

# Fasi di analisi dei segnali biomedici

Acquisizione

Elaborazione

Interpretazione

# ACQUISIZIONE

**Acquisizione:** trasferimento del segnale ad un supporto opportuno per elaborazioni successive:

- Rilevazione e trasduzione
- Condizionamento (pre-filtraggio)
- Conversione A/D
- Memorizzazione numerica

# ELABORAZIONE

## **Elaborazione:**

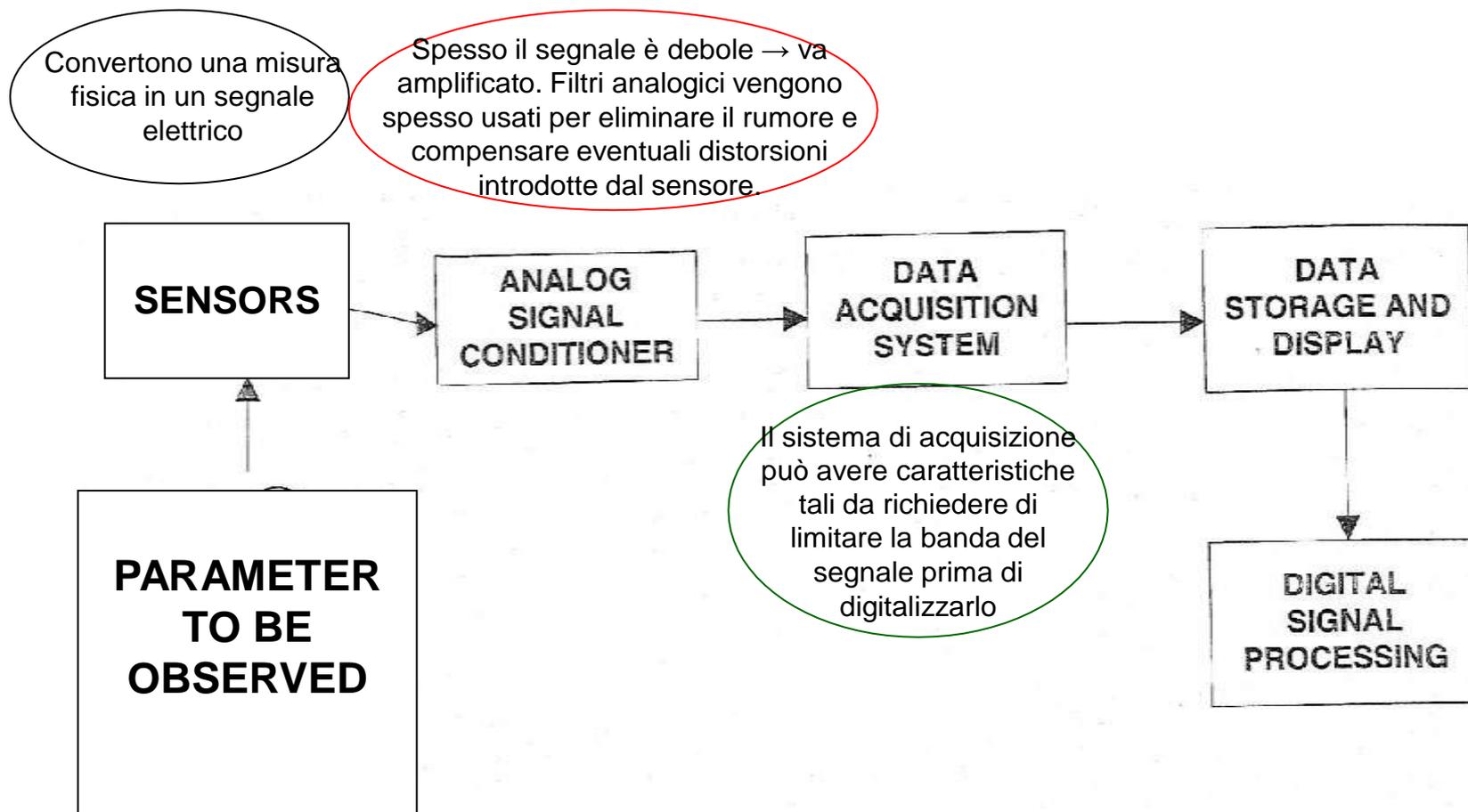
- Filtraggio (ripristino dell'informazione)
- Rivelazione di onde caratteristiche
- Trasformazione in altri domini
- Estrazione di caratteristiche
- Riduzione della dimensione (compressione)
- Classificazione di eventi

# INTERPRETAZIONE

## **Interpretazione:**

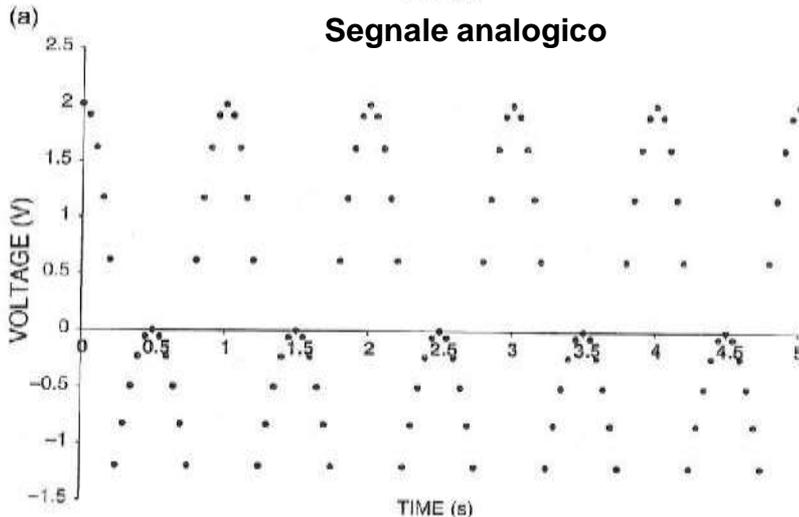
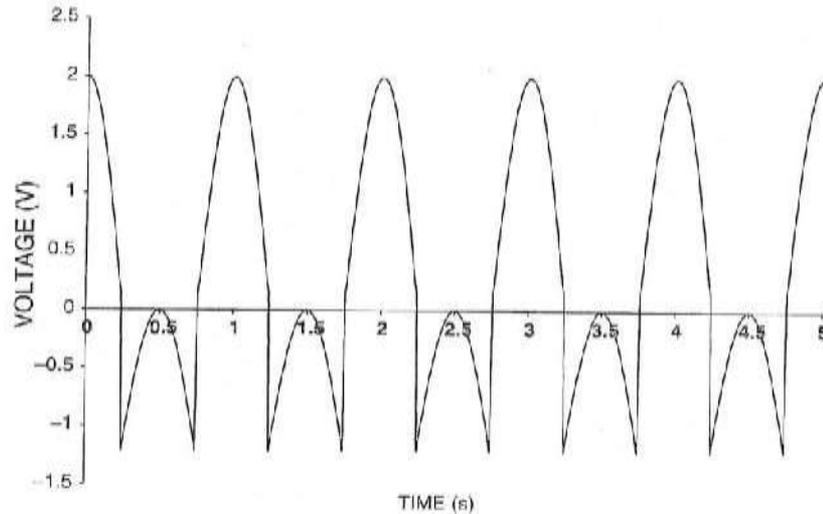
- Collegamento fra le classi di eventi individuate sulla base dell'applicazione delle tecniche di classificazione ed il significato fisiopatologico che esse assumono
- Necessita di una stretta collaborazione con il medico
- Si effettuano verifiche su modelli sperimentali controllabili e mediante studi clinici.

# ACQUISIZIONE DEI SEGNALI



Principali componenti di un sistema di acquisizione di segnali biomedici. Il sistema di amplificazione, filtraggio, conversione A/D non deve generare distorsioni che potrebbero portare a diagnosi sbagliate.

# CONVERSIONE A/D



(b) **Segnale digitale**

Il segnale biologico analogico è trasformato in una successione di campioni digitali. E' un voltmetro controllato dal computer che misura un segnale analogico in ingresso e fornisce in uscita una rappresentazione numerica del segnale che può essere salvata ed elaborata.

La conversione A/D implica due procedimenti: **campionamento e quantizzazione**

# CONVERTITORE A/D

Le operazioni di campionamento e quantizzazione sono svolte da un convertitore analogico/digitale A/D che fornisce in uscita un segnale codificato su un certo numero di bit (potenza del 2).

In un convertitore A/D si possono individuare 3 blocchi principali:

- 1.un campionatore ideale
- 2.un quantizzatore
- 3.un codificatore

# Esempio di trasduttore

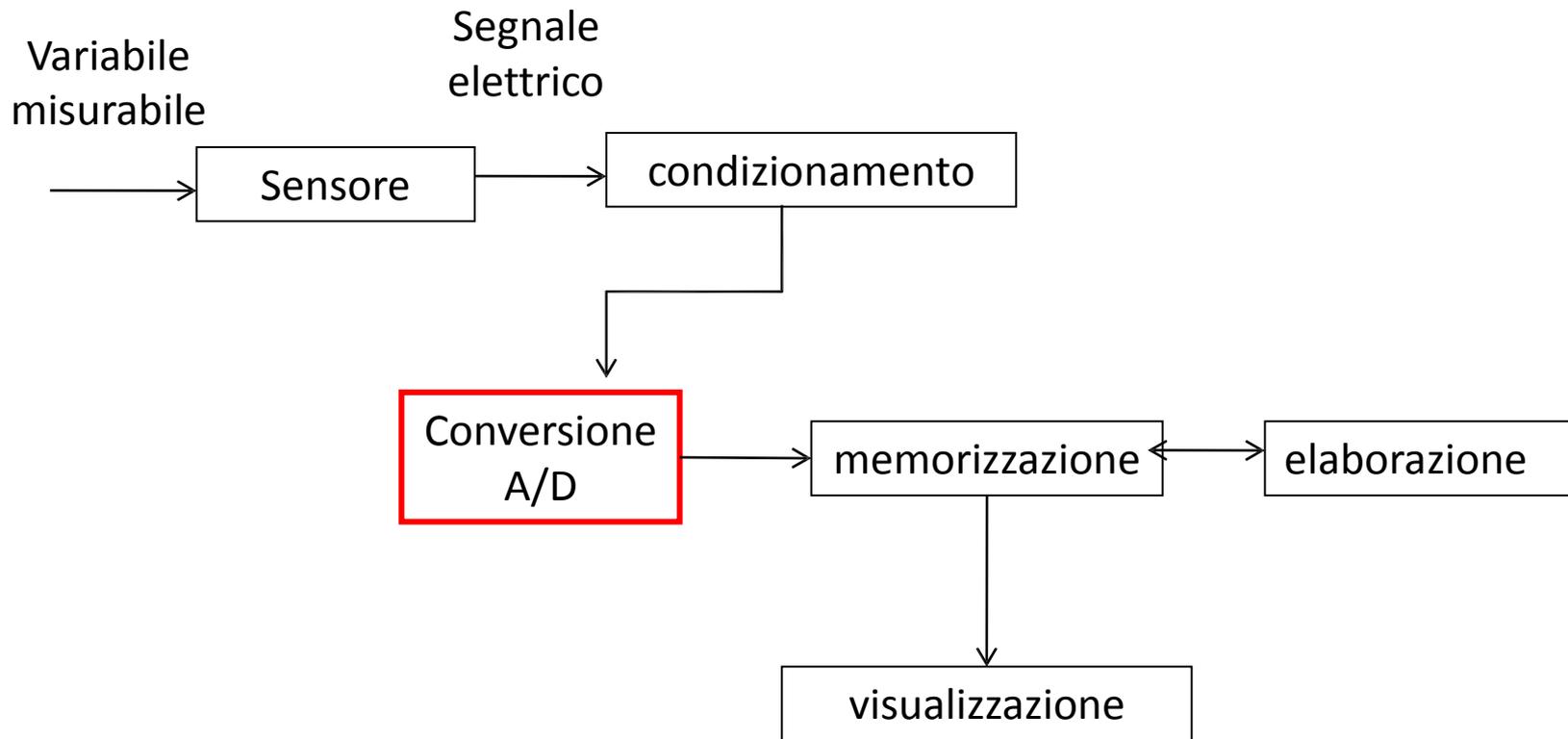
Il **microfono** è un trasduttore di tipo elettro-meccanico in grado di convertire le onde di pressione sonora in segnali elettrici.

I microfoni vengono classificati principalmente secondo la *tipologia di funzionamento* (in pratica il tipo di trasduttore) e la figura polare (ovvero la diversa sensibilità del trasduttore in relazione alla direzione di provenienza del suono), più altre caratteristiche tecniche.

Il microfono a condensatore (electret) sfrutta le variazioni di capacità del condensatore realizzato con una lamina metallica o di plastica metallizzata costituente l'armatura fissa del condensatore, ed una seconda, mobile, (la membrana).

Il microfono a condensatore, il cui principio di funzionamento si basa sulla variazione di un campo elettrico, per funzionare ha bisogno di una batteria di alimentazione che viene utilizzata per generare il campo elettrico necessario. Molto spesso tali microfoni, specialmente se di buona qualità, sono composti da due moduli separati: il modulo di alimentazione (con batteria da pochi volt, fino ai 48 volt dei microfoni professionali) ed il modulo microfono vero e proprio che può essere ad una, due o quattro celle, per distanze piccole, medie e grandi.

# Sistema di acquisizione e analisi dei segnali biomedici



# Perché campionare un segnale continuo?

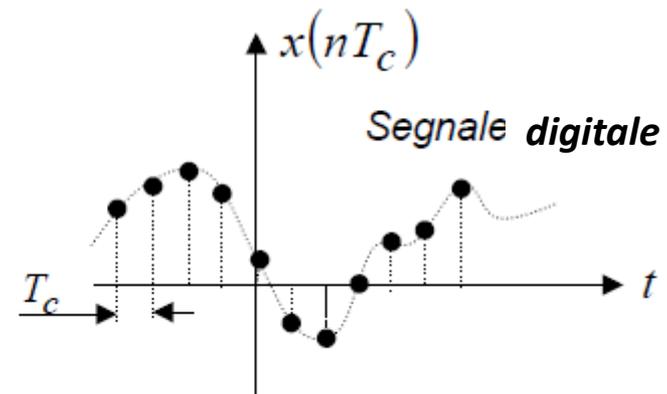
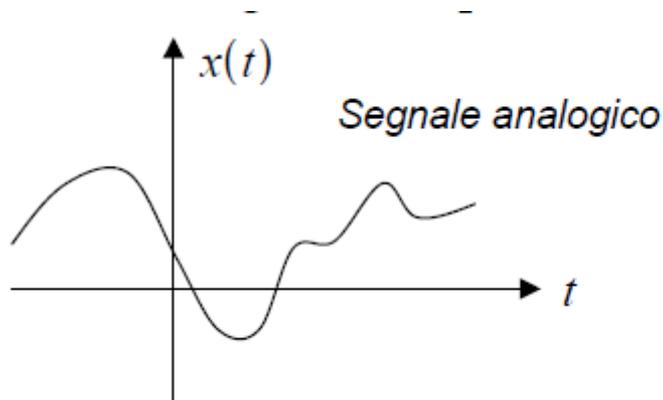
Molti dei segnali biomedici sono continui sia nel tempo sia nelle ampiezze, ma la maggior parte della strumentazione digitale moderna ottiene le misurazioni di interesse lavorando su campioni numerici del segnale analogico in ingresso.

Inoltre nei moderni sistemi di memorizzazione e trasmissione i segnali in ingresso sono di tipo numerico, normalmente rappresentati in formato binario  $\{0,1\}$ .

# Segnale analogico e digitale

**Segnale analogico:** rappresentazione dell'evento fisico descritto da un segnale continuo.

**Segnale digitale** (o numerico): assume solo un numero fisso di valori, corrispondenti a determinati istanti temporali. E' una rappresentazione "discretizzata" di un segnale analogico che viene memorizzato con una serie di "digits" pari a 0 o 1, detta codice binario.



# CAMPIONAMENTO

Si tratta di prelevare il segnale a tempo continuo in corrispondenza di punti che distano tra loro di una quantità  $T_c$  chiamata periodo di campionamento.

$T$  = periodo o intervallo di campionamento  $\Rightarrow F_s = 1/T =$   
frequenza di campionamento (si misura in Hertz ( $s^{-1}$ ))

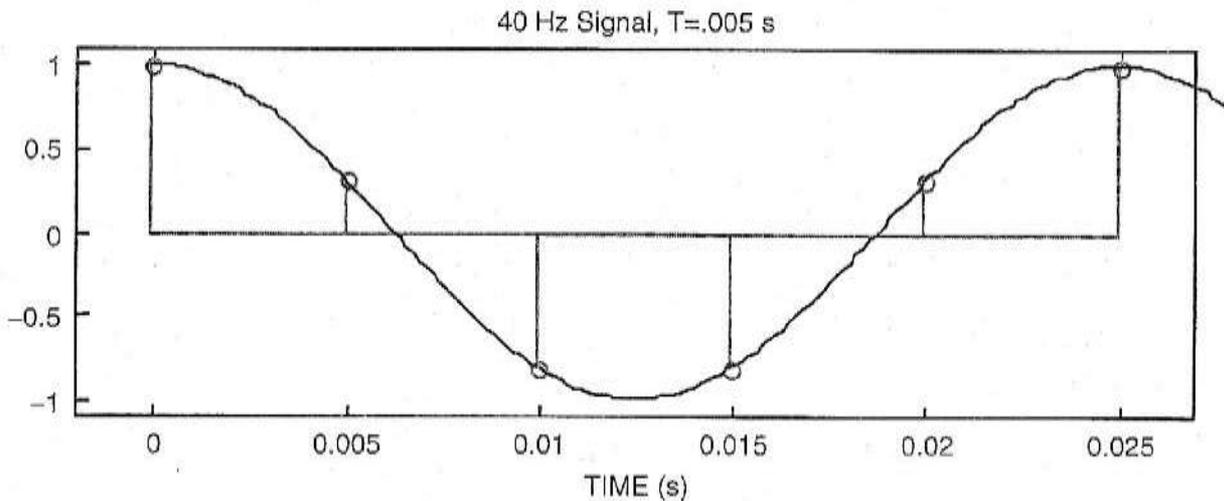
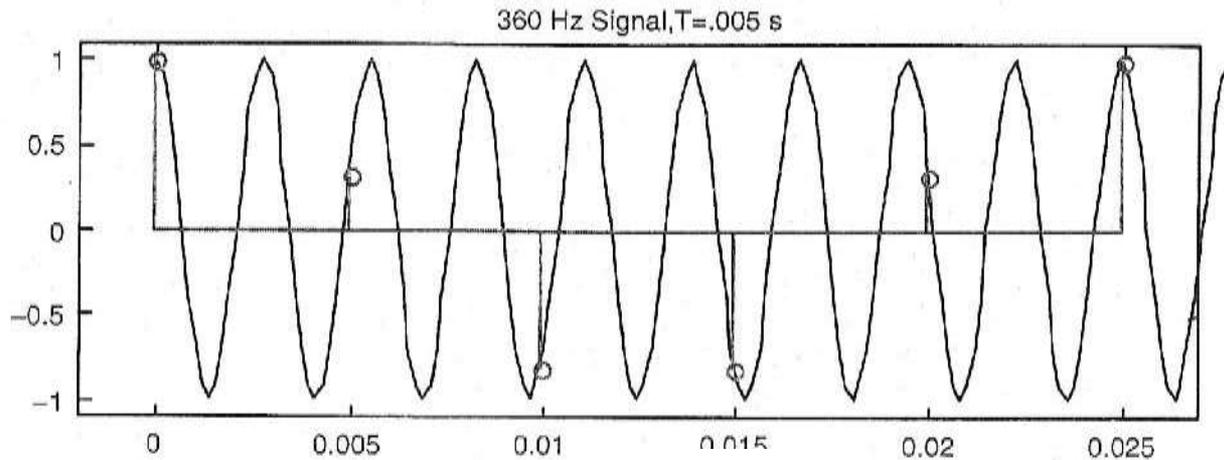
Frequenza di campionamento  $F_s$ : il teorema del campionamento di Nyquist afferma che un segnale può essere rappresentato in modo esatto se campionato ad una frequenza almeno doppia della massima frequenza presente (o di interesse) nel segnale,  $f_{\max}$

$$F_{\text{nyquist}} = 2 f_{\max}$$

Spesso si campiona a frequenze 5-10 volte  $f_{\max}$ .

# Campionamento

Affinché l'operazione di campionamento abbia senso compiuto, bisogna che la sequenza dei campioni consenta la ricostruzione del segnale analogico originario. Questo si verifica solo se certe condizioni sono rispettate. **Non si può campionare a caso!**



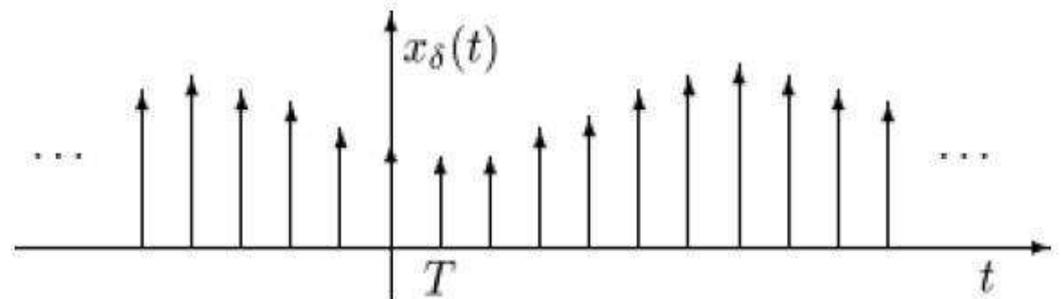
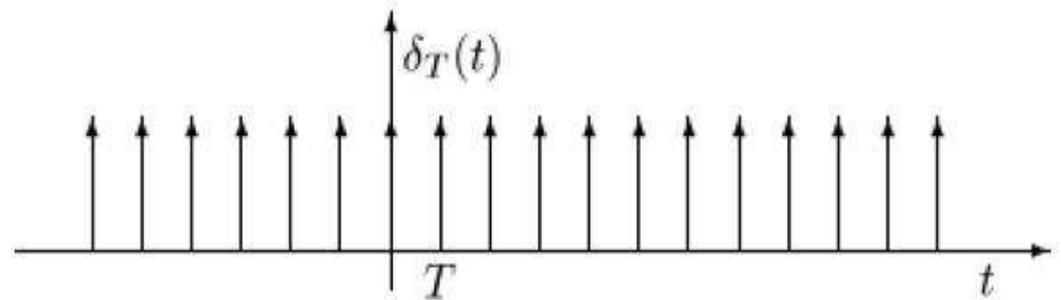
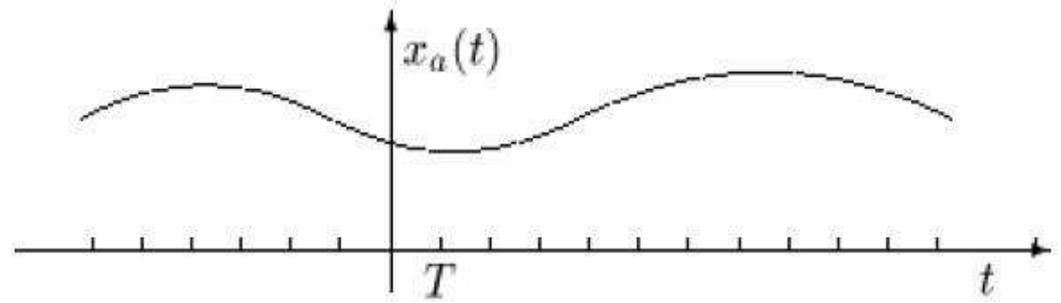
# Campionamento

il campionamento ideale è schematizzabile come il prodotto di  $x_a(t)$  per il treno periodico di impulsi di Dirac

$$x_\delta(t) = \sum_{n=-\infty}^{+\infty} x_a(nT_c) \cdot \delta(t - nT_c)$$

$$\delta_T(t) = \sum_{n=-\infty}^{+\infty} \delta(t - nT_c)$$

Per verificare la ricostruibilità del segnale  $x(t)$  bisogna studiare lo spettro di  $x_\delta(t)$



Per le proprietà della trasformata di Fourier, **ad un campionamento nel dominio del tempo corrisponde una replica (periodicizzazione) in frequenza.**

Inoltre la convoluzione tra una funzione ed un impulso implica la traslazione dell'origine della funzione nella posizione in cui è centrato l'impulso.

Quindi si ha che lo spettro di  $x_\delta(t)$  vale:

$$X_\delta(f) = \frac{1}{T_c} \cdot \sum_{k=-\infty}^{+\infty} X_a\left(f - \frac{k}{T_c}\right) = f_c \cdot \sum_{k=-\infty}^{+\infty} X_a(f - k \cdot f_c)$$

Dunque lo spettro del segnale campionato idealmente è costituito da repliche dello spettro di  $x_a(t)$  traslate di  $kf_c = k/T_c$  e scalate in ampiezza secondo il fattore  $1/T_c = f_c$ .

La quantità  $1/T_c$  è chiamata **frequenza di campionamento:  $f_c = 1/T_c$ .**

(la convoluzione tra una funzione ed un impulso implica la traslazione dell'origine della funzione nella posizione in cui è centrato l' impulso).

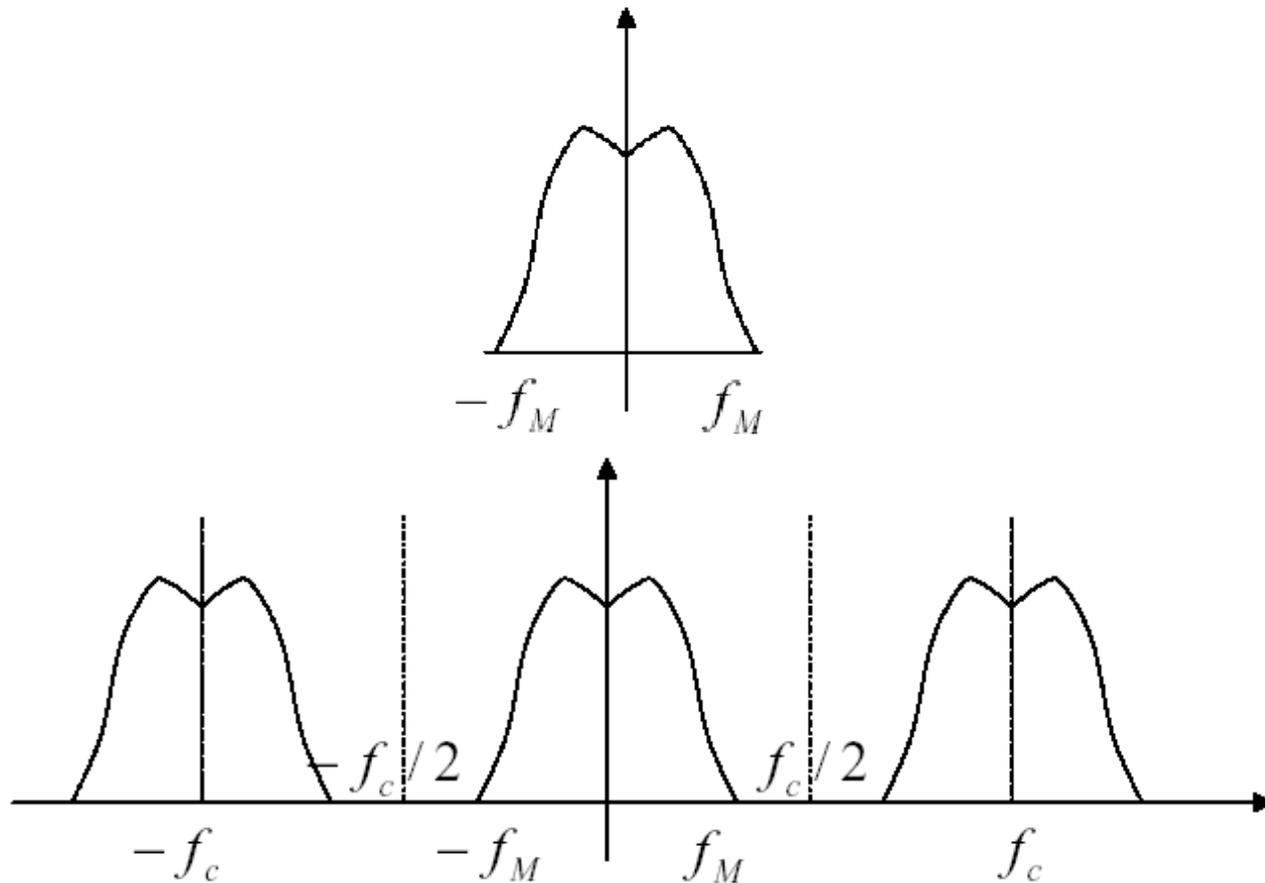
$$x_c(t) = x(t) \sum_{n=-\infty}^{\infty} \delta(t - nT_c)$$

$$X_c(f) = X(f) * \frac{1}{T_c} \sum_{k=-\infty}^{\infty} \delta\left(f - \frac{k}{T_c}\right) = \frac{1}{T_c} \sum_{k=-\infty}^{\infty} X\left(f - \frac{k}{T_c}\right)$$

Lo spettro del segnale campionato contiene una sequenza di repliche dello spettro del segnale analogico a passi di  $1/T_c$ , *scalate del* fattore  $1/T_c$ .  
La quantità  $1/T_c$  è *chiamata frequenza di campionamento*:  $f_c = 1/T_c$ .

# Campionamento

il campionamento di un segnale a tempo continuo con frequenza di campionamento  $f_c$  produce una ripetizione periodica dello spettro in frequenza con periodo di ripetizione  $f_c$ .



# Condizione di Nyquist

Si evincono quindi le condizioni per un corretto campionamento dei segnali limitati in banda:

per non avere perdita di informazione dal campionamento di un segnale limitato nella banda frequenziale  $f_M$ , è necessario che tale segnale sia campionato ad una frequenza almeno doppia della massima frequenza presente (o di interesse) nel segnale:

$$F_c > 2 f_M$$

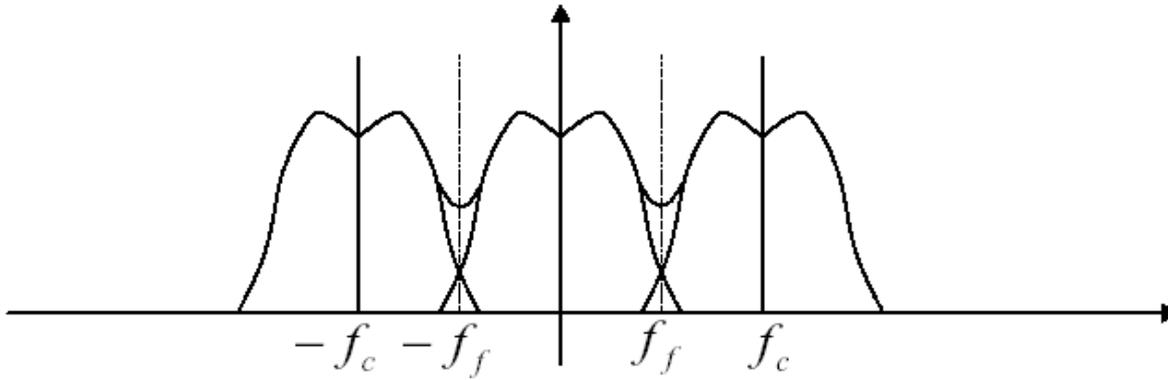
# Teorema del campionamento

(Shannon)

Un segnale il cui spettro è limitato nella banda  $f_M$  può essere ricostruito esattamente a partire dai propri campioni purché la frequenza di campionamento non sia inferiore a  $2 f_M$

# Aliasing

**Aliasing:** distorsione data dalle frequenze oltre  $f_c/2$ .



**Es.:** Il range di frequenze di un segnale analogico EEG è 0.5 – 100 Hz. Qual è la minima frequenza di campionamento per questo segnale, per ottenere un segnale digitale sufficientemente accurato?

Soluzione:

?

**Es.:** Un segnale sinusoidale a frequenza 360 Hz è campionato a 200 Hz. E' corretto o si avrà "aliasing"?

Soluzione:

?

·  
**Es.:** Perché nei CD si usa  $F_s=44.100$  Hz?

Soluzione:

?

# RANGE DI FREQUENZE PER ALCUNI SEGNALI BIOMEDICI

- Elettromiogramma: 5 Hz-10kHz
- Elettroretinogramma 0.2-200Hz
- EEG
  - Delta: 0.5-4Hz (sonno profondo)
  - Theta: 4-8 Hz (veglia)
  - Alfa: 8-13 Hz (veglia occhi chiusi, rilassato)
  - Beta: 13-22 Hz (attenzione)

# Prefiltraggio del segnale (filtro *anti-aliasing*):

Se non si è certi che la banda del segnale sia limitata ad un valore  $f_M$  (sulla base del quale si intende scegliere la frequenza di campionamento) è necessario “prefiltrare” il segnale (cioè filtrarlo prima del campionamento).

Il “prefiltro” (filtro *anti-aliasing*) ha caratteristiche molto simili al filtro di ricostruzione (talvolta è uguale, per utilizzare due volte un unico progetto).

**Esempi:** nel CD audio si filtra il segnale musicale in modo che abbia banda  $f_M = 20$  kHz (largamente sufficiente per un’ottima qualità) e poi si campiona a frequenza  $f_c = 44.1$  kHz. L’orecchio umano fa da filtro naturale (soglia udibilità=20kHz)

Invece il segnale telefonico viene spesso campionato alla frequenza  $f_c = 8$  kHz. In questo caso il prefiltro ha banda  $f_M < 4$  kHz (se si trasmette musica non si ottiene alta fedeltà).

# Anti-aliasing

La voce umana ha uno spettro che si estende da circa 60 Hz a oltre 8000 Hz.

Le norme CCITT (International Telegraph and Telephone Consultive Committee) prevedono che i segnali vocali siano campionati a 8 kHz.

È stato infatti fissato un limite a 3.4 kHz poiché le frequenze superiori, benché presenti, non sono strettamente necessarie all'intelligibilità del messaggio e ad esse è associata poca energia.

Quindi, per evitare l'*aliasing* è necessario filtrare il segnale vocale tramite un passa-basso prima di campionarlo.

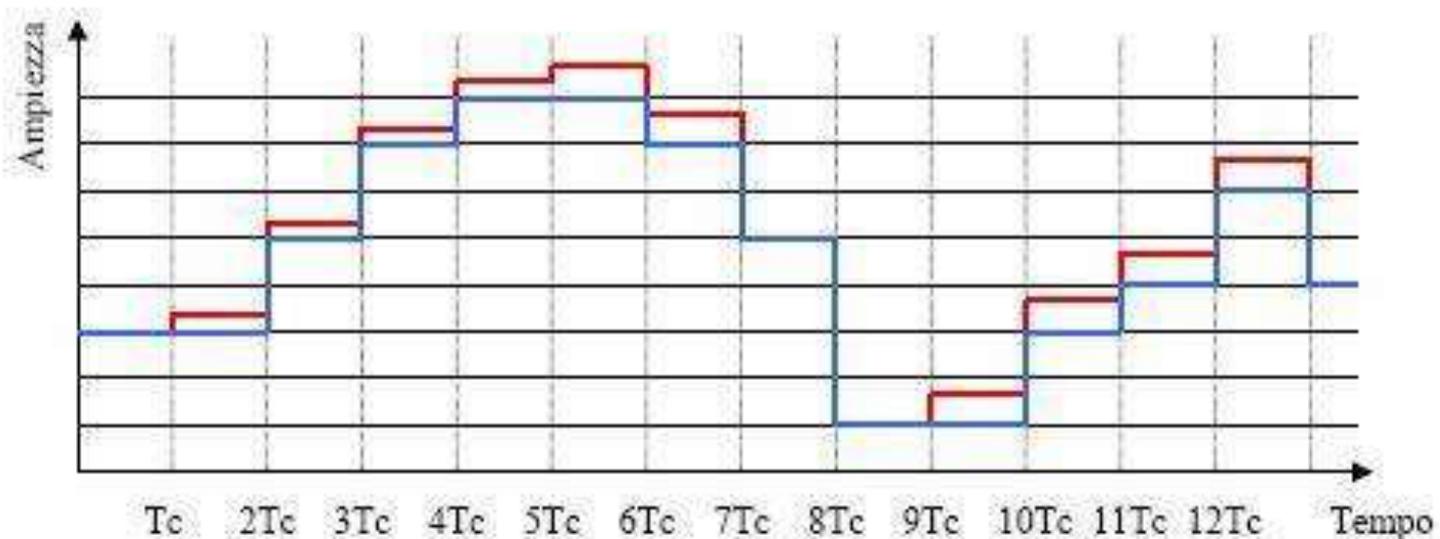
Il filtro passa-basso ha il compito di limitare lo spettro del segnale che verrà campionato alla frequenza di 8 kHz.

# Quantizzazione

Ogni campione del segnale campionato  $x(nT)$  è un numero reale che può assumere con continuità qualsiasi valore compreso tra un minimo e un massimo.

Se si vuole rappresentare ogni campione  $x(nT)$  in forma numerica (ad esempio per memorizzarlo in forma binaria su un PC) è necessario approssimare ciascun valore reale con il livello più vicino scegliendo tra un numero finito  $K$  di livelli compresi tra il minimo e il massimo. Questa operazione viene detta quantizzazione.

Con il tratto rosso è rappresentato il segnale campionato, mentre con il tratto blu è rappresentato il segnale quantizzato.



Segnale campionato e quantizzato

# Codifica

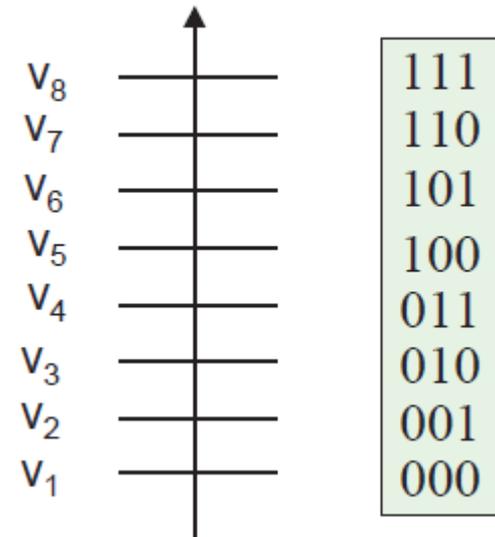
Con  $N$  cifre binarie (bit) si ottengono  $K = 2^N$  livelli di quantizzazione.

Ad ogni livello si può dunque associare un codice di  $N$  bit.

Ad esempio se  $N=3$  sono disponibili  $K = 8$  livelli di quantizzazione  $V_m$  codificabili (in vario modo) con 3 bit.

In pratica un unico dispositivo, detto convertitore analogico-digitale, campiona il segnale, individua l'intervallo in cui cade il campione e ne dà la codifica binaria.

codifica naturale:



Bit del convertitore	Livelli di discretizzazione
8	256
16	65.536
32	4.294.967.296

# Risoluzione

La risoluzione di un convertitore indica il **numero di valori discreti che può produrre**. E' la minima variazione dell'ingresso analogico che comporta, per qualsiasi valore dell'ingresso stesso, una variazione dell'uscita digitale.

In pratica la risoluzione viene indicata dando il numero di n bit della parola digitale di uscita del convertitore.

Per esempio, un convertitore che codifica un ingresso analogico in 256 livelli discreti ha una risoluzione di 8 bit, essendo  $2^8 = 256$ .

La risoluzione può anche essere definita elettricamente, ed espressa in volt. La risoluzione in volt è uguale alla minima differenza di potenziale tra due segnali che vengono codificati con due livelli distinti adiacenti.

La risoluzione del convertitore A/D si ottiene dividendo il range di tensione del segnale analogico in ingresso per il range numerico del convertitore.

Es.: Determinare la risoluzione di un convertitore A/D a 8 bit per un segnale in ingresso con un range di 10 V.

Soluzione:

$$\frac{\text{input voltage range}}{2^N} = \frac{10V}{256} = 39.1\text{mV}$$

# Esercizi

## **Esempio 1:**

Range compreso tra 0 e 10 volt

Risoluzione dell'ADC di 12 bit:  $2^{12} = 4096$  livelli di quantizzazione

La differenza di potenziale tra due livelli adiacenti è  $10 \text{ V} / 4096 = 0,00244 \text{ V} = 2,44 \text{ mV}$

## **Esempio 2:**

Range compreso tra -10 e 10 volt

Risoluzione dell'ADC di 14 bit:  $2^{14} = 16384$  livelli di quantizzazione

La differenza di potenziale tra due livelli adiacenti è  $20 \text{ V} / 16384 = 0,00122 \text{ V} = 1,22 \text{ mV}$

Nella pratica, la risoluzione di un convertitore è limitata dal rapporto segnale/rumore (*S/N ratio*) del segnale in questione. Se è presente troppo rumore all'ingresso analogico, sarà impossibile convertire con accuratezza oltre un certo numero di bit di risoluzione.

# Ritmo di trasmissione richiesto

La cadenza in bit al secondo di un segnale numerico viene chiamata ritmo di trasmissione (*bit rate*).

Per un segnale tempo continuo  $x(t)$  con *frequenza massima di 3.6 kHz* (*segnale vocale di qualità telefonica*) il teorema del campionamento richiede una frequenza di campionamento  $f_c$  *maggiore di 7.2 kHz*. Si *utilizza la frequenza di campionamento  $f_c = 8$  kHz (8000 campioni al secondo)*.

Se si quantizza il segnale con  $K=256$  *livelli occorrono  $N=8$  bit per campione*.

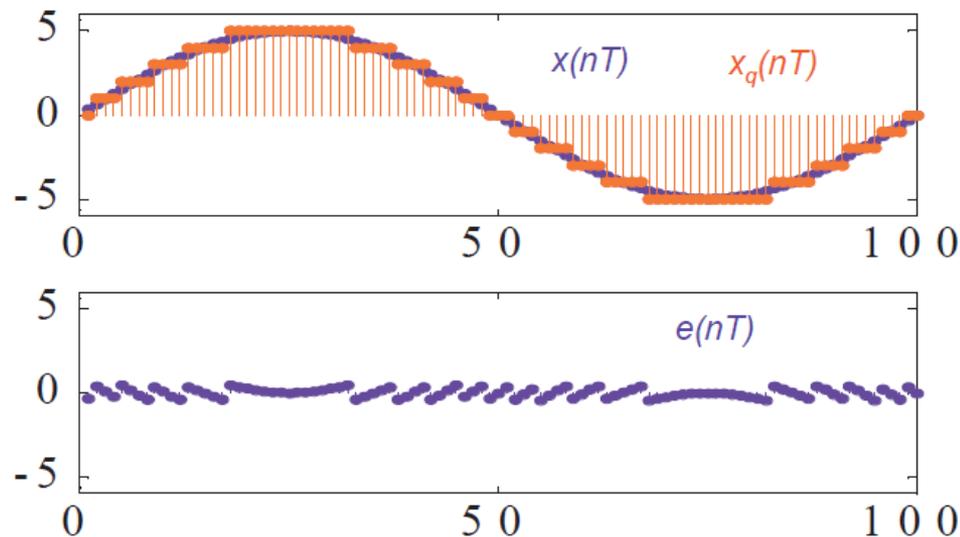
Il segnale telefonico in forma numerica richiede quindi un ritmo di trasmissione:

$$Nf_c = 8 \cdot 8000 = 64 \text{ kb/s}$$

# Errore di quantizzazione

Quantizzando si commette un errore tanto più piccolo quanto più elevato è il numero  $K$  di livelli. L'errore di quantizzazione è:

$$e(nT) = x_q(nT) - x(nT)$$



# Errore di quantizzazione

L'errore di quantizzazione di un campione ha valore compreso tra  $+\Delta/2$  e  $-\Delta/2$

$$-\frac{\Delta}{2} < e(nT) < \frac{\Delta}{2}$$

ed è una variabile casuale con densità di probabilità uniforme tra  $-\Delta/2$  e  $+\Delta/2$ . Possiamo considerarlo come un rumore che si somma al segnale utile  $x(nT)$ .

# Rapporto segnale/rumore

Se calcoliamo il rapporto segnale rumore dovuto all'errore di quantizzazione, esso è il rapporto tra la potenza del segnale utile e la potenza dell'errore di quantizzazione, quest'ultima è proporzionale al valore quadratico medio dell'errore:

$$\frac{S}{N} = \frac{P_{Sign}}{P_{noise}} = \frac{A^2}{e_m^2}$$

Per ogni cifra binaria aggiunta si ottiene che il numero di livelli  $K$  raddoppia, quindi l'intervallo di quantizzazione  $\Delta$  si dimezza e anche il l'errore medio  $e_m$  si dimezza, per cui l'errore quadratico medio si riduce di 4 volte.

Di conseguenza il rapporto segnale rumore diventa il quadruplo.