



**Unità didattica: CAF per TCA Cod.5521**

**Titolo della lezione: Fonometria**

**Docente: Prof. Angelo Farina**



# Premessa – I

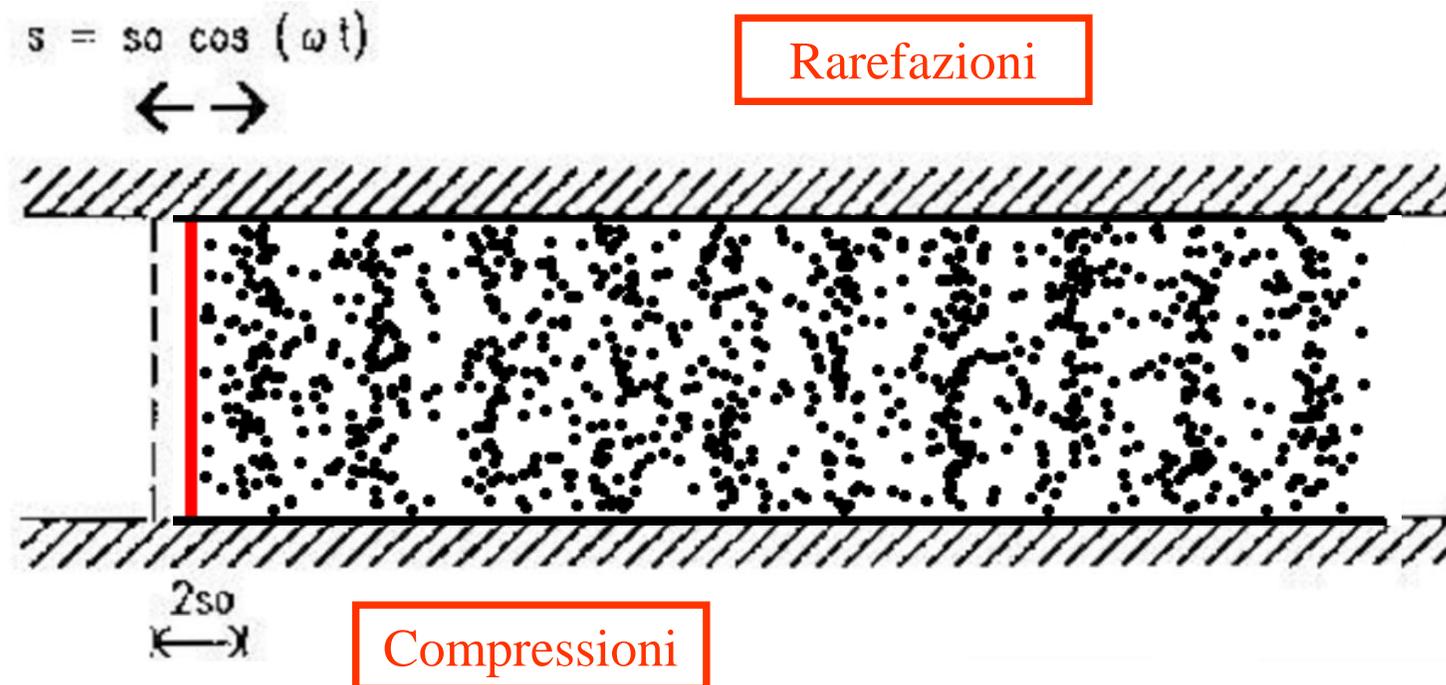
- Il tema delle misurazioni acustiche è **vasto**
- Ampia è la gamma di trasduttori e strumenti di misura dei quali ci si può avvalere
- **Sintetizzando estremamente** gran parte delle misure acustiche può essere ricondotta alla misura della **pressione sonora**
- Tuttavia in alcune specifiche misure si deve invece misurare anche la **velocità delle particelle dell'aria (particle velocity)**
- Lo strumento che misura la pressione sonora è il **microfono omnidirezionale**
- Esistono microfoni non omnidirezionali, con una **direttività** via via più marcata tanto più sono sensibili alla **particle velocity**

# Premessa – II

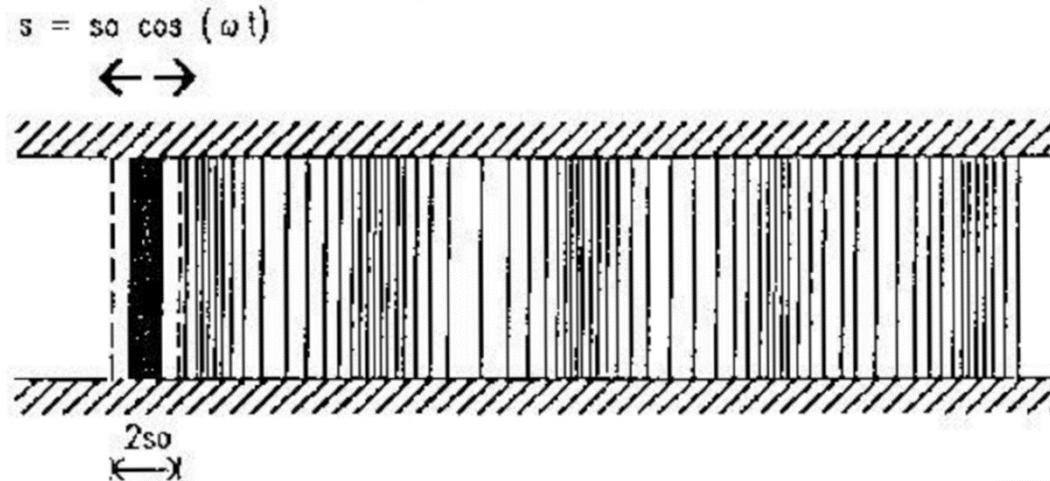
- Il **valore istantaneo della pressione sonora non fornisce informazioni immediatamente utili per gli scopi delle misurazioni acustiche** (energetiche).
- **È necessario applicare** al valore istantaneo della pressione sonora, o meglio, al segnale elettrico proporzionale ad essa e generato dal microfono **opportune operazioni** (filtraggio, mediatura, livello in dB SPL) al fine di ottenere valori numerici più comprensibili e meglio correlati agli effetti che tale pressione sonora ha implicato.
- **il fonometro è il dispositivo, grazie al microfono di cui è dotato**, in grado di rilevare le variazioni di pressione generate dalle onde sonore e di visualizzare successivamente su un display (eventualmente su un elaboratore elettronico) il livello di campo misurato

# Sorgente sonora (1):

**Sorgente sonora:** superficie piana che si muove di moto armonico semplice ad una estremità di un condotto di lunghezza infinita nel quale si trova un mezzo elastico in quiete.



# Sorgente sonora (2):



La superficie del pistone si muove di moto armonico semplice:

- spostamento =  $s = s_0 \cos(\omega t)$ ,
- velocità =  $v = ds/dt = -\omega s_0 \sin(\omega t)$ ,
- accelerazione =  $a = dv/dt = -\omega^2 s_0 \cos(\omega t)$ ,

dove  $s_0$  rappresenta il valore dello spostamento massimo della superficie del pistone.

## Valore medio efficace (RMS) di $p$ e $v$

Quando la forma d'onda è complessa, diventa ambigua la definizione dell'ampiezza media del segnale da analizzare, e l'uso del valore istantaneo massimo non è rappresentativa della percezione umana. Si impiega allora il cosiddetto Valore Medio Efficace o Valore **RMS** del segnale stesso, che assume un preciso significato energetico:

$$p_{eff} = \sqrt{\frac{1}{T} \cdot \int_0^T [p(t)]^2 \cdot dt}$$

$$v_{eff} = \sqrt{\frac{1}{T} \cdot \int_0^T [|\vec{v}(t)|]^2 \cdot dt} = \sqrt{\frac{1}{T} \cdot \int_0^T \{[v_x(t)]^2 + [v_y(t)]^2 + [v_z(t)]^2\} \cdot dt}$$

# Grandezze fisiche:

Le grandezze fisiche più importanti che caratterizzano il fenomeno sonoro sono:

- |                             |          |                        |                         |
|-----------------------------|----------|------------------------|-------------------------|
| • Pressione sonora          | <b>p</b> | <b>Pa</b>              | } Grandezze di campo    |
| • Velocità delle particelle | <b>v</b> | <b>m/s</b>             |                         |
| <hr/>                       |          |                        |                         |
| • Densità di energia sonora | <b>D</b> | <b>J/m<sup>3</sup></b> | } Grandezze energetiche |
| • Intensità sonora          | <b>I</b> | <b>W/m<sup>2</sup></b> |                         |
| • Potenza sonora            | <b>W</b> | <b>W</b>               |                         |

# Pressione sonora, velocità ed impedenza

Al passaggio dell'onda sonora nel mezzo elastico si originano una sequenza di compressioni ed espansioni dello stesso, ciò implica una variazione della pressione ambiente rispetto al valore di equilibrio. Tali compressioni ed espansioni danno origine alla **pressione acustica** “ $p'$ ” che dipende dalla frequenza ed ampiezza del moto armonico della sorgente, dalle caratteristiche elastiche e dalla massa del mezzo acustico. Il legame tra la **velocità delle particelle** del mezzo elastico “ $v'$ ” e pressione acustica “ $p'$ ” vale:

- $$\frac{p'}{v'} = \rho_0 \cdot c_0 \quad (\text{kg/m}^2\text{s})$$

dove  $\rho_0$  è la densità del mezzo elastico ed il prodotto  $\rho_0 c_0$  è detta **impedenza acustica (Z)** dell'onda piana ( $\text{kg/m}^2\text{s}$ )(rayl).

# Energia contenuta nel mezzo elastico:

Nel caso di onde piane in un mezzo elastico non viscoso, l'**energia per unità di volume** o **densità di energia sonora**  $D$  contenuta in  $1 \text{ m}^3$  del mezzo è data dalla somma di due contributi:

- $D = \frac{E}{V} = \frac{1}{2} \cdot \rho_0 \cdot v_{\text{eff}}^2$  (J/m<sup>3</sup>) - ENERGIA CINETICA

dove  $v_{\text{eff}}$  è la velocità della superficie del pistone e, per onde piane in un mezzo non viscoso, anche delle particelle del mezzo.

- $D = \frac{1}{2} \cdot \frac{p_{\text{eff}}^2}{\rho_0 \cdot c_0^2}$  (J/m<sup>3</sup>) - ENERGIA POTENZIALE

essa correla una grandezza direttamente misurabile, come il **valore efficace della pressione sonora** " $p_{\text{eff}}$ ", con l'energia immagazzinata causa la compressione elastica del mezzo.

## Energia contenuta nel mezzo elastico:

Nel caso di onde piane, i due contributi suddetti sono fra loro uguali. Nel caso generale di onde non piane, o in presenza di onde stazionarie (che rimbalzano avanti ed indietro) l'energia non è equamente suddivisa fra cinetica e potenziale, ed occorre valutare separatamente, in ciascun punto e in ciascun istante, i due contributi e sommarli:

$$D = \frac{E}{V} = \frac{1}{2} \cdot \left[ \rho_0 \cdot v_{\text{eff}}^2 + \frac{p_{\text{eff}}^2}{\rho_0 \cdot c_0^2} \right] \quad (\text{J/m}^3)$$

In generale, quindi, la valutazione corretta del contenuto energetico del campo sonoro richiede la simultanea ed indipendente misurazione sia della pressione sonora, sia della velocità delle particelle (che è un vettore con 3 componenti cartesiane).

# Intensità sonora:

L'**Intensità sonora** " $I$ " è il parametro di valutazione del flusso di energia che attraversa una determinata superficie.

E' definita come l'energia che nell'unità di tempo attraversa, in direzione normale, una superficie unitaria ( $W/m^2$ ).

L'intensità  $\vec{I}$  è un parametro vettoriale locale definito, nel punto P, da un modulo, una direzione ed un verso:

$$\vec{I}(P, t) = p(P, t) \cdot \vec{v}(P, t)$$

Nel caso di *onde piane*, in un mezzo in quiete non viscoso, tra densità ed intensità di energia sonora, intercorre la relazione:

- $I = D \cdot c_0 \quad (W/m^2)$

# Premessa – II

- Il **valore istantaneo della pressione sonora non fornisce informazioni immediatamente utili per gli scopi delle misurazioni acustiche** (energetiche).
- **È necessario applicare** al valore istantaneo della pressione sonora, o meglio, al segnale elettrico proporzionale ad essa e generato dal microfono **opportune operazioni** (filtraggio, mediatura, livello in dB SPL) al fine di ottenere valori numerici più comprensibili e meglio correlati agli effetti che tale pressione sonora ha implicato.
- **il fonometro è il dispositivo, grazie al microfono di cui è dotato**, in grado di rilevare le variazioni di pressione generate dalle onde sonore e di visualizzare successivamente su un display (eventualmente su un elaboratore elettronico) il livello di campo misurato

# FONOMETRO (SOUND LEVEL METER)



# Normativa di riferimento – I

- IEC – 61672-1
- IEC – 61672-2
- IEC – 61672-3

*IEC 61672-1:2013 gives electroacoustical performance specifications for **three kinds of sound measuring instruments**:*

- ***time-weighting sound level meters** that measure exponential-time-weighted, frequency-weighted sound levels; (**Livello istantaneo con pesatura esponenziale**)*
- ***integrating-averaging sound level meters** that measure time-averaged, frequency-weighted sound levels (**Livello equivalente - pesato A -**); and*
- ***integrating sound level meters** that measure frequency-weighted sound exposure levels (**SEL**).*

**I tre tipi di strumenti normati sono normalmente racchiusi all'interno di un unico fonometro**

# Normativa di riferimento – II

*Sound level meters specified in this standard are intended to measure sounds generally in the range of human hearing.*

*Two performance categories, class 1 and class 2, are specified in this standard. Acceptance limits for class 2 are greater than, or equal to, those for class 1.*

*This standard is applicable to a range of designs for sound level meters.*

*A sound level meter may be a self-contained hand-held instrument with an attached microphone and a built-in display device.*

*A sound level meter may be comprised of separate components in one or more enclosures and may be capable of displaying a variety of acoustical signal levels.*

*Sound level meters may include extensive analogue or digital signal processing, separately or in combination, with multiple analogue and digital outputs.*

*Sound level meters may include general-purpose computers, recorders, printers, and other devices that form a necessary part of the complete instrument.*

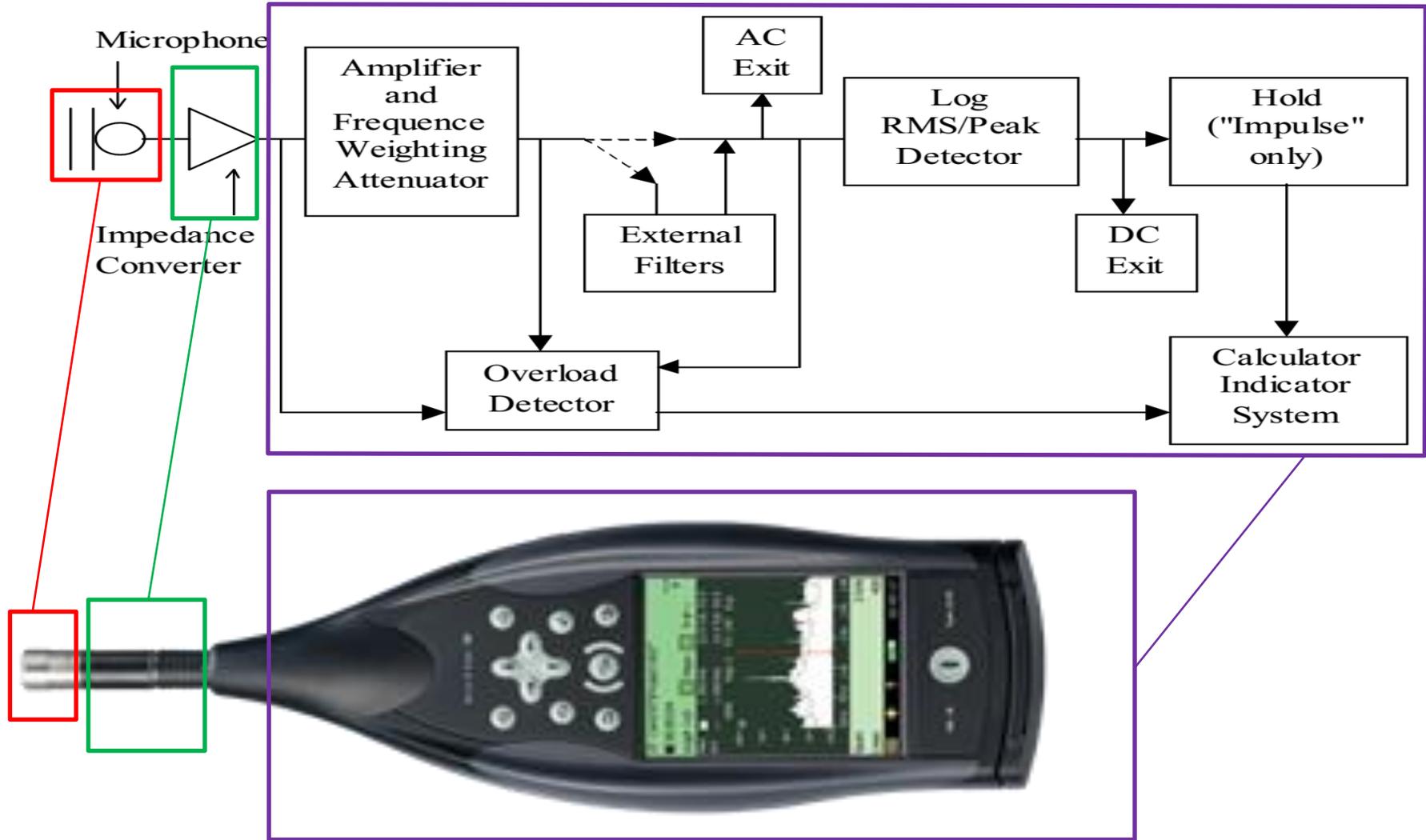
# Normativa di riferimento – III

*Sound level meters may be designed for use with an operator present or for automatic and continuous measurements of sound level without an operator present.*

*Specifications in this standard for the response to sound waves apply without an operator present in the sound field.*

***This second edition cancels and replaces the first edition published in 2002.** It constitutes a technical revision. In this second edition, conformance to specifications is demonstrated when measured deviations from design goals do not exceed the applicable acceptance limits, and when the uncertainty of measurement does not exceed the corresponding maximum-permitted uncertainty, with both uncertainties determined for a coverage probability of 95 %.*

# Fonometro (Sound Level Meter)



# IL MICROFONO



# Il microfono – I

- Microfono: trasduttore che trasforma la pressione acustica (**Pa**) in tensione elettrica (**V**)
- **Microfono** misura la variazione di pressione rispetto alla pressione atmosferica
- **Barometro** misura la pressione atmosferica



*Sensore: è la parte sensibile alle variazioni della grandezza fisica.*

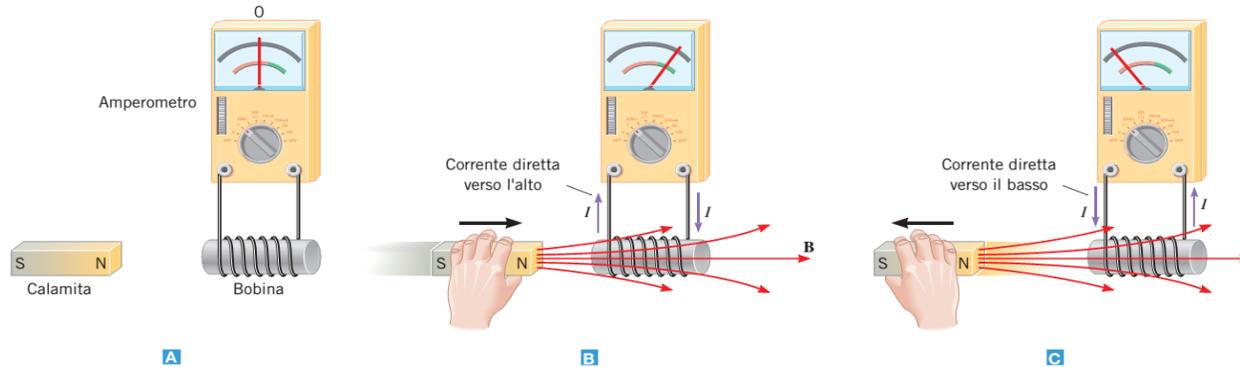
*Trasduttore: dispositivo che permette la misura o il controllo di una grandezza fisica. Normalmente è costituito dal sensore e da una parte circuitale.*

# Il microfono – II

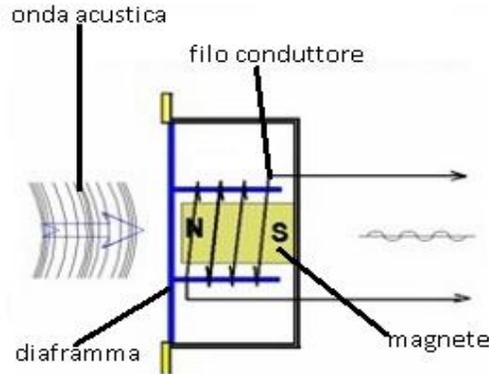
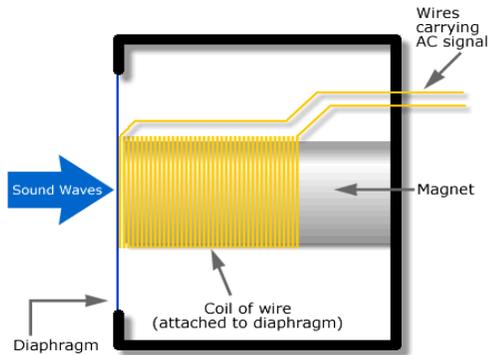
- **3 differenti fenomeni fisici** possono essere sfruttati per convertire la pressione acustica in tensione elettrica:
  - Il moto relativo tra un conduttore e un magnete determina una variazione di tensione ai capi del conduttore
  - Un materiale piezoelettrico sottoposto a trazione o compressione genera una variazione di tensione sulla superficie
  - La variazione della capacità di un condensatore mantenuto a carica costante genera una variazione di tensione sulle armature
- Ai 3 differenti fenomeni fisici corrispondono **3 differenti tipologie di microfoni**:
  - Microfono **magnetodinamico**
  - Microfono **piezoelettrico**
  - Microfono **a condensatore**

# Il microfono magnetodinamico

- «Il moto relativo tra un conduttore e un magnete determina una variazione di tensione ai capi del conduttore»

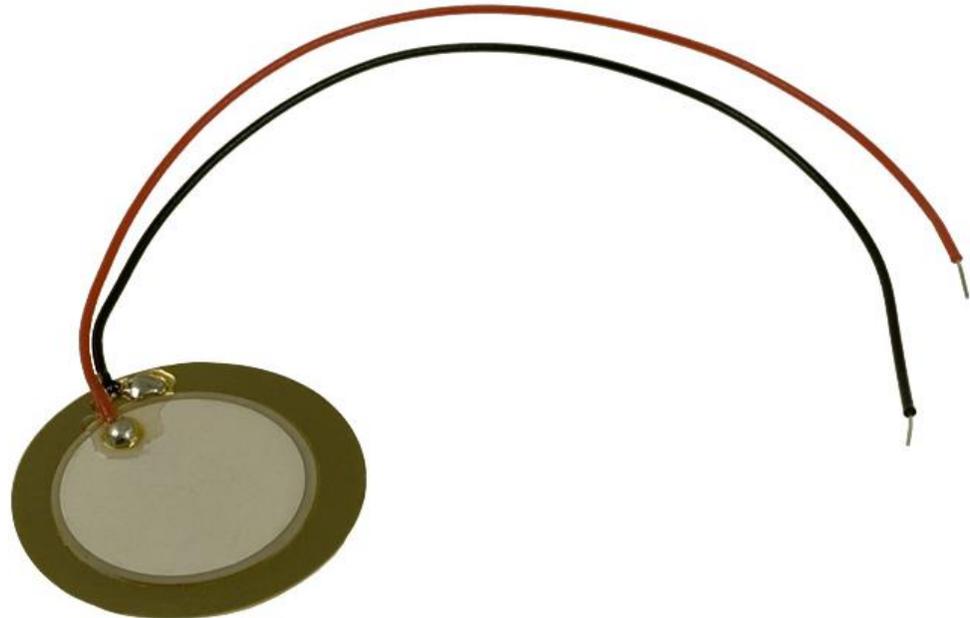
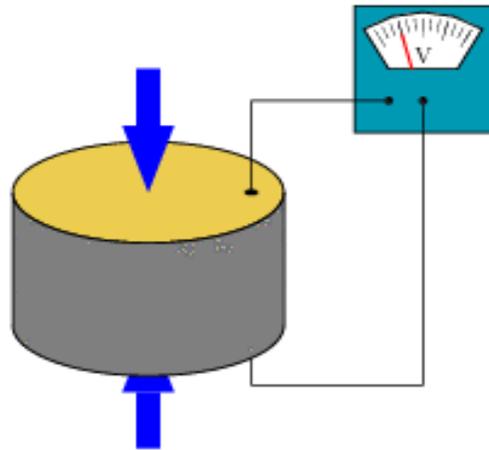


Cross section of a dynamic mic



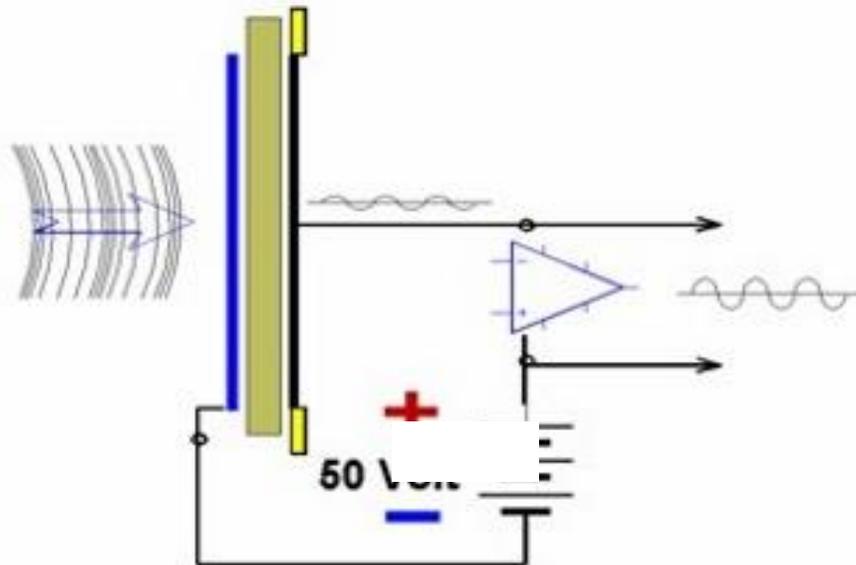
# Il microfono piezoelettrico

- «Un materiale piezoelettrico sottoposto a trazione o compressione genera una variazione di tensione sulla superficie»



# Il microfono a condensatore – I

- «La variazione della capacità di un condensatore mantenuto a **carica costante** genera una variazione di tensione sulle armature»



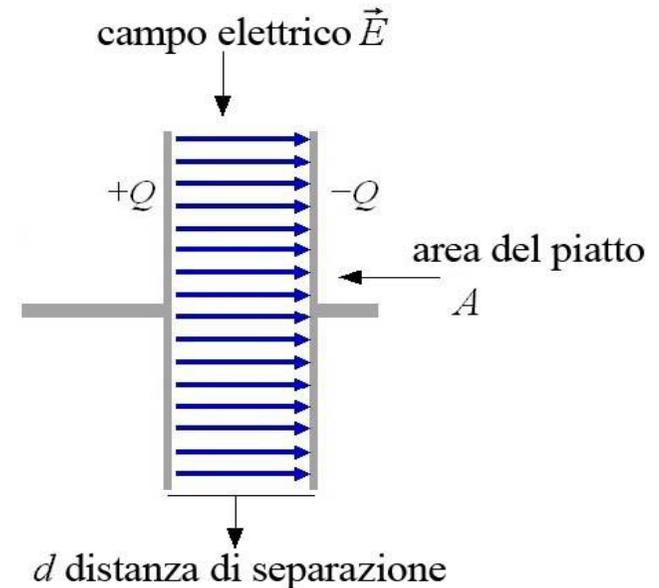
# Il microfono a condensatore – II

Carica del condensatore:  
deve essere mantenuta costante

$$\Delta V = \frac{Q}{C}$$

$$C = \epsilon \frac{S}{d}$$

Varia al variare della pressione

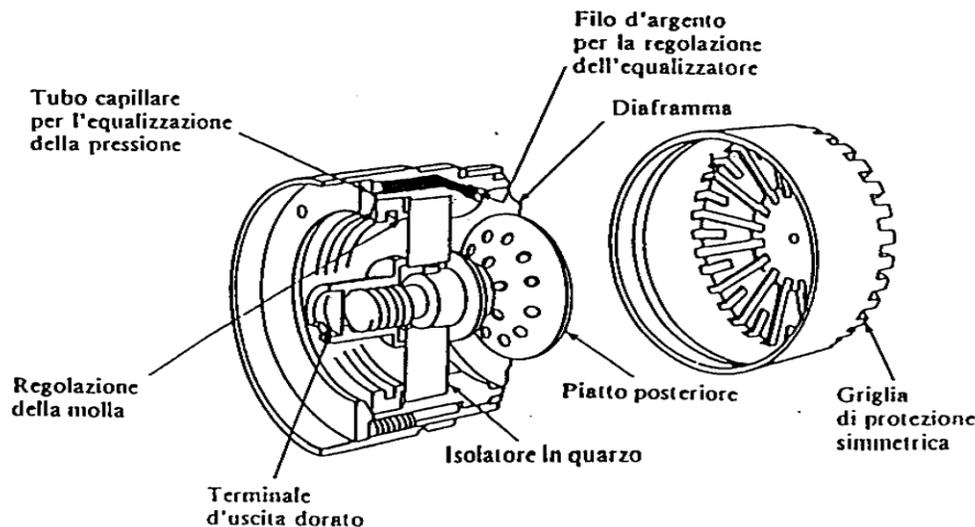


- S: Superficie dell'armatura
- d: Distanza tra le armature
- $\epsilon$ : Permittività elettrica, dipende dal dielettrico (il materiale tra le due armature)

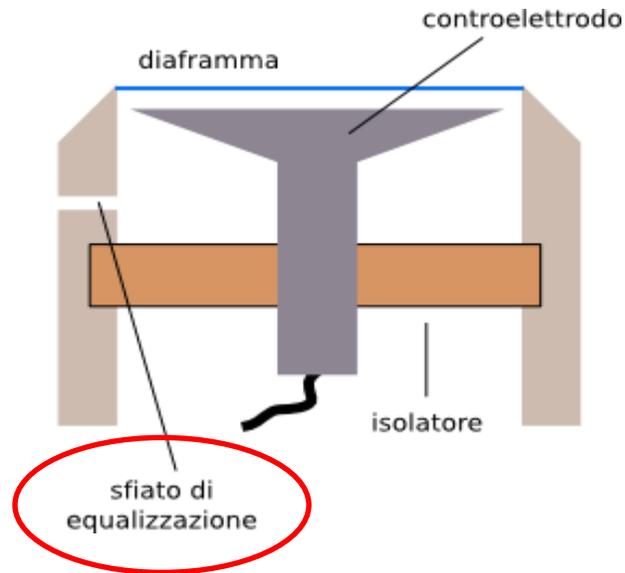
# Il microfono a condensatore – III

Esistono 2 modi per **mantenere costante Q**:

- Utilizzare una alimentazione esterna (microfono a condensatore a **polarizzazione esterna**, tipicamente a 200V DC)
- Utilizzare dei materiali dielettrici pre-polarizzati permanentemente (microfono a condensatore prepolarizzato: microfono a **elettrete**)



# Il microfono a condensatore – IV



- Lo sfiato di equalizzazione (foro di equalizzazione) rende il microfono **UN** microfono e non un barometro.
- Lo sfiato può essere laterale, a diretto contatto con l'ambiente esterno, o posteriore, che sfocia in una parte interna del microfono. In questo caso è possibile farlo passare attraverso un contenitore che contiene particolari sali che hanno il compito di asportare l'umidità dell'aria.

# Il microfono a condensatore – V

- I microfoni dei **fonometri** generalmente sono **microfoni a condensatore**.
- Pregi:
  - Elevata sensibilità
  - Ampia risposta in frequenza
  - Bassa sensibilità alla temperatura
- Difetti.
  - Elevata sensibilità all'umidità
  - **Fragilità**

# Caratteristiche di un microfono – I

- La **Sensibilità** [mV/Pa], espressa generalmente ad una frequenza di riferimento (solitamente 1000 Hz)
- Il **rumore di fondo** generato in assenza di pressione acustica, in dB(A)
- La variazione della sensibilità in funzione della frequenza, cioè la **risposta in frequenza**
- La variazione della sensibilità in funzione dell'angolo di incidenza del fronte d'onda, cioè la **caratteristica di direttività**
- Il **massimo livello di pressione misurabile** prima dell'insorgere di fenomeni non lineari (distorsione)
- Il **campo dinamico**: la differenza tra il livello massimo di pressione misurabile e il livello del rumore di fondo
- Le **dipendenze dai fattori atmosferici**

# Caratteristiche di un microfono – II

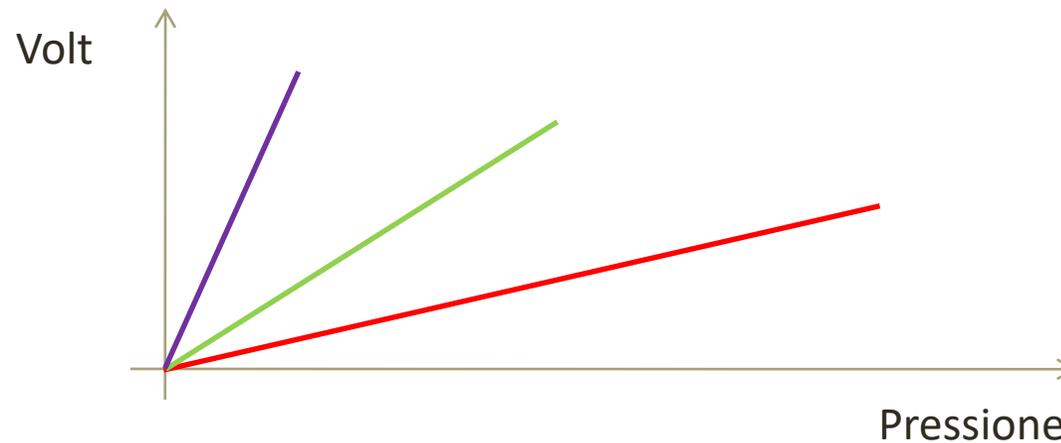
- **Sensibilità**: La sensibilità di un microfono è il rapporto fra la tensione di uscita e la pressione acustica in ingresso alla membrana
- *Sensitivity*  $y = \frac{mV}{Pa}$
- Valori tipici sono da 10 mV/Pa (sensibilità bassa) a 50 mV/Pa (sensibilità alta).
- Se un microfono ha sensibilità = 50 mV/Pa , significa che in presenza di 1 Pa esso erogherà una tensione di 50 mV.
- 1 Pa  $\rightarrow$  94 dB SPL

$$20 * \log_{10} \left( \frac{1}{20 \cdot 10^{-6}} \right) \cong 94$$

p  
p0

# Caratteristiche di un microfono – III

- Ne consegue che tanto più è alta la sensibilità del microfono tanto più è basso il minimo livello di pressione sonora che il microfono riesce a percepire e trasformare in segnale elettrico.



Sensibilità **ROSSO** < Sensibilità **VERDE** < Sensibilità **VIOLA**

- Si nota la perfetta linearità fra pressione sonora e tensione elettrica

# Caratteristiche di un microfono – IV

- **Rumore di fondo:** L'agitazione termica delle molecole e degli atomi della membrana fanno vibrare la membrana stessa. Quando il microfono è polarizzato e a temperatura superiore allo zero assoluto produce un segnale di rumore. Si può rappresentare questo rumore termico come una effettiva pressione di rumore

$$\bar{p} = \sqrt{4 \cdot k \cdot T \cdot R \cdot \Delta f}$$

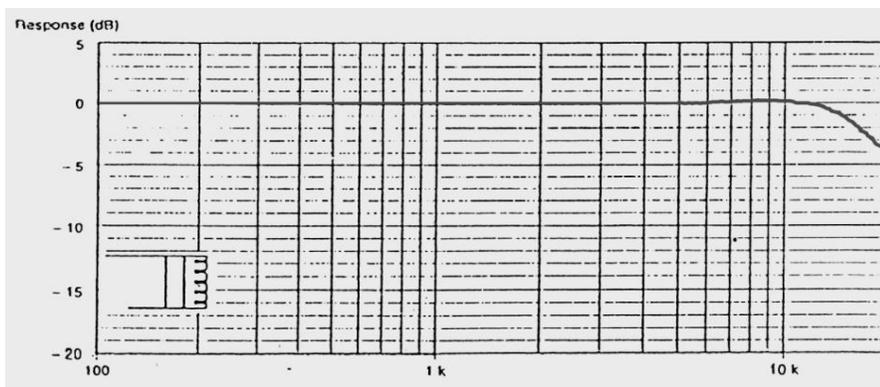
Dove

- $p$  := Pressione equivalente di rumore
- $k$  := Costante di Boltzmann
- $T$  := Temperatura ambientale assoluta (Kelvin)
- $R$  := Resistenza acustica del sistema-membrana in  $N \cdot s/m^3$
- $\Delta f$  := larghezza di banda considerata

Un buon microfono da misura ha un rumore di fondo attorno ai 10-15 dB(A)

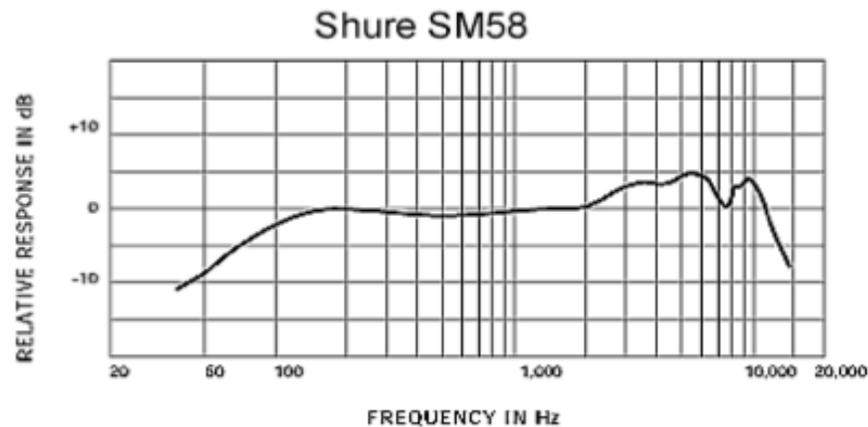
# Caratteristiche di un microfono – V

- **Risposta in frequenza** (sensibilità al variare della frequenza):



condensatore

dinamico



# Caratteristiche di un microfono – VI

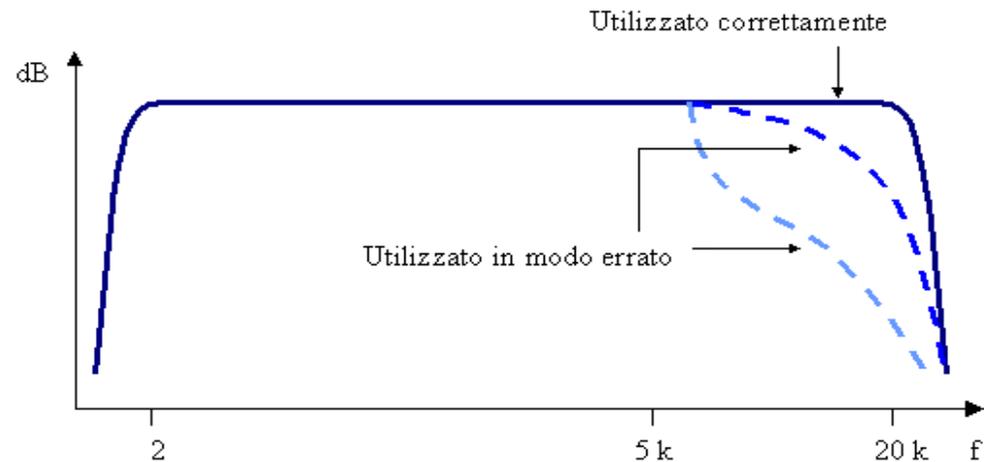
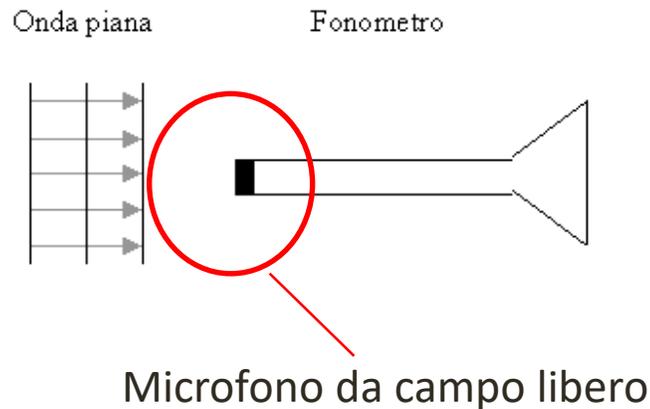
- **Risposta in frequenza** (sensibilità al variare della frequenza):
- Per un microfono da misura **l'ideale sarebbe** quello di avere **una risposta in frequenza costante per ogni frequenza (piatta, flat)**, quindi essere neutrale.
- **Nella pratica** questo **non è facile** da ottenere:
  - Gli effetti di **diffrazione** attorno al microfono determinano modifiche della risposta in frequenza
  - **E' lo stesso trasduttore che** a partire da frequenze con una lunghezza d'onda confrontabile con la sua dimensione perturba l'ambiente e **produce alterazioni della risposta in frequenza**

# Caratteristiche di un microfono – VII

- Per garantire misure neutrali (risposta piatta) esistono microfoni diversi, ottimizzati per il tipo di campo da misurare:
  - Microfoni da **campo libero**
  - Microfoni da **campo diffuso**
  - Microfoni da misure in accoppiatore (per le tarature)

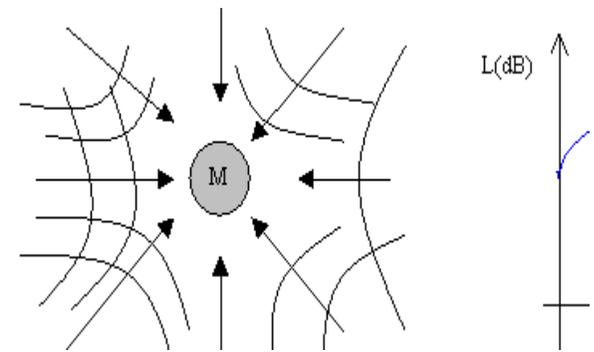
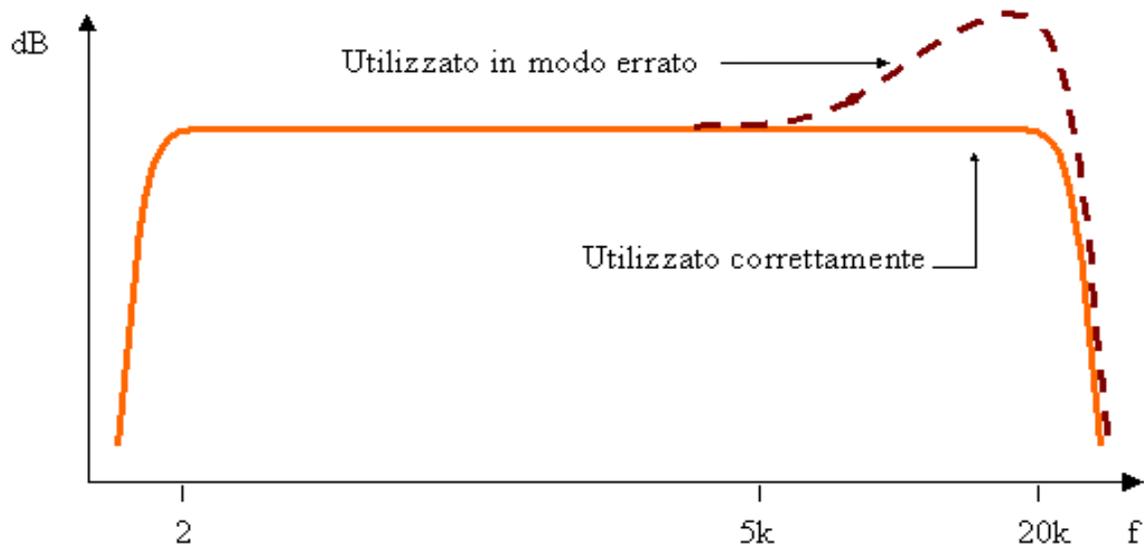
# Microfoni da campo libero

- I microfoni da **campo libero** hanno una risposta piatta quando puntati in direzione della sorgente, sono progettati per misurare il suono diretto (incidenza  $0^\circ$ ).
- Al contrario **tendono a sottostimare** la risposta in alta frequenza **quando puntati con un angolo di incidenza  $\neq 0^\circ$  oppure utilizzati per misure in campo diffuso**



# Microfoni da campo diffuso

- I microfoni da **campo diffuso**, progettati per misurare la pressione in campi in cui non esiste una direzione di propagazione privilegiata (campo diffuso, riverberante), **tendono a sovrastimare** il contributo in alta frequenza **quando puntanti in direzione di una eventuale sorgente**



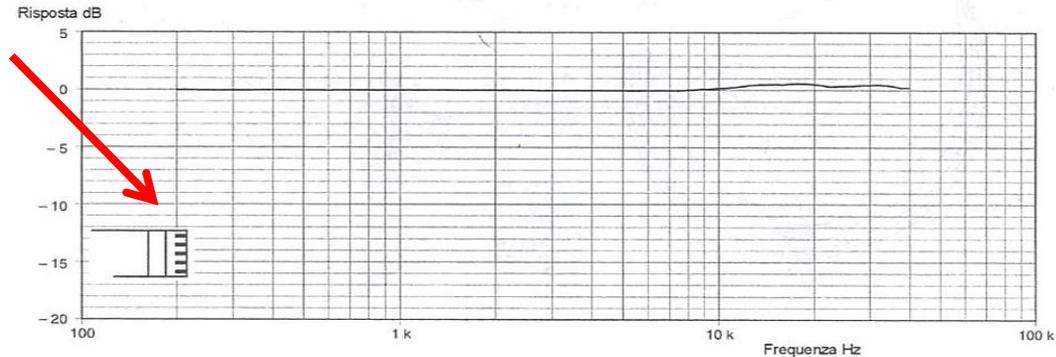
# Microfoni da campo libero / campo diffuso

- Avendo a disposizione un solo tipo di microfono di misura ???
- Avendo a disposizione solo **un microfono da campo libero e dovendo misurare un campo diffuso**:
  - In molti fonometri la circuiteria è in grado di applicare una compensazione alla risposta in frequenza del microfono
  - Il filtraggio è **ad-hoc**
- Avendo a disposizione solo **un microfono da campo diffuso e dovendo misurare un campo libero**:
  - Si orienta il microfono a  $90^\circ$  rispetto alla sorgente sonora

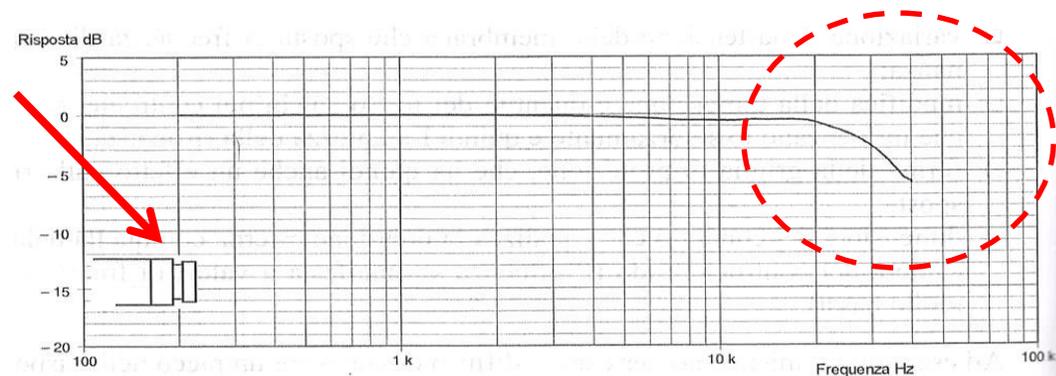
# Microfoni da campo libero / campo diffuso

- Esempi di risposte in frequenza di un **microfono** da 1/2'' da campo **libero** in diverse condizioni di funzionamento:

- Misura in campo libero (con **griglia** sul microfono)



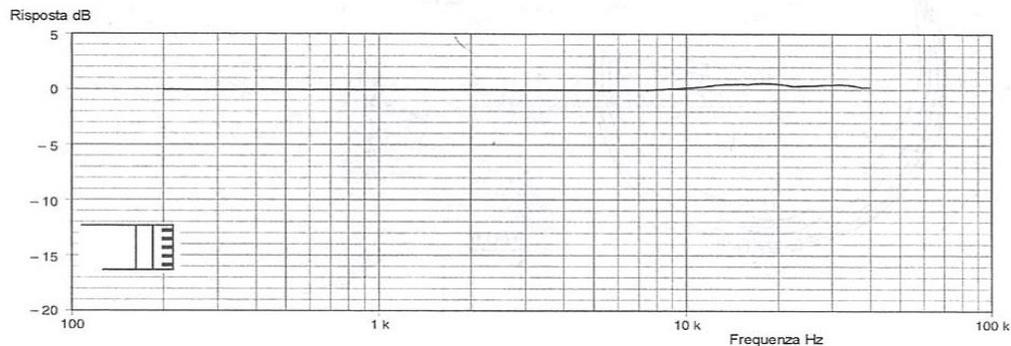
- Misura in campo libero (**senza griglia** sul microfono)



# Microfoni da campo libero / campo diffuso

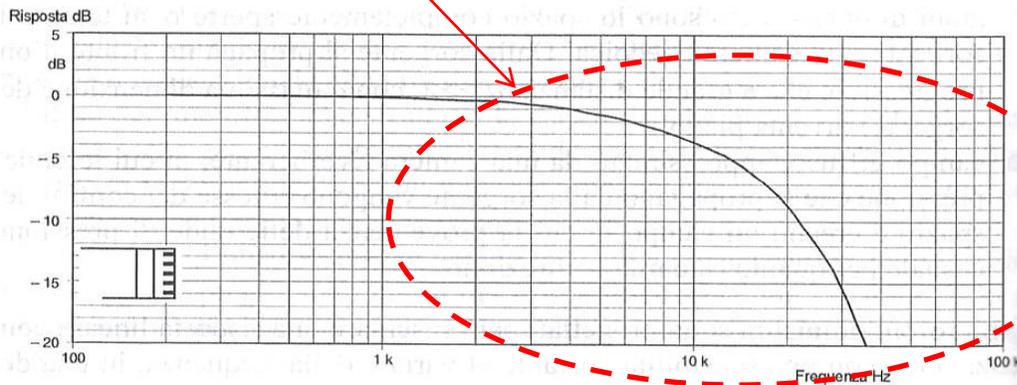
- Esempi di risposte in frequenza di un **microfono** da ½" **da campo libero** in diverse condizioni di funzionamento:

- Misura in campo libero (con griglia sul microfono)



da 2 kHz per ½", da 1 kHz per 1"

- Misura in campo diffuso (con griglia sul microfono)

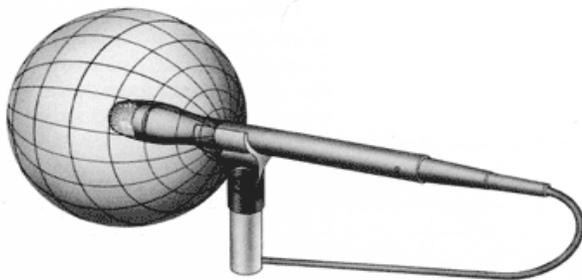


# Microfoni da campo libero / campo diffuso

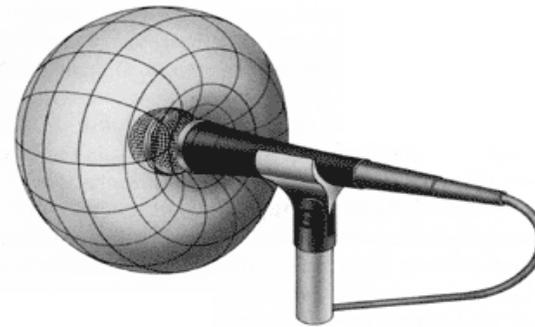
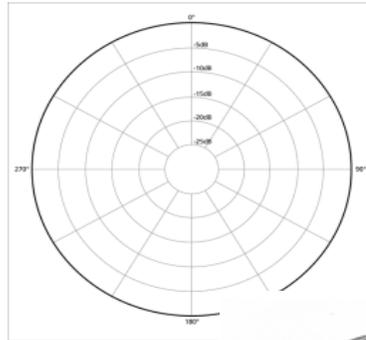
- La scelta del tipo di microfono da utilizzare è legata non solo alla particolare applicazione ma anche alla normativa che si intende seguire per le misure:
  - la Commissione Elettrotecnica Internazionale (IEC) specifica l'utilizzo del microfono a campo libero
  - l'Ente Nazionale Americano di Standardizzazione (ANSI) richiede l'uso dei microfoni ad incidenza casuale (campo diffuso).

# Caratteristiche di un microfono – VIII

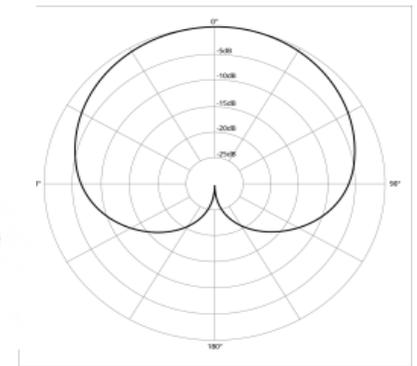
- **Direttività:** La sensibilità del microfono in funzione dell'angolo di incidenza dell'onda sonora



Omnidirezionale

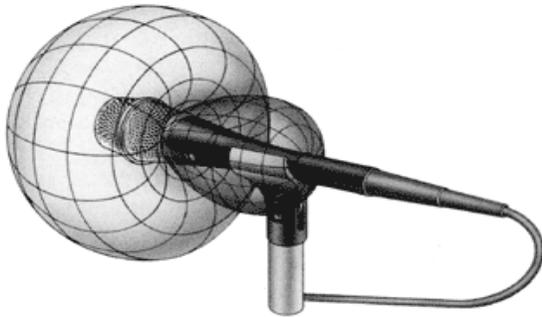


Cardioide



# Caratteristiche di un microfono – IX

- **Direttività:** La sensibilità del microfono in funzione dell'angolo di incidenza dell'onda sonora



Supercardioid

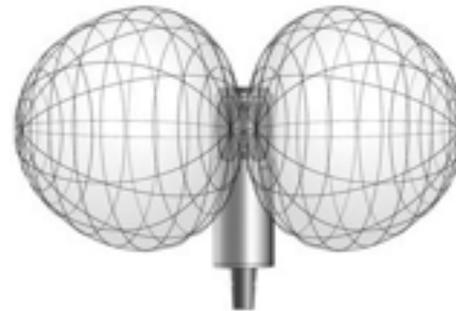
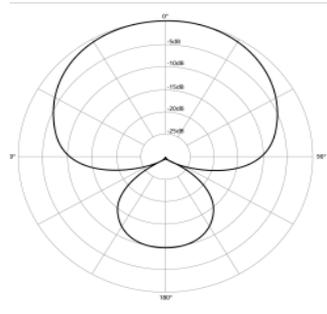
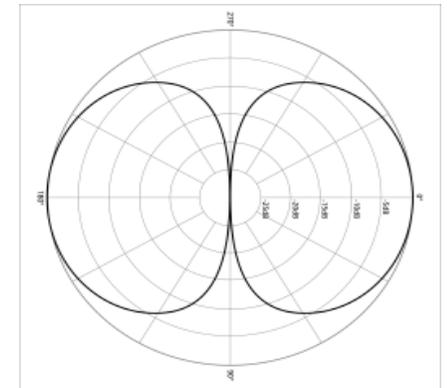
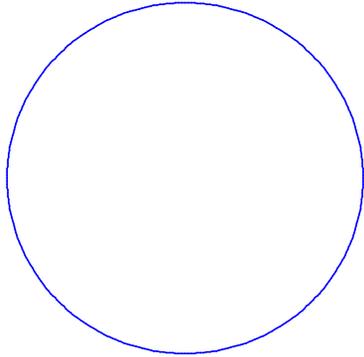


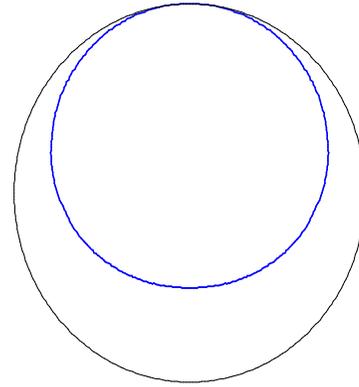
Figura di 8



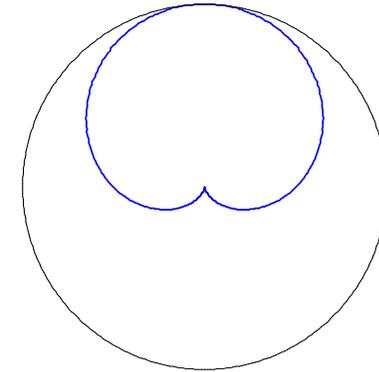
# Microphone directivity patterns



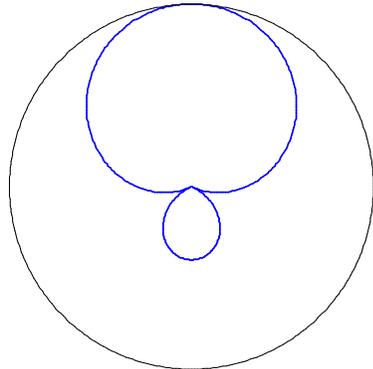
Omnidirectional ( $p=100, v=0$ )



Subcardioid ( $p=75, v=25$ )



Cardioid ( $p=50, v=50$ )



Hypercardioid ( $p=25, v=75$ )

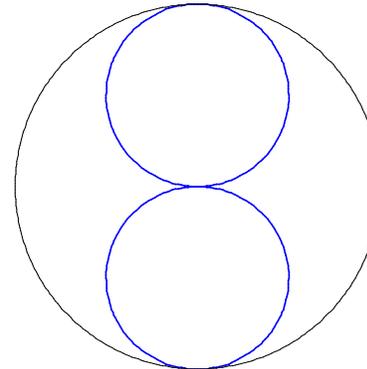
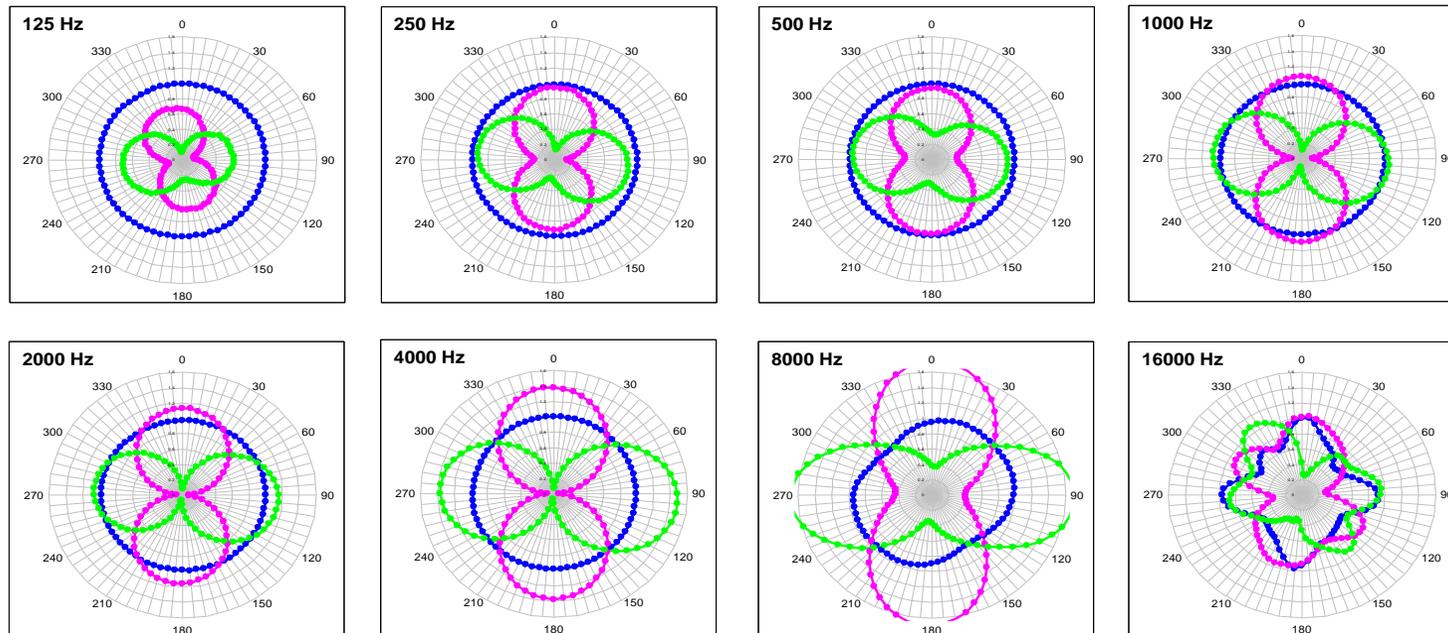


Figure-of-Eight ( $p=0, v=100$ )

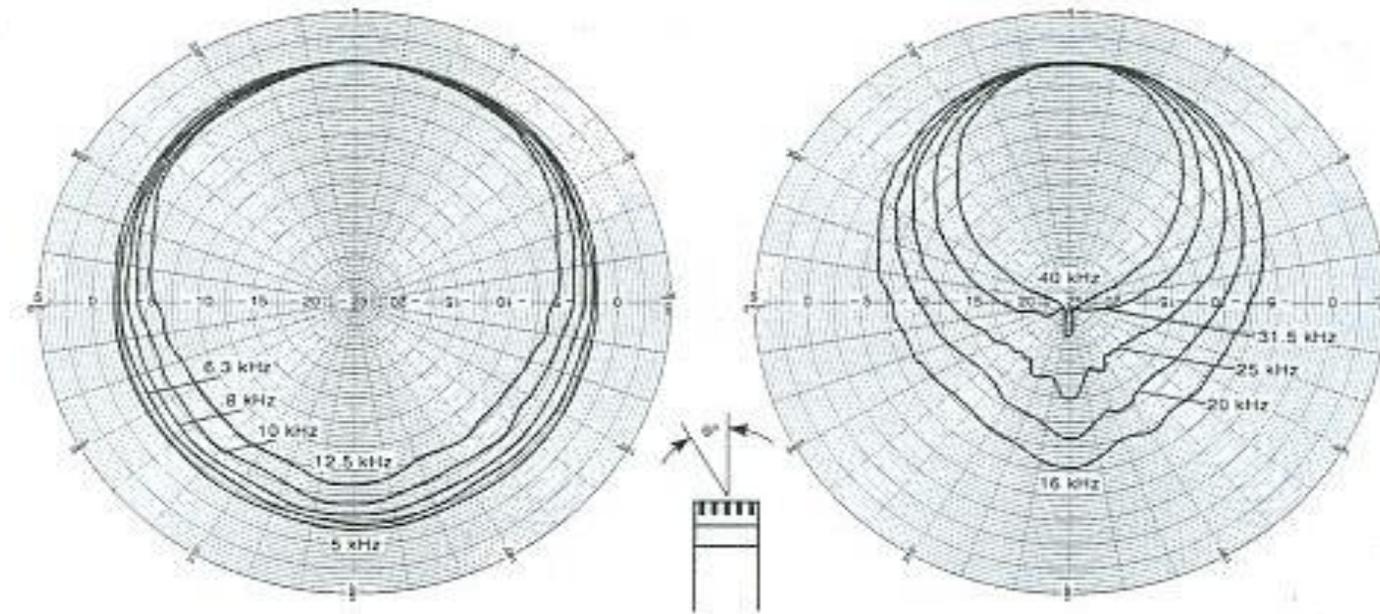
# Caratteristiche di un microfono – X

- La **Direttività** è funzione della frequenza
  - 1 microfono omnidirezionale
  - 2 microfoni a figura di 8



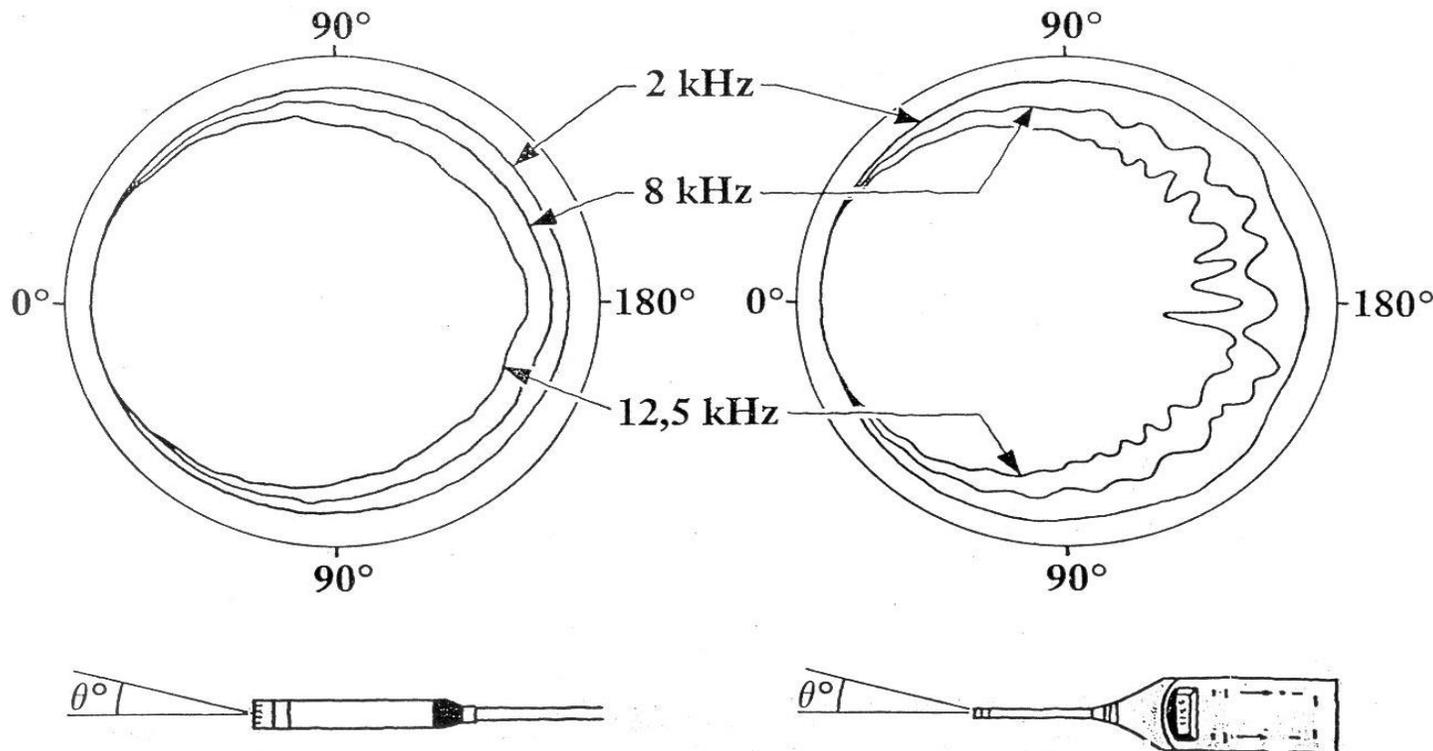
# Caratteristiche di un microfono – XI

- **Direttività**
  - la risposta in frequenza di un microfono di un fonometro (idealmente omnidirezionale) varia al variare della direzione di incidenza dell'onda, **ovvero in base alla direzione in cui lo si punta**



# Caratteristiche di un microfono – XII

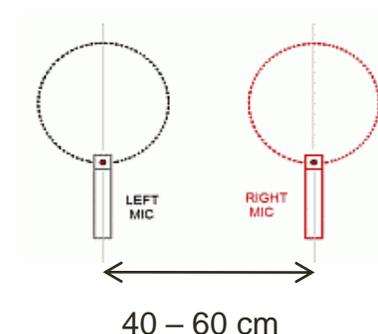
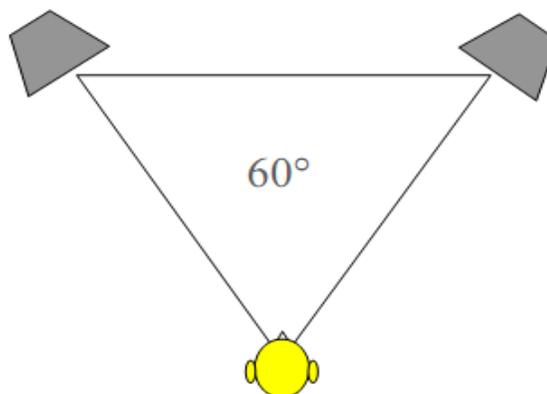
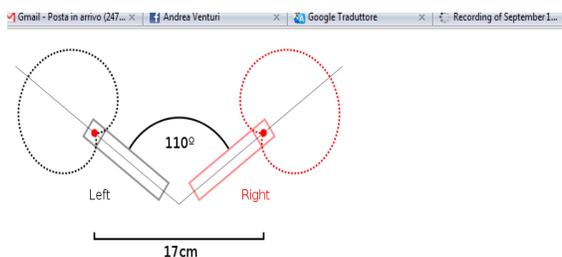
- **Direttività:** Essendo poi il microfono montato sul fonometro (a meno di utilizzare cavi di prolunga) lo chassis perturba l'ambiente stesso



# Esempio Audio



## ORFT e OMNI SPAZIATI (A-B)



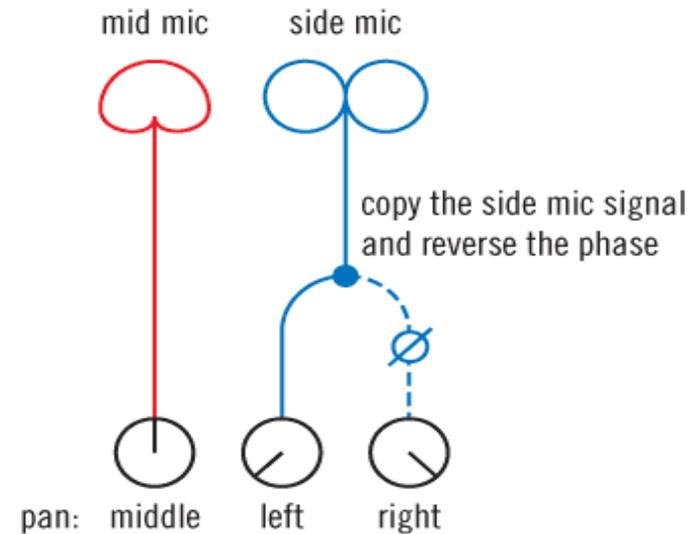
- La riproduzione può avvenire su una coppia di altoparlanti in configurazione stereo standard ( $\pm 30^\circ$ )
- **Ogni altoparlante è alimentato con il segnale proveniente dal microfono corrispondente**
- Riproduzione fedele della scena sonora ma limitato post processing

# Esempio Audio



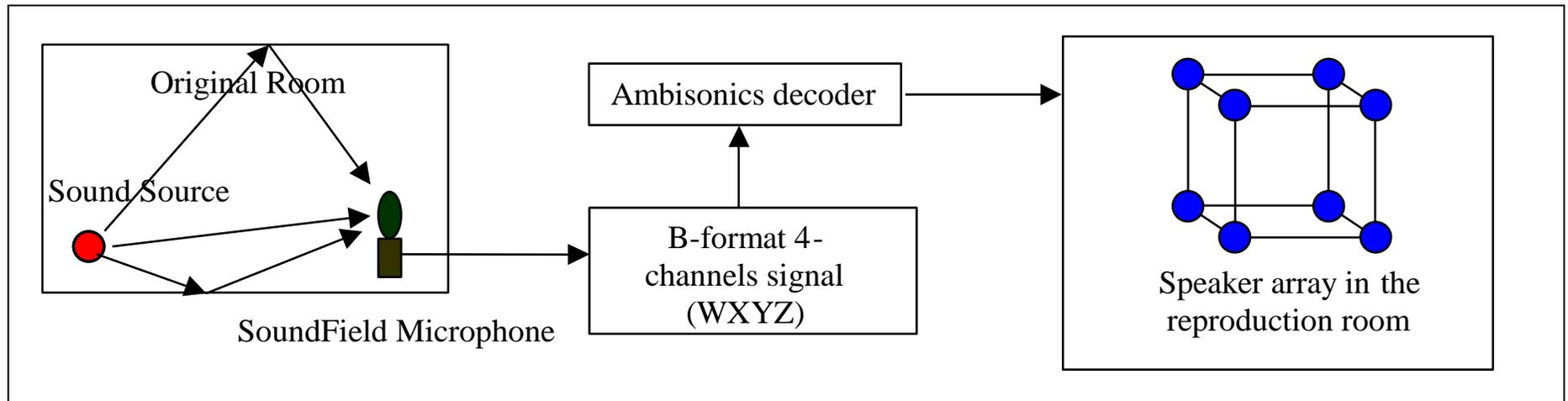
- Mid-Side (M/S)

Nel brevetto originale veniva indicato l'uso di un microfono **omnidirezionale**



- La «**stereo width**» può essere regolata cambiando il rapporto tra il segnale mid e il segnale side
- Il segnale a due canali è perfettamente **mono compatibile**

# Metodo Ambisonics 3D 1° ordine



- La riproduzione avviene su un array di 8-24 altoparlanti, attraverso un “decoder” Ambisonics

# Microfoni Ambisonics (Soundfield)

- Ad UNIPR utilizziamo microfoni Ambisonics da oltre 20 anni (Soundfield™, DPA-4, Tetramic, Brahma, Ambeo, Neve VR)

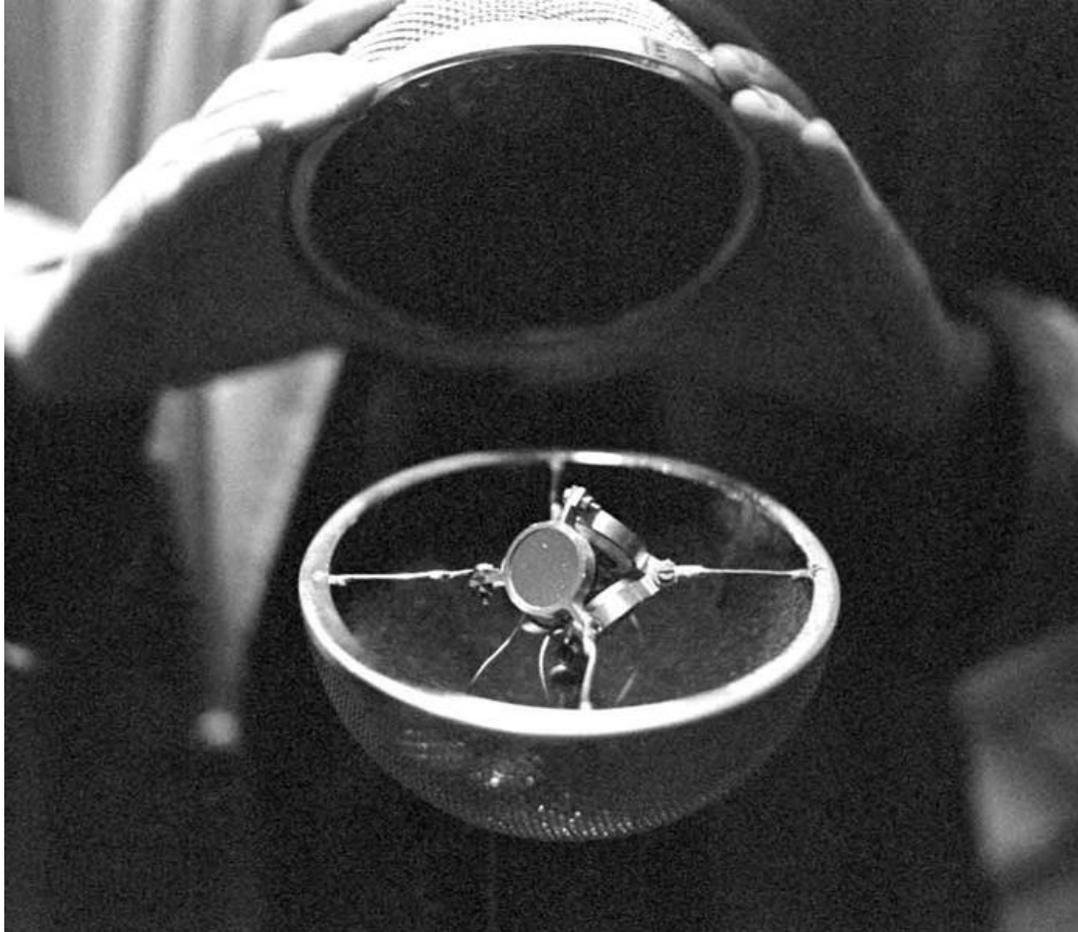


# Le origini: Michael Gerzon ed il Soundfield MK1

- A tetrahedral microphone probe was developed by Gerzon and Craven, originating the Soundfield microphone, in 1973

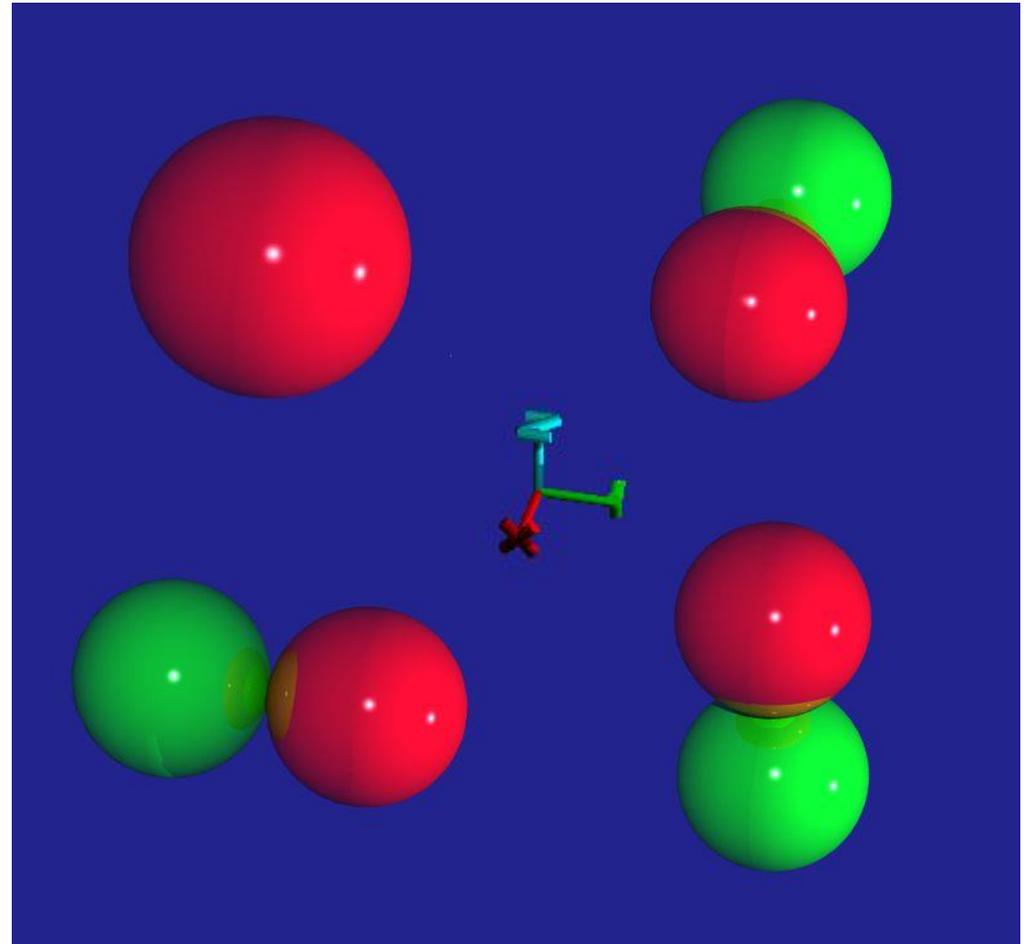


# Soundfield MK1 and MK5 microphones



# Ambisonics signals

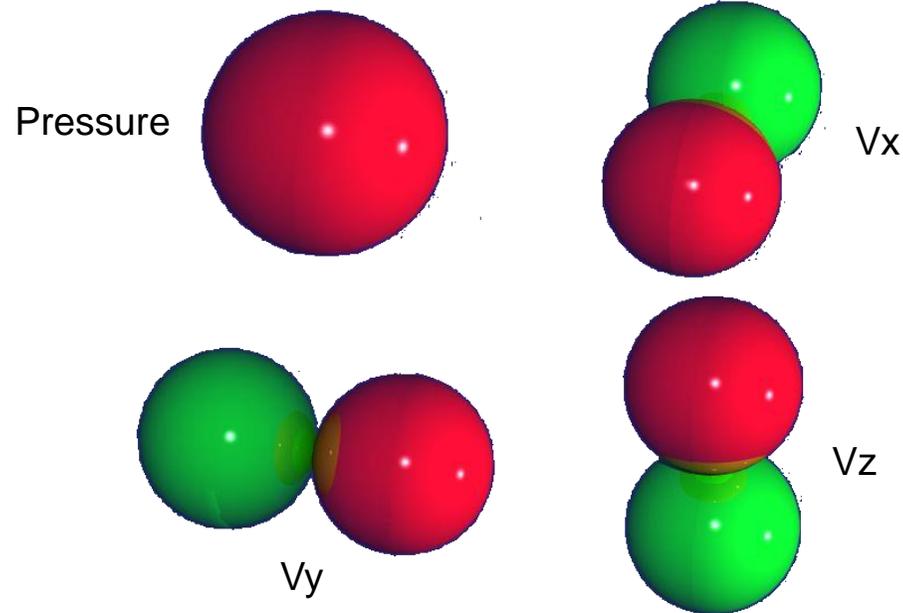
- The Soundfield (TM) microphone provides 4 signals:  
1 omnidirectional (pressure,  $W$ ) and 3 figure-of-8 (particle velocity,  $X$ ,  $Y$ ,  $Z$ )



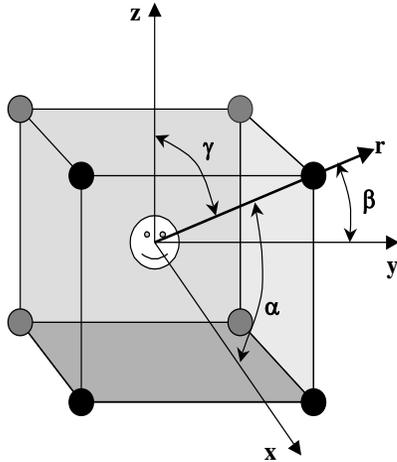


# First order Ambisonics (4 channels)

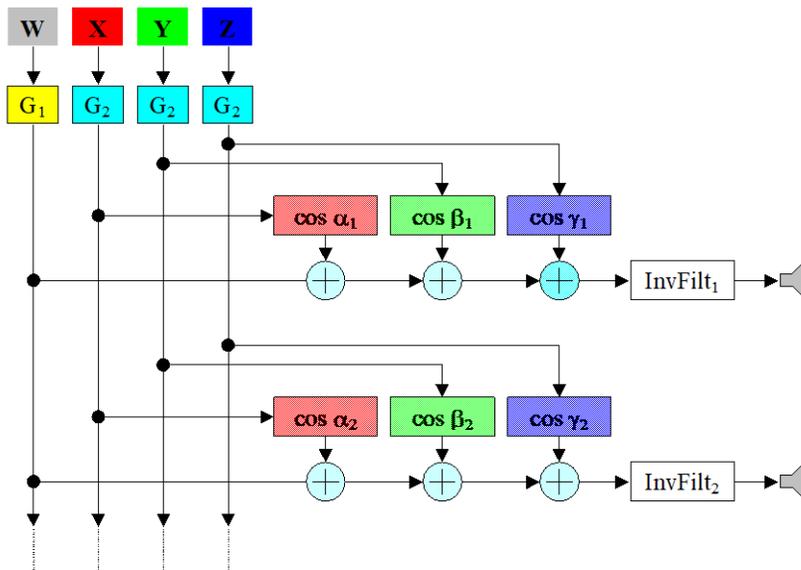
First order microphones: allow for simultaneous measurements of the sound pressure (omni) and of the three Cartesian components of particle velocity (figure-of-8 patterns)



# Algoritmo per decoding Ambisonics

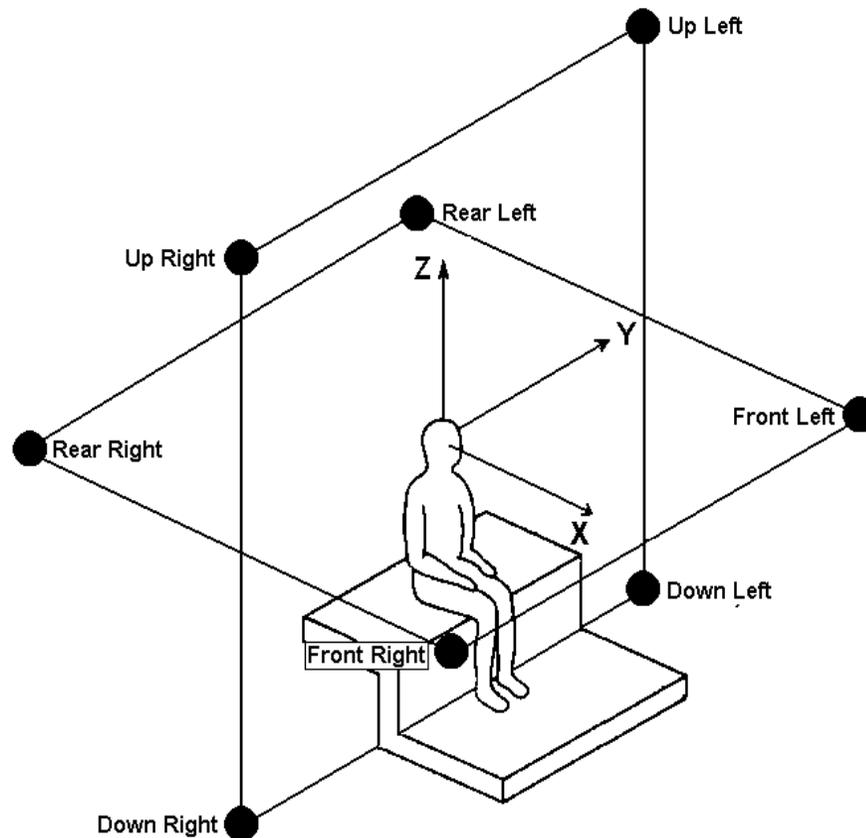


- Il segnale di ciascun altoparlante è semplicemente un “mix” dei 4 canali di trasmissione (WXYZ)
- I guadagni dipendono solo dalla posizione di ciascun altoparlante
- Viene aggiunto un piccolo filtro FIR specifico per ogni altoparlante, per equalizzarne la risposta



# Ambisonics decoding

## Bi-square Ambisonics array



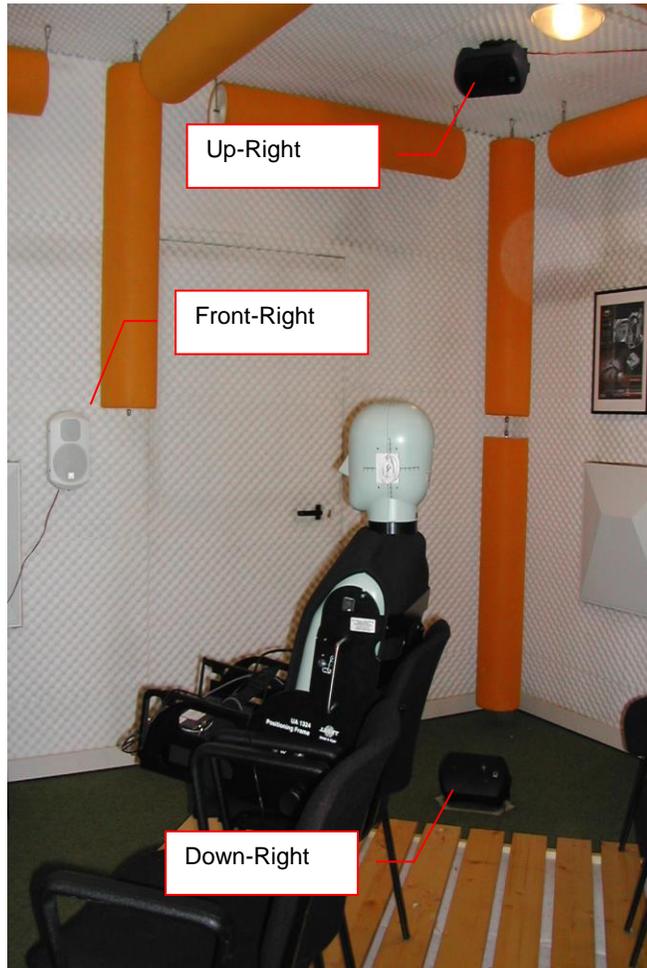
### vantaggi:

- Tridimensionale
- Buona percezione dei suoni laterali
- Buona risposta ai bassi
- "sweet spot" largo, nessuna colorazione uscendo da esso

### svantaggi:

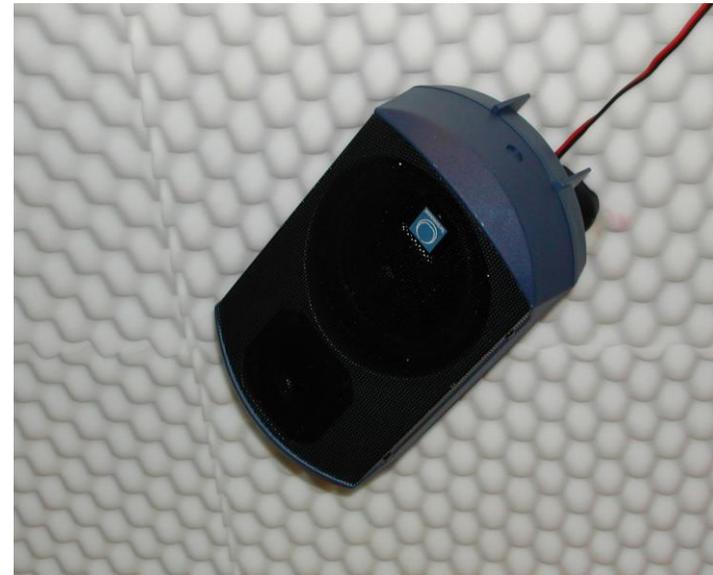
- Non isotropico
- Richiede un decoding avanzato (Y trattato diversamente da X,Z)

# Bi-square Ambisonics array



8 Turbosound Impact 50 loudspeakers:

- Light, easily fixed and oriented
- Good frequency response
- Very little distortion



# Sistema DSP per decoding Ambisonics

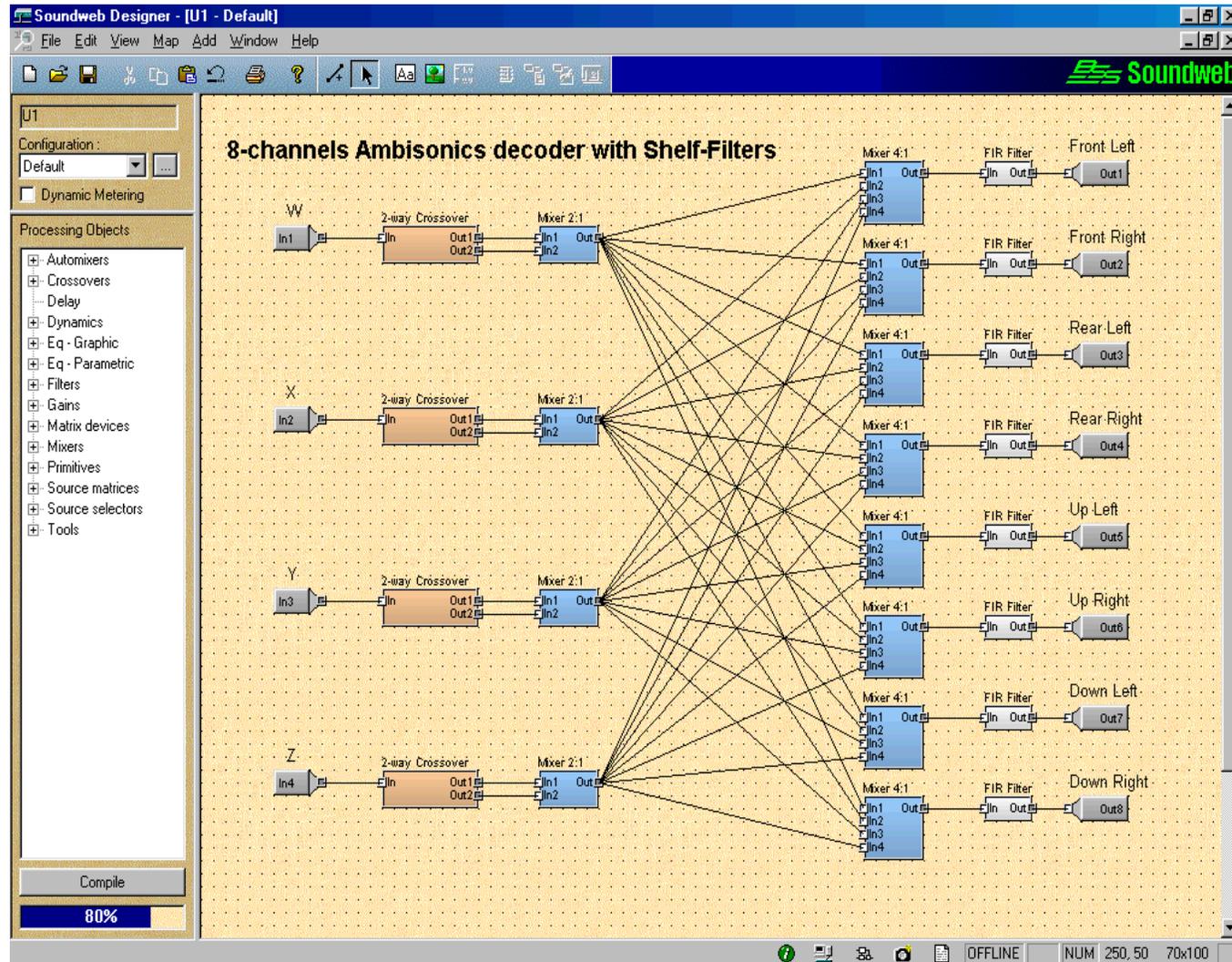
*BSS Soundweb 9088-II (8 ins, 8 outs)*



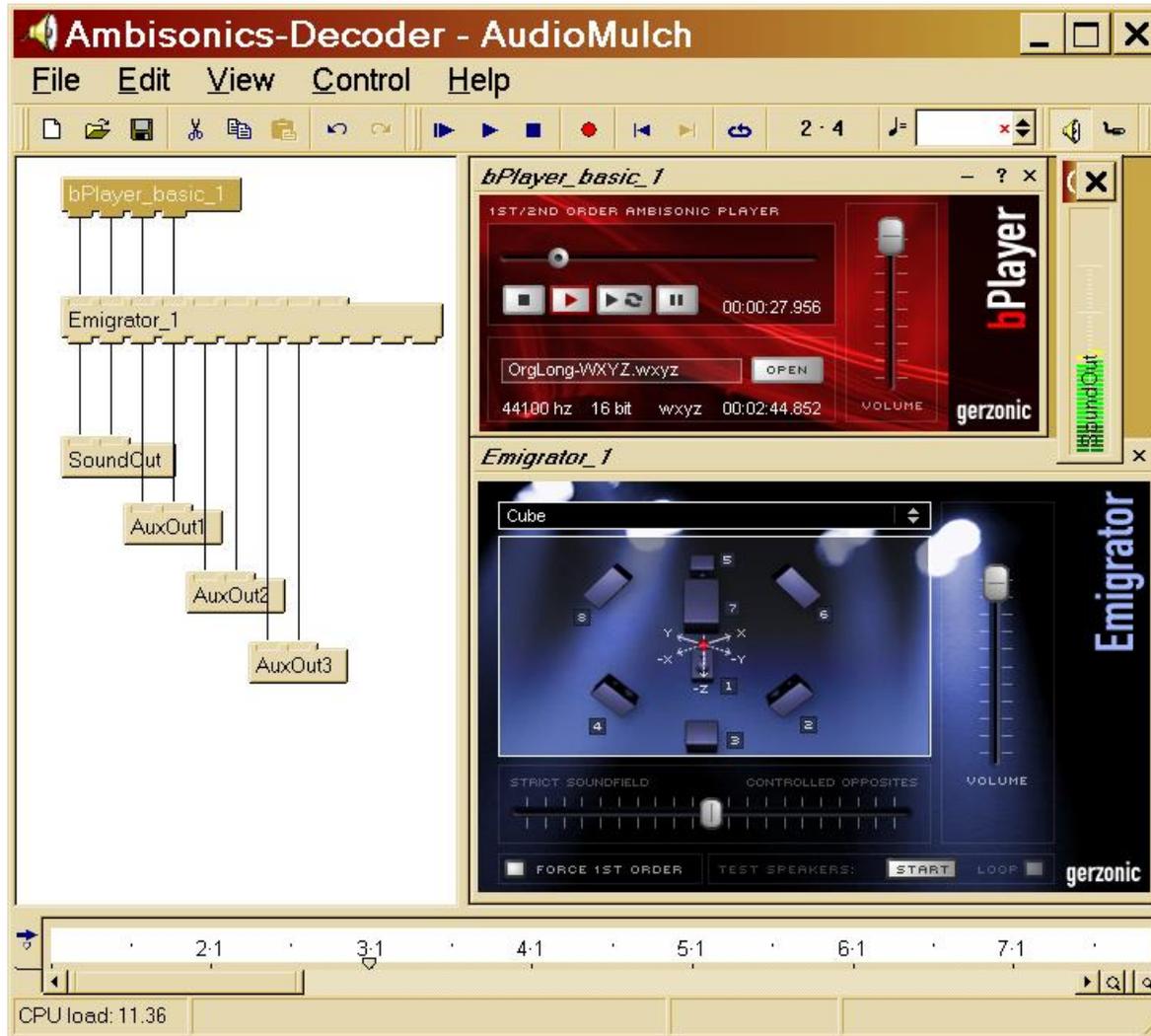
*SID Futureclient fanless PC (Pentium-III 1 GHz)*



# Programmazione del decoder sul processore digitale SoundWeb



# Decoder Ambisonics via software

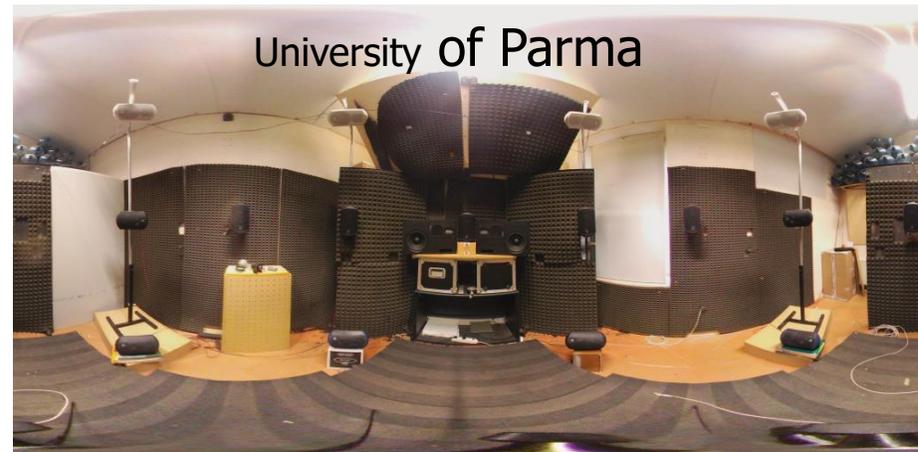
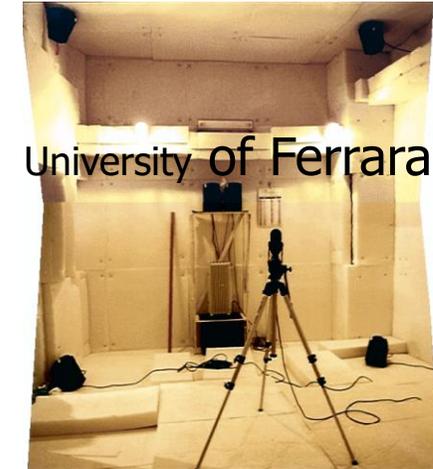


Audiomulch VST host

Gerzonic bPlayer

Gerzonic Emigrator

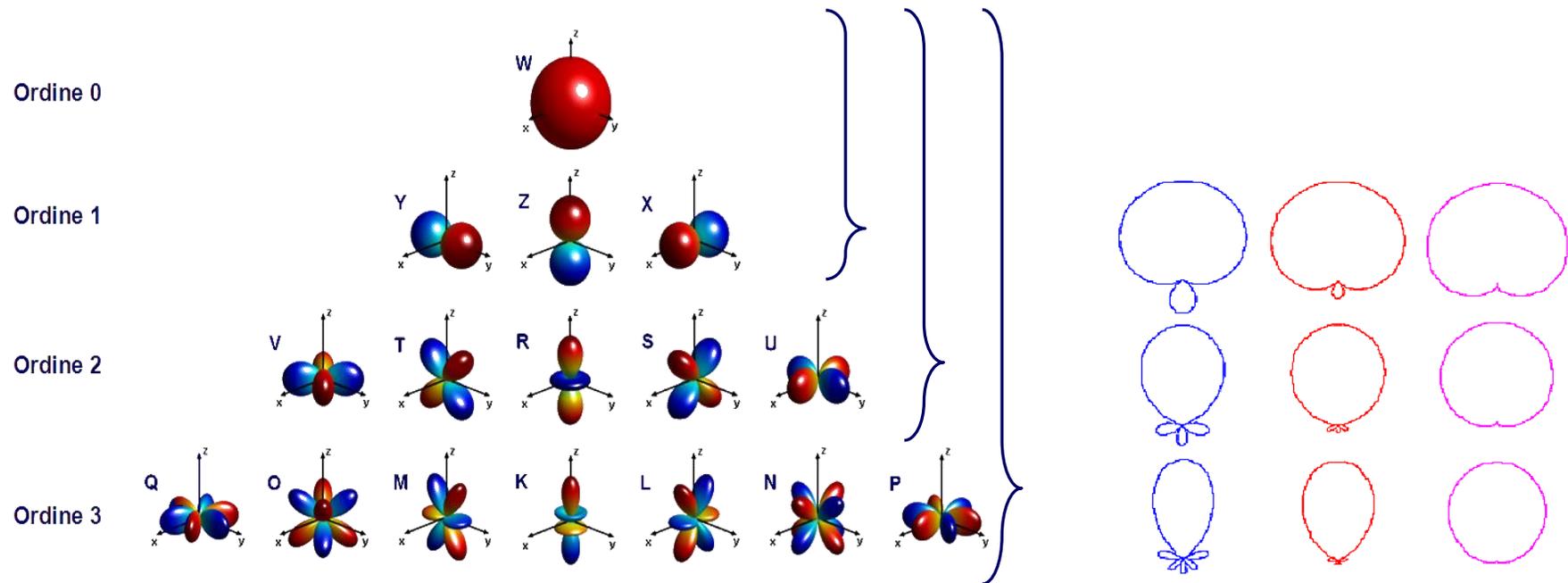
# Sale di Ascolto Ambisonics in Italia



# High Order Ambisonics

## Spherical Harmonics (H.O.Ambisonics)

## Virtual microphones



**A fixed number of “intermediate” virtual microphones is computed (3<sup>rd</sup> order B-format), then the dynamically-positioned virtual microphones are obtained by linear combination of these intermediate signals. This limits both dynamic range and frequency range.**

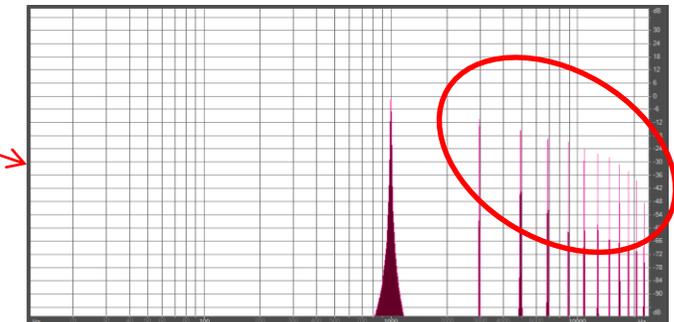
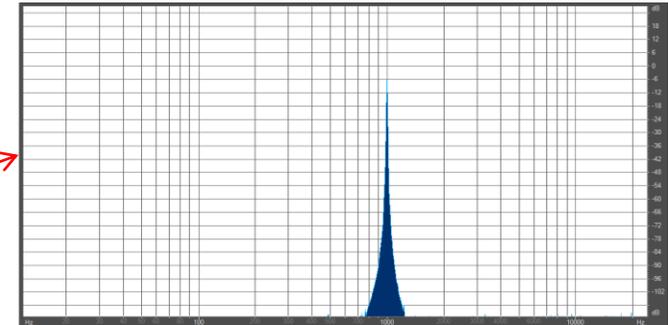
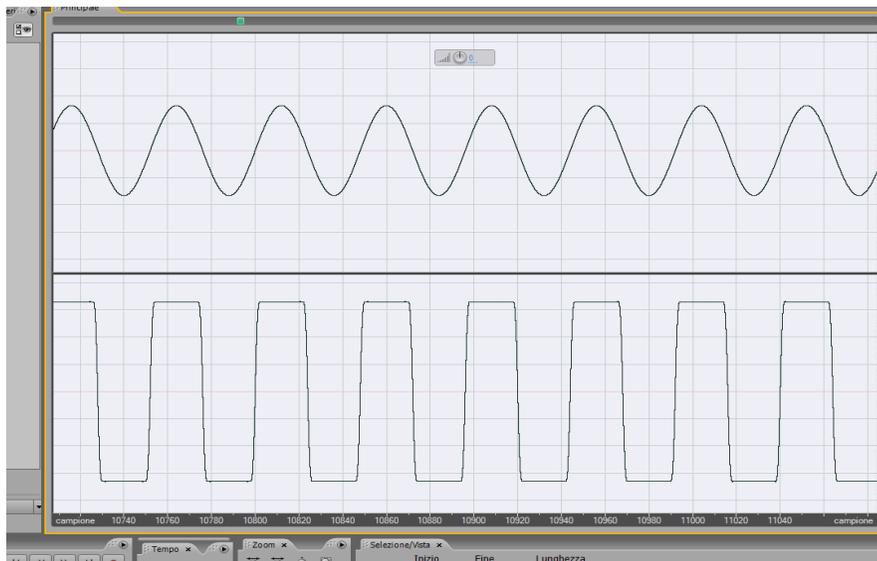
# Microfoni High Order Ambisonics

- Ad UNIPR utilizziamo microfoni High Order Ambisonics dal 2008: autocostruito, Eigenmike, Zylia



# Caratteristiche di un microfono – XIII

- **Massimo livello di pressione misurabile:** A fronte di una eccessiva sollecitazione meccanica della membrana microfonica il segnale elettrico risultante potrebbe soffrire di effetti di distorsione.



# Caratteristiche di un microfono – XIV

- 1) Poiché la distorsione dipende da un eccessivo movimento della membrana dovuto alla eccessiva forza esercitata sulla superficie della membrana del microfono...
- 2) Poiché la pressione è definita come:

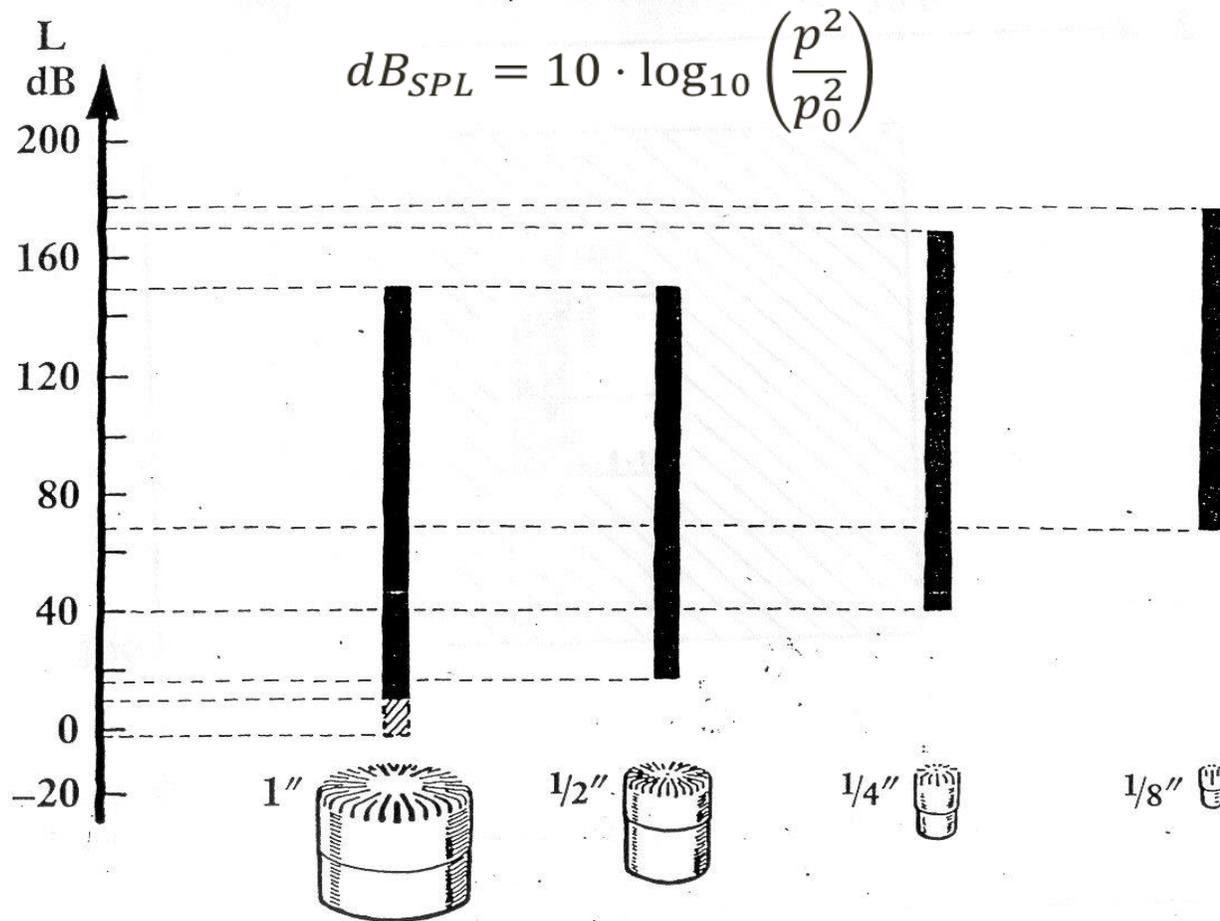
$$p = \frac{\vec{F} \cdot \hat{n}}{S} \longrightarrow \vec{F} \cdot \hat{n} = pS$$

ALLORA

Una soluzione per ridurre la forza esercitata sulla membrana è quella di ridurre la superficie (della membrana) (microfoni 1", 1/2", 1/4", 1/8")

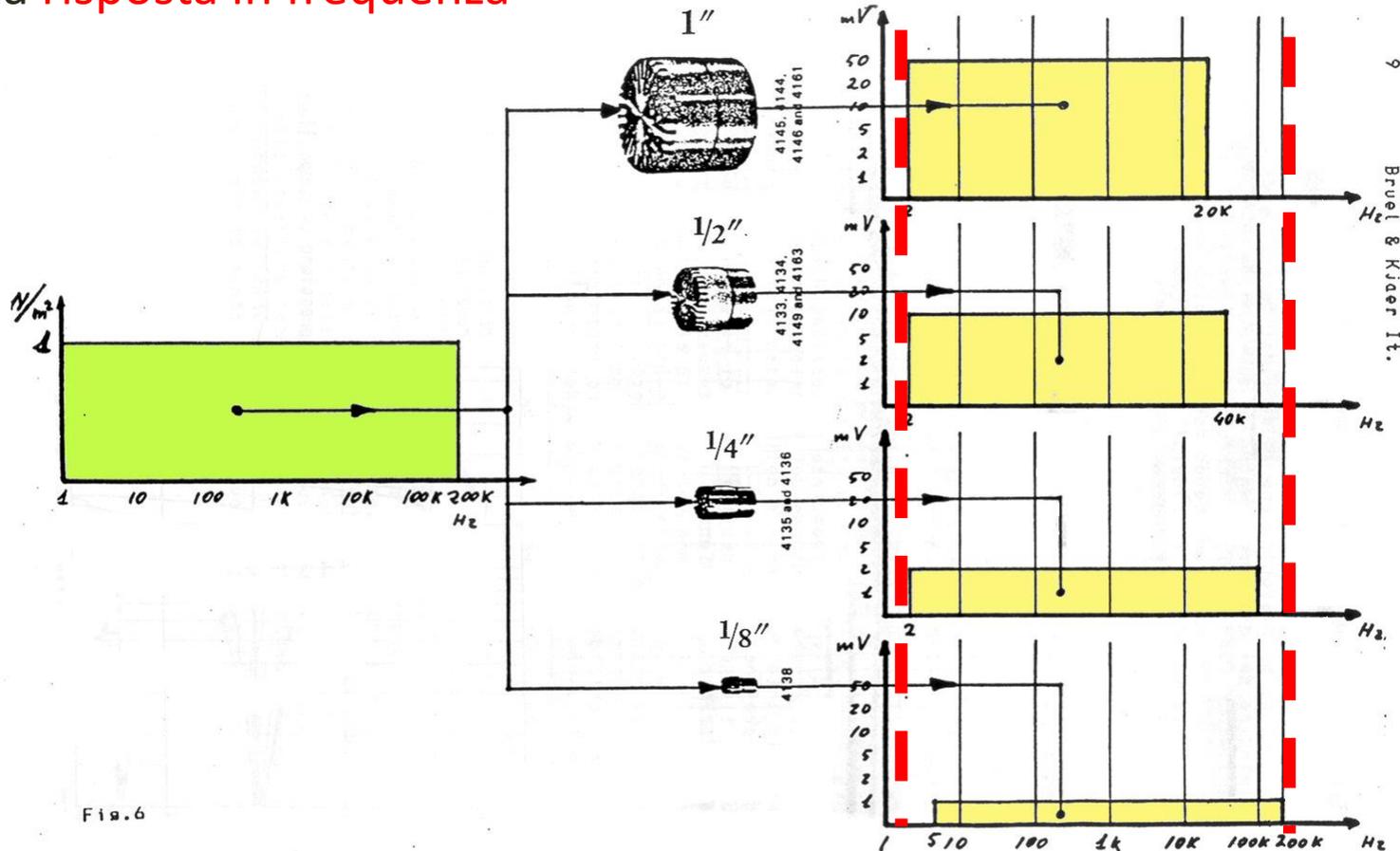
La controparte è però che una limitata pressione acustica potrebbe non sviluppare la forza necessaria per mettere in movimento la membrana del microfono (scarsa sensibilità)

# Caratteristiche di un microfono – XV



# Caratteristiche di un microfono – XVI

- La **dimensione** della membrana ha **effetti** anche **sulla** estensione della **risposta in frequenza**



# Caratteristiche di un microfono – XVII

Dimensioni	Sensibilità [mV/Pa]	Frequenza di taglio superiore [kHz]	Livello max. per 3% di distorsione (dB)
1''	50-100	8-12	140-150
½''	10-50	16-40	140-160
¼''	1-4	70-100	165-180

«Manuale di acustica applicata», Renato Spagnolo

# Caratteristiche di un microfono – XVIII

- **Campo dinamico**: la differenza fra i livelli di pressione più alti e quelli più bassi misurabili.
  - Il limite superiore è dato dall'elasticità della membrana che superati certi limiti incomincia a distorcere.
  - Il limite inferiore è dato dal rumore di fondo
    - Agitazione termica delle molecole della membrana
    - **Rumore elettrico** di quello che sta a valle della capsula microfonica (preamplificatore, amplificatore, filtri...)

# Caratteristiche di un microfono – XIX

- **Dipendenze dai fattori atmosferici:**
  - Temperatura
  - Umidità
  - Vento (Il vento determina turbolenze che si manifestano come rumore in bassa frequenza. Gli schermi antivento hanno forme prive di discontinuità che riducono il formarsi di turbolenze, pur rimanendo «trasparenti» dal punto di vista acustico)



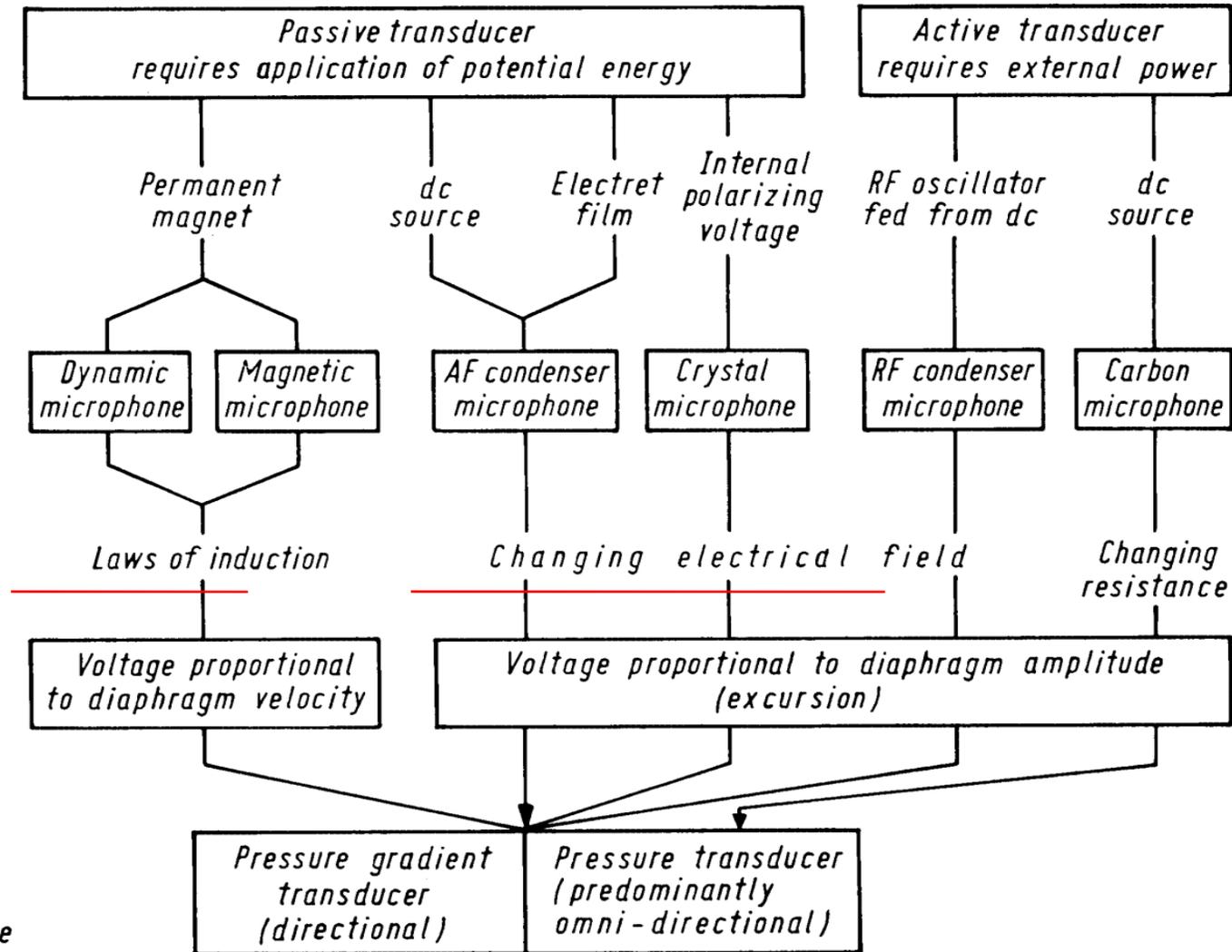
# Il microfono

**1st group**  
According to the  
energy source

Microphone types:

**2nd group**  
According to the  
transducer  
principle:

**3rd group**  
Dependent on  
magnitude of the  
driving force of the  
sound field





Designed to operate over a wide range of temperature, humidity and other environmental conditions. Connector: lemo 1B 7 pin.

**2669-L - preamplif LEMO con**  
This 1/2" Fa preamplifie temperaturu environme OB 7 pin &

**2670 - 1/4 preamplif pin LEMO**

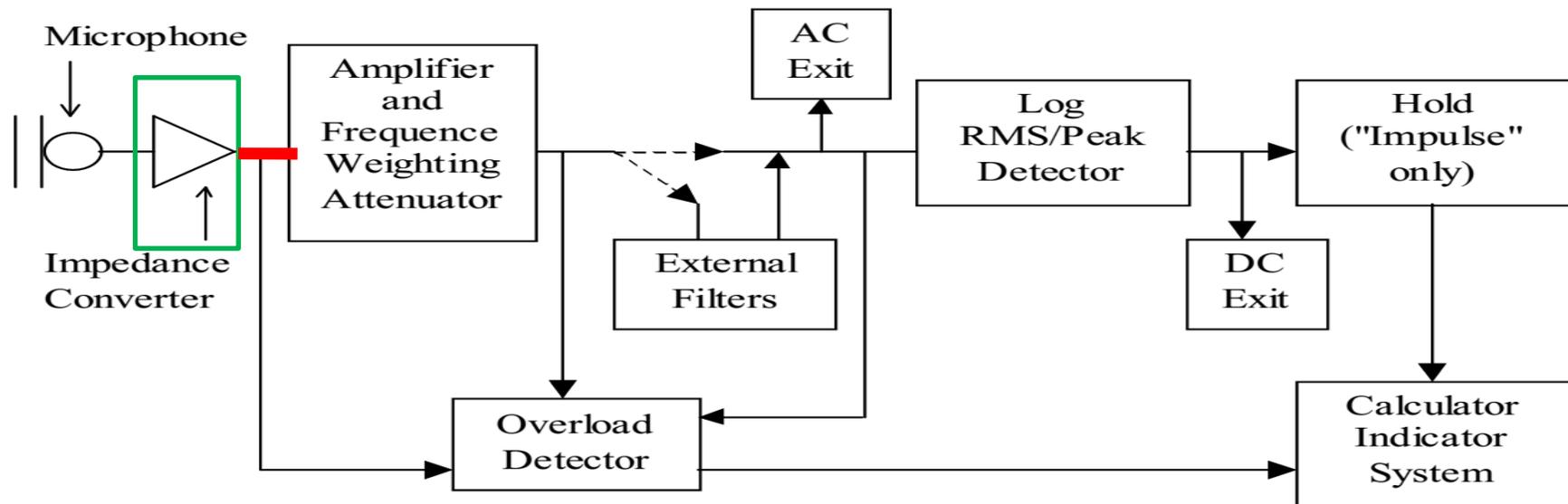
ical Charge Injector Calibrati

Charge Injector Calibrati

# ADATTATORE DI IMPEDENZA

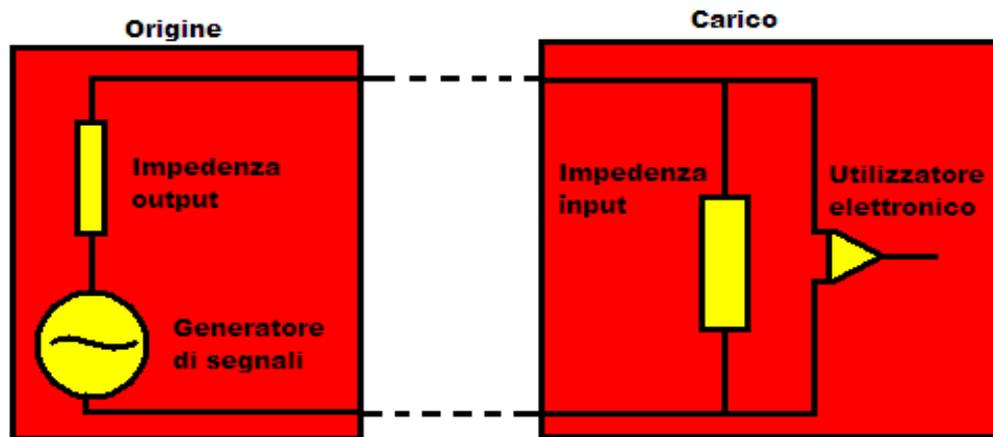
# Adattatore di impedenza – I

- Il segnale dalla capsula deve raggiungere l'amplificatore interno al fonometro
- La capsula microfonica potrebbe anche dover essere posta a decine di metri dal corpo del fonometro (cavo 10 metri)
- **Cavo lungo compromette la qualità** del segnale che viene trasportato



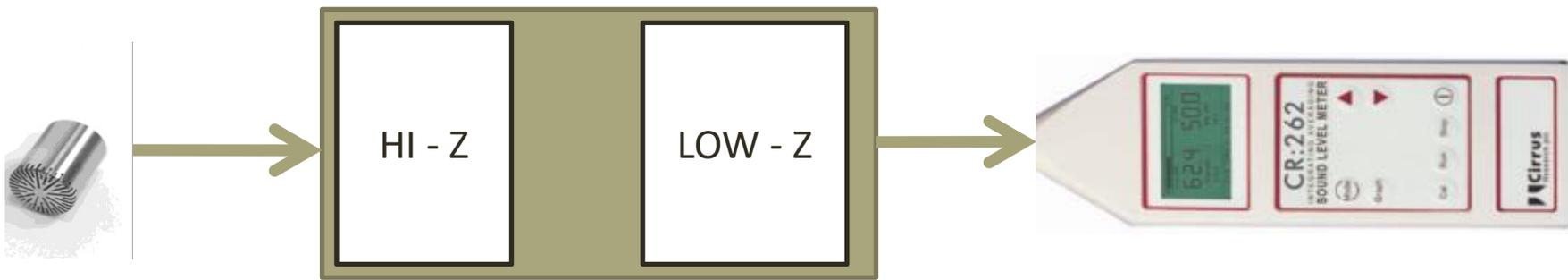
# Adattatore di impedenza – II

- Dal punto di vista elettrico l'effetto del cavo può essere ridotto adattando opportunamente l'impedenza di uscita del microfono all'impedenza di ingresso dell'amplificatore
- La «regola del pollice» dice che per avere un buon trasporto di tensione l'impedenza di ingresso del carico deve essere almeno 10 volte superiore all'impedenza di uscita dell'origine (*bridging connection*)



# Adattatore di impedenza – III

- Il ruolo dell'**adattatore di impedenza** (alle volte chiamato anche preamplificatore o «buffer») è quello di **fare da «ponte» tra capsula e amplificatore**.
- L' adattatore di impedenza ha:
  - **Alta impedenza di ingresso**:  $10\text{ G}\Omega$  ( $\gg$  dell'impedenza di uscita del microfono, in modo da acquisire tutta la tensione fornita dalla capsula)
  - **Bassa impedenza di uscita**:  $40\text{-}60\ \Omega$  ( $\ll$  dell'impedenza di ingresso dell'amplificatore, in modo da garantire un buon trasporto di tensione)



# Adattatore di impedenza – IV

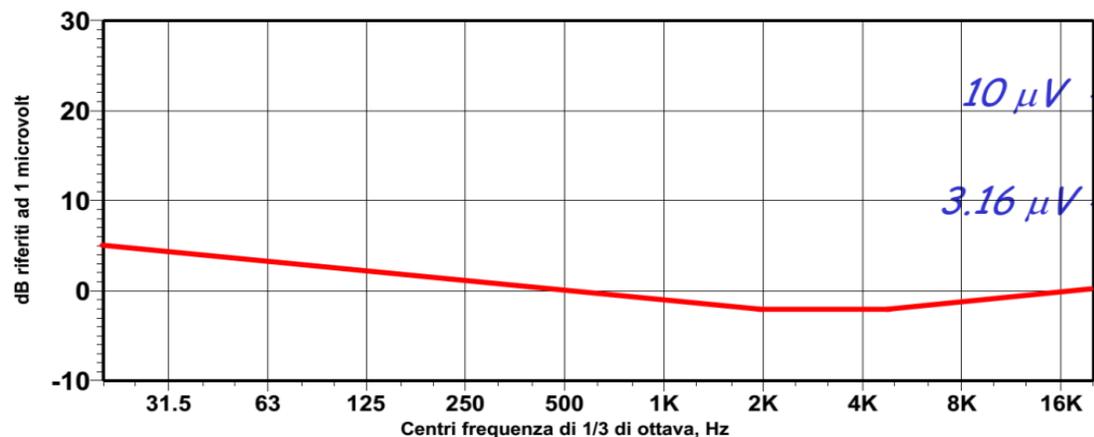


Risposta in frequenza	5 a 100.000 Hz
Guadagno nominale	(-) 0.08 dB
Impedenza di ingresso	10 GΩ su 0.16 pf
Impedenza uscita	50 Ω
Rumore ponderato A	1.6 μV A-weight (typ.)
Massima uscita	28 Vpp
Lunghezza max. cavo	90 metri

$$\mu = 10^{-6}$$

$$20 * \log_{10} \left( \frac{3.0\mu}{1.0\mu} \right) \approx 9.54 \rightarrow 10$$

*Aspetto tipico dello spettro del rumore intrinseco di un preamplificatore, per una valore globale ponderato pari a 3.0 μV(A) corrispondenti a 10 dB(A) con mic. da 50 mV/Pa*



# Adattatore di impedenza – V



L'adattatore di impedenza richiede alimentazione elettrica, che solitamente corre assieme ai fili di segnale, e che è di tre tipi:

- Mediante cavo multipolare dedicato (es. LEMO) su fili separati
- Mediante cavo coassiale (es. BNC) con tecnologia ICP – IEPE
- Mediante cavo «bilanciato» (es. XLR) con tecnologia P48V

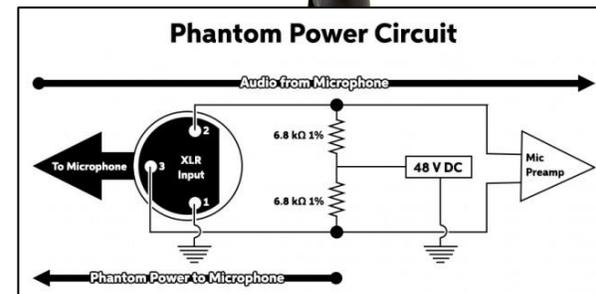
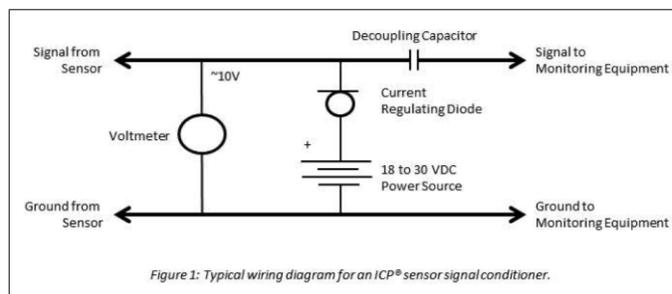
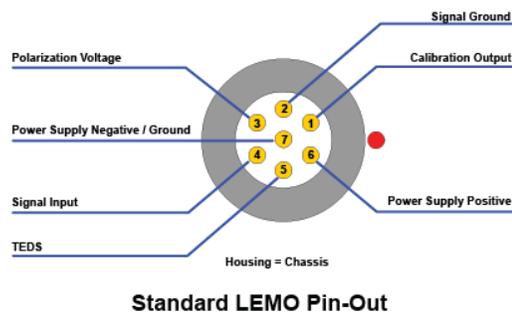


# Adattatore di impedenza – VI



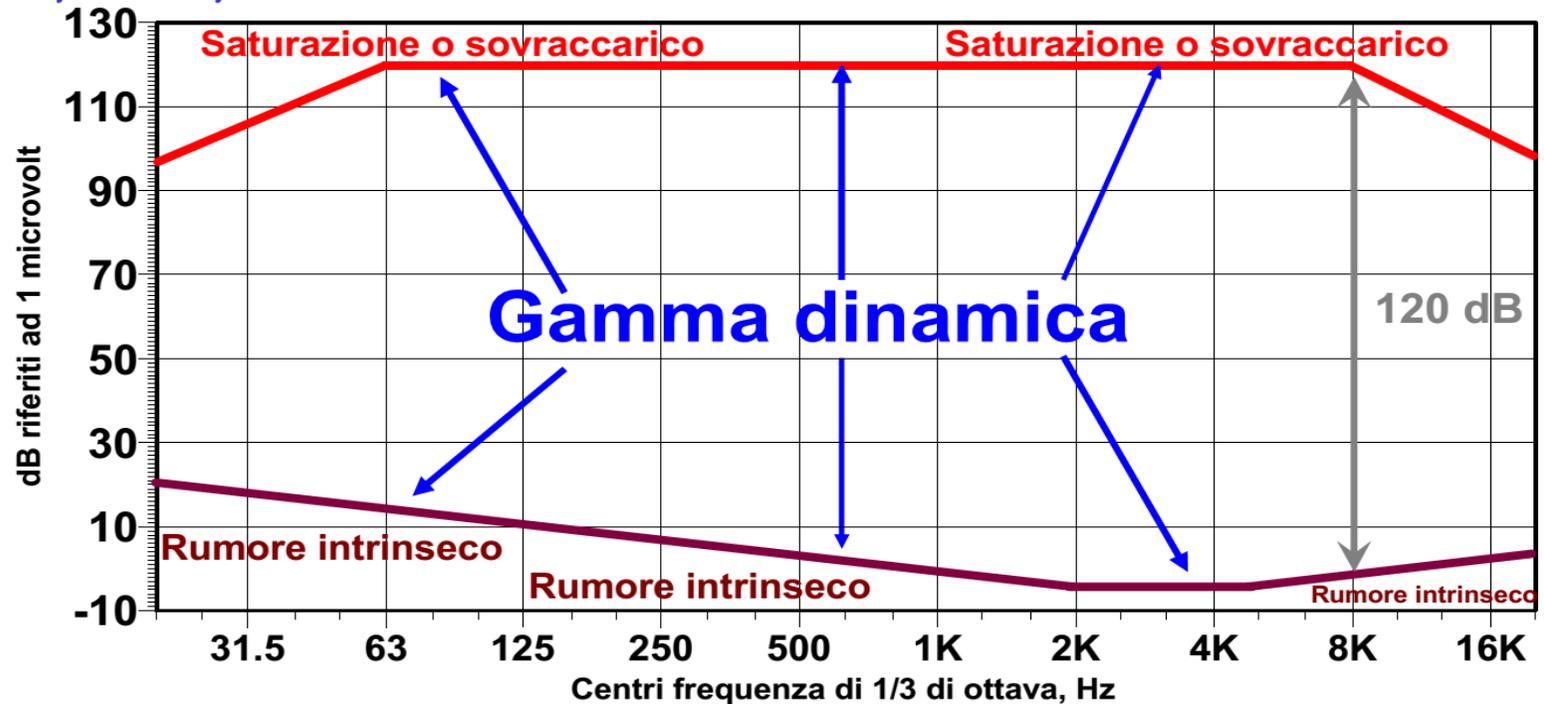
Chiaramente i preamplificatori debbono essere del tipo corrispondente all'alimentazione provvista dal fonometro:

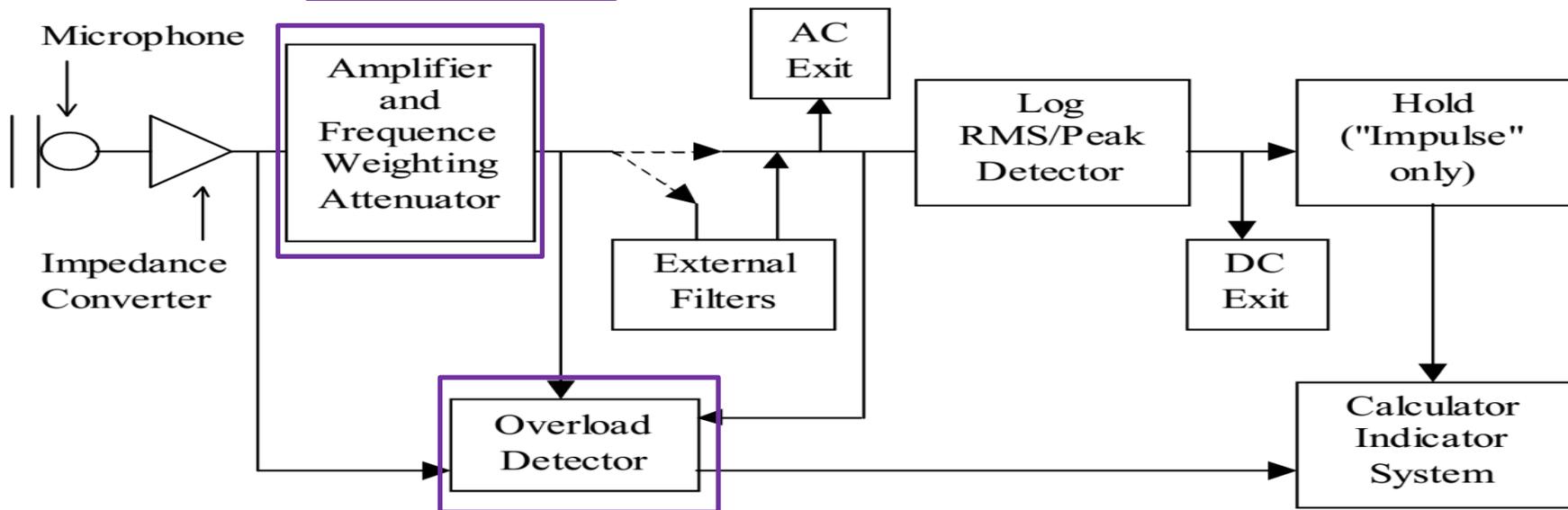
- Lemo - Cavo dedicato con tensione «dual rail» di +/- 28V o superiore
- BNC - ICP, tensione tipica + 28 V, 4 mA – il preamplificatore «sginocchia» a + 12V
- XLR - Phantom P48V, tensione +48V rispetto alla massa su entrambi i fili della coppia bilanciata (+/-)



# Adattatore di impedenza – V

*La gamma dinamica ci indica il campo di utilizzabilità del preamplificatore.*





## AMPLIFICATORE, OVERLOAD DETECTOR, ATTENUATOR



# Amplificatore – I

- L'amplificatore è lo stadio successivo all'adattatore di impedenza
- L'amplificatore di misura assolve al compito di **amplificare il segnale** fornito dal gruppo preamplificatore-microfono allo scopo di **consentire le successive operazioni** di filtraggio, estrazione del valore efficace ed eventuale registrazione su supporto magnetico o cartaceo a mezzo registratore grafico.
- **Si trova internamente al misuratore di livello sonoro.**
- È caratterizzato dal fattore di **guadagno** –  $G$  – (quanto amplifica) e dalla **dinamica** (rapporto segnale prima della distorsione/rumore di fondo)

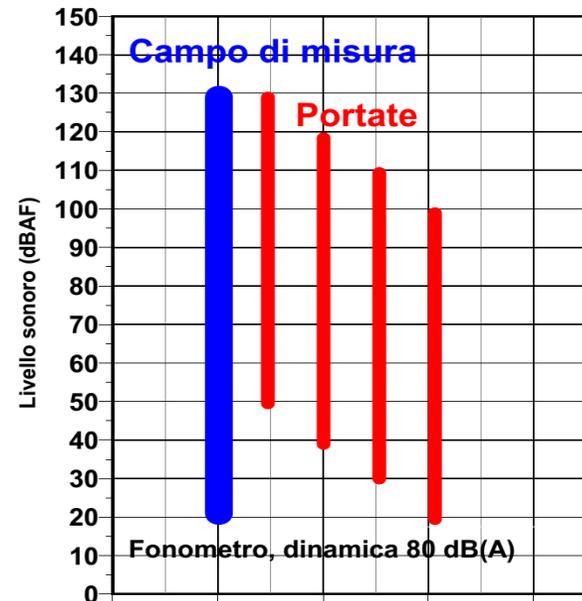
# Amplificatore – II

- L'amplificatore deve avere una **elevata risposta in frequenza** (come tutti i componenti che seguono il microfono **non** deve comportarsi da “**collo di bottiglia**”) per soddisfare a pieno le caratteristiche del microfono
- La gamma dinamica di un amplificatore fonometrico può essere dell'ordine degli **80 dB**

# Attenuatore / guadagno dell'amplificatore

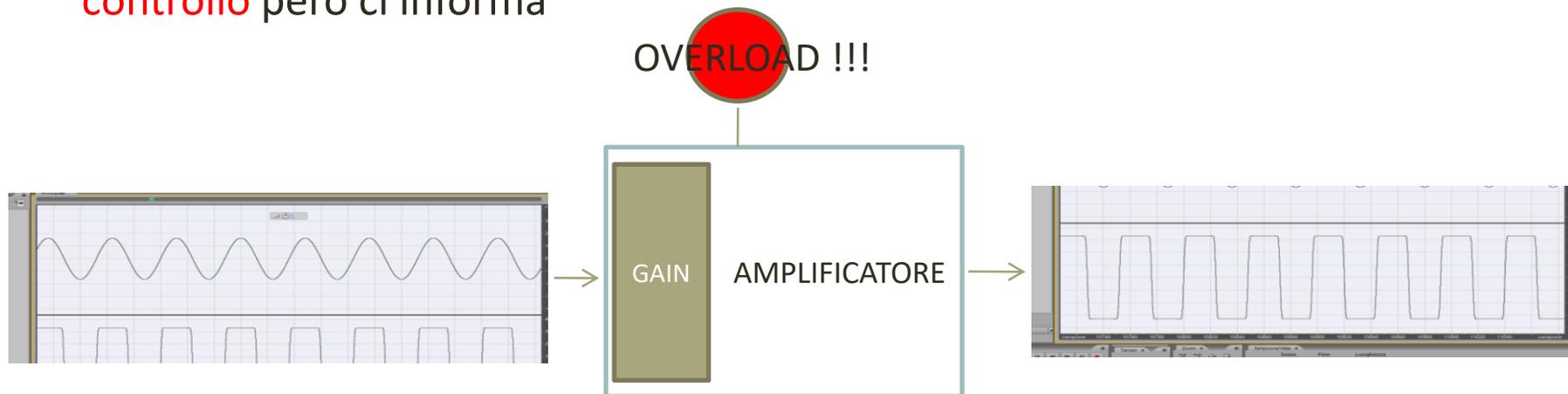
- Data la limitata (non infinita) dinamica dei componenti lo stadio di amplificazione è fornito di un controllo di guadagno
- Il controllo di guadagno permette di scegliere «dove usare» gli 80 dB (in genere) di dinamica disponibile.
  - da 20 dB SPL a 100 dB SPL
  - da 30 dB SPL a 110 dB SPL
  - da 40 dB SPL a 120 dB SPL
  - da 50 dB SPL a 130 dB SPL

I valori sono da considerarsi indicativi, poiché ogni strumento potrebbe fornire range diversi



# Controllo di Overload – I

- Se il controllo di guadagno è impostato per avere un fondo-scala di 100 dB SPL ma il segnale misurato è a 130 dB SPL, gli ingressi dell'amplificatore vengono saturati dal segnale in ingresso.
- Il fenomeno che si viene ad instaurare è lo stesso del caso già affrontato durante la trattazione del funzionamento del microfono: la **distorsione**
- Nel caso di una **sovraccarico agli ingressi dell'amplificatore** una **circuiteria di controllo** però ci informa

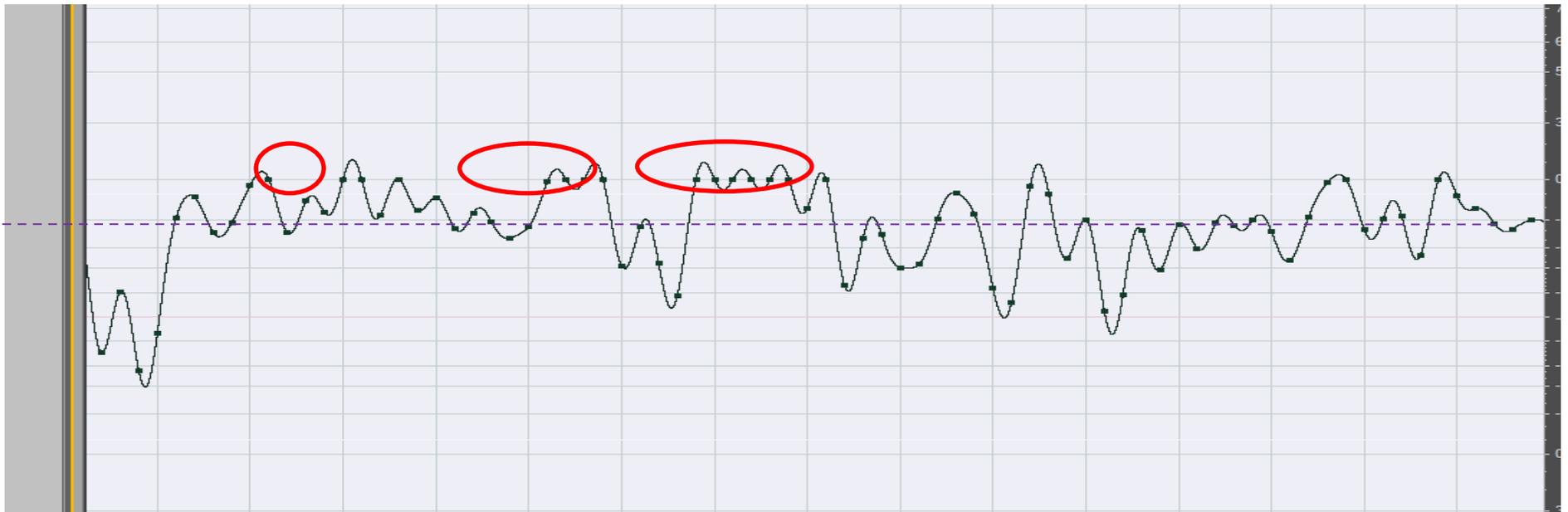


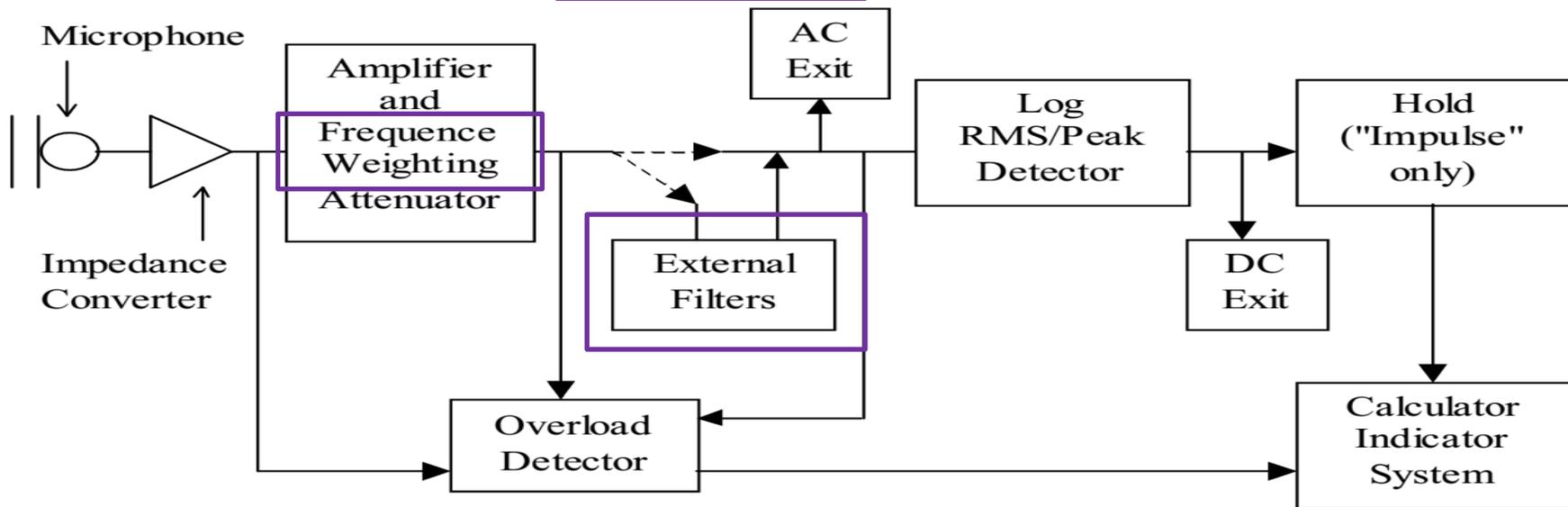
# Controllo di Overload – II

- Si noti che **la saturazione della capsula microfonica non viene rilevata**
- **L'esperienza permette però di accorgersi**, senza alcun supporto circuitale, **di una saturazione degli stadi precedenti all'amplificatore:**
  - **Se** in una misura senza alcuna segnalazione di overload in presenza di rumori forti e/o esplosivi **i valori di picco sono sempre uguali** la probabilità della **saturazione della capsula** è elevata. Non resta che sostituire una capsula con una sensibilità inferiore.

# Controllo di Overload – III

- I valori cerchiati sono sospetti...
- **E' davvero possibile che siano tutti esattamente uguali ?!?!?**
- La linea viola tratteggiata serve ad evidenziare come sia invece più probabile il raggiungimento massimo della dinamica del microfono



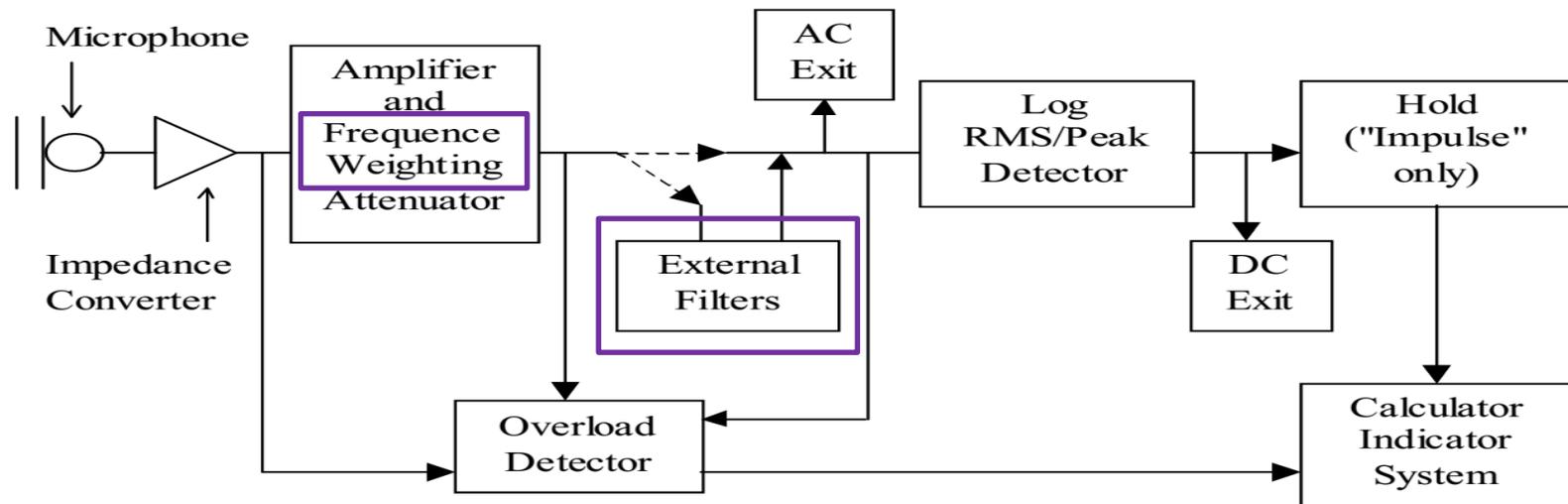


# FILTRI



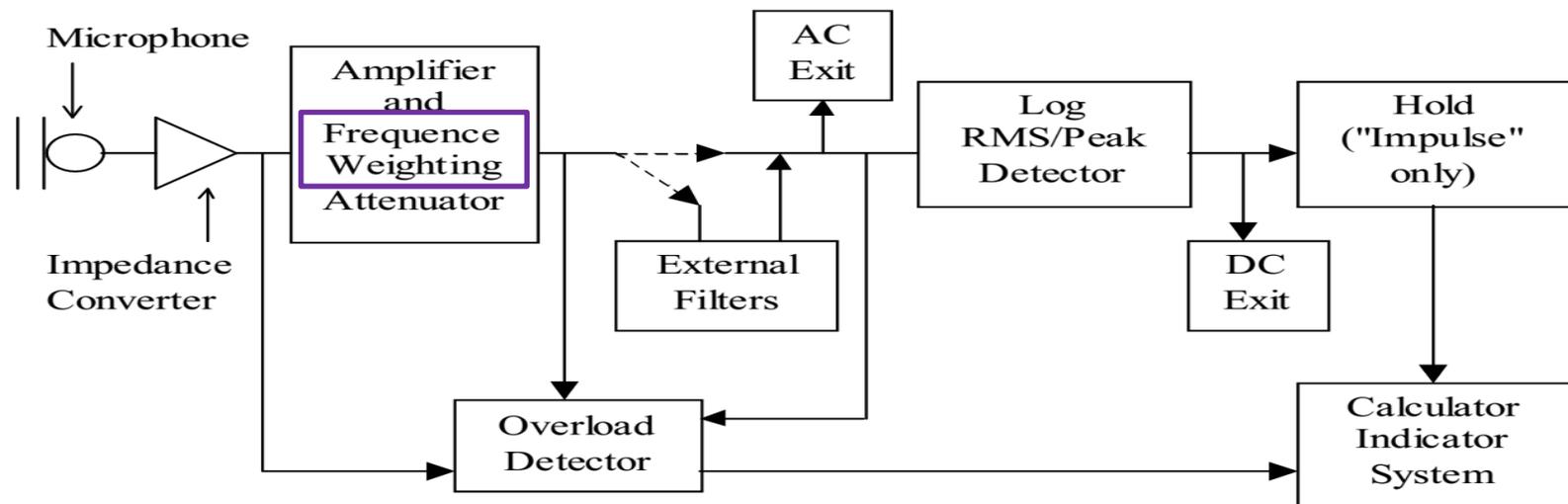
# Filtri di ponderazione (Frequency weighting) - I

- L'intenzione di rendere il fonometro uno strumento finalizzato a fornire indicazioni sul suono, così come percepito dal sistema uditivo umano, prevede particolari **blocchi di filtraggio** del segnale.



# Filtri di ponderazione (Frequency weighting) – II

- Il primo blocco di **filtri** che troviamo sono quelli inerenti alla **ponderazione** del segnale



# Filtri di ponderazione (Frequency weighting) – III

- L'obiettivo di tale filtraggio è quello di consentire una valutazione più accorta **degli effetti del suono sull'uomo**
- Noto che l'orecchio umano risulta più **sensibile** a certe frequenze (quelle alte) che non ad altre (quelle basse)
- Esistono delle curve normate (dei **filtri**) che cercano di **modellare tale diversa sensibilità**
  - A, C, Z, Lin, B, D

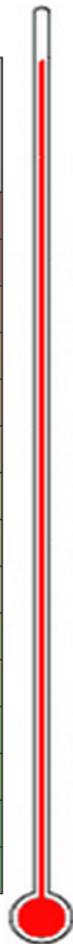
# Filtri di ponderazione (Frequency weighting) – IV

- **A**: di uso generale per valutare il livello di disturbo o di pericolosità del rumore; è presente **in tutti gli strumenti**, attenua le basse frequenze e in misura minore le alte
- **C**: attenua entrambi gli estremi della gamma di frequenze, ma in misura minore rispetto alla A
- **Z** (o zero): prevede che non ci sia né attenuazione né esaltazione da 10 Hz a 20 kHz
- **Lin**: Condizione in cui la ponderazione in frequenza è esclusa. La banda passante dipende dai componenti del fonometro
- **B**: attenua poco le frequenze basse rispetto ad A. In Italia ha avuto una importanza legata alla misura della rumorosità dello scarico dei veicoli
- **D**: utilizzata per la misura del rumore degli aeromobili (alti livelli sonori)



# Filtri di ponderazione (Frequency weighting) – V

Sound sources (noise) Examples with distance	Sound pressure Level $L_p$ dB SPL
Jet aircraft, 50 m away	140
Threshold of pain	130
Threshold of discomfort	120
Chainsaw, 1 m distance	110
Disco, 1 m from speaker	100
Diesel truck, 10 m away	90
Kerbside of busy road, 5 m	80
Vacuum cleaner, distance 1 m	70
Conversational speech, 1 m	60
Average home	50
Quiet library	40
Quiet bedroom at night	30
Background in TV studio	20
Rustling leaves in the distance	10
Hearing threshold	0



Sound pressure $p$ $N/m^2 = Pa$ Sound field quantity	Sound intensity $I$ $W/m^2$ Sound energy quantity
200	100
63.2	10
20	1
6.3	0.1
2	0.01
0.63	0.001
0.2	0.000 1
0.063	0.000 01
0.02	0.000 001
0.006 3	0.000 000 1
0.002	0.000 000 01
0.000 63	0.000 000 001
0.000 2	0.000 000 000 1
0.000 063	0.000 000 000 01
0.000 02	0.000 000 000 001

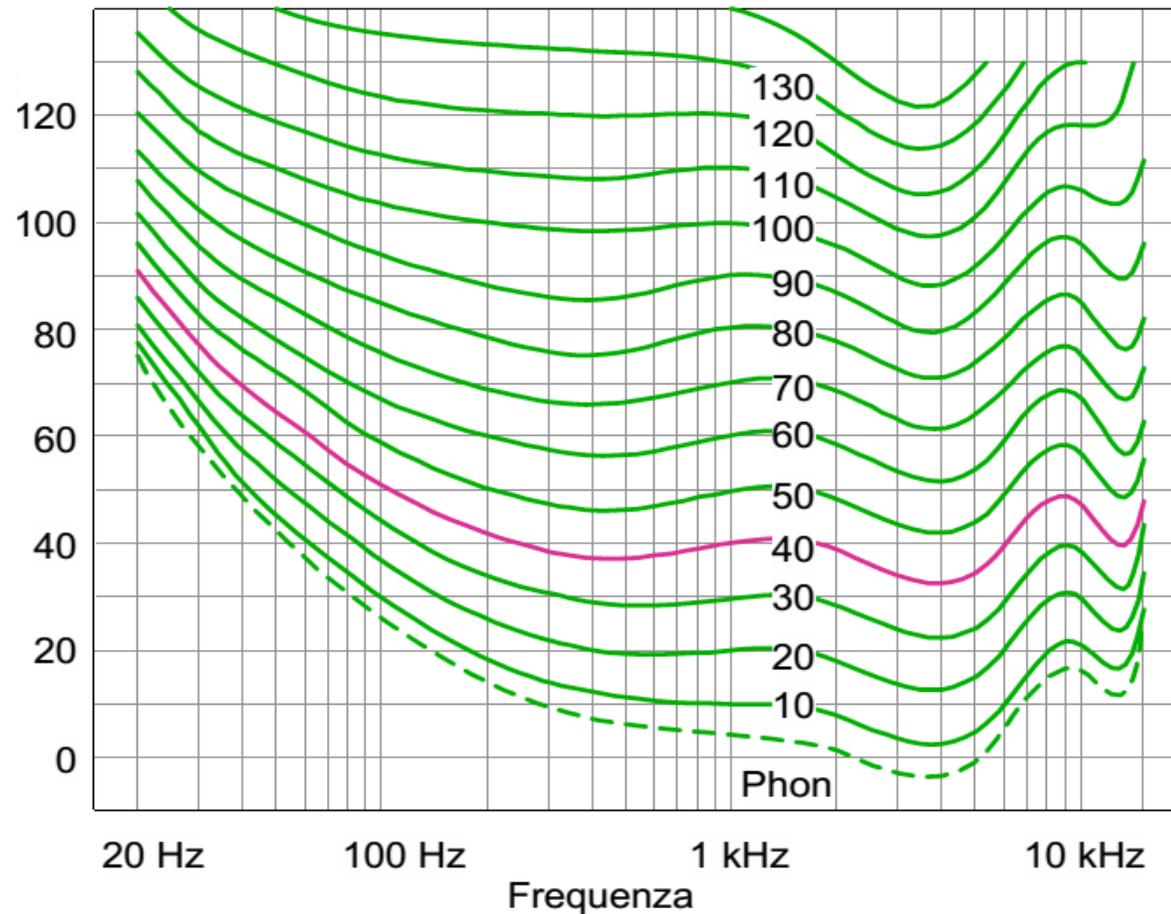


# Filtri di ponderazione (Frequency weighting) – VI

- Una **buona approssimazione per la curva A** si è ottenuta **“ribaltando” l’isofona a 40 phon**, ma posizionandola in modo che a 1000 Hz ci fosse un valore normalizzato di 0 dB.
- Per la curva C si è fatto, invece, riferimento ad una curva più alta in quanto essa è la curva di normalizzazione per effetti impulsivi, e comunque di maggior entità acustica.
- Curva isofona (per primi Fletcher and Munson 1933)
  - rappresenta la misura della pressione acustica (dB SPL) al variare della frequenza (Hz) a cui **l'ascoltatore percepisce un'intensità costante**, quando sottoposto ad un tono puro stazionario

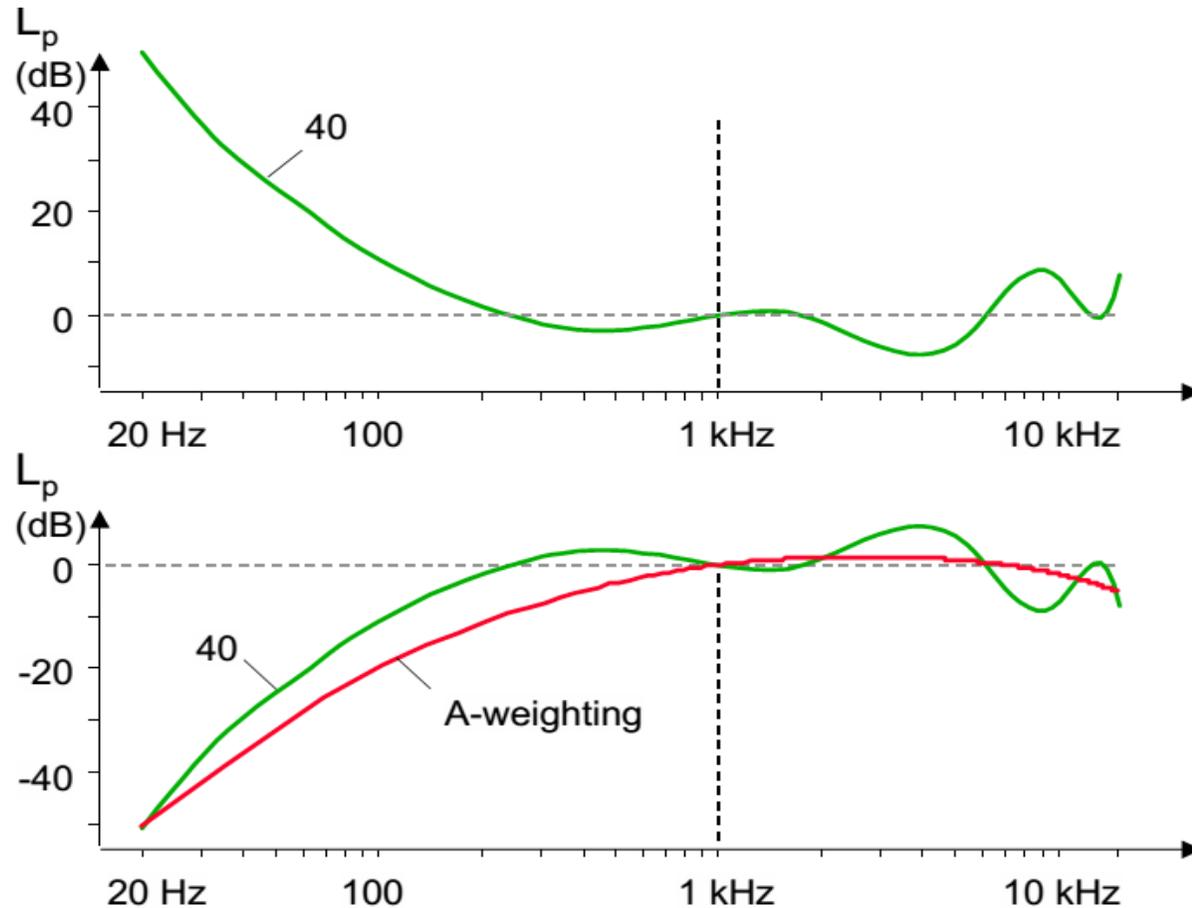
# Filtri di ponderazione (Frequency weighting) – VII

- Ponderazione A: simile al «mirror» della curva a isofona a 40 phon

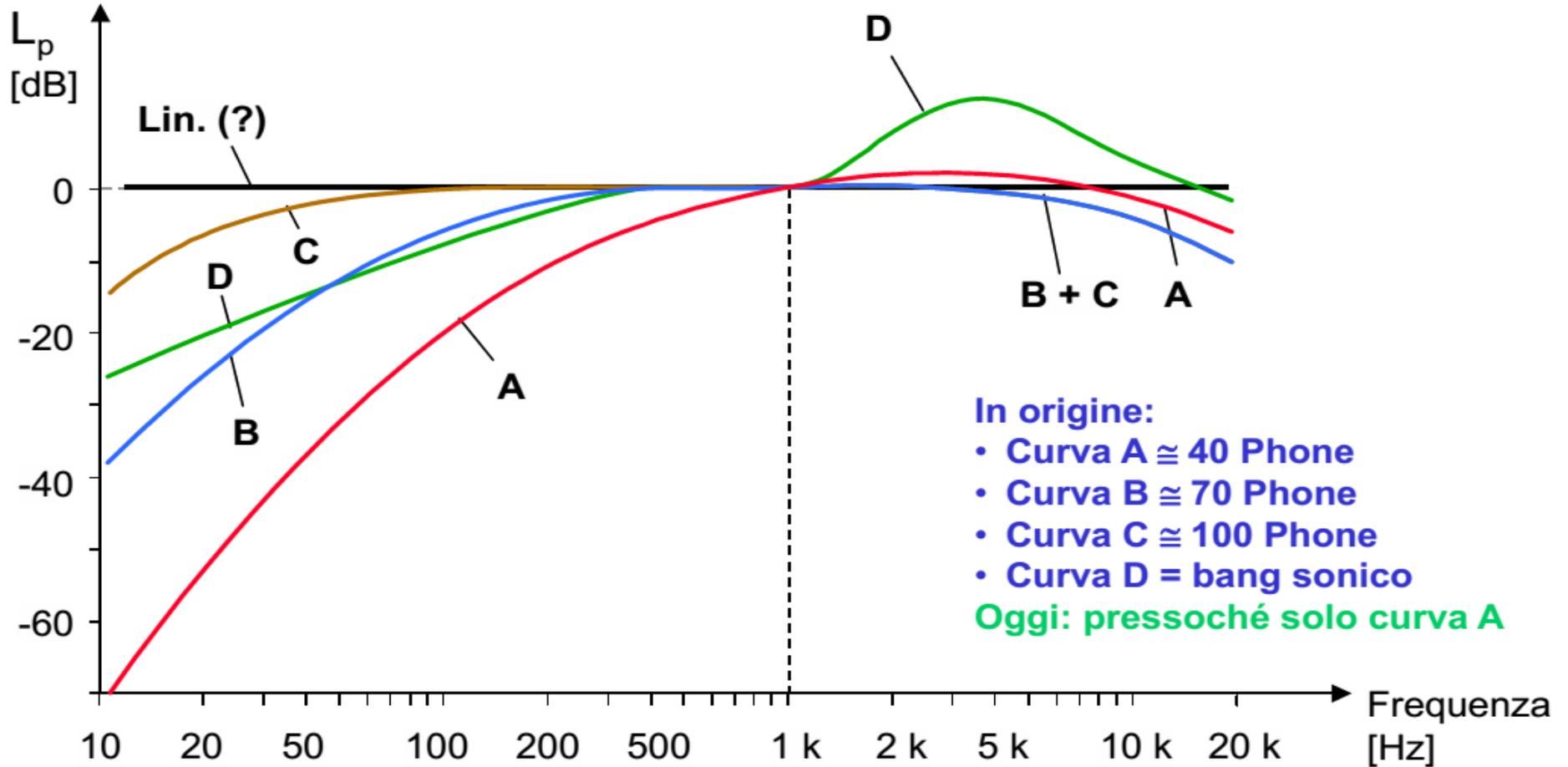


# Filtri di ponderazione (Frequency weighting) - VIII

- Ponderazione A: simile al «mirror» della curva a isofona a 40 phon

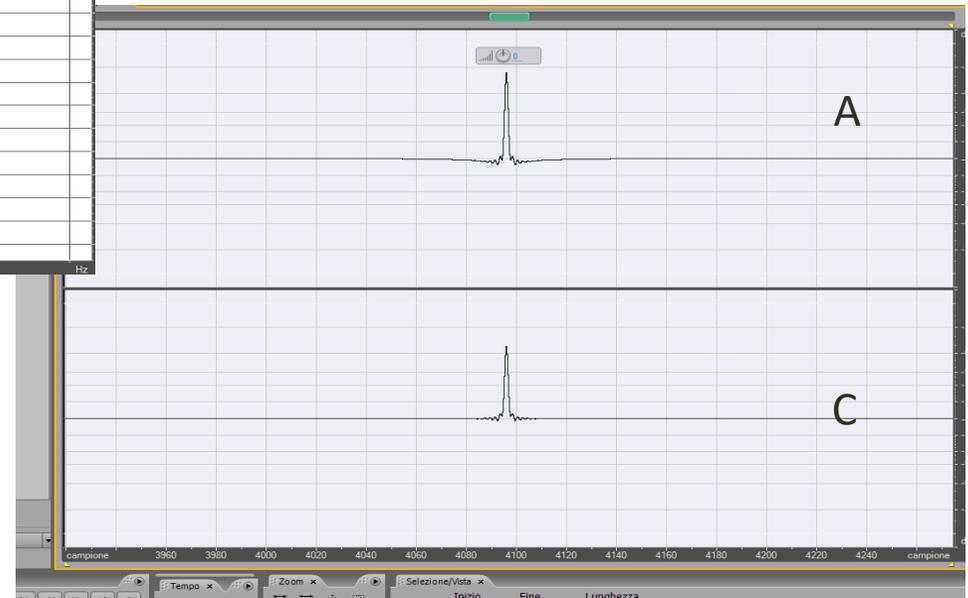
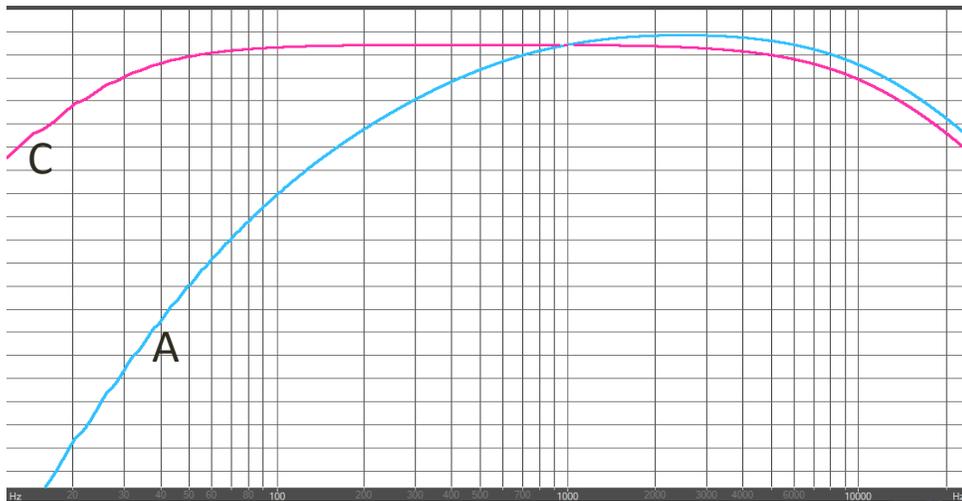


# Filtri di ponderazione (Frequency weighting) – IX



# Filtri di ponderazione (Frequency weighting) – X

- La IEC 61672-1 contiene le equazioni che descrivono la risposta in frequenza (solo ampiezza, no fase) delle curve di pesatura A e C



# Filtri di ponderazione (Frequency weighting) – XI

Nominal frequency <sup>a)</sup> Hz	Frequency weightings <sup>b)</sup> dB			Tolerance limits (dB)	
	A	C	Z	Class	
				1	2
10	-70,4	-14,3	0,0	+3,5; -∞	+5,5; -∞
12,5	-63,4	-11,2	0,0	+3,0; -∞	+5,5; -∞
16	-56,7	-8,5	0,0	+2,5; -4,5	+5,5; -∞
20	-50,5	-6,2	0,0	±2,5	±3,5
25	-44,7	-4,4	0,0	+2,5; -2,0	±3,5
31,5	-39,4	-3,0	0,0	±2,0	±3,5
40	-34,6	-2,0	0,0	±1,5	±2,5
50	-30,2	-1,3	0,0	±1,5	±2,5
63	-26,2	-0,8	0,0	±1,5	±2,5
80	-22,5	-0,5	0,0	±1,5	±2,5
100	-19,1	-0,3	0,0	±1,5	±2,0
125	-16,1	-0,2	0,0	±1,5	±2,0
160	-13,4	-0,1	0,0	±1,5	±2,0
200	-10,9	0,0	0,0	±1,5	±2,0
250	-8,6	0,0	0,0	±1,4	±1,9
315	-6,6	0,0	0,0	±1,4	±1,9
400	-4,8	0,0	0,0	±1,4	±1,9
500	-3,2	0,0	0,0	±1,4	±1,9
630	-1,9	0,0	0,0	±1,4	±1,9
800	-0,8	0,0	0,0	±1,4	±1,9
1 000	0	0	0	±1,1	±1,4
1 250	+0,6	0,0	0,0	±1,4	±1,9
1 600	+1,0	-0,1	0,0	±1,6	±2,6
2 000	+1,2	-0,2	0,0	±1,6	±2,6
2 500	+1,3	-0,3	0,0	±1,6	±3,1
3 150	+1,2	-0,5	0,0	±1,6	±3,1
4 000	+1,0	-0,8	0,0	±1,6	±3,6
5 000	+0,5	-1,3	0,0	±2,1	±4,1
6 300	-0,1	-2,0	0,0	+2,1; -2,6	±5,1
8 000	-1,1	-3,0	0,0	+2,1; -3,1	±5,6
10 000	-2,5	-4,4	0,0	+2,6; -3,6	+5,6; -∞
12 500	-4,3	-6,2	0,0	+3,0; -6,0	+6,0; -∞
16 000	-6,6	-8,5	0,0	+3,5; -17,0	+6,0; -∞
20 000	-9,3	-11,2	0,0	+4,0; -∞	+6,0; -∞

a) Nominal frequencies are from the R10 series given in table 1 of ISO 266:1997 [5].

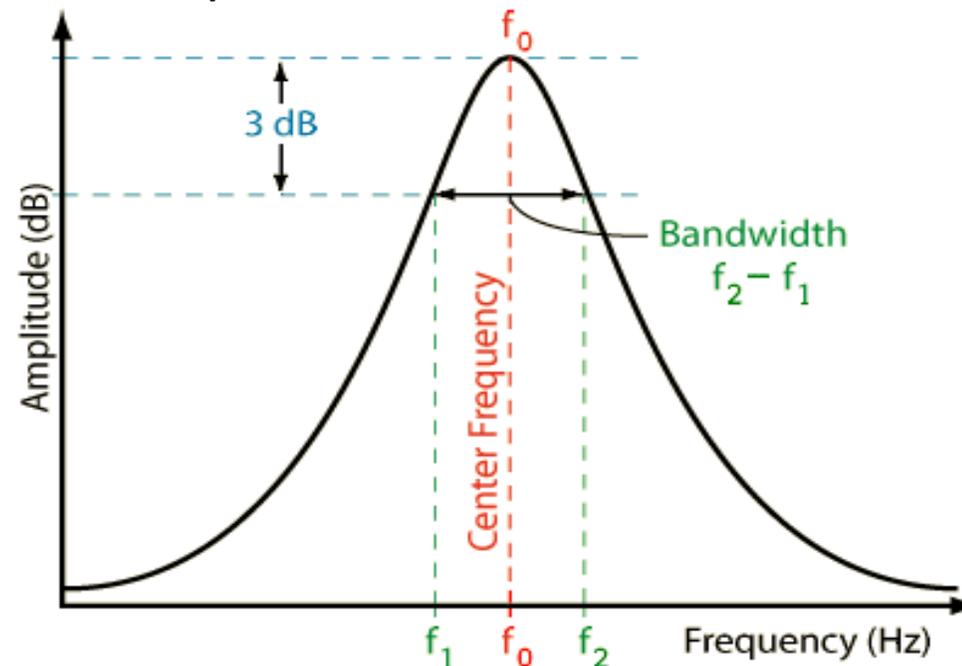
b) C and A frequency weightings were calculated by use of equations (6) and (7) with frequency  $f$  computed from  $f = (f_r)[10^{0,1(n-30)}]$  with  $f_r = 1$  kHz and  $n$  an integer between 10 and 43. The results were rounded to a tenth of a decibel.

# Filtri per l'analisi in frequenza – I

- In alcuni fonometri è presente un **banco di filtri** per l'analisi in frequenza in **ottave** o in **terzi di ottava** (filtri a banda percentuale costante), le cui frequenze centrali sono normate (ISO 266:1997, Acoustics -- **Preferred** frequencies).
- Tali filtri possono permettere:
  - individuazione di sorgenti sonore
  - progetti di insonorizzazioni mirati a determinate frequenze
  - individuazione di componenti tonali
- Il filtraggio avviene tramite opportuni **filtri passa-banda**.

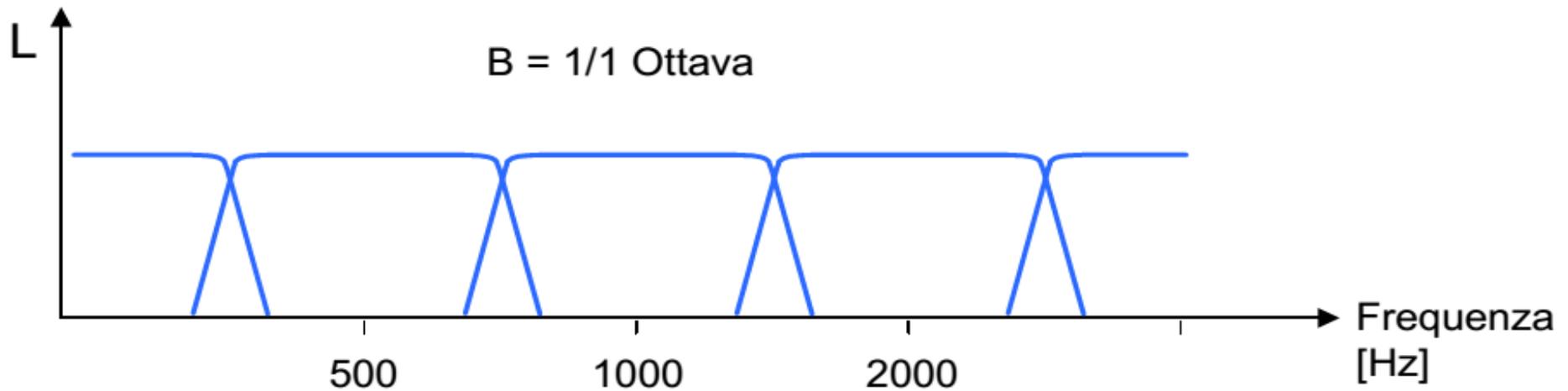
# Filtri per l'analisi in frequenza – II

- Devono lasciare inalterata la banda interessata e abbassare drasticamente tutte le altre.
- Le frequenze di taglio inferiore e superiore sono individuate da una attenuazione di 3dB, rispetto ai valori interni alla banda.



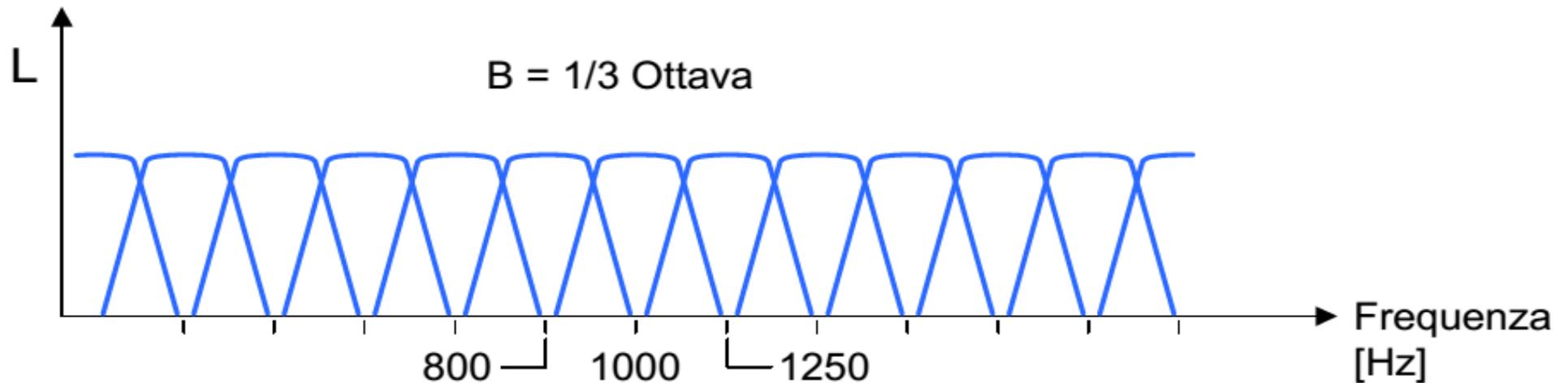
# Filtri per l'analisi in frequenza – III

- Banco di filtri con larghezza di banda 1 ottava
  - Si noti la **simmetricità** quando l'asse delle **frequenze è in scala logaritmica (questo caso)**

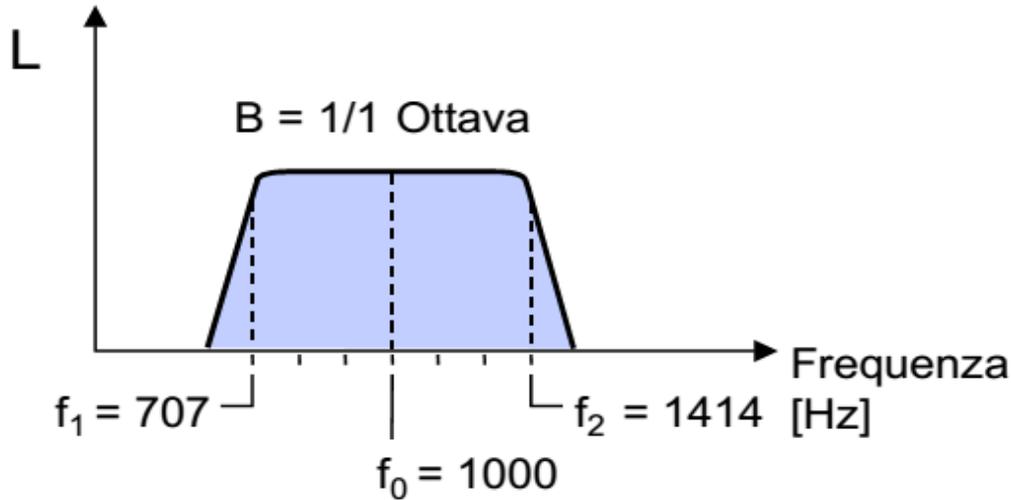


# Filtri per l'analisi in frequenza – IV

- Banco di filtri con larghezza di banda 1/3 ottava
  - Si noti la **simmetricità** quando l'asse delle **frequenze è scala logaritmica (questo caso)**



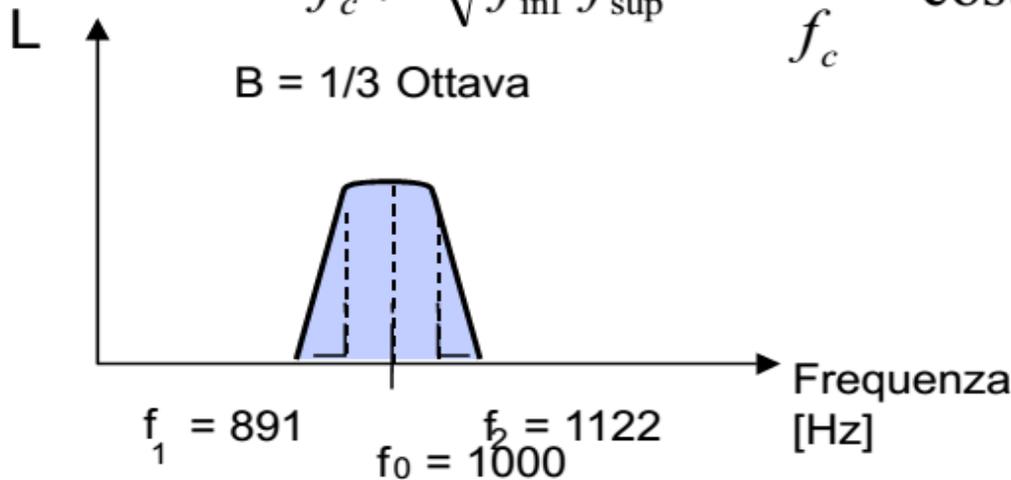
# Filtri per l'analisi in frequenza – V



<b>1/1 Ottava</b>
$f_2 = 2 \times f_1$ $B = 0.7 \times f_0 \approx 70\%$

$$f_c := \sqrt{f_{\text{inf}} f_{\text{sup}}}$$

$$\frac{\Delta f}{f_c} = \text{cost} = k; \quad \Delta f := f_{\text{sup}} - f_{\text{inf}}$$



<b>1/3 Ottava</b>
$f_2 = \sqrt[3]{2} \times f_1 = 1.25 \times f_1$ $B = 0.23 \times f_0 \approx 23\%$

# Filtri per l'analisi in frequenza – VI

		Base 10					Base 2				
$f_n$ (Hz)	$f_m$ (Hz)	$f_{1,2}$ (Hz)	$f_m$ (Hz)	$f_{1,2}$ (Hz)		$f_n$ (Hz)	$f_m$ (Hz)	$f_{1,2}$ (Hz)	$f_m$ (Hz)	$f_{1,2}$ (Hz)	
		22,387		22,097	t			1412,5		1414,2	t
25	25,119		24,803			1600	1584,9		1587,4		
		28,184		27,841				1778,3		1781,8	
31,5	31,623		31,250		c	2000	1995,3		2000,0		c
		35,481		35,077				2238,7		2244,9	
40	39,811		39,373			2500	2511,9		2519,8		
		44,668		44,194	t			2818,4		2828,4	t
50	50,119		49,606			3150	3162,3		3174,8		
		56,234		55,681				3548,1		3563,6	
63	63,096		62,500		c	4000	3981,1		4000,0		c
		70,795		70,154				4466,8		4489,8	
80	79,433		78,745			5000	5011,9		5039,7		
		89,125		88,388	t			5623,4		5656,9	t
100	100,00		99,213			6300	6309,6		6349,6		
		112,20		111,36				7079,5		7127,2	
125	125,89		125,00		c	8000	7943,3		8000,0		c
		141,25		140,31				8912,5		8979,7	
160	158,49		157,49			10000	10000		10079		
		177,83		176,78	t			11220		11314	t
200	199,53		198,43			12500	12589		12699		
		223,87		222,72				14125		14254	
250	251,19		250,00		c	16000	15849		16000		c
		281,84		280,62				17783		17959	
315	316,23		314,98			20000	19953		20159		
		354,81		353,55	t			22387		22627	t
400	398,11		396,85								
		446,68		445,45							
500	501,19		500,00		c						
		562,34		561,23							
630	630,96		629,96								
		707,95		707,11	t						
800	794,33		793,70								
		891,25		890,90							
1000	1000,0		1000,0		c						
		1122,0		1122,5							
1250	1258,9		1259,9								
		1412,5		1414,2	t						

Nota: I valori delle frequenze centrale e di taglio delle bande di ottava sono contraddistinte rispettivamente dai simboli **c** e **t**; gli altri valori sono relativi alle bande di 1/3 di ottava

Frequenze nominali  $f_n$ , centrali  $f_m$  e di taglio  $f_{1,2}$  delle bande di frequenza normalizzate di 1/3 di ottava e di ottava

# Esempi Audio



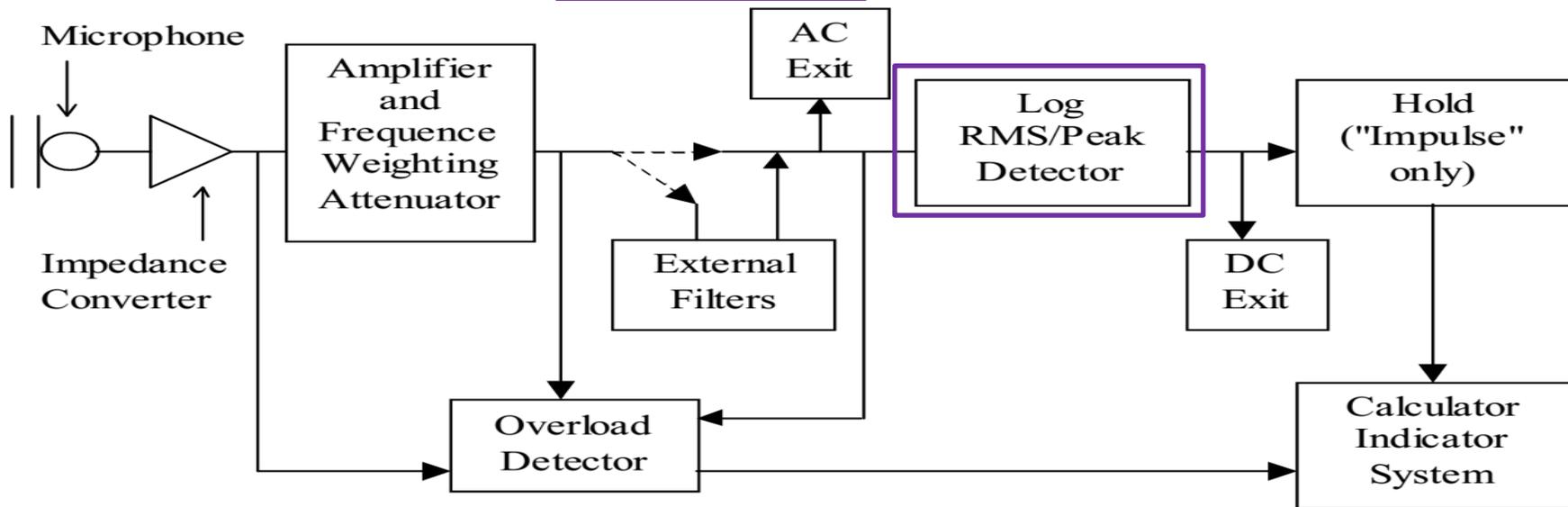
## Filtri Audio

- Passa basso
- Passa alto
- Passa banda

$$Q = \frac{\sqrt{2^N}}{2^N - 1}$$

Q := quality factor  
N := larghezza di banda in ottave

BW in octaves	Filter Q		BW in octaves	Filter Q		BW in octaves	Filter Q		BW in octaves	Filter Q
1/80	115.4		1	1.41		4	0.267		7	0.089
1/60	86.6		1 1/4	1.12		4 1/4	0.242		7 1/4	0.082
1/50	72.1		1 1/3	1.04		4 1/3	0.234		7 1/3	0.079
1/40	57.7		1 1/2	0.92		4 1/2	0.220		7 1/2	0.075
1/30	43.3		1 2/3	0.82		4 2/3	0.207		7 2/3	0.071
1/25	36.1		1 3/4	0.78		4 3/4	0.200		7 3/4	0.068
1/20	28.9		2	0.67		5	0.182		8	0.063
1/16	23.1		2 1/4	0.58		5 1/4	0.166		8 1/4	0.058
1/12	17.3		2 1/3	0.56		5 1/3	0.161		8 1/3	0.056
1/10	14.4		2 1/2	0.51		5 1/2	0.152		8 1/2	0.053
1/8	11.5		2 2/3	0.47		5 2/3	0.143		8 2/3	0.050
1/6	8.65		2 3/4	0.45		5 3/4	0.139		8 3/4	0.048
1/5	7.20		3	0.40		6	0.127		9	0.044
1/4	5.76		3 1/4	0.36		6 1/4	0.116		9 1/4	0.041
1/3	4.32		3 1/3	0.35		6 1/3	0.113		9 1/3	0.039
1/2	2.87		3 1/2	0.33		6 1/2	0.106		9 1/2	0.037
2/3	2.14		3 2/3	0.30		6 2/3	0.100		9 2/3	0.035
3/4	1.90		3 3/4	0.29		6 3/4	0.097		9 3/4	0.034
									10	0.031



# RMS / PEAK DETECTOR



# RMS / Peak detector – I

- **Blocco essenziale del fonometro**
- Alla fine dei filtri di ponderazione ed eventualmente dei filtri di banda **il segnale viene convertito in una tensione che è proporzionale al valore efficace (RMS)**.
- In alternativa invece di trasformare il segnale nel suo valore efficace, di esso può essere considerato il **valore di picco** relativo al fenomeno acustico esaminato
- In seguito, grazie ad un convertitore logaritmico il valore efficace viene espresso in dB
- Queste operazioni vengono svolte nel dominio analogico in quasi tutti i fonometri (anche se possiedono un display digitale) e solo nei più recenti sono realizzati in tecnologia digitale

# RMS / Peak detector – II

- Per consentire differenti possibilità per analizzare il fenomeno sonoro, ed anche per **avvicinarsi il meglio possibile al modo di reagire dell'orecchio umano**, quattro costanti di tempo sono state normalizzate:

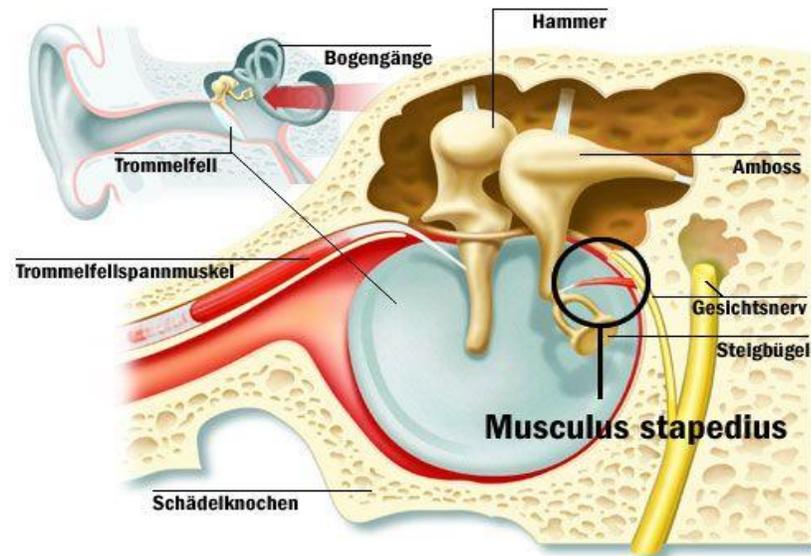
NOME	VALORE
Slow	1s
Fast	125ms
Impulse-livelli crescenti	35ms
Impulse-livelli decrescenti	1,5s
Peak	20 $\mu$ s

# RMS / Peak detector – III

- La costante **fast** (125 ms) ha una risposta abbastanza veloce e meglio segue il comportamento temporale del suono e presenterà alti valori massimi e piccoli valori minimi
- La costante **slow** (1 s) tenderà ad omogeneizzare di più tali valori, avendo massimi più bassi e minimi più alti.
- La costante **impulse** ha rapida ascesa (35 ms è paragonabile al tempo di reazione dell'orecchio umano) adatto proprio ad eventi impulsivi, e lento decadimento (1.5 s)
  - «lento decadimento» è legato alle vecchie strumentazioni nelle quali era necessario avere il tempo per leggerle: display analogici

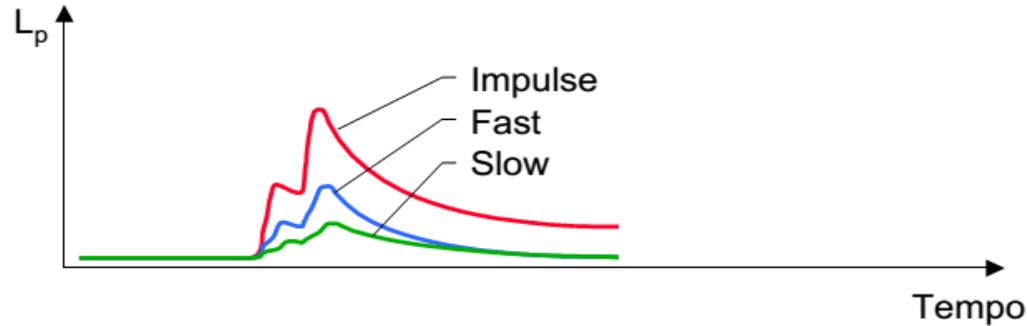
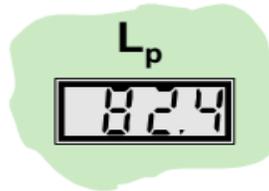
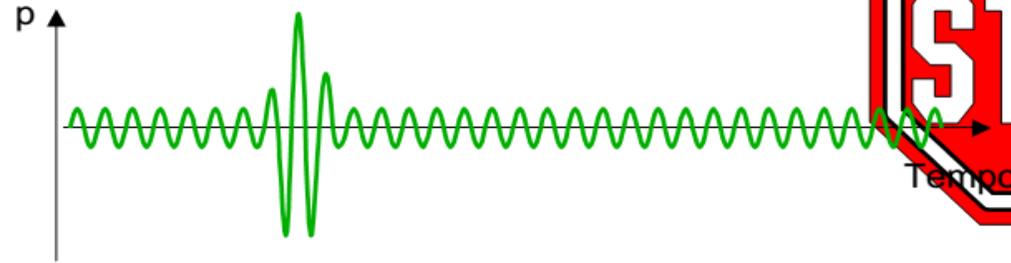
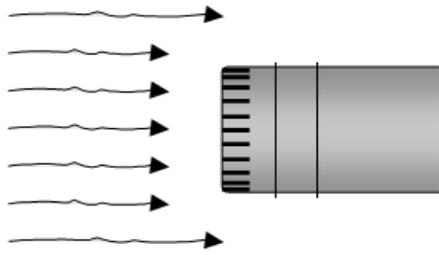
# RMS / Peak detector – IV

- La costante **peak** invece ha un tempo di salita piccolissimo ( $20 \mu\text{s}$ ) e viene usata per **registrare il valore massimo della pressione sonora** in quelle occasioni in cui **suoni impulsivi con grande energia ma brevissima durata non avrebbero tempo di essere corretti dai sistemi difensivi dell'orecchio ed potrebbero provocare danni irreversibili**. (v. muscolo stapedio: previene un eccessivo movimento della staffa)
  - Esistono normative che vanno ad imporre dei limiti per i valori di picco (130-140 dB SPL)



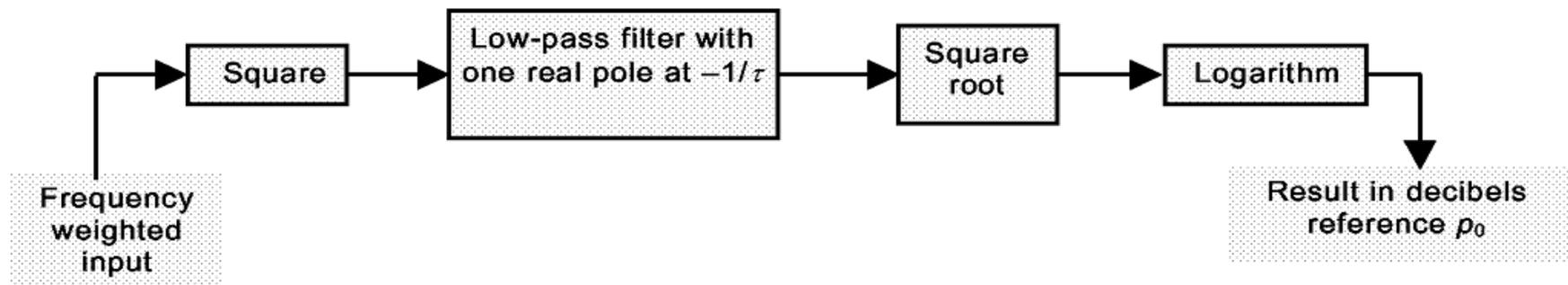
# RMS / Peak detector – V

## L'INTEGRAZIONE ESPONENZIALE



# RMS / Peak detector – VI

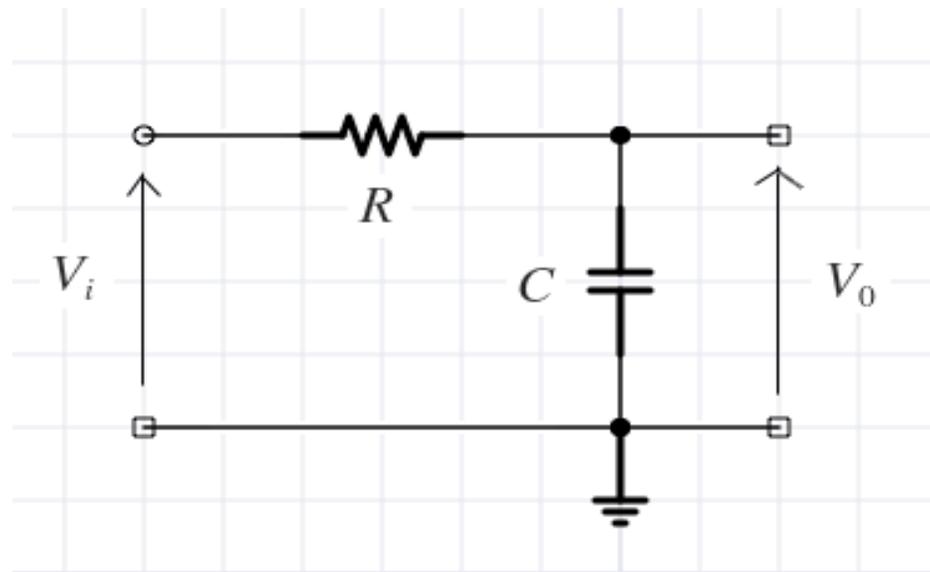
- Lo schema seguente descrive il processo al quale il segnale è sottoposto al fine di ottenere il valore RMS in dB



- Il segnale proveniente dai precedenti filtri viene:
  - Elevato al quadrato
  - Filtrato da un filtro **passa basso** che contiene l'informazione della costante di tempo scelta (SLOW, FAST, ...)
  - Il risultato di tale segnale viene messo sotto radice quadrata
  - ABBIAMO OTTENUTO IL VALORE RMS**
  - Si calcola il livello in dB sfruttando l'operazione di logaritmo e la costante  $p_0$

# RMS / Peak detector – VII

- Come accennato le informazioni sulle costanti di tempo sono «contenute» nel filtro passa basso, in particolare:
  - Il filtro passa basso è realizzato tramite un circuito RC (1 resistenza e 1 condensatore)
  - Il valore numerico di RC uguaglia il valore in secondi della costante di tempo:  $\tau = RC$

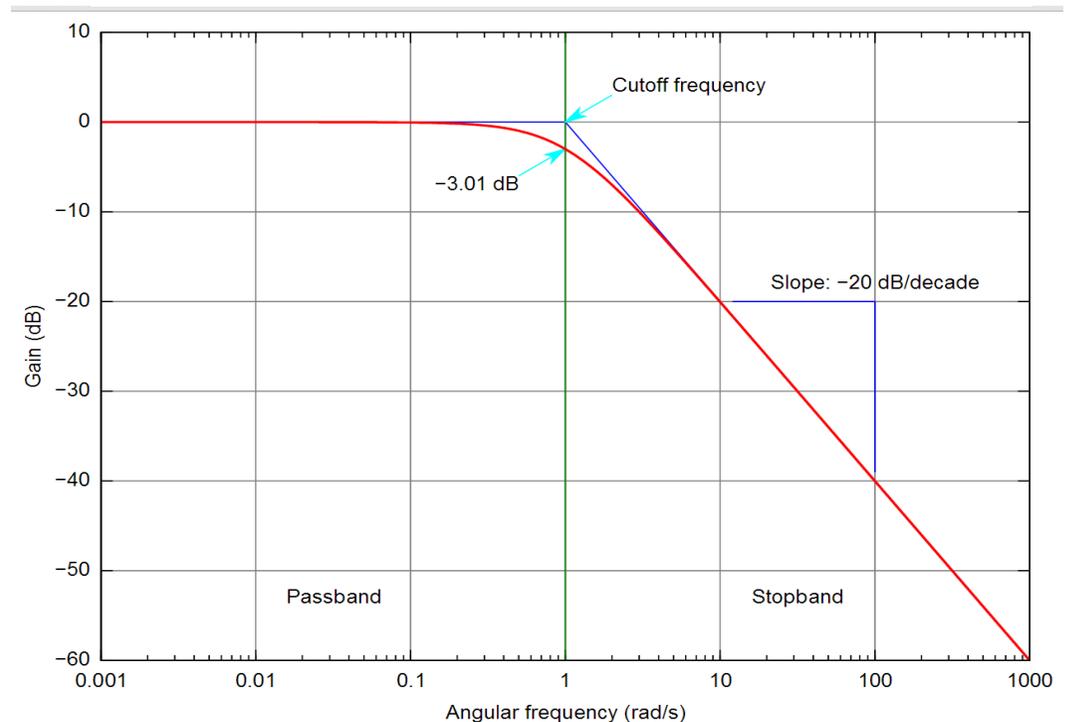


# RMS / Peak detector – VIII

- Ricordando che l'equazione che descrive la frequenza di taglio di un filtro passa basso RC è:

$$f_c = \frac{1}{2\pi\tau} = \frac{1}{2\pi RC}$$

- Poiché  $\tau = RC$
- Si deduce che al variare della costante di tempo (SLOW, FAST, ...) **la frequenza di taglio del filtro passa basso cambia**



# RMS / Peak detector – IX

- La normativa IEC 61672-1 riporta l'equazione da applicare per ottenere il valore RMS pesato secondo le costanti di tempo, ovvero filtrato da un passa basso con una opportuna frequenza di taglio, in dB SPL.

$$L_{A\tau}(t) = 20 \lg \left\{ \left[ (1/\tau) \int_{-\infty}^t p_A^2(\xi) e^{-(t-\xi)/\tau} d\xi \right]^{1/2} / p_0 \right\}$$

$$g(t) = e^{-t/\tau}$$

$$(f * g)(t) \stackrel{\text{def}}{=} \int_{-\infty}^{\infty} f(\tau) g(t - \tau) d\tau = \int_{-\infty}^{\infty} f(t - \tau) g(\tau) d\tau.$$

# RMS / Peak detector – X

- Nei moderni fonometri digitali in cui non esiste circuiteria analogica l'operazione di filtraggio, descritta dalla parte evidenziata,

$$L_{A\tau}(t) = 20 \lg \left\{ \left[ (1/\tau) \int_{-\infty}^t p_A^2(\xi) e^{-(t-\xi)/\tau} d\xi \right]^{1/2} / p_0 \right\}$$

Viene implementata sfruttando la seguente formula

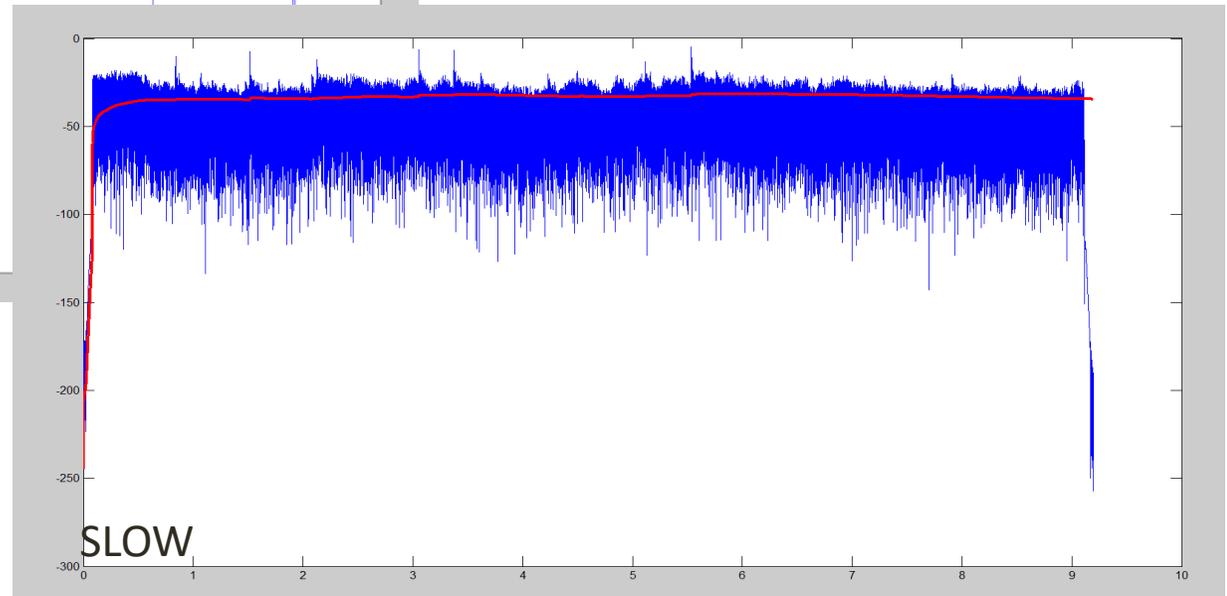
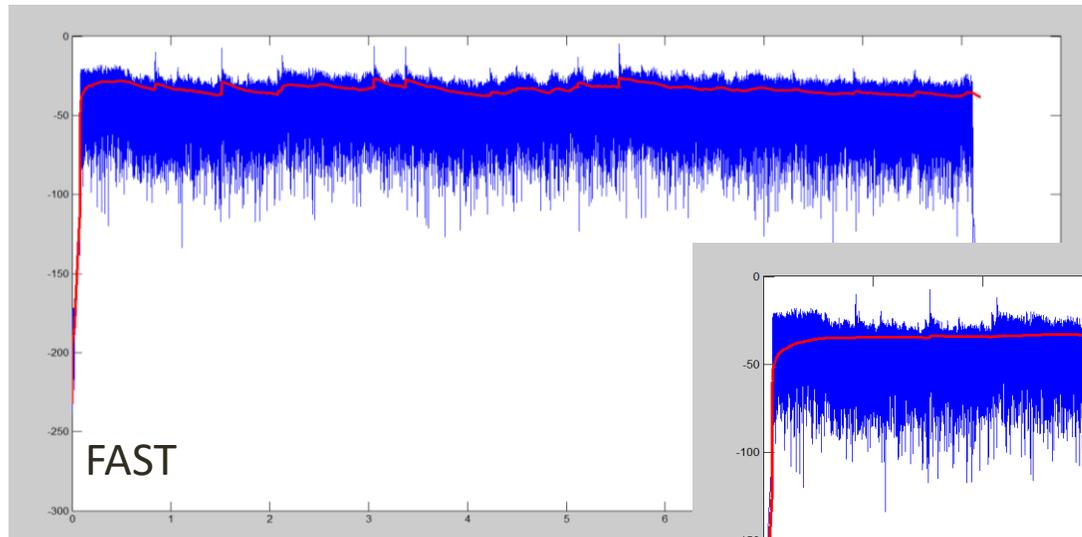
$$p_{RMS}^2[i] = \alpha \cdot p_A^2[i] + (1 - \alpha) \cdot p_{RMS}^2[i - 1]$$

Dove:

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{where } \alpha \triangleq \frac{\Delta_T}{RC + \Delta_T} \\ \Delta T = 1/fs \quad (\text{fs := frequenza di campionamento}) \\ RC = \tau \quad (\text{valore in secondi di SLOW, FAST, ...}) \end{array} \right.$$

# RMS / Peak detector – XI

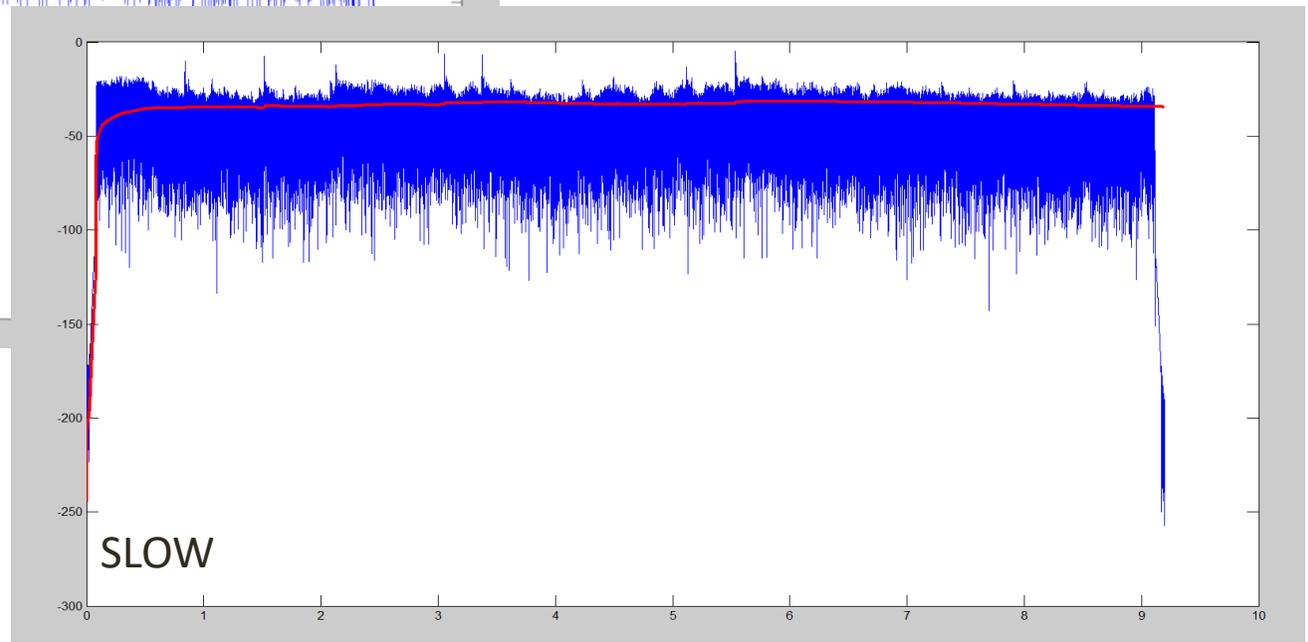
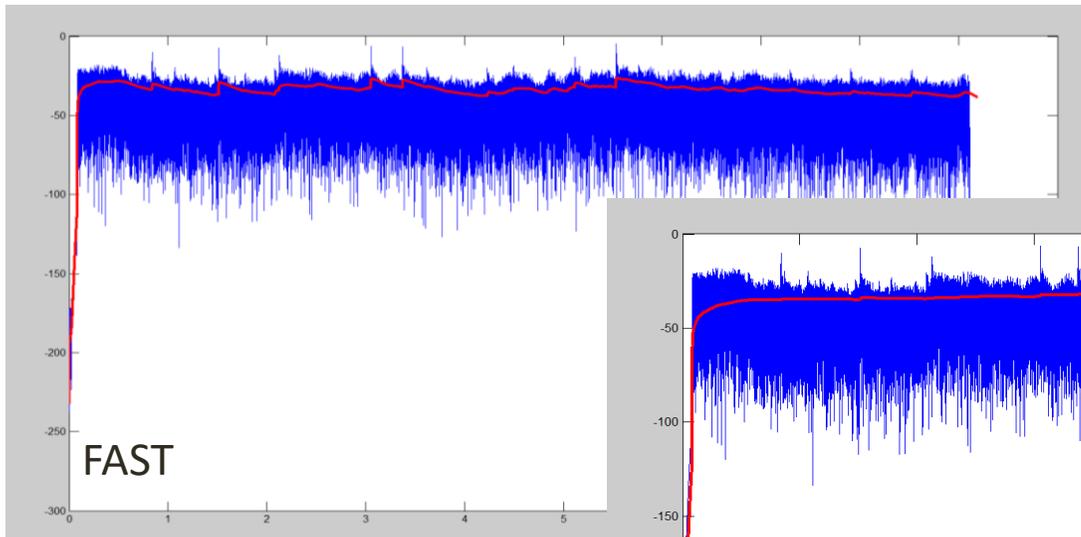
- Esempio dell'effetto delle diverse costanti di tempo sullo stesso fenomeno sonoro

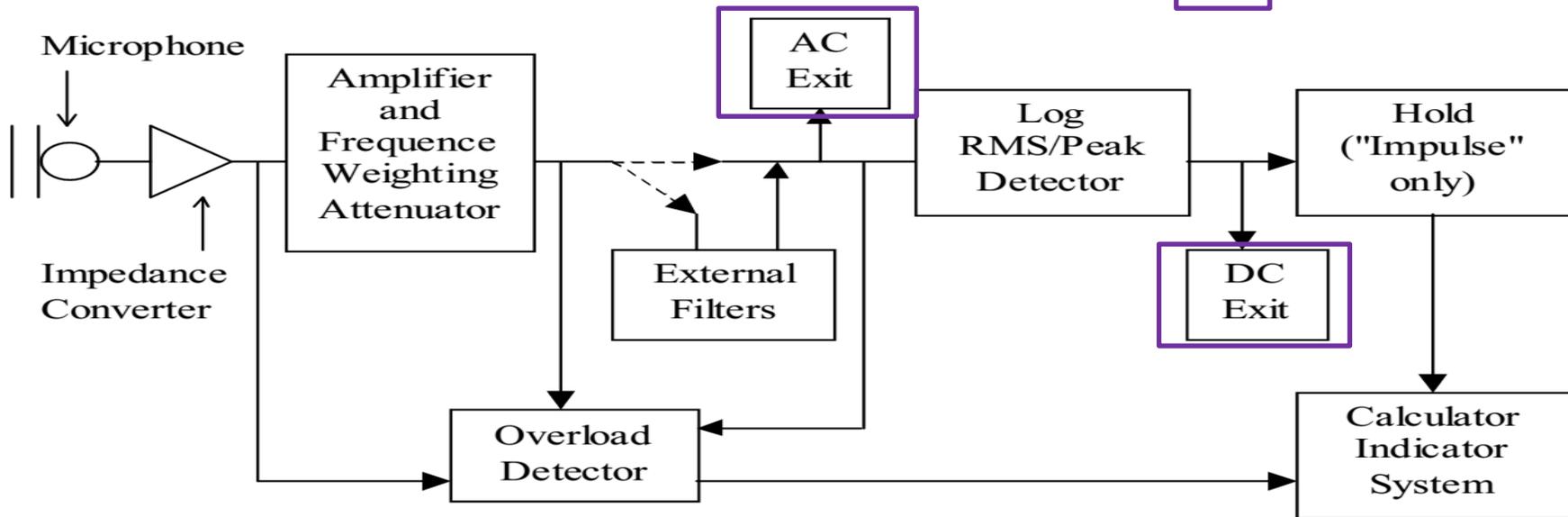


# Esempio Audio



- Costanti SLOW, FAST come filtro passa basso

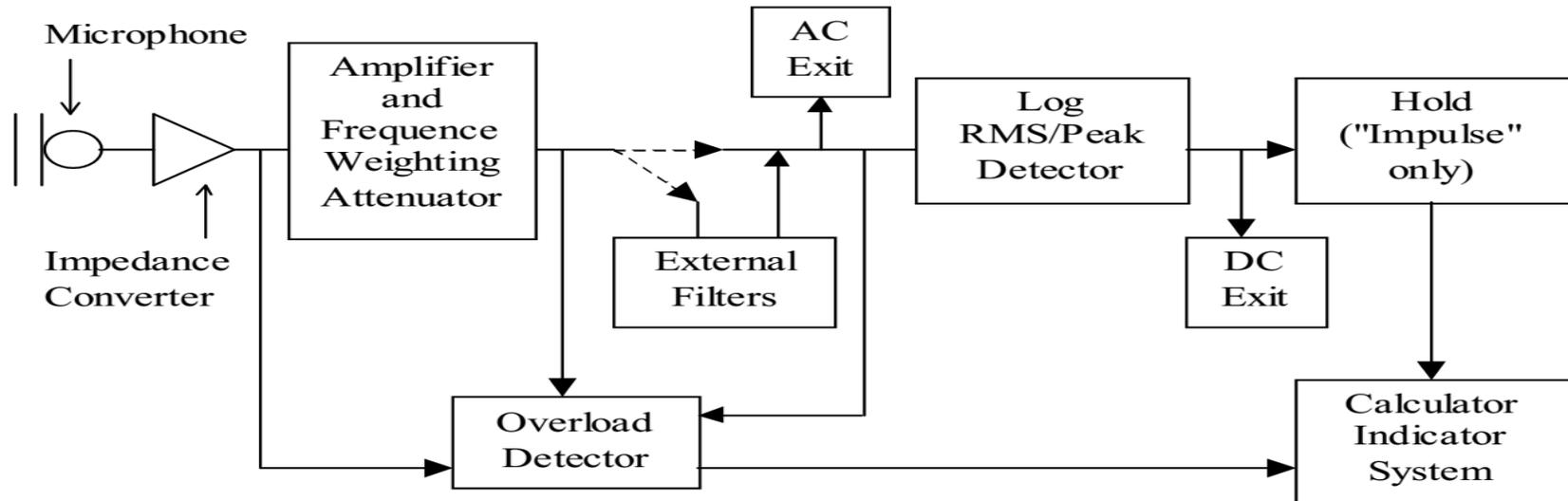




# OUTPUTS

# Outputs

- Come evidente dalla rappresentazione nello schema a blocchi i fonometri possiedono delle uscite
- Tali uscite hanno lo scopo di prelevare alcuni segnali dal fonometro e renderli disponibili all'esterno per successive o parallele operazioni
- Si ricordano le uscite AC e DC

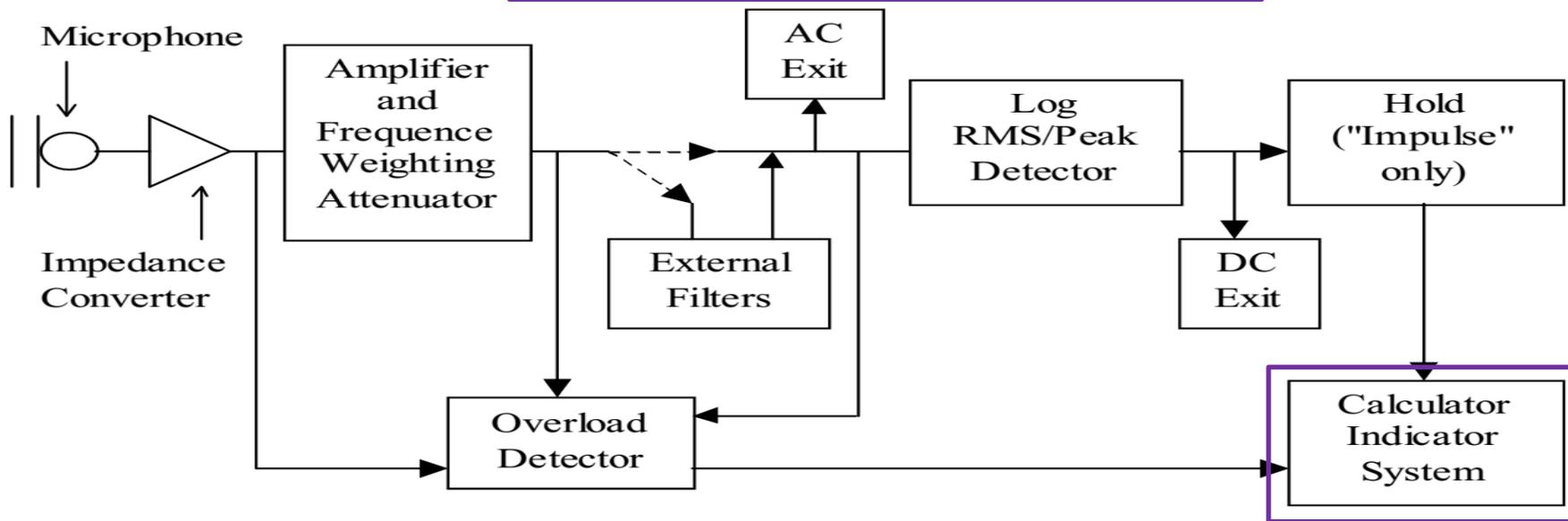


# AC Output / DC Output – I

- Gli utilizzi dei segnali AC/DC possono essere molteplici:
  - AC Output (Segnale in alternata): Fornisce il segnale in tensione alternata proporzionale alla pressione sonora. **Può essere registrato tramite la scheda audio di un computer e utilizzato per successive elaborazioni digitali.** // *Il posizionamento di tale blocco può variare da fonometro a fonometro. Generalmente preleva il segnale prima dei filtri di ponderazione ma in alcuni casi il filtraggio di ponderazione è incluso nel segnale*
  - DC Output (Segnale in continua): Questo segnale fornisce il valore RMS istantaneo pesato tramite la costante di tempo selezionata. Può essere utilizzato per pilotare una stampante al fine di creare un grafico dell'andamento del campo sonoro.

# AC Output / DC Output – II





# CALCULATOR INDICATOR SYSTEM

# Calculator Indicator System – I

- Il blocco di calcolo presente in molti fonometri moderni permette di calcolare immediatamente durante la misurazione e alla fine di essa una serie di grandezze utili che poi vengono rese disponibili (per esempio sul display o su scheda SD):
  - Livello SPL istantaneo con costanti di tempo
  - Livello equivalente
  - SEL
- Si parla di **fonometro istantaneo** quando si visualizzano i valori dei **livelli di pressione con l'uso delle costanti di tempo**
- Si parla di **fonometro integratore** quando si visualizzano i valori dei **livelli equivalenti e del SEL**, ottenuti mediante opportune integrazioni.

# Calculator Indicator System – II

- Livello istantaneo con pesatura esponenziale (IEC 61672-1)

## time-weighted sound level

twenty times the logarithm to the base ten of the ratio of a given root-mean-square sound pressure to the reference sound pressure, root-mean-square sound pressure being obtained with a standard frequency weighting and standard time weighting

NOTE 1 Time-weighted sound level is expressed in decibels (dB).

NOTE 2 For time-weighted sound level, example letter symbols are  $L_{AF}$ ,  $L_{AS}$ ,  $L_{CF}$ , and  $L_{CS}$  for frequency weightings A and C and time weightings F and S.

NOTE 3 In symbols, A-weighted and time-weighted sound level,  $L_{A\tau}(t)$ , at any instant of time  $t$  is represented by

$$L_{A\tau}(t) = 20 \lg \left\{ \left[ (1/\tau) \int_{-\infty}^t p_A^2(\xi) e^{-(t-\xi)/\tau} d\xi \right]^{1/2} / p_0 \right\} \quad (1)$$

where

- $\tau$  is the exponential time constant in seconds for time weighting F or S;
- $\xi$  is a dummy variable of time integration from some time in the past, as indicated by  $-\infty$  for the lower limit of the integral, to the time of observation  $t$ ;
- $p_A(\xi)$  is the A-weighted instantaneous sound pressure; and
- $p_0$  is the reference sound pressure.

In equation (1), the numerator of the argument of the logarithm is the exponential-time-weighted, root-mean-square, frequency-weighted sound pressure at observation time  $t$ .

NOTE 4 The sketch in figure 1 illustrates the process indicated by equation (1).

# Calculator Indicator System – III

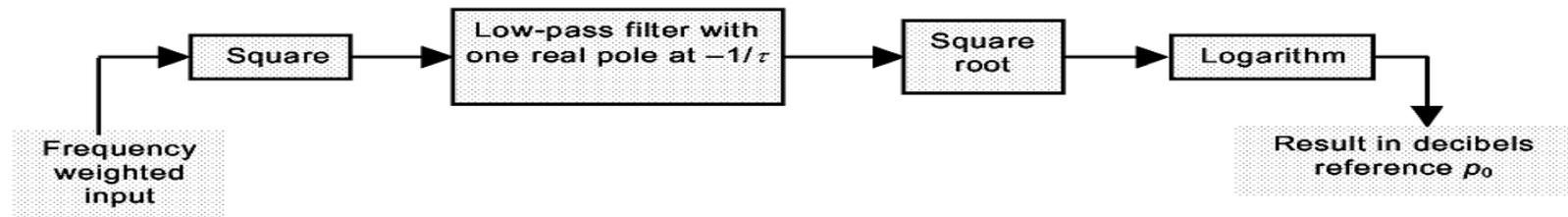
- Livello istantaneo con pesatura esponenziale (IEC 61672-1)

the integral, to the time of observation  $t$ ;

- $p_A(\xi)$  is the A-weighted instantaneous sound pressure; and
- $p_0$  is the reference sound pressure.

In equation (1), the numerator of the argument of the logarithm is the exponential-time-weighted, root-mean-square, frequency-weighted sound pressure at observation time  $t$ .

NOTE 4 The sketch in figure 1 illustrates the process indicated by equation (1).



IEC 1082/02

Figure 1 – Principal steps involved in forming an exponential-time-weighted sound level

# Calculator Indicator System – IV

- Livello equivalente - pesato A - (IEC 61672-1)

## **time-average sound level**

### **equivalent continuous sound level**

twenty times the logarithm to the base ten of the ratio of a root-mean-square sound pressure during a stated time interval to the reference sound pressure, sound pressure being obtained with a standard frequency weighting

NOTE 1 Time-average or equivalent continuous sound level is expressed in decibels (dB).

NOTE 2 In symbols, time-average, A-weighted sound level,  $L_{AT}$  or  $L_{AeqT}$ , is given by

$$L_{AT} = L_{AeqT} = 20 \lg \left\{ \left[ (1/T) \int_{t-T}^t p_A^2(\xi) d\xi \right]^{1/2} / p_0 \right\} \quad (2)$$

where

- $\xi$  is a dummy variable of time integration over the averaging time interval ending at the time of observation  $t$ ;
- $T$  is the averaging time interval;
- $p_A(\xi)$  is the A-weighted instantaneous sound pressure; and
- $p_0$  is the reference sound pressure.

In equation (2), the numerator of the argument of the logarithm is the root-mean-square, frequency-weighted sound pressure over averaging time interval  $T$ .

NOTE 3 In principle, time weighting is not involved in a determination of time-average sound level.

# Calculator Indicator System – V

- SEL (IEC 61672-1)

----  
**sound exposure level**

ten times the logarithm to the base ten of the ratio of a sound exposure to the reference sound exposure, reference sound exposure being the product of the square of the reference sound pressure and the reference time interval of 1 s

NOTE 1 Sound exposure level is expressed in decibels (dB).

NOTE 2 In symbols, A-weighted sound exposure level,  $L_{AE}$ , is related to a corresponding measurement of time-average, A-weighted sound level,  $L_{AT}$  or  $L_{AeqT}$ , by

$$L_{AE} = 10 \lg \left\{ \left[ \int_{t_1}^{t_2} p_A^2(t) dt \right] / (p_0^2 T_0) \right\} = 10 \lg(E_A / E_0) = L_{AT} + 10 \lg(T / T_0) \quad (4)$$

where

- $E_A$  is the A-weighted sound exposure in pascal-squared seconds (see equation (3));
- $E_0$  is the reference sound exposure of  $(20 \mu\text{Pa})^2 \times (1 \text{ s}) = 400 \times 10^{-12} \text{ Pa}^2\text{s}$ ;
- $T_0 = 1 \text{ s}$  and
- $T = t_2 - t_1$  is the time interval for measurement, in seconds, for sound exposure level and time-average sound level.

NOTE 3 Time-average, A-weighted sound level  $L_{AT}$  or  $L_{AeqT}$  during time interval  $T$  is related to the total A-weighted sound exposure  $E_A$  occurring within that interval by

$$E_A = (p_0^2 T) (10^{0,1L_{AT}}) \quad (5a)$$

or

$$L_{AT} = 10 \lg \left[ E_A / (p_0^2 T) \right] = L_{AE} - 10 \lg(T / T_0) \quad (5b)$$

# Fonometri e classi di appartenenza

- Normativa di riferimento IEC 61672
- Due Classi di fonometri
  - classe 1: strumento per laboratorio e misure di precisione sul campo, con tolleranze sulla linearità in frequenza di  $\pm 1.1$  dB per frequenze intorno a 1 kHz e dinamica di 60 dB, con linearità in ampiezza di  $\pm 0.6$  dB per variazioni di meno di 10 dB e di 1.1 dB su tutta la scala. Tipicamente sono microfoni da  $\frac{1}{2}$ "
  - classe 2: strumento per misure sul campo di uso generale, con tolleranze dell'ordine dei  $\pm 4$  dB sulla risposta in frequenza nella gamma centrale e di dinamica di 60 dB, con linearità di ampiezza di  $\pm 0.8$  dB per variazioni minori di 10 dB e 1.4 dB su tutta al scala. Le dimensioni meccaniche sono di grande varietà
- La ponderazione A è obbligatoria su tutti i fonometri
- La ponderazione C è obbligatoria per i fonometri di Classe 1

# Esperimenti in aula



## MiniDSP UMIK-2:

- USB Audio Reference Measurement Microphone
- Unique calibration file for each microphone
- 1/2" capsule on 60 UNS thread
- 32bit 44.1~192kHz recording, Custom Windows ASIO drivers and Plug&Play on Linux/Mac OSx
- Low noise floor preamps, 120DR ADC
- Plug&Play compatible with wide range of software, including REW & Dirac Live platforms

# Esperimenti in aula

## BEDROCK AM100 – Sound Level Meter and Spectrum Analyser

- Class 1 / Type 1 sound level meter (fast, slow, impulse; A/C.Z-weighting, Leq, SEL) conforming to IEC-61672 class 1, ANSI S1.4 Type 1.
- STIPA measuring (quick screening mode, pro mode, averaging mode)
- Full STI using the direct method (65 second measurement).
- Speech Level Measurements cf IEC-60268 Annex J.
- Statistical acoustics (L10, L90, etc)
- Real Time Analyzer (1/12, 1/6, 1/3 and 1/1 octave)
- FFT analyzer (detailed frequency analysis up to 32768 lines)
- RT60 measuring (reverberation times: T20/T30/EDT).
- Noise Curves (NR, NC, PNC, NCB, RC, RC mark II)
- THD+N
- Fundamental frequency estimation
- Building acoustics: D, R', DnT, Dn
- Building acoustics: SRI/STC.
- Audio oscilloscope
- Long term logging and monitoring (LEQ, RTA)
- AC Volt meter for audio line level measurements (dBU, dBV, V rms)
- Calibrated audio recording
- USB audio device mode - calibrated audio for your PC-based software applications





# LA CALIBRAZIONE DEL FONOMETRO

# La calibrazione del fonometro

- I misuratori di livello devono essere tarati di frequente
- **I calibratori** sono dispositivi in grado di produrre un livello di pressione nota ad una data frequenza sul diaframma di un microfono che viene inserito nella sua cavità (accoppiato in pressione).
- Vengono utilizzati per valutare la sensibilità della catena di misura prima e dopo ogni rilievo (in particolare possono servire ad eseguire la calibrazione del solo microfono).
- I calibratori più usati sono quelli a **stantuffo** e a **trasduttore**.

# Calibratori a stantuffo – I

- Calibratori a stantuffo: Sono costituiti da una cavità (accoppiatore) in cui si produce una variazione di pressione mediante lo spostamento di uno più pistoni che si muovono con legge sinusoidale
- Il microfono da tarare è messo in comunicazione con l'accoppiatore (una ottima tenuta ai bordi deve essere garantita)

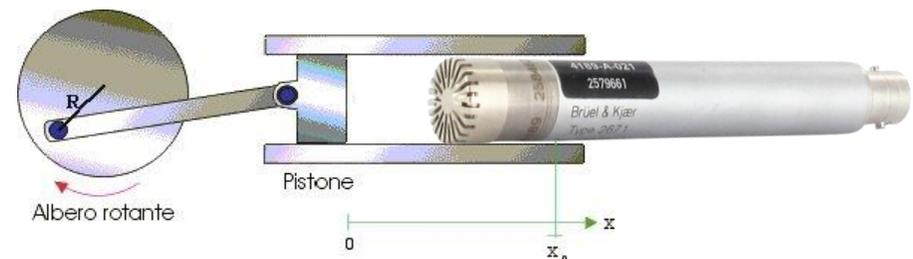


# Calibratori a stantuffo – II

- Il motore si muove con velocità angolare costante e questa velocità determinerà la frequenza a cui il microfono viene testato
- Il valore di picco della pressione acustica sinusoidale che si viene a formare nella cavità risulta essere:

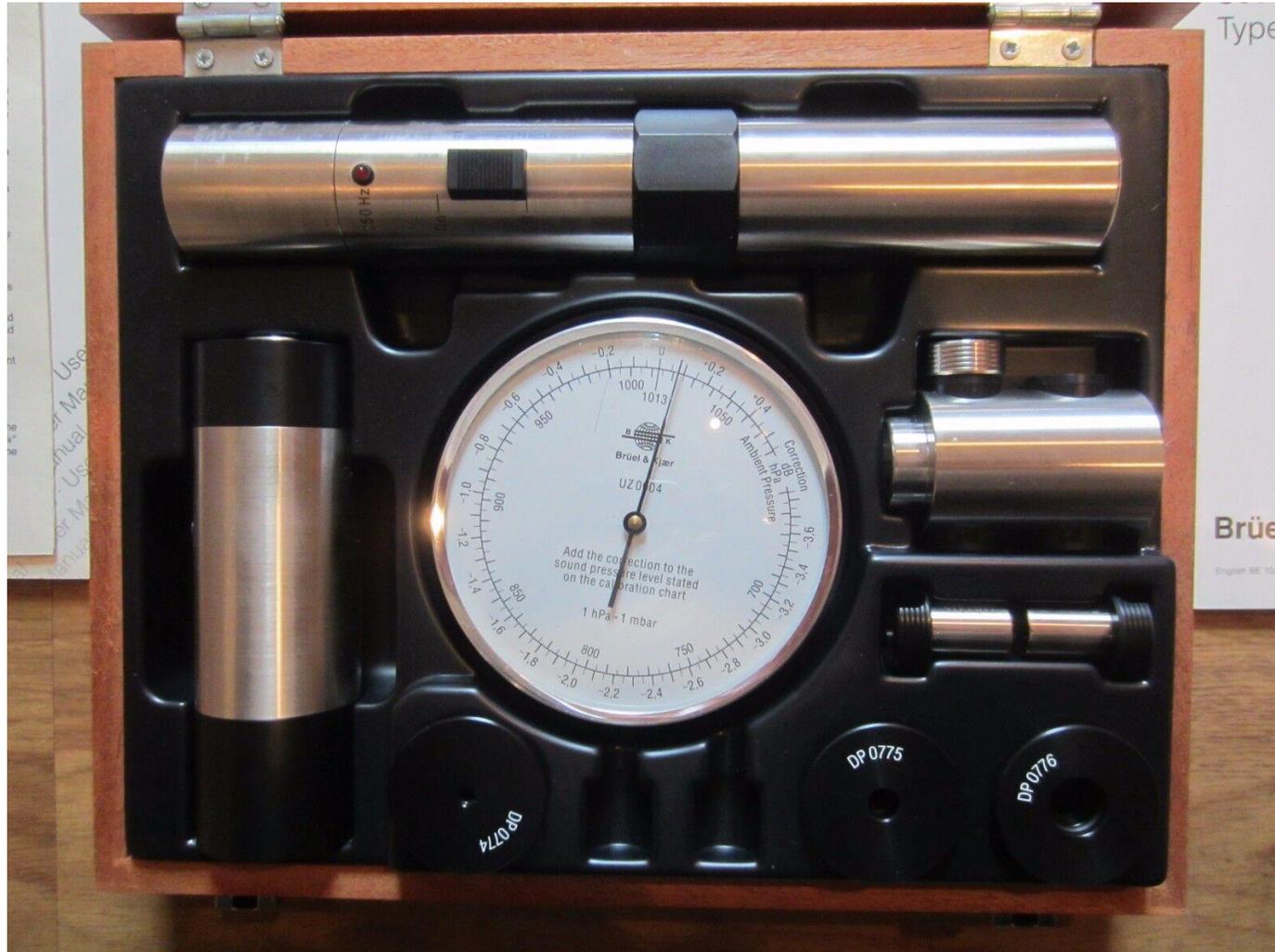
$$\Delta p = \gamma P_0 (\Delta V / V_0)$$

- $\gamma$  := rapporti dei calori specifici del gas
- $\Delta V$  := Variazione di picco del volume
- $V_0$  := Volume della cavità
- $P_0$  := **Pressione atmosferica**



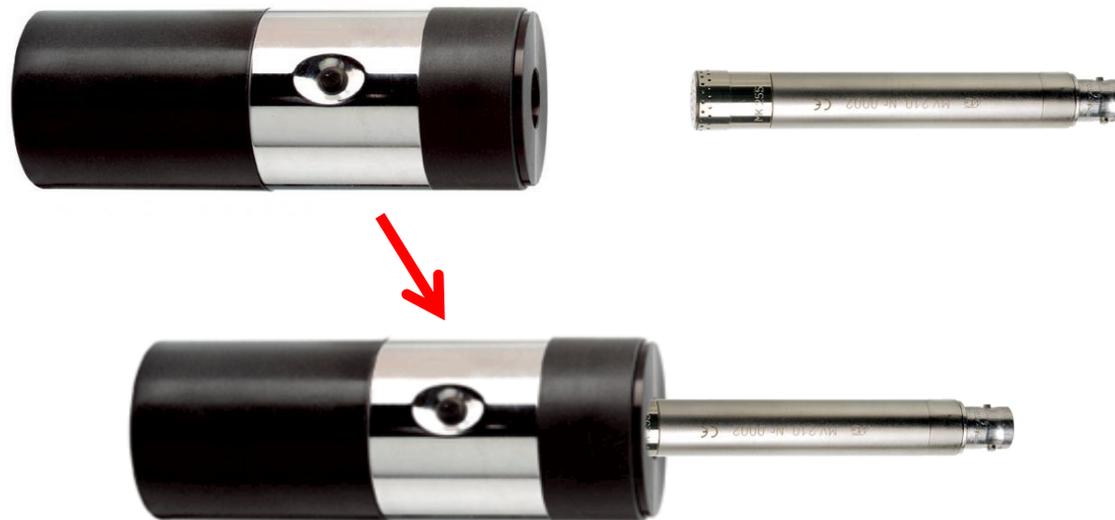
**L'incertezza della taratura dipende dall'incertezza del valore di pressione atmosferica al tempo della taratura.** Temperatura e umidità hanno un effetto minore sul valore di picco della pressione acustica del calibratore

# Calibratori a stantuffo – III



# Calibratori a trasduttore – I

- Calibratori a trasduttore: Sono costituiti da un piccolo altoparlante, di solito piezoelettrico, che genera un livello pressione sonora nell'accoppiatore
- Questo tipo di calibratori possono lavorare a diversi livelli di pressione e a diverse frequenze di riferimento



# Calibratori a trasduttore – II

- **Ma i più comuni funzionano a 1000 Hz, 94 dB (1 Pa RMS)**
- I calibratori a trasduttore (anche detti elettrodinamici) sono più pratici di quelli a stantuffo poiché sono molto poco sensibili ai parametri ambientali (potenzialmente più soggetti però ad una deriva di funzionamento dovuto ai componenti)
- I calibratori a trasduttore tendono ad avere incertezze di
  - +/- 0.15 dB tra 250 e 2000 Hz
  - +/- 0.5 dB attorno ai 31.5 Hz (bassa frequenza) e ai 16 kHz (alta frequenza)

# Calibratori e classi di appartenenza

- La norma sui calibratori è la IEC 6094 pubblicata nel 1997 in prima edizione e successivamente aggiornata.
- I calibratori vengono catalogati in 3 classi, di precisione decrescente
  - Classe LS: tolleranza di  $\pm 0.20$  dB
  - Classe 1: tolleranza di  $\pm 0.40$  dB
  - Classe 2: tolleranza di  $\pm 0.75$  dB
- Un eventuale simbolo /C dopo l'indicazione della classe significa che il calibratore richiede correzioni della pressione nominale indicata per condizioni ambientali (come avviene sempre per i calibratori a stantuffo)



# Misura della potenza acustica



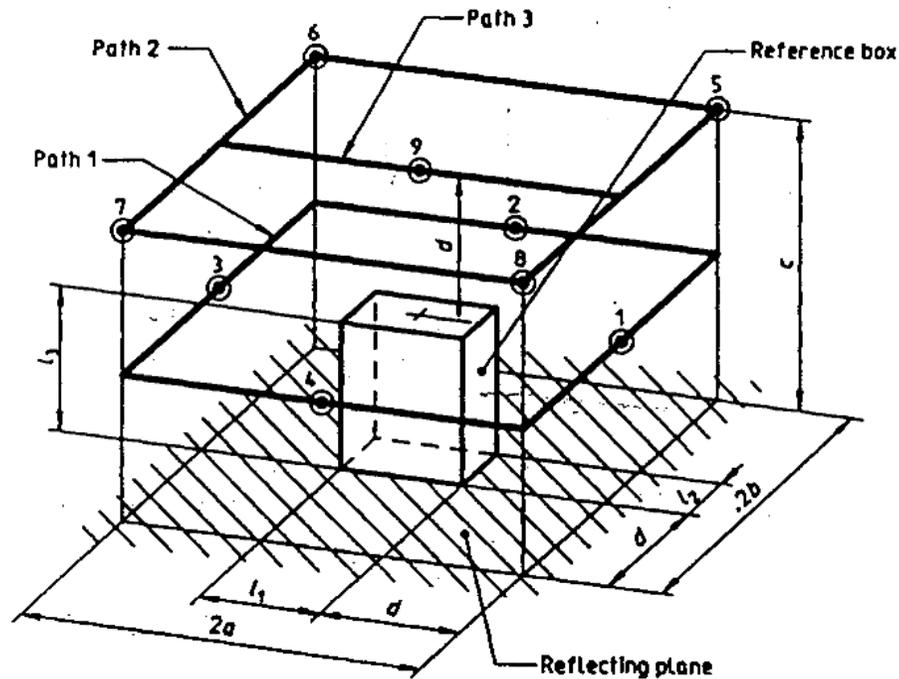
# Normative per la misura della potenza sonora

Le tecniche per la misura della potenza sonora di una macchina sono due e sono basate sulla misura di parametri diversi.

- Valutazione della potenza sonora a partire da una **misura di pressione:**  
La tecnica è descritta, a seconda della condizione operativa, nelle norme della famiglia ISO 374x, (fonometro).
- Valutazione della potenza sonora a partire da una **misura di intensità:**  
La tecnica è descritta nella norma ISO 9614, (sonda intensimetrica).

# Livello di potenza di una sorgente calcolato tramite livelli di *pressione sonora* (1)

Per calcolare il livello di potenza impiegando i livelli di pressione sonora occorre definire una superficie di riferimento attorno alla sorgente ed individuare un congruo numero di punti in cui rilevare il valore del livello di pressione.



## Livello di potenza di una sorgente calcolato tramite livelli di *pressione sonora* (2)

Secondo la norma ISO 3744 (ambiente riflettente) il livello di potenza risulta:

$$L_W = L_{Pm} + 10 \cdot \log(S_{tot}) - K_1 - K_2$$

Dove:  $K_1 = -10 \cdot \log\left(1 - 10^{-\left(\frac{L_{PmON} - L_{PmOFF}}{10}\right)}\right)$  e  $K_2 = 10 \cdot \log\left(1 + \frac{4 \cdot S_{tot}}{A}\right)$

- $L_{Pm}$  livello medio di pressione misurato sulla superficie di misura;
- $S_{tot}$  superficie di involuppo impiegata;
- $A$  assorbimento equivalente dell'ambiente:
- $L_{PmON}$   $L_{Pm}$  con sorgente accesa
- $L_{PmOFF}$   $L_{Pm}$  con sorgente spenta

# Sonda intensimetrica (1)

Intensità sonora:

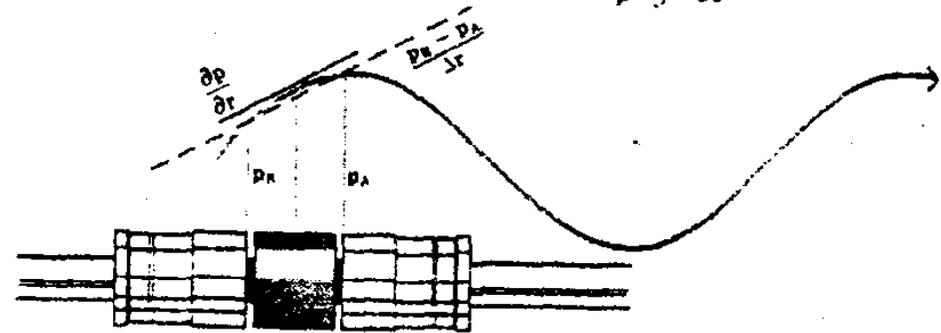
$$\vec{I} = p \cdot \vec{u}$$

la velocità delle particelle viene correlata al gradiente di pressione (cioè a quanto cambia il valore della pressione istantanea in rapporto alla distanza tra due punti di misura) che viene misurato con due microfoni ravvicinati

Formulazione in dominio del tempo

Secondo Eulero

$$u = -\frac{1}{\rho} \int \frac{\partial p}{\partial r} dt$$



L'approssimazione per differenza finita

$$u = -\frac{1}{\rho} \int \frac{p_B - p_A}{\Delta r} dt$$

Pressione media

$$p = \frac{p_A + p_B}{2}$$

$$I = \overline{p \cdot u}$$

$$I = -\frac{p_A + p_B}{2\rho\Delta r} \int (p_B - p_A) dt$$

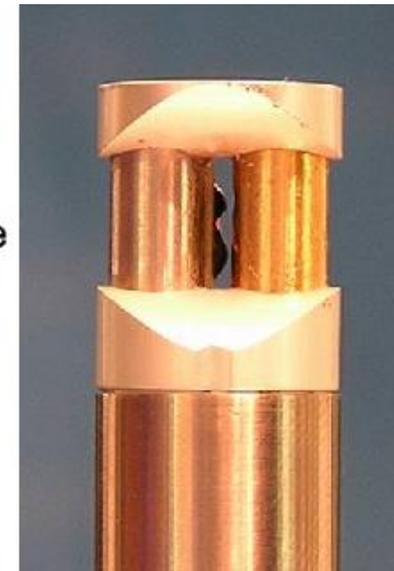
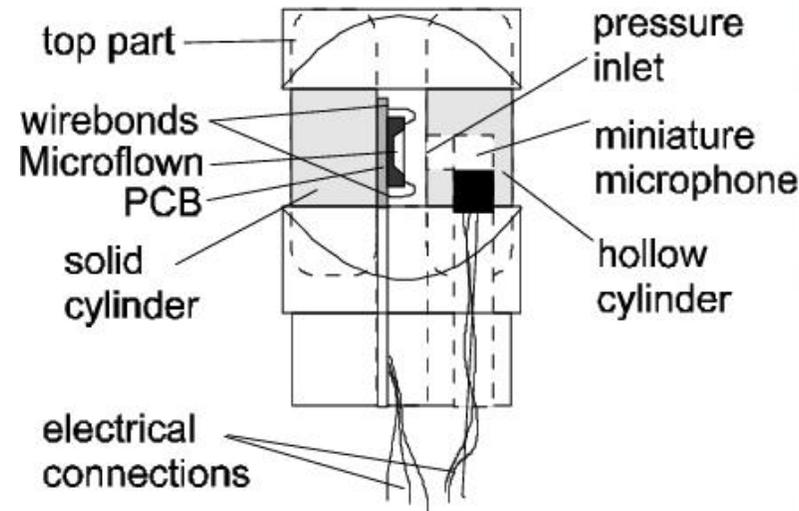
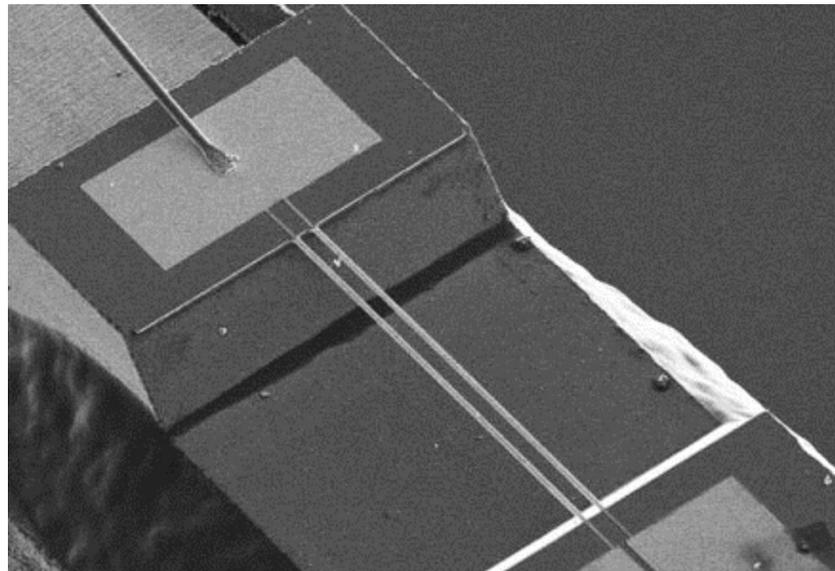
# Sonda intensimetrica (2)

Un fonometro/analizzatore bicanale è necessario per collegare la sonda intensimetrica:



# Sonda Microflown

Il sensore di velocità è un anemometro a filo caldo doppio. La differenza di temperatura dei due fili è proporzionale alla particle velocity – il tutto accoppiato ad un normale micr. a pressione



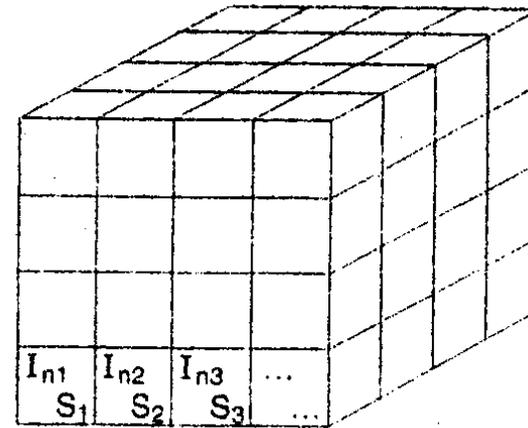
# Livello di potenza di una sorgente calcolato tramite livelli di *intensità sonora* (1)

Per calcolare il livello di potenza impiegando i livelli di intensità sonora occorre definire una superficie di riferimento attorno alla sorgente.

Nel caso in cui la superficie chiusa  $S$  sia scomponibile in  $N$  superfici  $S_k$  elementari, l'espressione della potenza sonora diventa:

$$W = \sum_{k=1}^N I_{nk} \cdot S_k$$

$$W = \int_S \vec{I} \cdot d\vec{S} = \int_S I_n dS$$



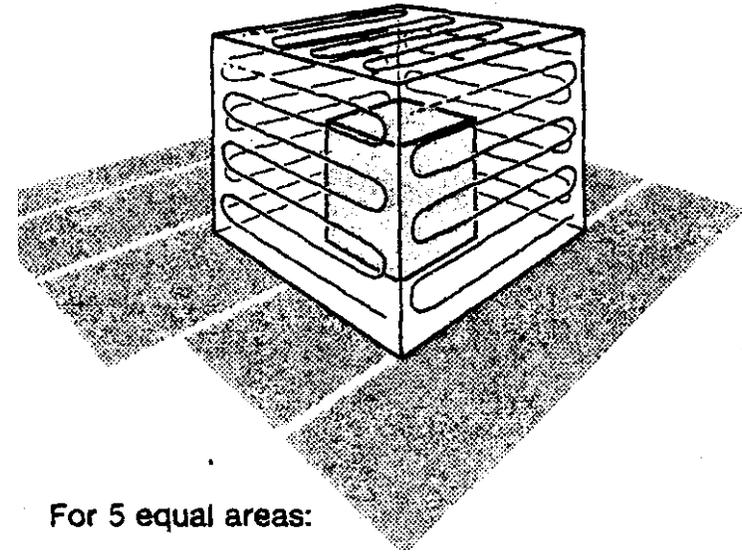
$$\hat{W} = \sum_{k=1}^N I_{nk} S_k$$

## Livello di potenza di una sorgente calcolato tramite livelli di *intensità sonora* (2)

Una ulteriore tecnica è quella di rilevare l'intensità media emessa dalla singola faccia della superficie di riferimento attorno alla sorgente mediante "spazzolamento".

$$W = \sum_{j=1}^N I_{nj} \cdot \Delta S_j$$

$$P = \sum_{j=1}^5 I_{nj} \cdot \Delta S_j$$



For 5 equal areas:

$$P = \langle I \rangle \cdot S_{\text{tot.}}$$

where  $\langle I \rangle$  is the surface average of intensity and  $S_{\text{tot.}}$  is the total area of the 5 surfaces