

## Acustica con Visual Analyser

Visual Analyser è un software gratuito, scaricabile al sito [www.sillanumsoft.org](http://www.sillanumsoft.org), che ‘trasforma’ un PC in un oscilloscopio virtuale. Con una opportuna interfaccia è possibile utilizzarlo proprio come un oscilloscopio, ma con il solo microfono del PC lo si può utilizzare come strumento di analisi del suono. Alla apertura si vede la seguente schermata:



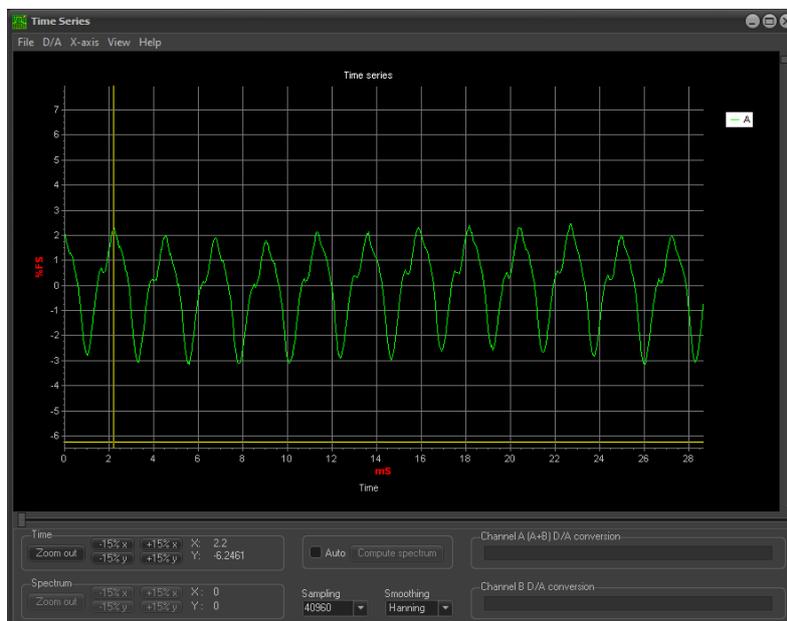
Che presenta un quadrante superiore denominato **Quadrante Scope** (oscilloscopio) per la visualizzazione dell'onda sonora e uno inferiore **Quadrante Spectrum** per l'analisi dello spettro delle frequenze; in alto vi è un menu orizzontale il cui primo pulsante **On** serve per avviare la acquisizione dell'onda sonora; a destra del quadrante scope vi è una finestra per il settaggio di alcuni valori di visualizzazione e di trigger del segnale, a destra del **Quadrante Spectrum** vi è una sezione con più schede che riportano pulsanti e caselle di settaggio: i pulsanti più importanti si trovano nella prima scheda **Main** e servono per avviare la registrazione dell'onda sonora per un certo periodo di tempo (**Capture scope**) e per avviare la registrazione dello spettro delle frequenze relativo ad un certo intervallo di tempo (**Capture spectrum**). Dopo la registrazione è possibile dilatare o restringere lungo gli assi x e y l'onda in modo da poter effettuare misure precise che si leggono in basso a sinistra in corrispondenza della sezione Time e Spectrum.

Altre caratteristiche che saranno utilizzate verranno descritte durante le varie esperienze.

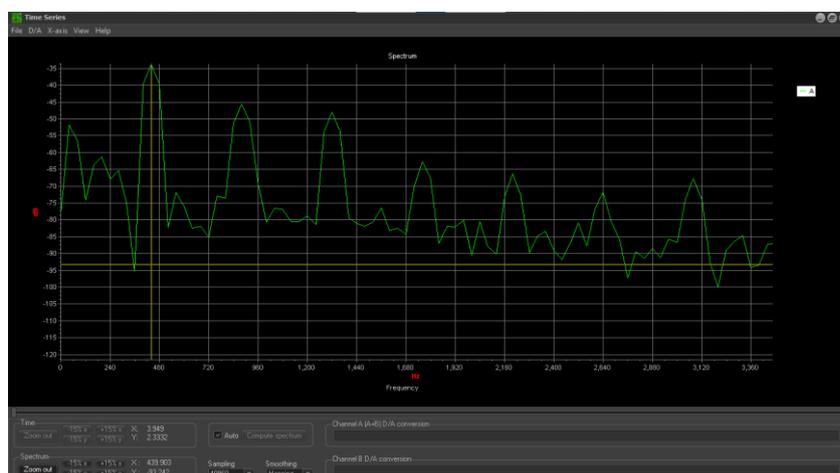
1. **Prima esperienza:** misura del periodo di un'onda armonica e della sua frequenza:

- Con diapason e cassa di risonanza, con un generatore di suono sullo smartphone oppure con uno strumento musicale (chitarra, organo elettrico, flauto, ...) si emette un suono e si visualizza l'onda facendo eventualmente alcune considerazioni sulla differenza tra suono e rumore.
- Si registra la forma dell'onda sonora con l'oscilloscopio.
- Si effettua la misura del periodo dal grafico dell'onda e si calcola la frequenza; si può quindi verificare che essa corrisponde a quella individuata sullo spettro e, se si conosce la frequenza del suono emesso, si verifica la corrispondenza.

Ad esempio con il suono prodotto da una app per generazione di onde sonore, con la frequenza di 440 Hz, si visualizza la seguente onda sonora e misurando il tempo di 10 periodi si ottiene  $T = 2,27 \cdot 10^{-3}$  s, che corrisponde ad una frequenza di circa 440 Hz come ci si doveva aspettare.



Controllando il quadrante relativo allo spettro dell'onda sonora si ottiene ancora il valore di 440 Hz.



## 2. **Seconda esperienza:** Sfasamento angolare e sfasamento temporale:

L'oscilloscopio virtuale funziona anche come generatore di onde, con la possibilità di scegliere oltre alla ampiezza e alla frequenza, anche la fase. È possibile generare 2 onde contemporaneamente e analizzarle.

- Si accede alla scheda **Wave** del menu principale abilitando entrambe le onde del generatore.
- Si imposta la stessa frequenza (ad es. 1000 Hz) per le due onde, si abilitano entrambe le onde settando la voce **Enable** e la voce **LoopBack** (o **direct** a seconda della versione del software) per entrambe le onde.
- Si imposta lo sfasamento della seconda onda rispetto alla prima (**Phase**) ad es. su 45° (dopo aver scritto 45 nella casella di testo corrispondente alla fase, ricordarsi di premere **Apply**).
- Agendo sulla casella a discesa in basso a destra nella scheda **Main**, si sceglie: canali **A e B**.
- Si avvia la generazione delle due onde e si registra l'oscilloscopio.
- Si misura lo sfasamento temporale verificando che  $\frac{\Delta\varphi}{2\pi} = \frac{\Delta t}{T}$  essendo  $\Delta\varphi$  lo sfasamento angolare,  $\Delta t$  quello temporale e  $T$  il periodo dell'onda (dedotto dalla frequenza scelta o misurata come nella prima esperienza)

Si può osservare inoltre che la fase non influisce sulla percezione del suono da parte dell'orecchio umano (a parità di ampiezza e di frequenza)

## 3. **Terza esperienza:** misura della soglia di udibilità

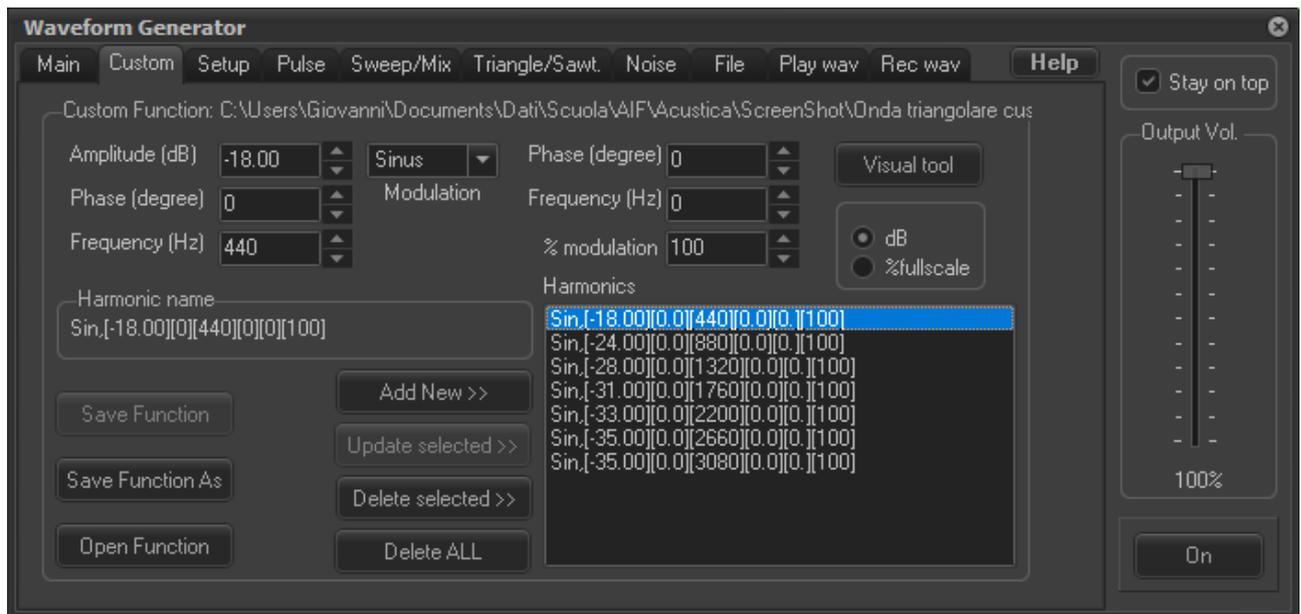
- Si accede alla scheda **Wave** del menu principale abilitando solo il canale A; si seleziona tra le funzioni d'onda **Wave function** la voce **Sweep (Sine)**
- Avviando la generazione dell'onda si osserva la variazione di frequenza mentre il picco nella finestra dello spettro si sposta verso destra; si individua approssimativamente il suono di frequenza massima udibile (che è ovviamente personale)
- Per una miglior precisione si seleziona una frequenza vicino a quella individuata precedentemente e si aumenta o si diminuisce la frequenza per determinare la soglia massima di udibilità.
- Eventualmente ripetere lo stesso procedimento per la soglia minima di udibilità.

#### 4. Quarta esperienza: il timbro di un suono.

- Si produce la stessa nota con strumenti diversi: chitarra, flauto, generatore di suono nello smartphone, diapason, eventualmente voce umana, ecc. visualizzando la forma diversa dell'onda periodica
- Si genera la stessa nota con le funzioni d'onda interne: onda sinusoidale, onda quadra, onda triangolare e si osserva, oltre alla forma d'onda, anche la distribuzione spettrale evidenziando che:
  - i. Per un'onda quadra giocano un ruolo fondamentale le frequenze multiple dispari di quella fondamentale
  - ii. Per un'onda a dente di sega giocano un ruolo fondamentale tutte le frequenze multiple di quella fondamentale
- Provare a ricostruire un'onda a dente di sega (o quadra) utilizzando la possibilità di creare un'onda sovrapponendo onde di frequenza multipla di quella fondamentale.  
Per far questo è necessario:
  - i. Nel menu **Wave**, nella scheda **Main** scegliere nel menu a discesa della sezione **Wave function** la voce **CUSTOM**
  - ii. Nella scheda **Custom** si inserisce l'ampiezza, la frequenza ed eventualmente la fase nelle caselle corrispondenti e si preme il pulsante **Add New**
  - iii. Si ripete il punto ii. aggiungendo altre armoniche.

Per ricostruire un'onda a dente di sega si utilizzi la sovrapposizione delle seguenti armoniche:

Ampiezza (dB)	Frequenza (Hz)	N° armonica
-18	440	1
-24	880	2
-28	1320	3
-31	1760	4
-33	2200	5
-35	2660	6
-35	3080	7



Concludere con il Teorema di Fourier (da Wikipedia):

*Qualunque forma d'onda periodica può essere approssimata quanto più si desidera sommando alla sinusoide avente la stessa frequenza dell'onda periodica (frequenza fondamentale o prima armonica) una serie di sinusoidi aventi frequenze multiple (armoniche) di quella dell'onda periodica, di ampiezza opportuna e in specifici rapporti di fase fra loro. La più bassa di queste frequenze (la frequenza fondamentale), che è anche l'inverso del periodo dell'onda, determina l'altezza del suono, come percepita dall'udito.*

5. **Quinta esperienza:** misura della velocità del suono nell'aria:

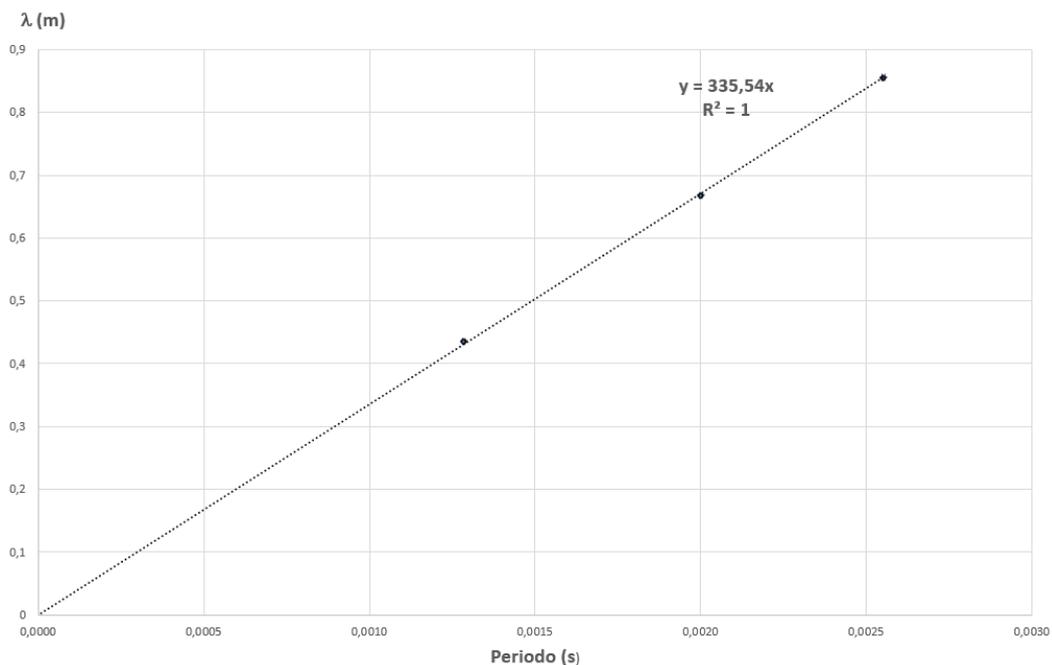
- Realizzare 3 o 4 tubi aperti ai due estremi di diversa lunghezza (da 10 cm circa fino a circa 20 cm) utilizzando ad esempio una canalina in plastica per cavi elettrici, a sezione circolare, di diametro circa 1,5 cm.
- Tenendo tappato un estremo del tubo, si soffia in corrispondenza dell'altra estremità e si raccoglie il suono con il software Visual Analyser, evidenziando in particolare lo spettro delle frequenze.
- Si determina la frequenza dell'armonica fondamentale ( $f_0$ ) in funzione della lunghezza del tubo, ripetendo per ciascun tubo realizzato. I valori che ho ottenuto sono:

Lunghezza tubo (m)	Frequenza (Hz)
0,109	778
0,167	500
0,214	392

- Per ogni frequenza si calcola la lunghezza d'onda corrispondente, ricordando che per la teoria delle onde stazionarie in un tubo chiuso ad un estremo la lunghezza d'onda  $\lambda$  dell'armonica fondamentale risulta essere 4 volte la lunghezza del tubo e si riporta in corrispondenza i relativi periodi. I valori ottenuti danno la seguente tabella:

Lunghezza d'onda $\lambda$ (m)	Periodo T (ms)
0,436	1,29
0,668	2,00
0,856	2,55

Il cui diagramma cartesiano è il seguente:



- Dalla pendenza della retta dei minimi quadrati si legge la velocità del suono nell'aria (in un ambiente a circa 20°C).

6. **Sesta esperienza:** verifica della frequenza delle armoniche in un tubo chiuso ad un estremo:

- Utilizzando uno dei tubi aperti ai due estremi (vedi quinta esperienza) tenendo tappato un estremo, si soffia in corrispondenza dell'altra estremità e si raccoglie il suono con il software Visual Analyser, evidenziando in particolare lo spettro delle frequenze.
- Le lunghezze d'onda delle armoniche emesse da un tubo chiuso ad un estremo sono date dalla formula:

$$\lambda_n = \frac{4L}{2n + 1} \quad \text{Con } n = 0, 1, 2, 3, 4, \dots$$

Pertanto, essendo  $f_n = \frac{v}{\lambda_n} = \frac{v}{4L} \cdot (2n+1)$ , risulta:

Armonica	Valore della frequenza	Relazione con $f_0$
$f_0$	$\frac{v}{4L}$	
$f_1$	$\frac{v}{4L} \cdot 3$	$f_1 = 3f_0$
$f_2$	$\frac{v}{4L} \cdot 5$	$f_2 = 5f_0$
$f_3$	$\frac{v}{4L} \cdot 7$	$f_3 = 7f_0$

Con un tubo lungo 10,8 cm ho ottenuto:

armonica	Frequenza misurata	$(2n+1)f_0$	Errore percentuale
$f_0$	776 Hz	776 Hz	
$f_1$	2308 Hz	2328 Hz	0,86%
$f_2$	3859 Hz	3880 Hz	0,54%
$f_3$	5530 Hz	5432 Hz	1,8%

In ottimo accordo con i dati sperimentali.

### 7. Settima esperienza: studio dei battimenti

Per lo studio dei battimenti occorrono 2 sorgenti sonore con frequenza diversa (ad esempio con una differenza di qualche Hz); la teoria afferma che la frequenza dei battimenti è pari alla differenza in valore assoluto tra le frequenze dei due suoni, e che l'orecchio umano percepisce un suono con frequenza media tra le due.

Per le 2 sorgenti sarebbe meglio avere due diapason uguali con relative cassette di risonanza; uno dei due diapason dovrebbe avere in aggiunta una masserella posta su uno dei due rebbi; in alternativa si possono utilizzare due corde contigue di una chitarra opportunamente accordate (in realtà non è detto che entrambi i suoni siano perfettamente sinusoidali, quindi può essere più faticoso effettuare una esperienza quantitativa) oppure due smartphone con generatore di suoni (o uno solo che possa generare due suoni contemporaneamente).

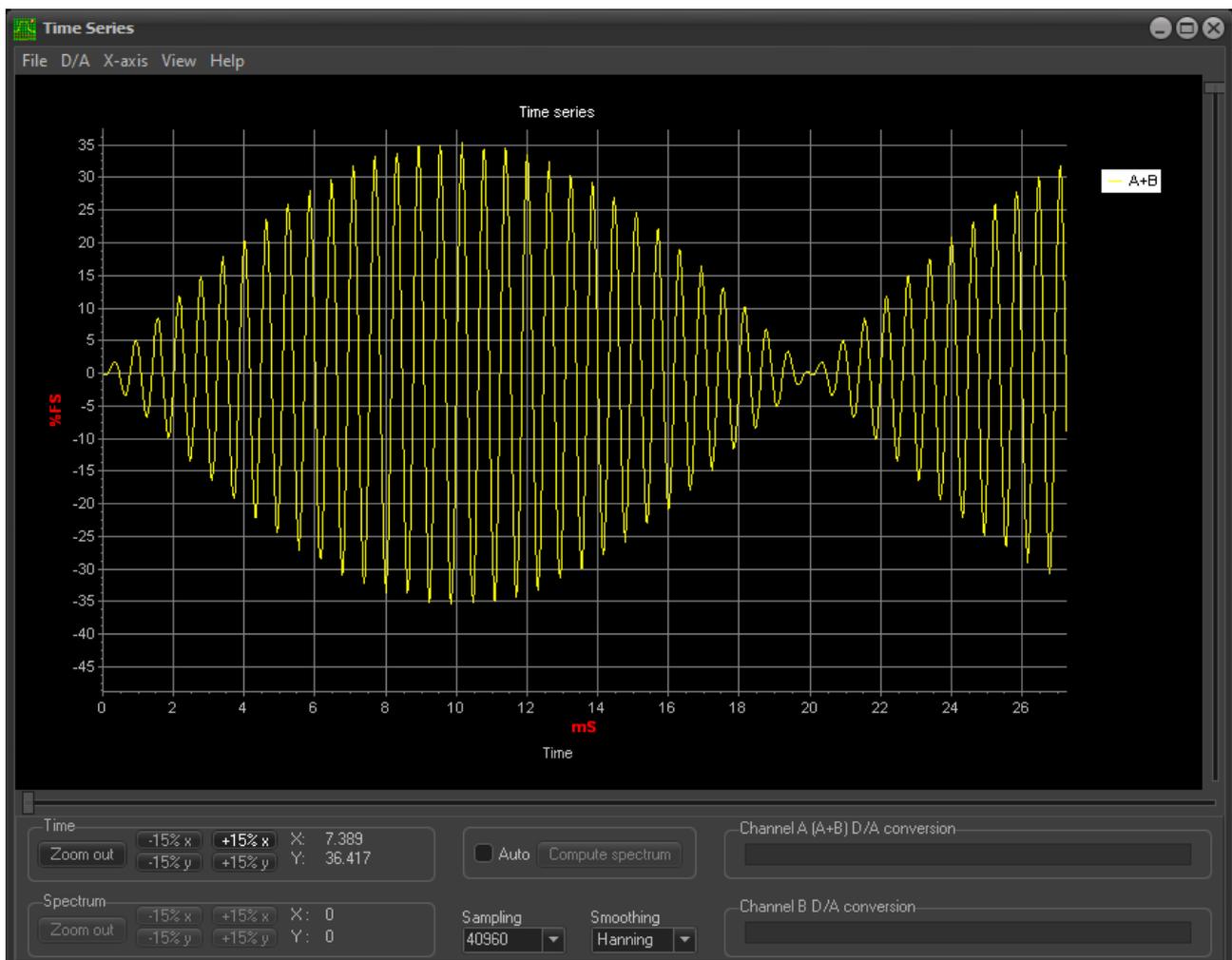
**NB** – In ogni modo con l'oscilloscopio virtuale 'Visual Analyser' non è possibile effettuare registrazioni di fenomeni a lunga durata (maggiore circa di 100 ms), in quanto l'oscilloscopio è

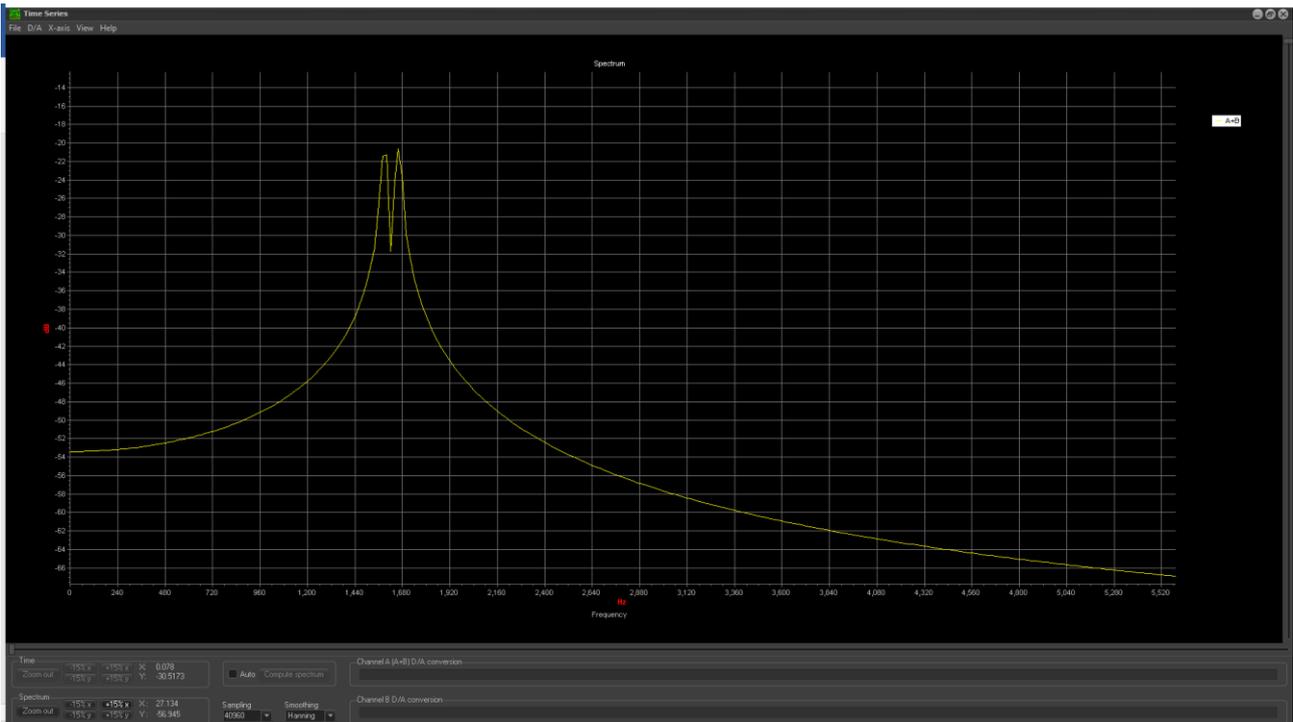
costruito per evidenziare fenomeni variabili repentinamente: pertanto sarà necessario produrre suoni con una differenza maggiore di 10 Hz. Il fenomeno dei battimenti è tuttavia visibile sull'oscilloscopio come variazione del massimo di intensità.

Avviare Visual Analyser e produrre i due suoni (udire la vibrazione della intensità del suono con l'orecchio riconoscendo il fenomeno dei battimenti); registrare con 'Capture Scope' e calcolare la differenza tra i due minimi ottenuti; calcolare la frequenza dei battimenti e verificare che essa corrisponde alla differenza tra le frequenze dei due suoni.

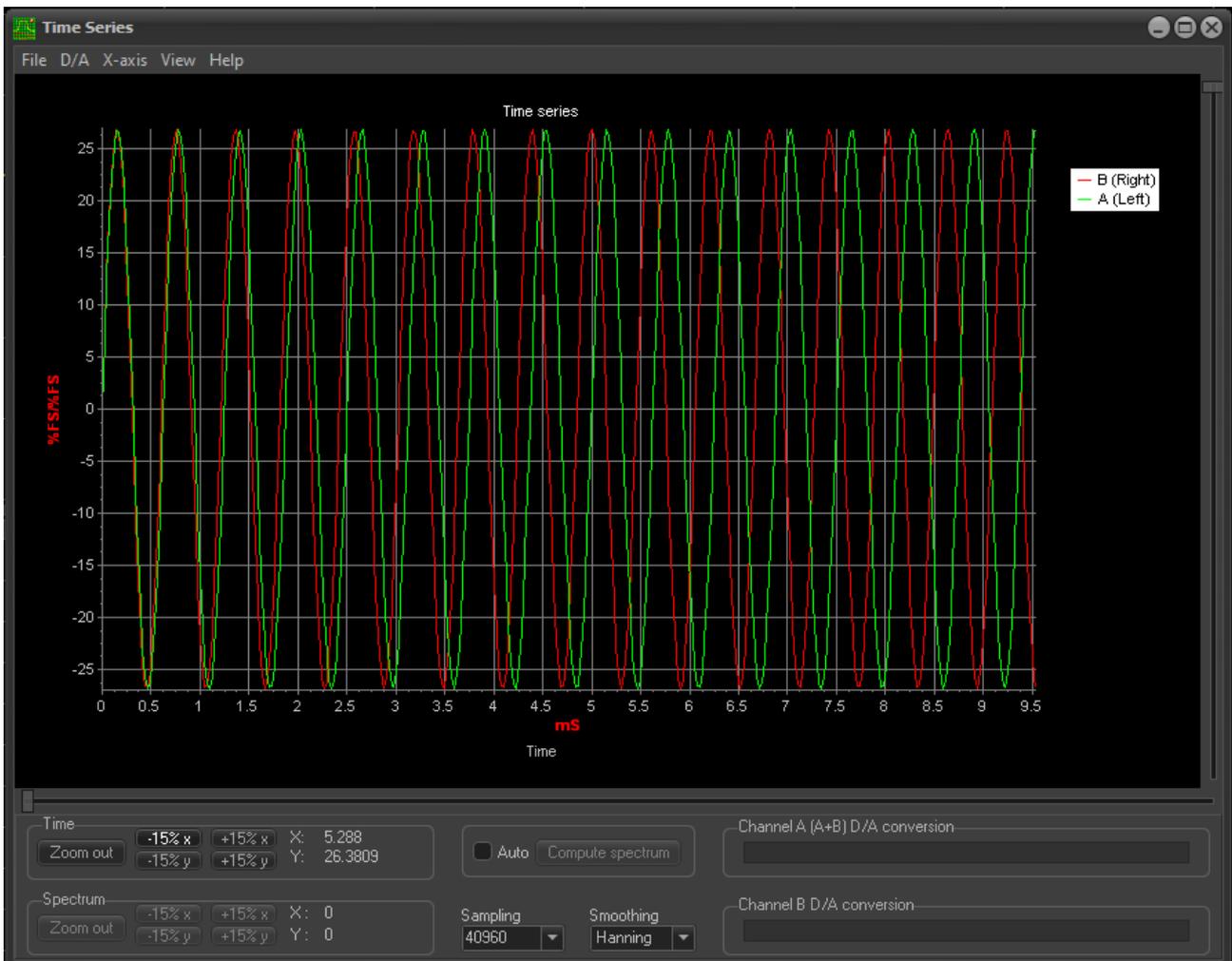
L'orecchio umano sente un suono di un'unica frequenza intermedia fra le due; se si analizza lo spettro delle frequenze, si possono individuare 2 picchi in corrispondenza delle due frequenze generate.

In alternativa è possibile utilizzare due suoni generati direttamente dal software, ottenendo un suono molto 'pulito'. Aprire nel menu principale la voce '**wave**': si aprirà la seguente finestra alla scheda '**Main**' in cui è possibile effettuare le scelte indicate; in particolare bisogna abilitare i due canali, settare le frequenze ad esempio su 1600 Hz e 1650 Hz; inoltre selezionare **Interlock** (i suoni saranno purificati da ogni rumore esterno) e **Loopback** (o **Direct** a seconda della versione del software). In tal modo si ottiene un'onda e uno spettro delle frequenze come nelle seguenti figure:





Visualizzare anche le due onde sullo stesso grafico per evidenziare che in certi istanti le onde sono in fase, in altri in opposizione di fase:

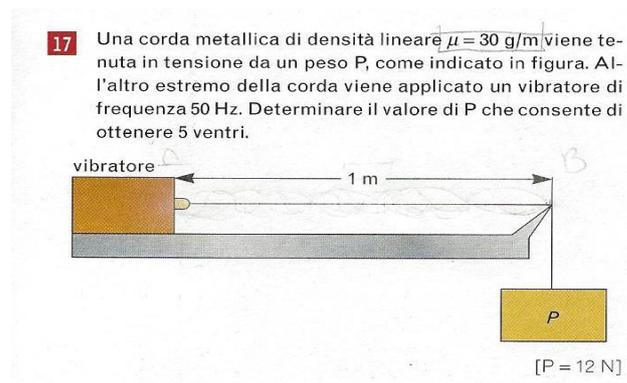


8. **Ottava esperienza:** verifica della legge che esprime la velocità del suono in una corda

È noto dalla teoria che la velocità del suono in una corda è data dalla formula  $v = \sqrt{\frac{T}{d_l}}$ , essendo

$T$  la tensione della corda e  $d_l$  la densità lineare della corda stessa.

Per lo studio e la verifica della formula esistono apparecchiature didattiche che presentano una corda fissa ad un estremo mentre all'altro è appesa una massa variabile, in modo da poter studiare la frequenza e quindi la velocità del suono in funzione della tensione. Anche sui libri di testo sono spesso presentati problemi con un apparato simile



(da: *L'indagine del mondo fisico* vol. 2 - Bergamaschini, Marazzini, Mazzeni)

Forse la verifica potrebbe essere fatta meglio utilizzando un sensore forza applicato ad un estremo della corda.

Tuttavia, avendo a disposizione una chitarra, mi sono chiesto se fosse possibile verificare in qualche modo la formula, variando la tensione applicata alla corda agendo sulle chiavi per accordare la chitarra. Il problema sta nel fatto che risulta difficile misurare direttamente la tensione della corda della chitarra.

Supponendo che la corda della chitarra obbedisca alla legge di Hooke, l'allungamento rispetto alla posizione di equilibrio deve risultare proporzionale alla tensione. Se raddoppio l'allungamento rispetto alla condizione di riposo deve raddoppiare anche la tensione. Ma non è facile individuare la lunghezza della corda a riposo, perché la corda eventualmente già messa in tensione, si 'assesta' (tanto è vero che la corda si 'scorda' facilmente quando è nuova).

Ora, facendo suonare il Mi cantino ( $Mi_3$ , prima corda della chitarra, tutta di nylon) ho rilevato la frequenza  $f_3$  mediante lo spettro delle frequenze del Visual Analyser e tirando la corda di un giro completo della chiave ho ottenuto la frequenza  $f_4$ ; poi allentando la chiave di un giro completo, a partire dalla posizione del  $Mi_3$  ho misurato la nuova frequenza  $f_2$ , e poi allentando ancora di un giro la frequenza  $f_1$ , infine allentando ancora la corda di un giro della chiave ho ottenuto la frequenza più bassa  $f_0$ . Ho preferito non tirare eccessivamente la corda per evitare una eventuale rottura. La frequenza  $f_3$  corrisponde quindi a quella del  $Mi_3$  (329,6 Hz). Le frequenze ottenute, misurate con l'oscilloscopio virtuale, sono:

$f_0$	249 Hz
$f_1$	276 Hz
$f_2$	301 Hz
$f_3$	330 Hz
$f_4$	354 Hz

Per misurare l'allungamento della corda ad ogni giro di chiave ho misurato con un calibro il diametro del cilindretto attorno a cui si avvolge la corda, che risulta di 10,4 mm e ho osservato che ci vogliono circa 16 giri della chiave per effettuare un giro completo del cilindretto.

Pertanto ad ogni giro della chiave la corda si allunga (o si accorcia) di una quantità

$$\Delta l = \frac{\pi D}{16} = 2,041 \text{ mm} \quad \text{con } D = \text{diametro del cilindretto}$$

Ora, se è vera la  $v = \sqrt{\frac{T}{d_l}}$ , deve risultare

$$T = v^2 \cdot d_l \quad \text{e quindi} \quad T - T_0 = (v^2 - v_0^2) \cdot d_l$$

e ricordando la legge di Hooke e la relazione tra velocità e frequenza di un'onda

$$k \cdot \Delta x = d_l \cdot \lambda^2 (f^2 - f_0^2);$$

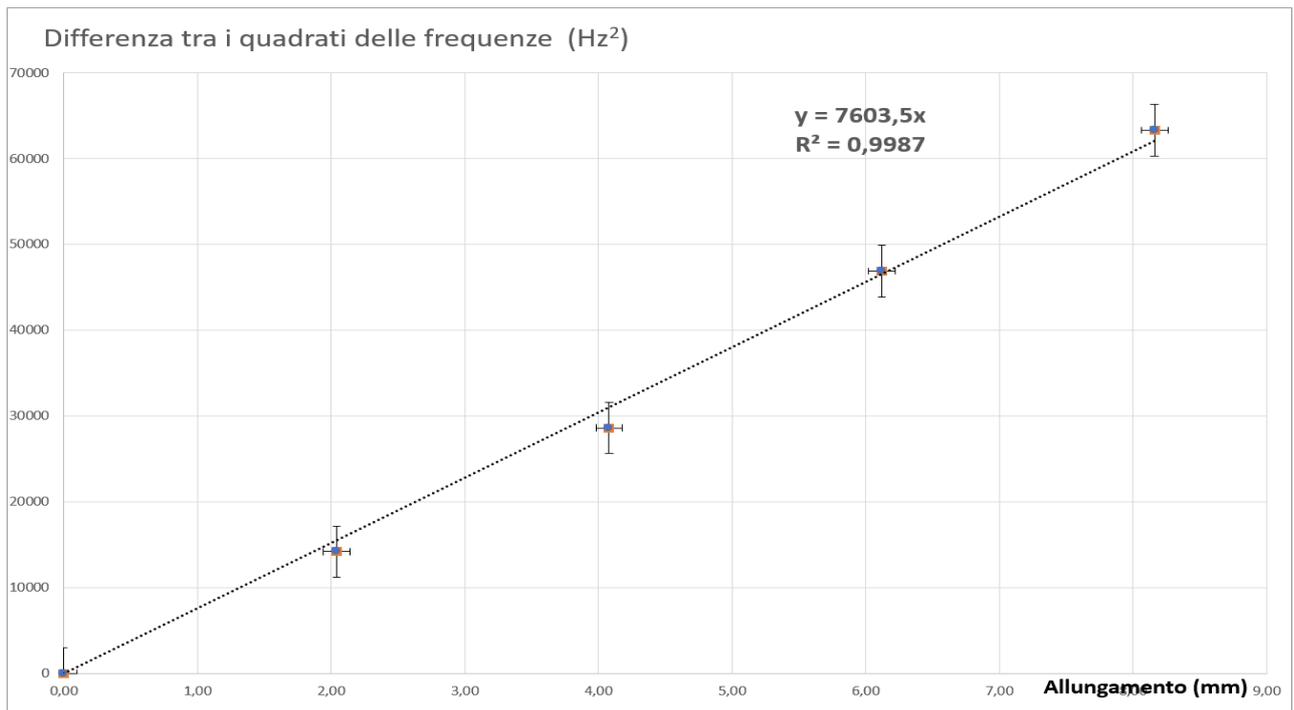
infine:

$$\boxed{(f^2 - f_0^2) = \frac{k}{d_l \cdot \lambda^2} \cdot \Delta x}$$

Quindi la variazione del quadrato di una frequenza rispetto al quadrato della frequenza più bassa deve risultare proporzionale all'allungamento. I dati che ho ottenuto sono riportati nella seguente tabella:

<b>f (Hz)</b>	<b><math>\Delta x</math> (mm)</b>	<b><math>f^2 - f_0^2</math> (Hz<sup>2</sup>)</b>
249	0	0
276	2,04	14.175
301	4,080	28.600
330	6,12	46.899
354	8,160	63.315

E il grafico relativo è il seguente:



In ottimo accordo con una relazione di proporzionalità diretta.

Quindi ricordando che  $v = \lambda \cdot f$  e che  $d_l = d \cdot S$

$d_l$  = densità lineare

$d$  = densità del nylon (circa 1,14 kg/dm<sup>3</sup>)

$S$  = sezione della corda (0,71 mm)

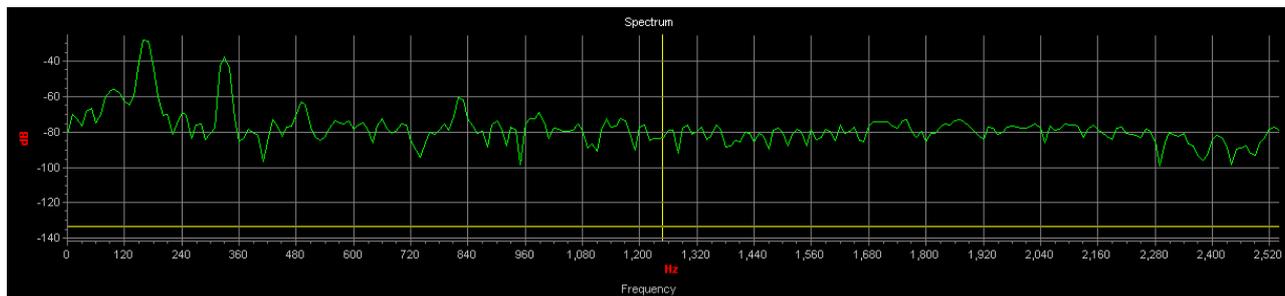
(il diametro della corda per chitarra è indicato sulla confezione)

si può stimare oltre che le velocità del suono nella corda, anche le diverse tensioni alle quali è sottoposta la corda. Si ottiene:

lunghezza corda (m)	lunghezza d'onda (m)	frequenza misurata (Hz)	velocità onda (m/s)	Tensione (N)
0,65	1,3	249	323,7	47,3
0,65	1,3	276	358,8	58,1
0,65	1,3	301	391,3	69,1
0,65	1,3	330	429,0	83,1
0,65	1,3	354	460,2	95,6



## 10. Decima esperienza: suoni armonici in una chitarra



Pizzicando la corda mentre si tiene un dito a metà della corda

Effettuando il suono armonico sulla corda Mi (6<sup>a</sup> corda) alla 12<sup>a</sup> posizione (metà corda) si nota che la nota fondamentale di 82 Hz non c'è più, mentre sono presenti in modo evidente le due armoniche a 164 Hz e a 328 Hz: la nota fondamentale diviene quella a 164 Hz e il suono è 'dolce'.