverbero che raggiungevano quasi i 3 secondi ed il loro valore ideale si attestava intorno a poco meno di 1 secondo. Questo ha fatto sì che esse fossero caratterizzate dal punto di vista acustico come inadeguate con conseguente rischio vocale maggiore per i soggetti che hanno svolto o svolgeranno le lezioni al suo interno.

5. BIBLIOGRAFIA E

SITOGRAFIA

- 1) <https://www.centrolatrottola.it/sos-disfonia-problemi-di-voce-nellinsegnante-e-professionista-vocale/>
- 2) <https://www.puntosicuro.it/coordinatori-C-78/insegnanti-l-attivita-lavorativa-le-patologie-della-voce-AR-13794/>
- 3) http://spic821009.istruzione.site/wp-content/uploads/2017/04/E_Rumore-e-sforzi-vocali-in-ambiente-scolastico.pdf
- 4) <https://sstefano.it/lezioni-online,-a-rischio-la-voce-degli-insegnanti>
- 5) <https://www.orizzontescuola.it/dad-e-i-disturbi-della-voce-quando-si-configura-unamalattiaprofessionale/#:~:text=La%20prevalenza%20di%20disturbi%20vocali,metodologia%20utilizzata%20nello%20studio%2C%20etc.>
- 6) https://www.rockfon.it/siteassets/documents-it/brochures/ispirazione/manuale-acustica_a4_d_02_2022.pdf
- 7) https://www.inquinamentoacustico.it/_download/propagazione%20negli%20spazi%20chiusi%20-%20ficarelli.pdf
- 8) <https://www.suva.ch/it-ch/infortunio/per-i-fornitori-di-prestazioni/medicina-assicurativa-svizzera-interlocutori-e-prestazioni#state=%5Banchor-F88B9283-FC39-4290-BE74-95092ACA14A7%5D>
- 9) Claudia Manfredi e Philippe H.Dejonckere, Voice Dosimetry and monitoring,with emphasis on professional voice diseases: critical review and framework for future research (2016)
- 10) <https://medicinaonline.co/2016/09/10/a-che-serve-losso-ioide-e-dove-si-trova-cose-il-pomo-dadamo/>
- 11) VHM_manual
- 12) Ketaki Vasant Phadkem Anne-Maria Lukkanen, Irma Ilomäki, Elina Kankare, Ahmed Geneid e Jan G Švec, Cepstral and Perceptual Investigations in Female Teachers with Functionally Healthy Voice (2018)
- 13) <https://it.wikipedia.org/wiki/Cepstrum>
- 14) MVDP Instruction Manual

- 15) <http://www.tanzariello.it/index.php/92-studioprofatanzariello/laringe/esami/199-esamespettroacusticodellavoce#:~:text=I%20parametri%20acustici%20utilizzati%20sono,ottenuto%20dal%20grafico%20dell'MDVP>.
- 16) <https://www.ilmicrofono.it/content/42-1-intellegibilita-del-parlato>
- 17) <https://icare-cro.com/blog/2018/02/05/analisi-elettroacustica-della-voce/>
- 18) <https://www.ecophon.com/it/about-ecophon/acoustic-knowledge/basic-acoustics/sound-pressure-level/>
- 19) <https://fonudito.it/pressione-sonora-e-frequenze-udibili/>
- 20) <https://decibelpro.app/blog/how-many-decibels-does-a-human-speak-normally/#:~:text=A%20raised%20voice%20is%20between,voice%20is%20above%2085%20dB>
- 21) Giulia Calosso, Giuseppina Emma puglisi, Arianna Astolfi, Antonella Castellana, Alessio Carullo e Franco Pellerey, A one-school year longitudinal study of secondary school teachers' voice parameters and the influence of classroom acoustics (2017)
- 22) Titze I.R., Hunter E.J., Svec J.G., Voicing and silenze period in daily and weekly vocalizations of teachers, Journal of Acoustical Society of America (2007)
- 23) Astolfi A., Carullo A., Vallan A., Pavese L., influence of classroom acoustics on the vocal behavior of teachers, in Proceedings of Meetings on Acoustics, Acoustical Society of America (USA), 21 st Onternational Congress on Acoustics, Montreal (CAN) 2-7 giugno 2013, Vol. 19, 040123, pp 1-9
- 24) Puglisi G.E., Pavese L., Parametri per la caratterizzazione dello sforzo vocale: l'influenza dell'acustica di due ambienti differenti sull'uso della voce, in Atti del 41° Convegno Nazionale AIA, Pisa 17-19 giugno 2014
- 25) <https://www.anit.it/uni-acustica-nelle-scuole-nuova-11532-2/>
- 26) https://www.ordineing-fc.it/wp-content/uploads/2019/10/acusticaedilizia_d-compresso.pdf