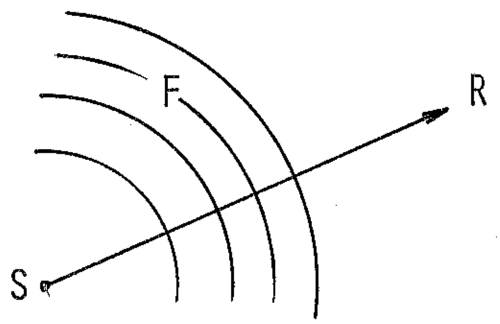
# PROPAGAZIONE DELL' ONDA ACUSTICA




S → R = DIREZIONE DI PROPAGAZIONE

F = FRONTE EQUIFASE DELL' ONDA

C = VELOCITA' DI PROPAGAZIONE DELL' ONDA NEL MEZZO

In aria, a 20 °c e alla pressione atmosferica di 1013 mbar

$$c = 343 \ \text{m/s}$$

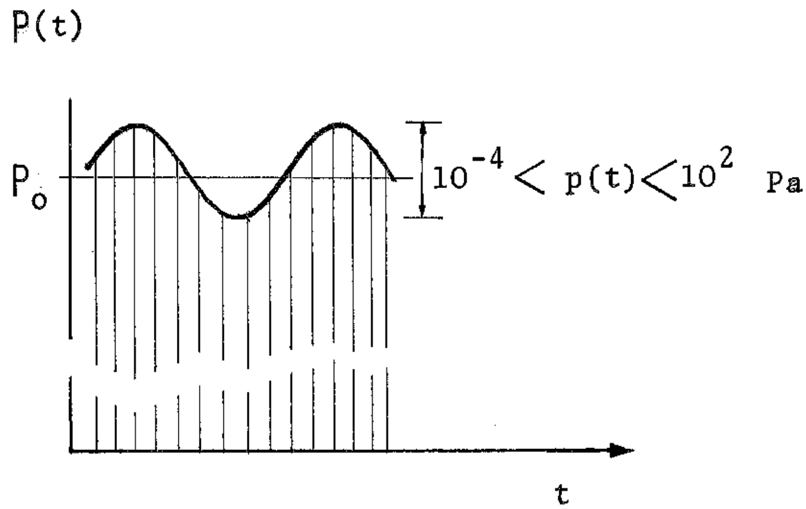
## GRANDEZZE PERTURBATE DALL' ONDA SONORA

| | | |
|---|---|---|
| MASSA VOLUMICA | $m_v( x,y,z,t )$ | $Kg/m^3$ |
| TEMPERATURA | $T (x,y,z,t)$ | °C |
| SPOSTAMENTO | $s (x,y,z,t)$ | m |
| VELOCITÀ SONORA | $u (x,y,z,t)$ | m/s |
| PRESSIONE SONORA | $p (x,y,z,t)$ | Pa |

Pa Pascal $1 \text{ Pa} = 1 \text{ Nw} / m^2$

# PRESSIONE SONORA

- VARIAZIONE DELLA PRESSIONE STATICA -



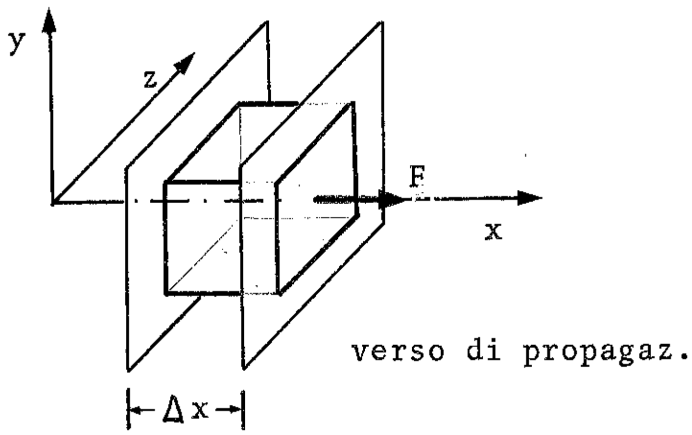

$$P(t) = P_o + p(t)$$

PRESSIONE STATICA $P_o = 1{,}013 \cdot 10^5$ Pa

PRESSIONE SONORA $p(t) = A\cos(wt)$ Pa

$$1 \text{ Pa} = 1 \text{ Nw/m}^2 = 10\ \mu\text{bar}$$

EQUAZIONE DELL' ONDA PIANA



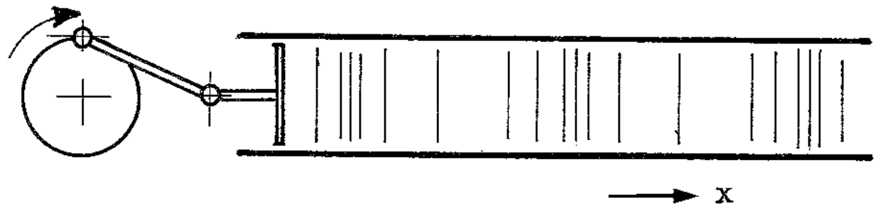

$$\boxed{-\frac{\partial p_x}{\partial x} = m_v \frac{\partial u_x}{\partial t}}$$

$p_x$ é la componente della pressione sonora lungo asse x

$m_v$ é la massa volumica del mezzo

$u_x$ é la componente della velocità del baricentro del cubetto lungo l'asse x

## ONDA PIANA UNIDIMENSIONALE




IL TUBO É INFINITAMENTE LUNGO

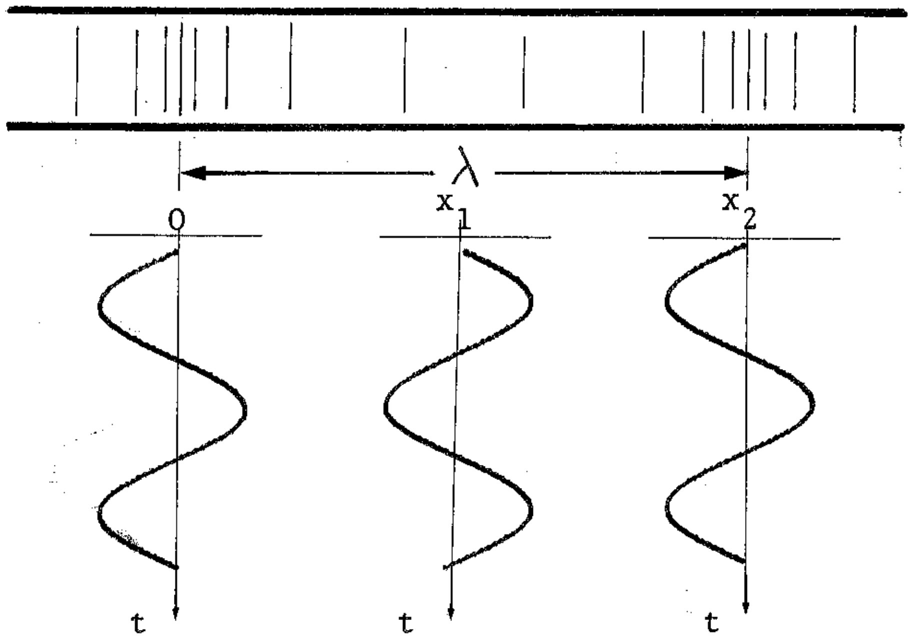
IL MOTO DEL PISTONE É ARMONICO

L'andamento della pressione sonora nel tempo e nello spazio sarà del tipo:

$$p_x(x,t) = A \cos k(x-ct)$$

# PERIODICITA' NELLO SPAZIO

## STESSO ISTANTE IN POSIZIONI DIVERSE LUNGO IL TUBO




$$p(x,t) = A \cos k(x-ct)$$

Per ogni distanza multipla di  (lunghezza d'onda) il valore istantaneo di p é lo stesso

e.g.  per $t = 0$  $p(x) = A \cos kx$

La pressione assumerà gli stessi valori per

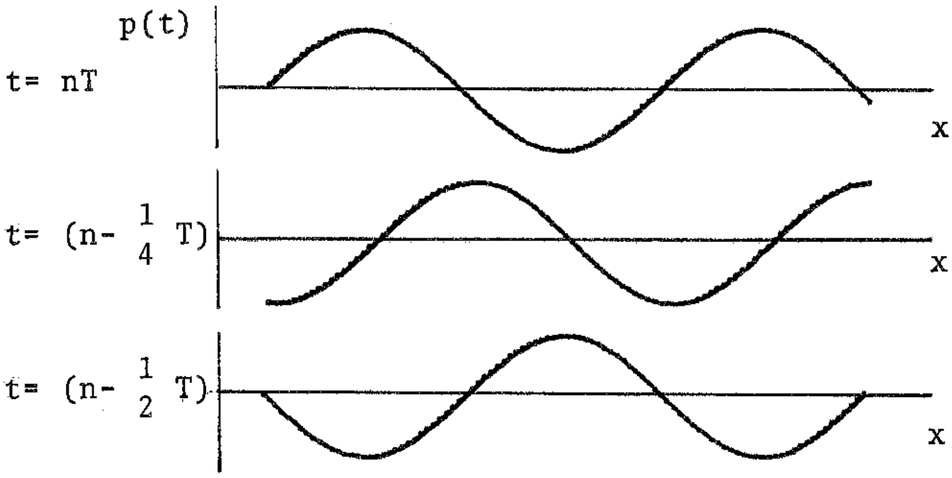
$$x = \frac{2\pi}{k} n = n\lambda$$

$$\boxed{k = \frac{2\pi}{\lambda} \quad \text{rad/m}}$$

k é detto NUMERO D'ONDA

# PERIODICITA' NEL TEMPO

STESSA POSIZIONE LUNGO IL TUBO IN ISTANTI DIVERSI




$$p(x,t) = A \cos k(x-ct)$$

Per ogni istante multiplo di T (periodo) la situazione spaziale é la stessa.

Per x=0 $\qquad p(t) = A \cos kct$

La pressione assumerà gli stessi valori per:

$$t = n \frac{2\pi}{kc} n = nT$$

$$\boxed{T = \frac{2\pi}{kc} \text{ sec}}$$

T é il periodo

$$T = \frac{2\pi}{kc} = \frac{\lambda}{c}$$

posto $f = \frac{1}{T}$ frequenza (Hz)

$$\lambda f = c$$

$\lambda$ = lunghezza d'onda (m) c = velocità di propagazione (m/s)

posto $\omega = 2\pi f$ pulsazione (rad/s)

$$\boxed{k = \frac{2\pi}{\lambda} \ \text{rad/m}} \qquad \boxed{\omega = \frac{2\pi}{T} \ \text{(rad/s)}}$$

k HA LO STESSO RUOLO, NELLE COORDINATE SPAZIALI, DI $\omega$ NELLE COORDINATE TEMPORALI

## SUONO PURO

$$A \cos k(x-ct) \quad = \quad A \cos (kx-\omega t)$$

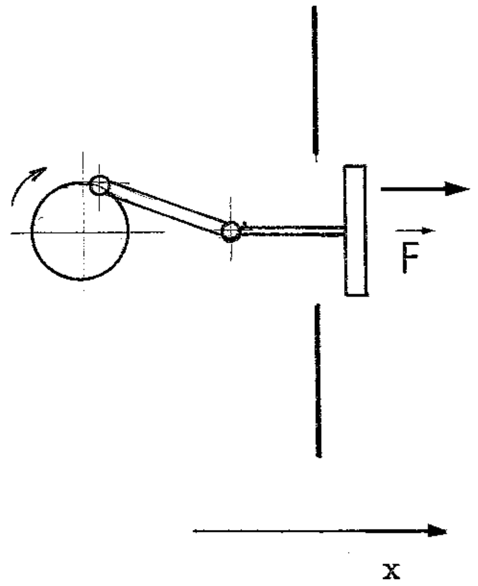
ove

$$kc = 2\pi \frac{c}{\lambda} = 2\pi f = \omega$$

per x=0

$$\boxed{p(t) = A \cos \omega t}$$

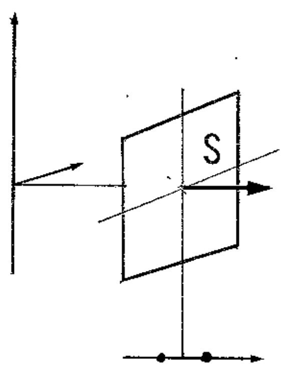
## POTENZA MECCANICA FORNITA DAL PISTONE AL MEZZO




$$L = \vec{F} \cdot \vec{x}$$

$$W = F \frac{dx}{dt}$$

## POTENZA MECCANICA W



$$W = \overline{u(t) \cdot p(t)}\, S$$

Watt

$$F(t) = p(t)\, S$$

$$u(t) = \frac{dx}{dt}$$

É LA MEDIA TEMPORALE DEL PRODOTTO SCALARE TRA LA FORZA ISTANTANEA $F(t)$ E LA VELOCITÀ ISTANTANEA $u(t)$

## VELOCITA' E PRESSIONE SONORA DI UN' ONDA ARMONICA PIANA

$$p(x,t) = A \cos k(x-tc)$$

dalla equazione d'onda $$-\frac{\partial p(x,t)}{\partial x} = m_v \frac{\partial u(x,t)}{\partial t}$$

si ricava per $x = 0$ $$u(t) = \frac{1}{m_v c}\, p(t)$$

$$Z_0 = m_v c = \frac{p(t)}{u(t)}$$ ( $Kg/m^2 s$ ) é la impedenza acustica specifica del mezzo. In aria $Z_0 = 414$ rayls

## POTENZA FORNITA DA UNA ONDA ARMONICA PROGRESSIVA

$$p(t) = A \cos \omega t \qquad u(t) = \frac{A}{Z_0} \cos \omega t$$

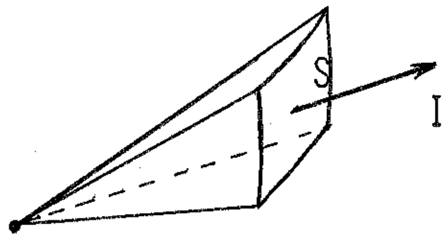
$$W = \frac{1}{Z_0} \frac{1}{T} \int_0^T A^2 \, S \cos^2 \omega t \, dt$$

$$W = \frac{1}{Z_0} \left( \frac{A}{\sqrt{2}} \right)^2 S$$

posto $p_{eff} = \frac{A}{\sqrt{2}}$ valore efficace della pressione

$$\boxed{W = \frac{p_{eff}^2}{Z_0} S} \qquad \text{( watt)}$$

## INTENSITA' SONORA - I -



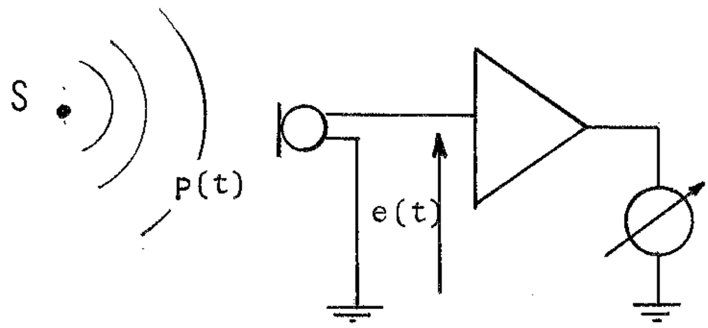

MODULO DEL VETTORE INTENSITÀ

$$\boxed{I = \frac{W}{S} = \overline{u(t) \cdot p(t)}} \quad W/m^2$$

per il campo libero $\qquad u_{eff} = \frac{1}{Z_0}\, p_{eff}$

$$I = u_{eff} \cdot p_{eff} = \frac{p_{eff}^2}{Z_0}$$

# MISURA DELLA PRESSIONE SONORA




SENSIBILITÀ M DEL MICROFONO

$$\boxed{M = \frac{e_{eff}}{p_{eff}}} \quad (\text{ volt/ Pa })$$

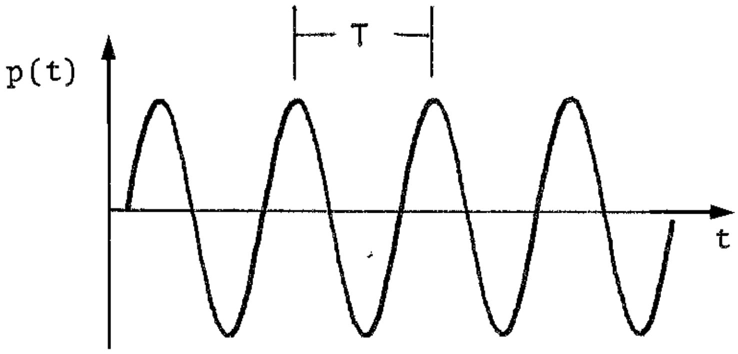
PER IL MICROFONO A CONDENSATORE M = 50 mV/Pa

## SEGNALI

- DETERMINISTICI
  - PERIODICI
    - SINUSOIDALI
    - COMPLESSI
  - NON PERIODICI
- CASUALI
  - STAZIONARI
  - NON STAZIONARI

# ESEMPI DI SEGNALI DETERMINISTICI

SINUSOIDALE $\quad p(t) = A \cos wt$




COMPLESSO $\quad p(t) = A_1 \cos(2\pi ft + \theta_1) + A_2 \cos(2\pi 2f)$

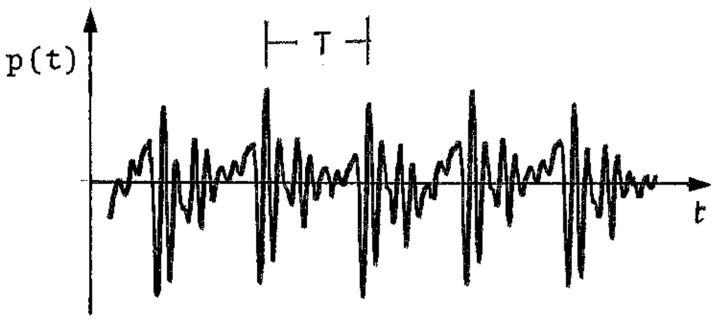



fig. 1

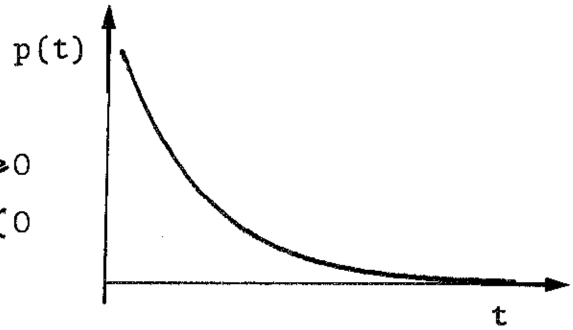
# SEGNALE DETERMINISTICO NON PERIODICO

QUASI PERIODICO

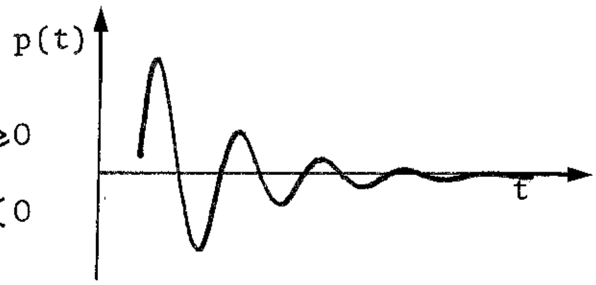
$$p(t) = A_1 \cos(2\pi f_1 t + \vartheta_1) + A_2 \cos(2\pi f_2 t + \vartheta_2) +$$

TRANSITORIO

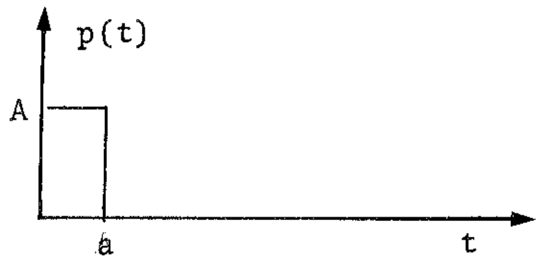
$$p(t) = \begin{cases} A\, e^{-\alpha t} & t \geqslant 0 \\ 0 & t < 0 \end{cases}$$



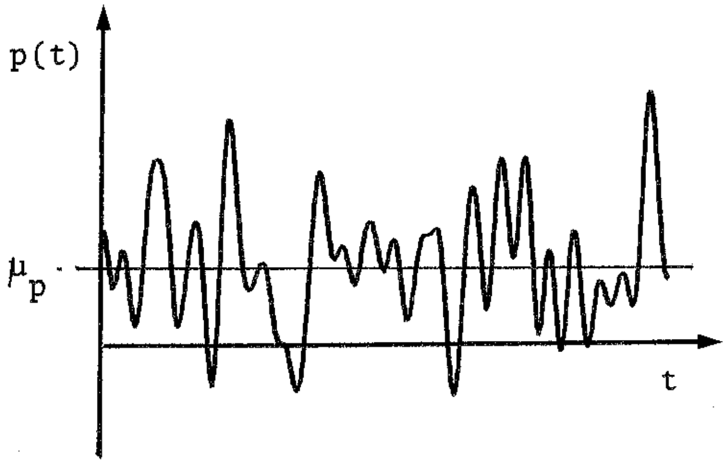

$$p(t) = \begin{cases} Ae^{-\alpha t} \cos wt & t \geqslant 0 \\ 0 & t < 0 \end{cases}$$




$$p(t) = \begin{cases} A & 0 \leqslant t \leqslant a \\ 0 & t > a \\ & t < a \end{cases}$$



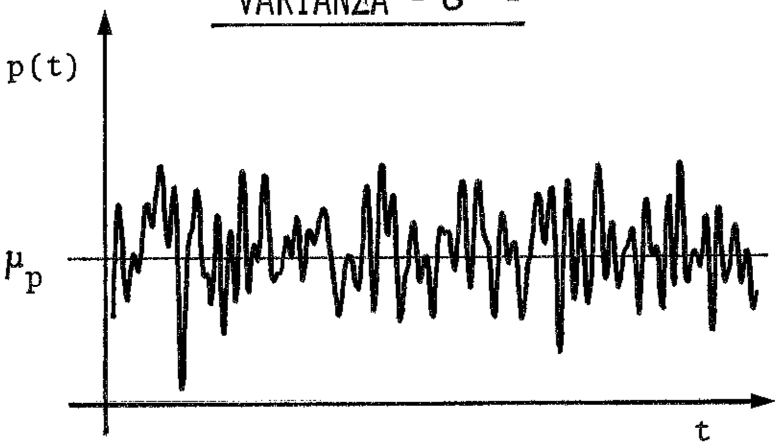
# VALORE MEDIO - $\mu_p$ -




$$\mu_p = \lim_{T \to \infty} \frac{1}{T} \int_0^T p(t)\, dt$$

IL VALORE MEDIO E' LA COMPONENTE
" STATICA " DEL SEGNALE p(t)

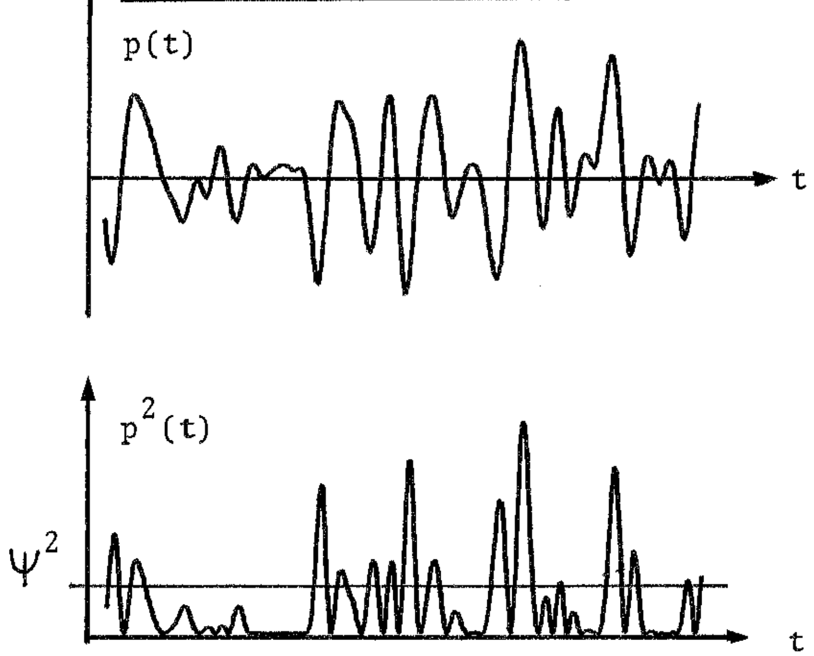
## VARIANZA - $\sigma^2$ -




$$\sigma^2 = \lim_{T \to \infty} \frac{1}{T} \int_0^T \left[p(t) - \mu_p\right]^2 dt$$

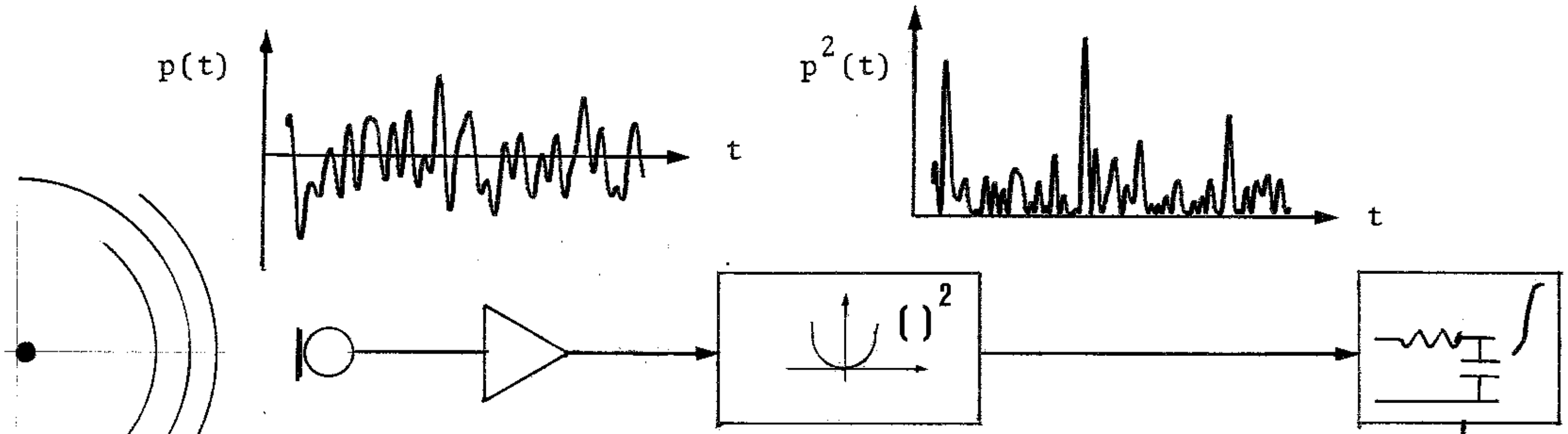
LA VARIANZA E' LA COMPONENTE DINAMICA DEL SEGNALE p(t)

## VALORE QUADRATICO MEDIO - $\Psi^2$ -



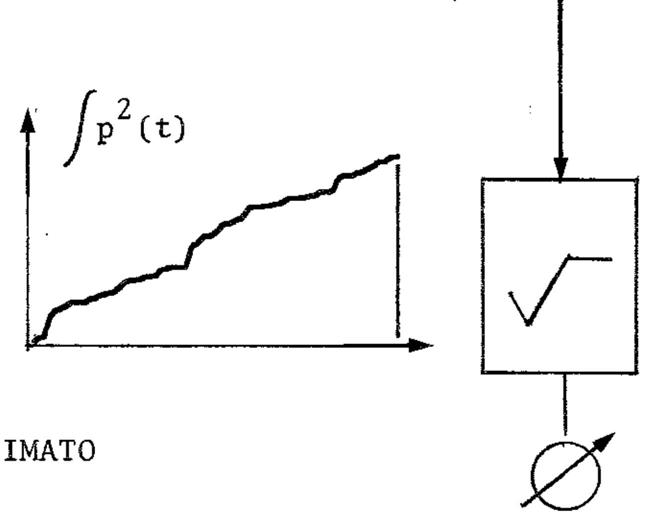

$$\Psi^2 = \lim_{T \to \infty} \frac{1}{T} \int_0^T p^2(t)\, dt$$

# MISURA DEL VALORE EFFICACE - $p_{eff}$ -




$$p_{eff} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_{0}^{T} p^2(t)\, dt}$$

$$\Psi^2 = p_{eff}^2$$




POICHE' T E' FINITO $p_{eff}$ E' APPROSSIMATO

## LIVELLO DI POTENZA SONORA - Lw -

$$L_W = 10 \text{ Log} \frac{W}{10^{-12}} \quad \text{dB re } 10^{-12} \text{ (W)}$$

e.g. UN RAPPORTO DI 10 TRA $W_1$ e $W_2$

CORRISPONDE AD UNA DIFFERENZA

DI LIVELLI PARI A:

$$10 \text{ Log} \frac{W_1}{W_2} = 10 \quad \text{dB}$$

## LIVELLO DI INTENSITA' SONORA - $L_I$ -

$$\boxed{L_I = 10 \text{ Log } \frac{I}{10^{-12}} \quad \text{dB re } 10^{-12} \text{ W/ m}^2}$$

e.g. RADDOPPIANDO L'INTENSITA' I IL
LIVELLO SALE DI 3 dB

$$L_{2I} = 10 \text{ Log } \frac{2I}{10^{-12}} = L_I + 3 \quad \text{dB}$$

## LIVELLO DI PRESSIONE SONORA - Lp -

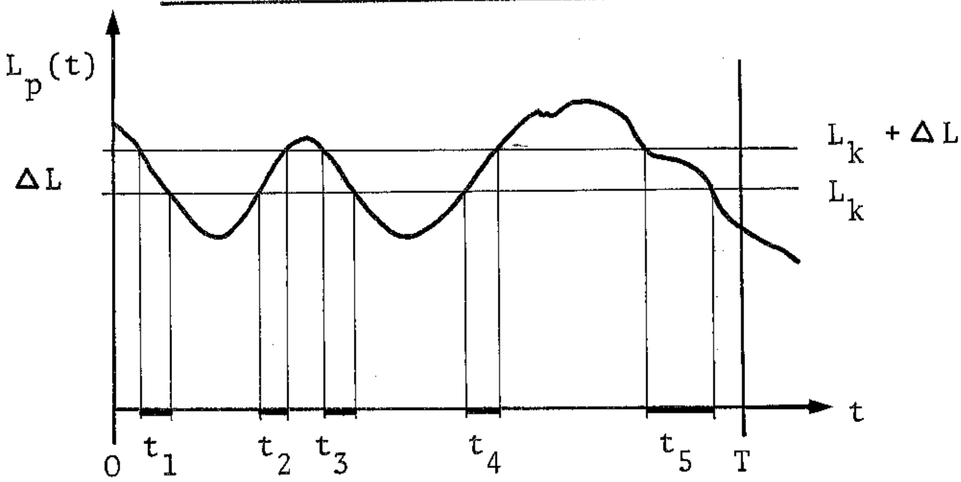
$$\boxed{L_p = 10 \text{ Log} \frac{p_{eff}^2}{p_o^2} = 20 \text{ Log} \frac{p_{eff}}{p_o} \quad \text{dB}}$$

dB re $p_o = 2\ 10^{-5} = 20\ \mu Pa$

e.g. RADDOPPIANDO LA PRESSIONE SONORA
IL LIVELLO SALE DI 6 dB

$$L_{2p} = 20 \text{ Log} \frac{2p}{2\ 10^{-5}} = L_p + 6 \quad \text{dB}$$

## DENSITA' DI PROBABILITA' $w(L)$




$$\boxed{w(L) = \lim_{\Delta L \to 0} \frac{P(L_k; L_k + \Delta L)}{\Delta L}}$$

$\Delta L$ é la fascia entro la quale i valori sono assunti pari a $L_k$

$$P(L_k; L_k + \Delta L) = \lim_{T \to \infty} \frac{T_x}{T}$$

é la probabilità che L assuma i valori compresi tra $L_k$ e $L_k + \Delta L$

$T_k$ é dato dalla relazione:

$$T_k = \sum_{i=1}^{m} t_i$$

## FUNZIONE DI DISTRIBUZIONE CUMULATIVA F(L)

$$\boxed{F(L) = \int_{-\infty}^{L} w(L)\, dL}$$

F(L) assume valori compreso tra 0 e 1

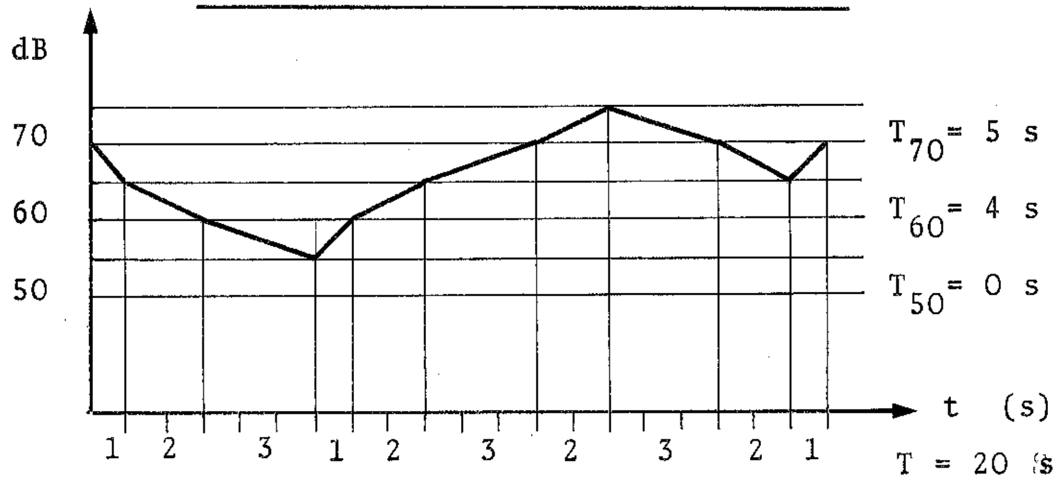
$$0 < F(L) \leqslant 1$$

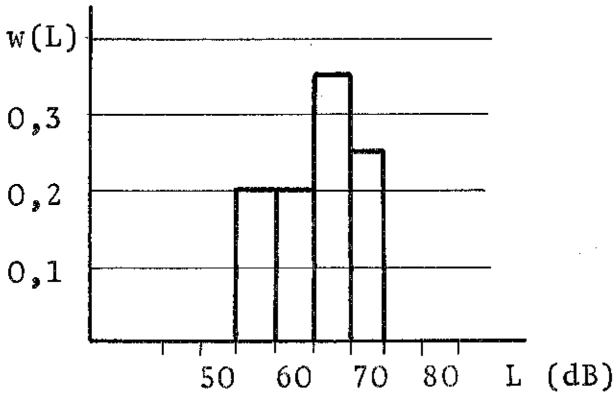
e.g.

$F(L_1)$ é la probabilità di avere $L \leqslant L_1$

$F(L_2) - F(L_1)$ è la probabilità di trovare $L_1 < L < L_2$

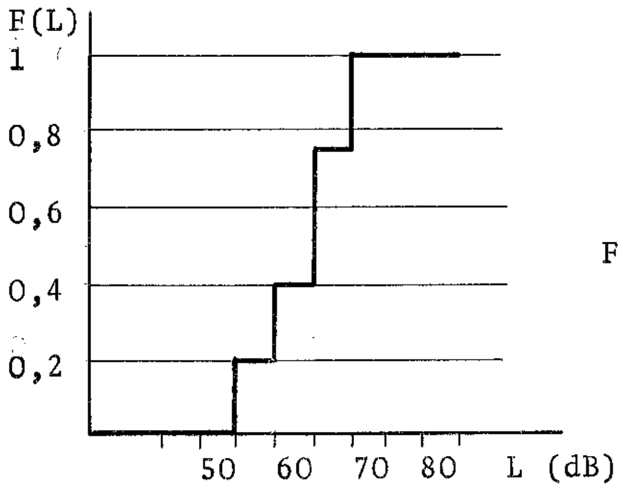
# ANALISI STATISTICA DEL LIVELLO




DENSITA' DI PROBABILITA'

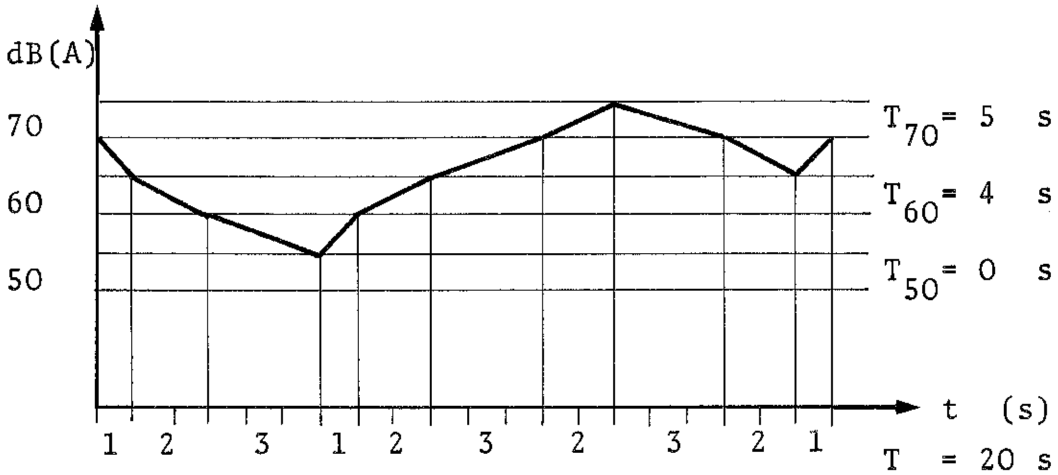
$$w(65) = \frac{7}{20} = .35$$




DISTRIBUZIONE CUMULATIVA

$$F(65) = 0,2+0,2+0,3 = 0,6$$

## LIVELLO SONORO CONTINUO EQUIVALENTE Leq




$$\boxed{Leq = 10 \log \frac{1}{T}\int_0^T \left(\frac{p_A(t)}{P_o}\right)^2 dt}$$

T é il tempo di misura

$p_A(t)$ é la pressione sonora istantanea pesata A

$P_o$ é la pressione di riferimento pari a 20 μPa

$$Leq = 10 \log \frac{1}{T} \sum_k t_k \, 10^{L_k/10}$$

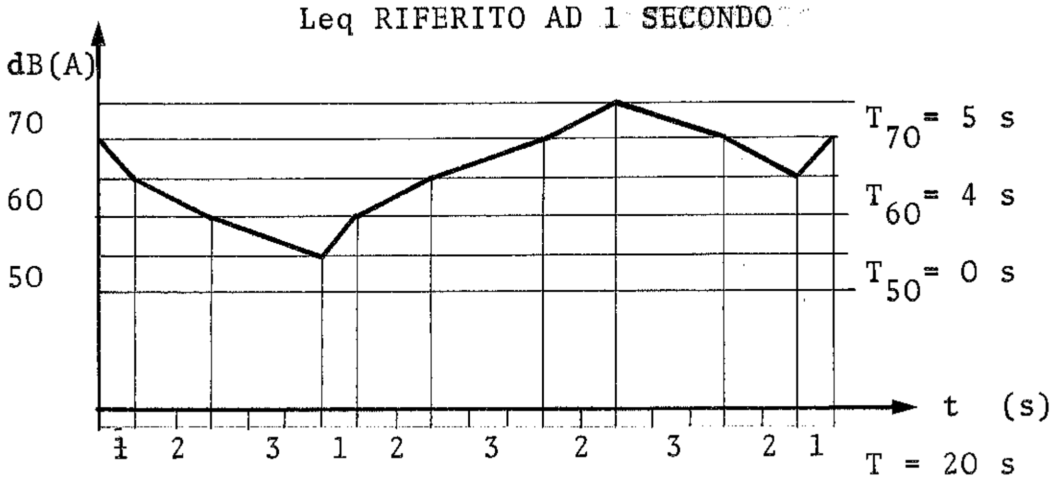
e.g.

$$Leq = 10 \log 1/20 \left[ 4 \cdot 10^{5,5} + 4 \cdot 10^{6} + 7 \cdot 10^{6,5} + 5 \cdot 10^{7} \right]$$

$$Leq = 65,87 \text{ dB(A)}$$

## SEL - SOUND EXPOSURE LEVEL - $L_{AX}$

Leq RIFERITO AD 1 SECONDO




$$\boxed{L_{AX} = 10 \log \frac{1}{1} \int_0^T \left( \frac{p_A(t)}{p_o} \right)^2 dt}$$

T é il tempo di misura

$P_A(t)$ é la pressione sonora istantanea pesata A

$p_o$ é la pressione di riferimento pari a 20 $\mu$Pa

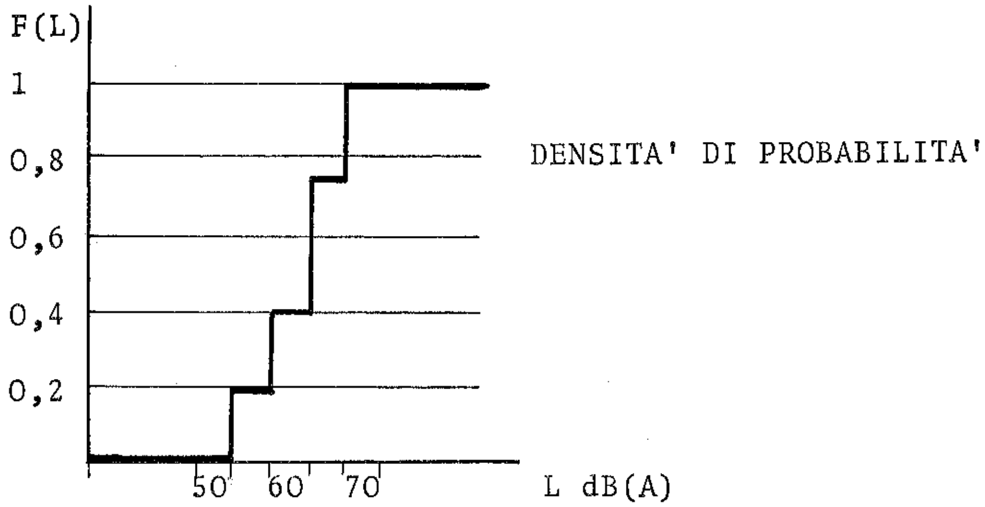
$$L_{AX} = 10 \log \frac{1}{1} \sum t_k \; 10^{L_k/10}$$

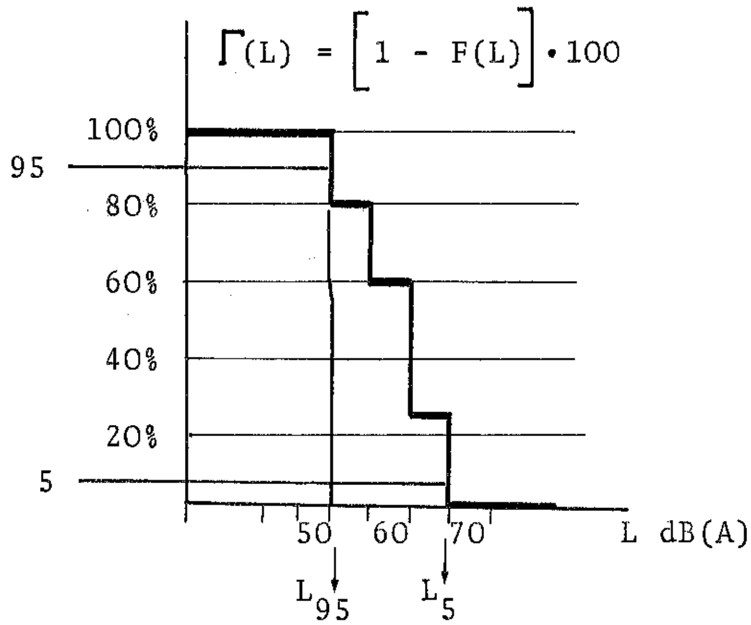
e.g.

$$L_{AX} = 10 \log \left[ 4 \cdot 10^{5,5} + 4 \cdot 10^6 + 7 \cdot 10^{6,5} + 5 \cdot 10^7 \right]$$

$$L_{AX} = 78{,}89 \text{ dB(A)}$$

# LIVELLI STATISTICI - $L_N$ -



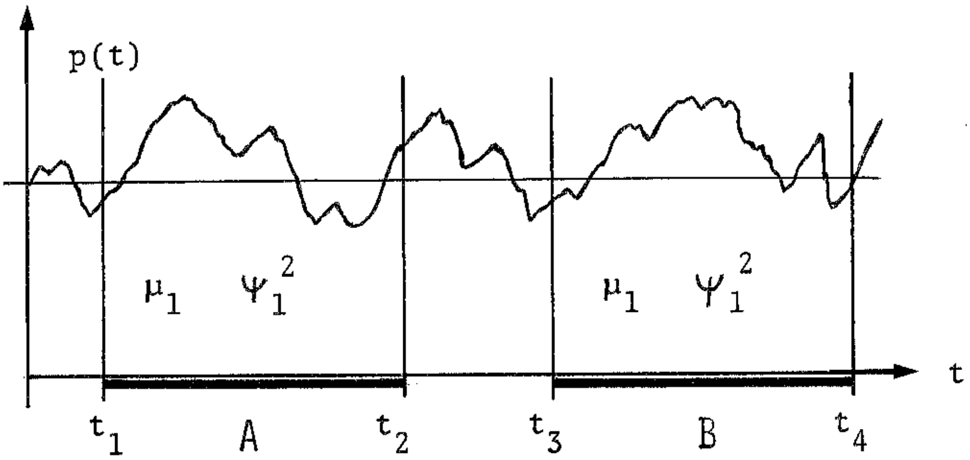




$L_N$ é il livello sonoro superato per l' N % del tempo

$L_5$, $L_1$ sono i livelli di picco del rumore

$L_{90}$, $L_{95}$ sono i livelli del rumore di fondo

# SEGNALE STAZIONARIO




LE PROPRIETÀ STATISTICHE NON CAMBIANO SE CAMBIA LA FINESTRA TEMPORALE DI ANALISI

$\mu_1$ = VALOR MEDIO

$\Psi_1^2$ = VALORE QUADRATICO MEDIO

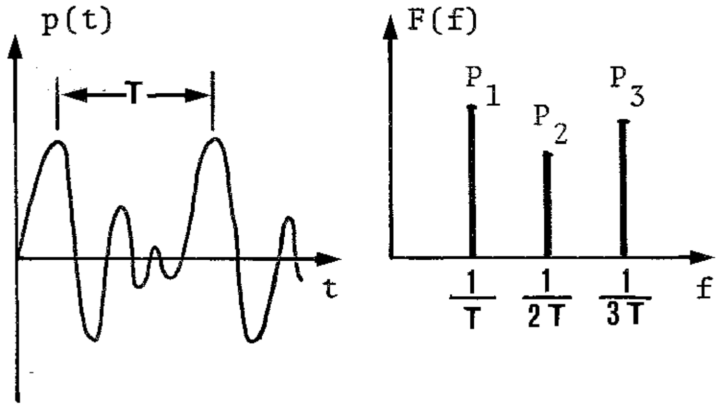
e.g.

$$\Psi^2 = \frac{1}{t_2 - t_1} \int_{t_1}^{t_2} p^2(t)\, dt = \frac{1}{t_3 - t_2} \int_{t_2}^{t_3} p^2(t)\, dt$$

IL VALORE QUADRATICO MEDIO É LO STESSO NEI DUE INTERVALLI DI ANALISI A E B

# ANALISI IN FREQUENZA DEI SEGNALI

SEGNALE PERIODICO

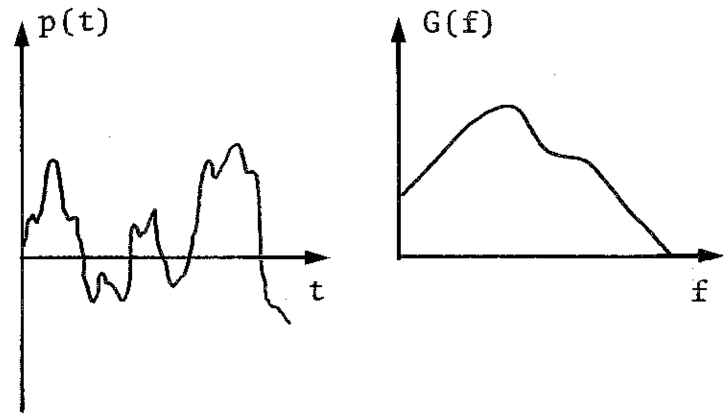



LO SPETTRO E' A RIGHE

$$p(t) = P_1 \cos wt + P_2 \cos 2wt + .. + P_n \cos nwt$$

F(f) = SERIE DI FOURIER

RUMORE CASUALE



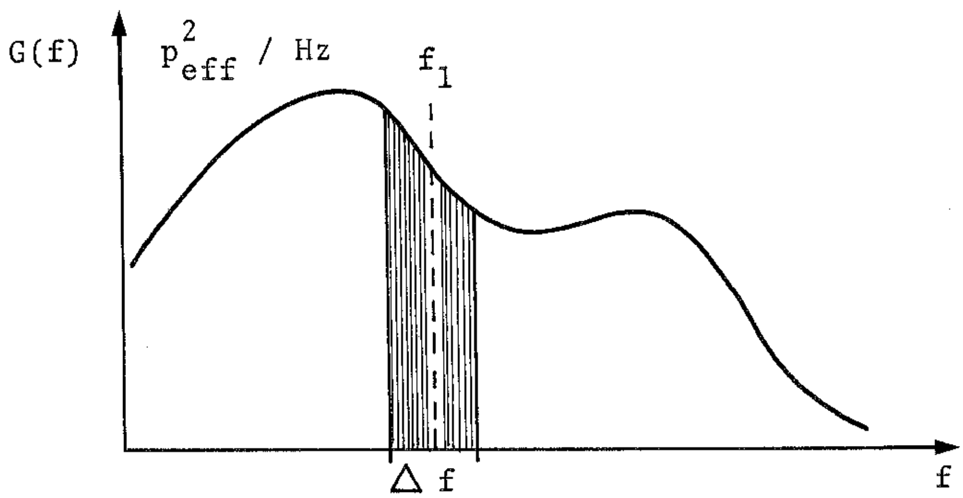

LO SPETTRO E' CONTINUO

$$G(f) = \lim_{\Delta f \to 0} \lim_{T \to \infty} \frac{1}{\Delta f\, T} \int_0^T p^2(f, \Delta f, t)\, dt$$

G(f) = DENSITA' SPETTRALE DI POTENZA

# DENSITA' SPETTRALE DI POTENZA

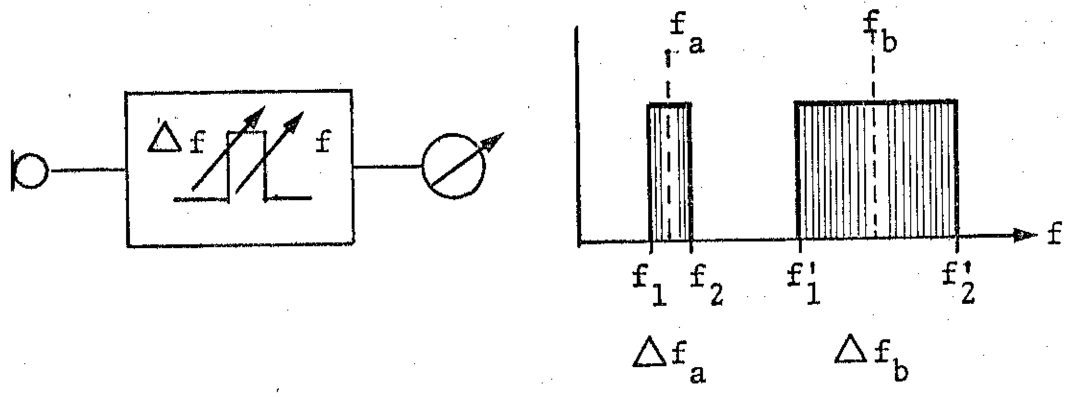
$$\boxed{G(f) = \lim_{\Delta f \to 0} \lim_{T \to \infty} \frac{1}{\Delta f T} \int_0^T p^2(f, \Delta f, t)\, dt}$$




VALORE QUADRATICO MEDIO NELLA BANDA $\Delta f$ $\qquad \Psi^2(f_1, \Delta f) = G(f_1)\Delta f$

VALORE QUADRATICO MEDIO DEL SEGNALE $\qquad \Psi_p^2 = \int_0 G(f)\, df$

## ANALIZZATORI A PERCENTUALE DI BANDA COSTANTE




$$\frac{\Delta f}{f} = \text{COSTANTE} = \frac{f_2 - f_1}{f_a} = \frac{f'_2 - f'_1}{f_b}$$

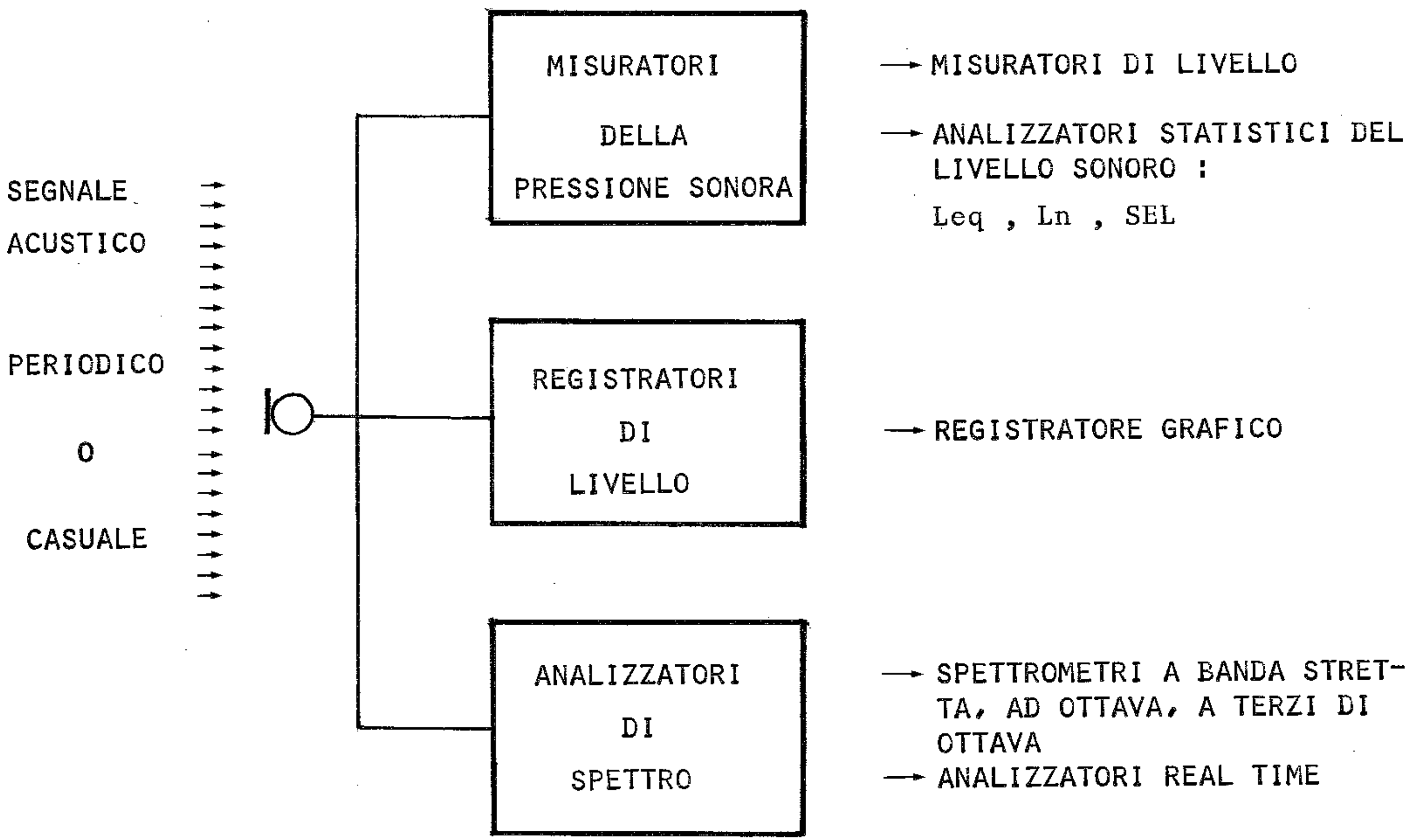
$\Delta f/f$ E' COSTANTE PER QUALSIASI VALORE DELLA FREQUENZA

IN PRATICA SI UTILIZZANO :

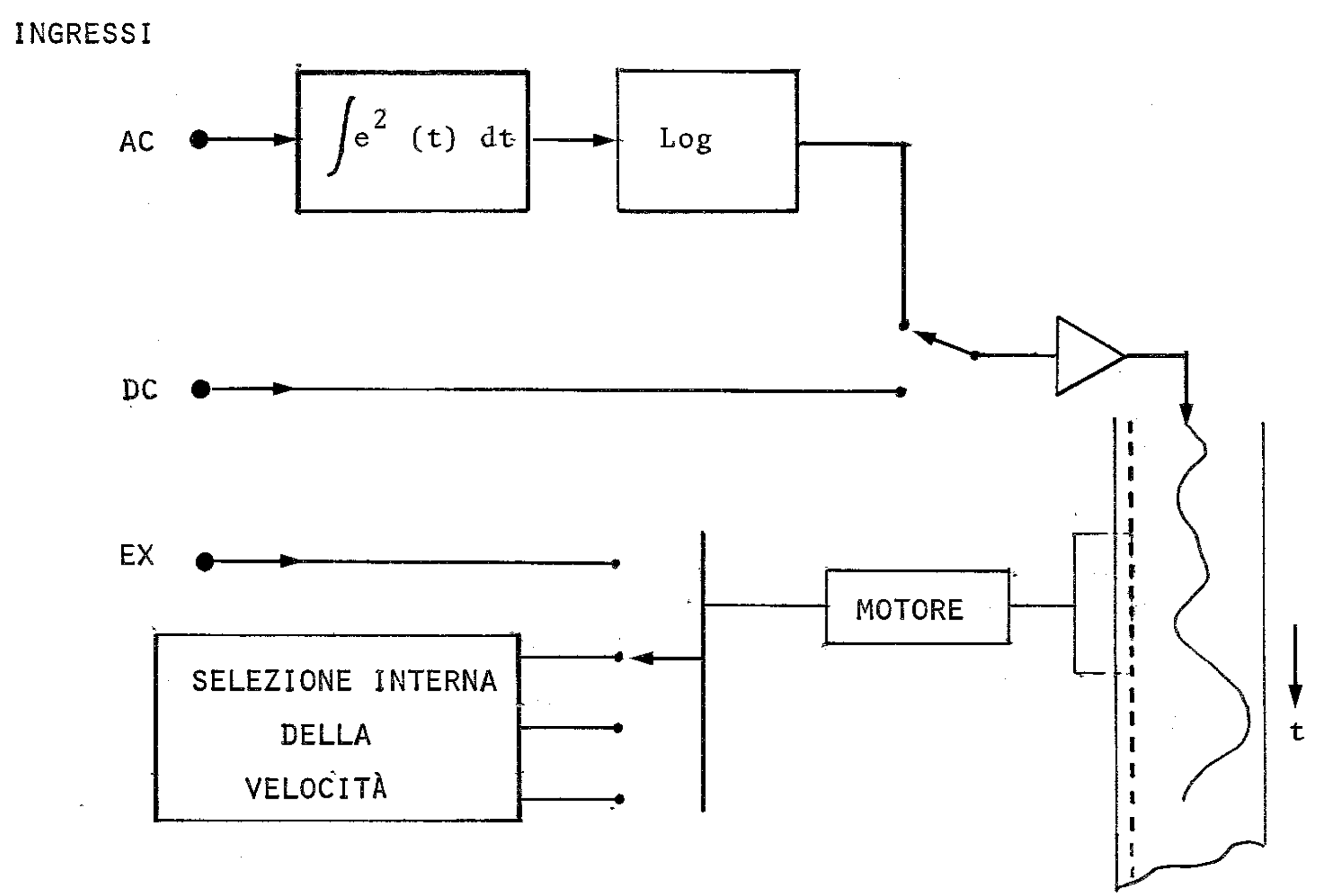
- FILTRI AD OTTAVA $\quad \dfrac{f_2}{f_1} = 2 \qquad f_a = \sqrt{f_1 \cdot f_2} = f_1\sqrt{2}$

- FILTRI A 1/3 DI OTTAVA $\quad \dfrac{f_2}{f_1} = \sqrt[3]{2} \qquad f_a = \sqrt{f_1 \cdot f_2} = f_1\sqrt[6]{2}$

# PRINCIPALI STRUMENTI IN USO ALLA ACUSTICA APPLICATA



## REGISTRATORE GRAFICO DI LIVELLO



# ANALIZZATORI DI SPETTRO

SUDDIVISIONE IN BASE AL TIPO DI FILTRO

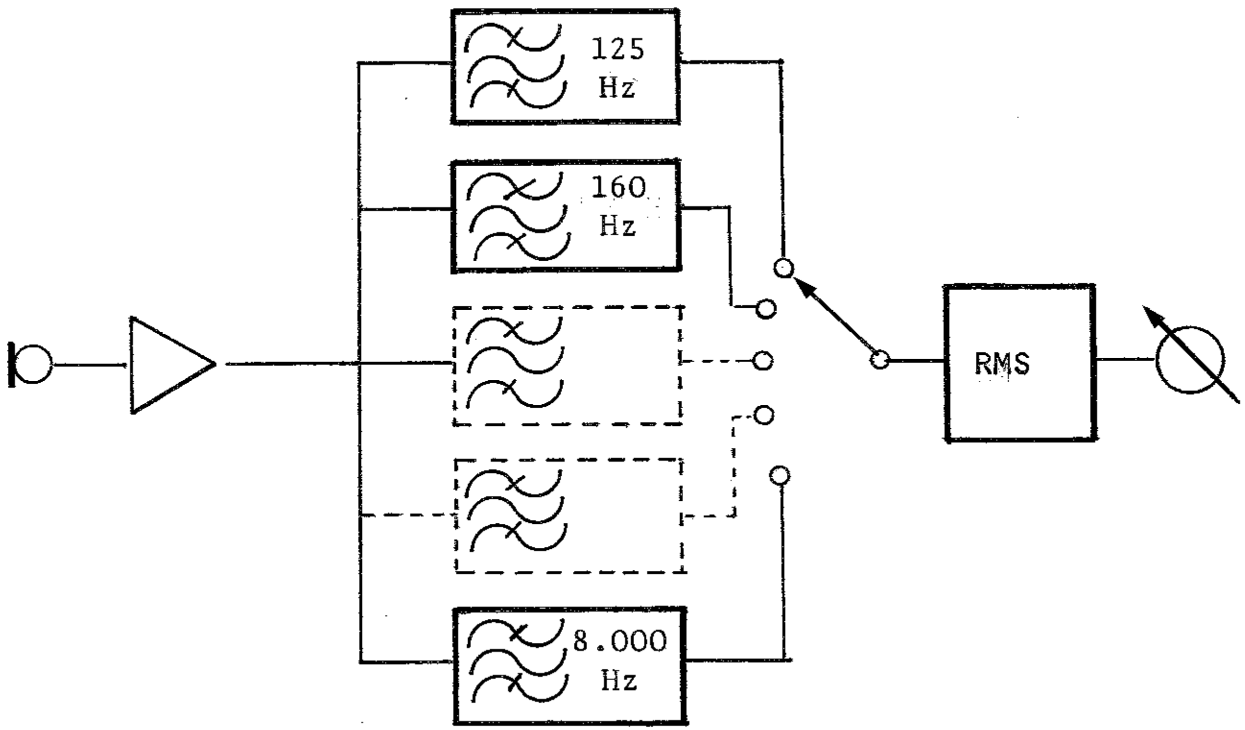
- → A BANDA STRETTA — $\Delta f$ = COSTANTE
- → A BANDA DI OTTAVA O A TERZI DI OTTAVA — $\frac{\Delta f}{f}$ = COSTANTE

SUDDIVISIONE IN BASE AL TIPO DI SCANSIONE

- → A SCANSIONE SEQUENZIALE
  - CONTINUA
  - A SCATTI
- → A SCANSIONE DI TIPO PARALLELO — TEMPO REALE

# ANALIZZATORE A BANDE DI TERZI DI OTTAVA

- SCANSIONE SEQUENZIALE A SCATTI -



# ANALIZZATORE A BANDE DI TERZI DI OTTAVA

- REAL TIME -