

LIVELLO FISICO



1

Come si generano, trasmettono e ricevono le informazioni?  
*(Onde elettromagnetiche)*

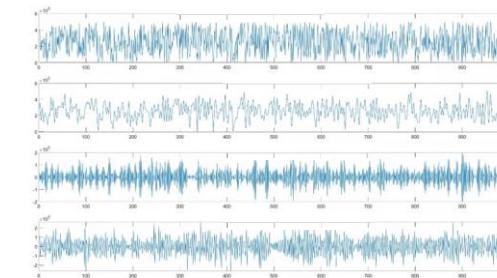


4

Quale mezzo trasmissivo scelgo?  
*(Mezzi di trasmissione)*

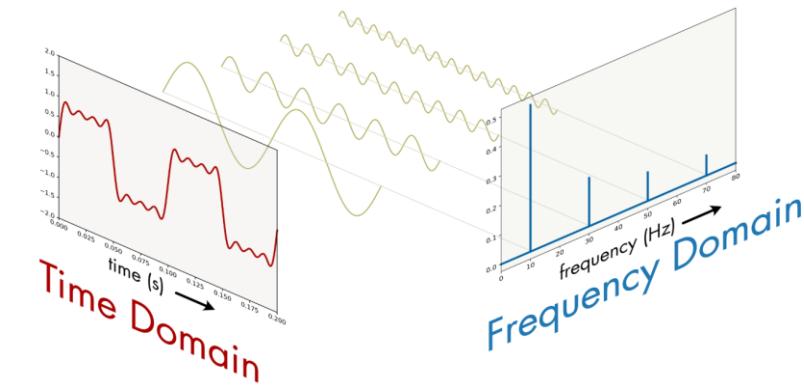
3

Come passo da segnali digitali ad analogici?  
Come facciamo a far coesistere più segnali su un canale?  
Quali sono le caratteristiche di un canale di trasmissione?  
*(Il canale, Tecniche di modulazione)*



2

Come posso analizzare un segnale?  
Come posso pulirlo e isolarlo (filtraggio)?  
*(Il segnale)*



- Onde elettromagnetiche
- Il segnale
- Il canale
- Tecniche di modulazione
- Mezzi di trasmissione

Onde  
elettromagnetiche

## Onde elettromagnetiche

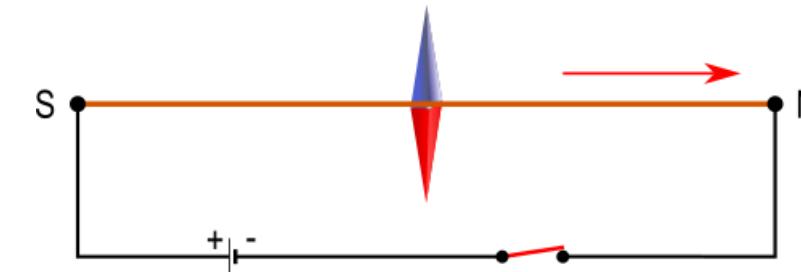
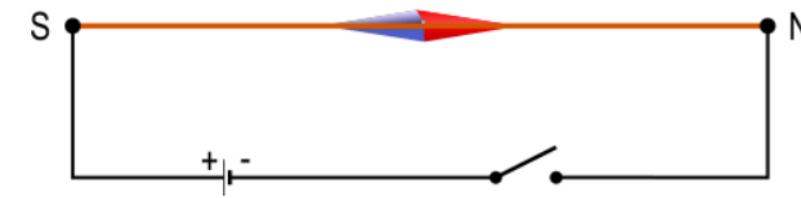
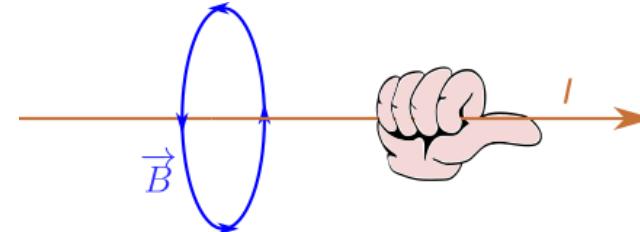
Come il campo elettrostatico è generato da cariche elettriche in quiete, così il campo magnetico è generato da cariche elettriche in movimento.

**Hans Christian Ørsted** (1777 - 1851) notò che un conduttore percorso da cariche elettriche in movimento genera nello spazio circostante un campo magnetico (effetto Ørsted), perciò i fenomeni elettrici e quelli magnetici erano strettamente legati.

### Esperimento di Ørsted:

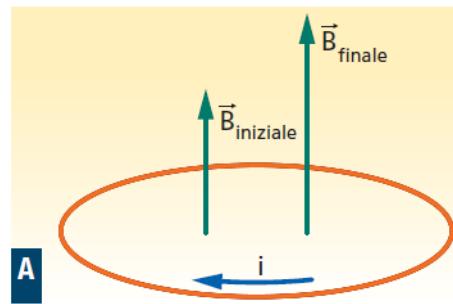
fissò un cavo elettrico lungo la direzione nord-sud e sotto mise una bussola; l'ago era orientato nella medesima maniera.

Quando chiuse il circuito, l'ago cambiò direzione, ponendosi perpendicolare al filo se la corrente era abbastanza intensa, come se gli fosse stata avvicinata una calamita.

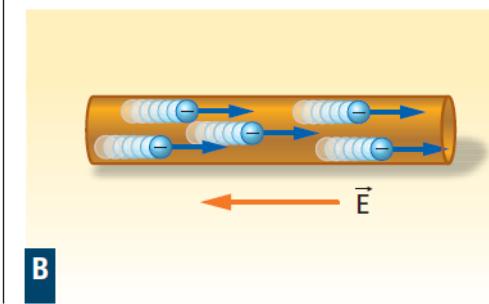


Per induzione elettromagnetica, un campo magnetico **che varia** genera un campo elettrico indotto le cui linee di campo sono chiuse su se stesse e poste in un piano perpendicolare al campo magnetico:

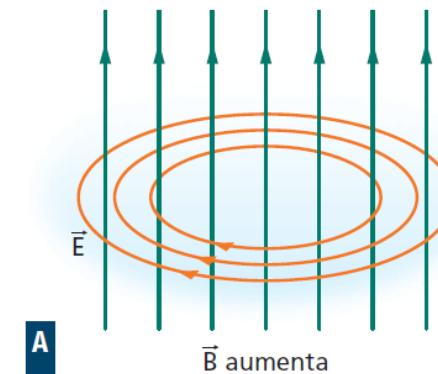
Un campo magnetico che aumenta genera, in una spira di metallo, una corrente indotta.



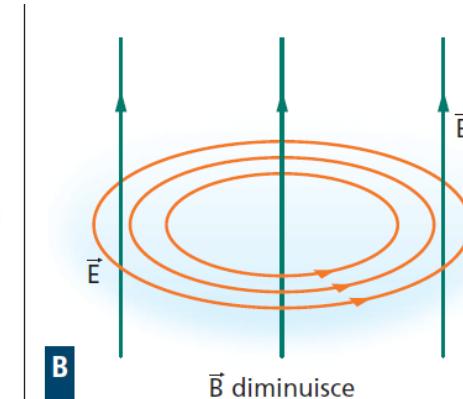
Gli elettroni della spira sono messi in movimento, tutti nello stesso senso, da un campo elettrico.



Se  $B$  aumenta, le linee del campo elettrico si avvolgono tutte nello stesso senso.



Se  $B$  diminuisce, le linee del campo elettrico si avvolgono in senso opposto.

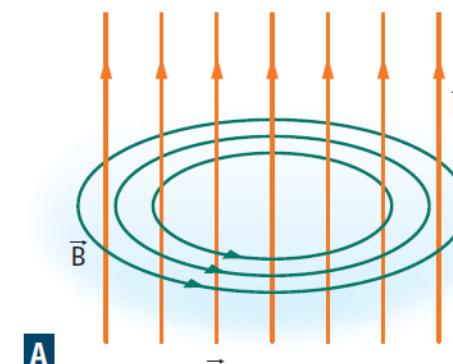


Il culmine nella comprensione dei fenomeni elettrici e magnetici venne raggiunto nel XIX secolo dal fisico scozzese **James Clerk Maxwell** (1831-1879) che riuscì a fornire un quadro unitario di tali fenomeni sulla base di **sole considerazioni teoriche** e senza evidenze sperimentali.

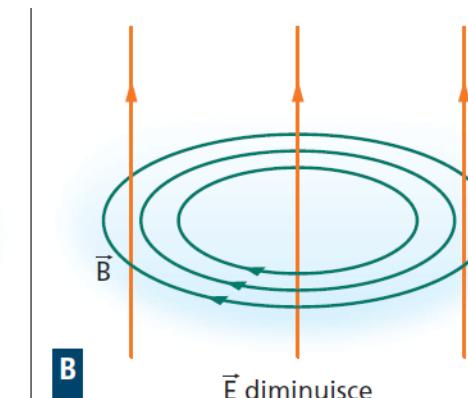
Nel 1873 James C. Maxwell pubblicò il suo fondamentale lavoro *Treatise on Electricity and Magnetism* (Trattato sull'elettricità e sul magnetismo) in cui faceva l'ipotesi che: **un campo elettrico variabile genera un campo magnetico**.

Secondo questa ipotesi, le linee del campo magnetico si chiudono su se stesse su un piano perpendicolare alle linee del campo elettrico:

Se  $\vec{E}$  aumenta, le linee del campo magnetico si avvolgono tutte nello stesso senso.



Se  $\vec{E}$  diminuisce, le linee del campo magnetico si avvolgono in senso opposto.



Le **equazioni di Maxwell** forniscono una visione unitaria dei fenomeni elettrici e magnetici e costituiscono le leggi fondamentali dell'elettromagnetismo. In questa teoria i due tipi di campi sono due aspetti di una stessa entità: il **campo elettromagnetico**.

Campo elettromagnetico	Sorgenti
Campo elettrico	<ul style="list-style-type: none"><li>• Cariche ferme e in movimento</li><li>• Campi magnetici variabili</li></ul>
Campo magnetico	<ul style="list-style-type: none"><li>• Cariche in movimento (correnti elettriche)</li><li>• Campi elettrici variabili</li></ul>

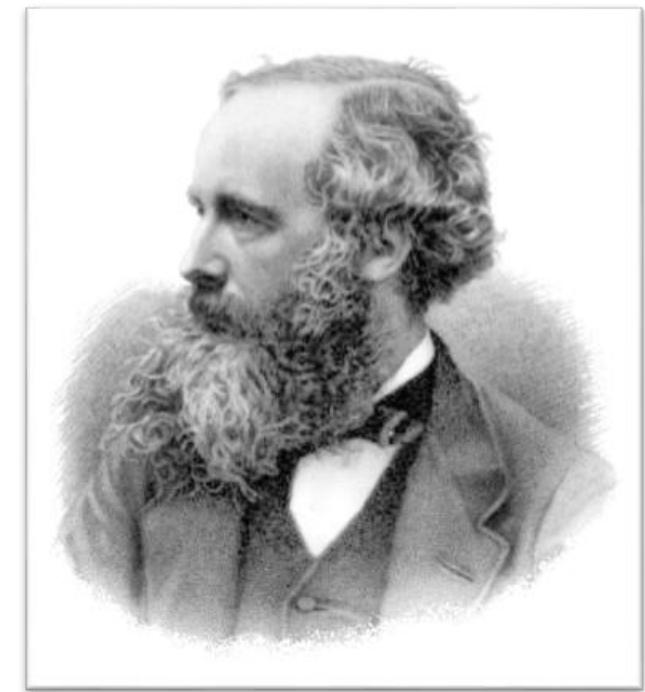
#### LEGAMI FONDAMENTALI TRA CAMPO ELETTRICO E CAMPO MAGNETICO:

1. Una corrente elettrica genera un campo magnetico ( $\text{\O}rsted}$ )
2. Un campo magnetico esercita una forza su una carica elettrica che si muova al suo interno e, di conseguenza su un conduttore percorso da corrente in esso immerso
3. La **variazione** di un campo magnetico induce in un conduttore in esso immerso una forza elettromotrice. Più in generale, **se in un punto dello spazio vi è un campo magnetico che varia nel tempo, in quel punto nasce un campo elettrico**

un campo magnetico variabile genera un campo elettrico  
un campo elettrico variabile genera un campo magnetico

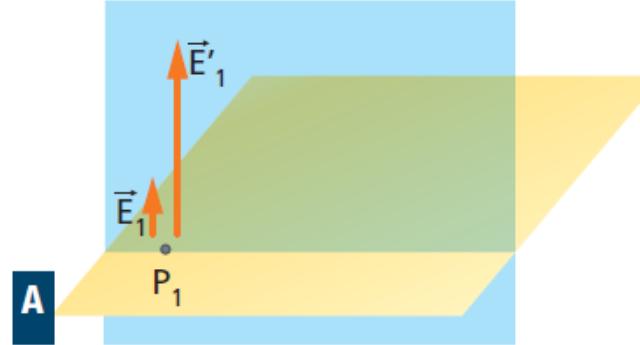


produzione di  
**ONDE ELETTROMAGNETICHE**

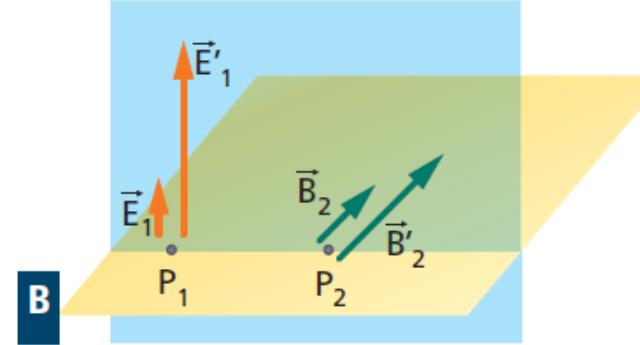


Il campo elettromagnetico si propaga nello spazio. Per capire come fa, immaginiamo di tenere in movimento una carica  $Q$ , facendola oscillare molto rapidamente avanti e indietro (corrente alternata). Questo movimento dà origine a un campo elettrico e a un campo magnetico oscillanti perpendicolari, che si generano l'un l'altro:

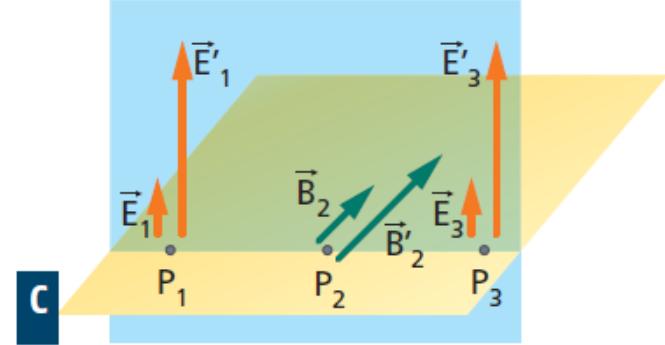
per effetto del movimento di  $Q$ , in un punto  $P_1$  si genera un campo *elettrico* variabile;



questo, a sua volta, genera un campo *magnetico* variabile in un punto  $P_2$  spostato rispetto a  $P_1$



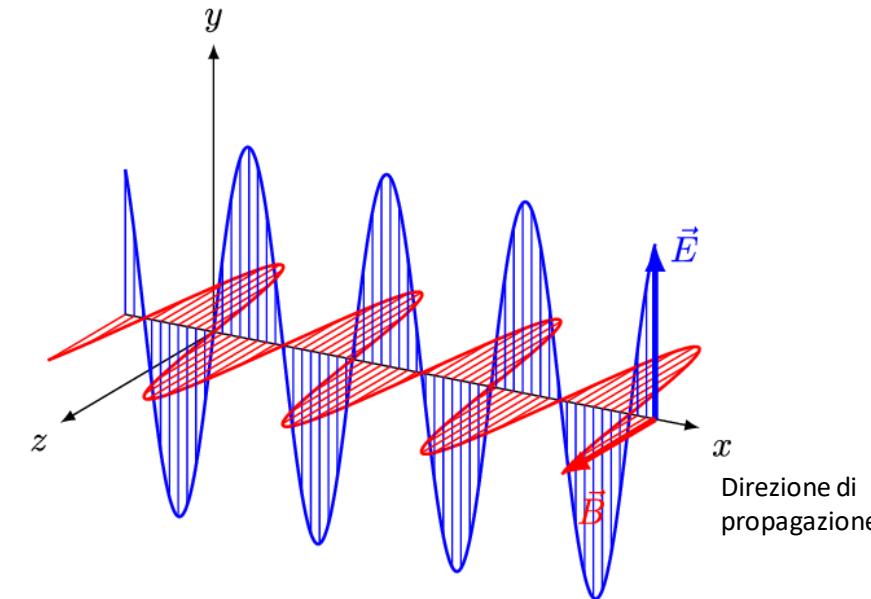
ma il campo magnetico variabile in  $P_2$  crea un campo elettrico indotto in un altro punto  $P_3$



In realtà, in  $P_1$  c'è anche un campo magnetico variabile, che genera in  $P_2$  un campo elettrico variabile, che genera in  $P_3$  un ulteriore campo magnetico...

I campi elettrici e magnetici oscillano perpendicolari l'uno all'altro e si generano con continuità propagandosi sempre più lontano dalla carica che li ha creati all'inizio. Anche quando la carica smette di oscillare, essi continuano a generarsi l'un l'altro in punti sempre più distanti.

Il campo elettromagnetico ha un'esistenza autonoma: si propaga nello spazio e trasporta energia.



L'oscillazione di un campo elettrico, cioè la variazione della sua intensità in un punto al variare del tempo, genera l'oscillazione di un campo magnetico in punti vicini e così via: l'oscillazione si propaga nello spazio sotto forma di **onda elettromagnetica**.

L'onda elettromagnetica è allora data da due componenti, **campo elettrico  $E$**  e **campo magnetico  $B$**  che oscillano in fase perpendicolari tra loro e perpendicolari alla direzione di propagazione.

Diversamente dalle onde meccaniche che si propagano solo in un mezzo elastico, le onde elettromagnetiche si propagano anche nello spazio vuoto, privo di materia. Nelle onde elettromagnetiche infatti non oscillano le particelle di un mezzo materiale, ma le intensità dei campi elettrico e magnetico variano nello spazio e nel tempo.

La velocità delle onde elettromagnetiche nel vuoto è numericamente uguale alla **velocità della luce  $c$**  ( $3 \times 10^8$  m/s).

L'uguaglianza della velocità di propagazione nel vuoto della luce e delle onde elettromagnetiche suggerisce una conclusione di importanza fondamentale:  
**la luce è costituita da onde elettromagnetiche.**

La luce visibile è un particolare tipo di onda elettromagnetica. Altri tipi sono, per esempio, le onde radio, i raggi ultravioletti e i raggi X.

Ciò che differenzia le diverse onde elettromagnetiche è la loro frequenza di oscillazione.

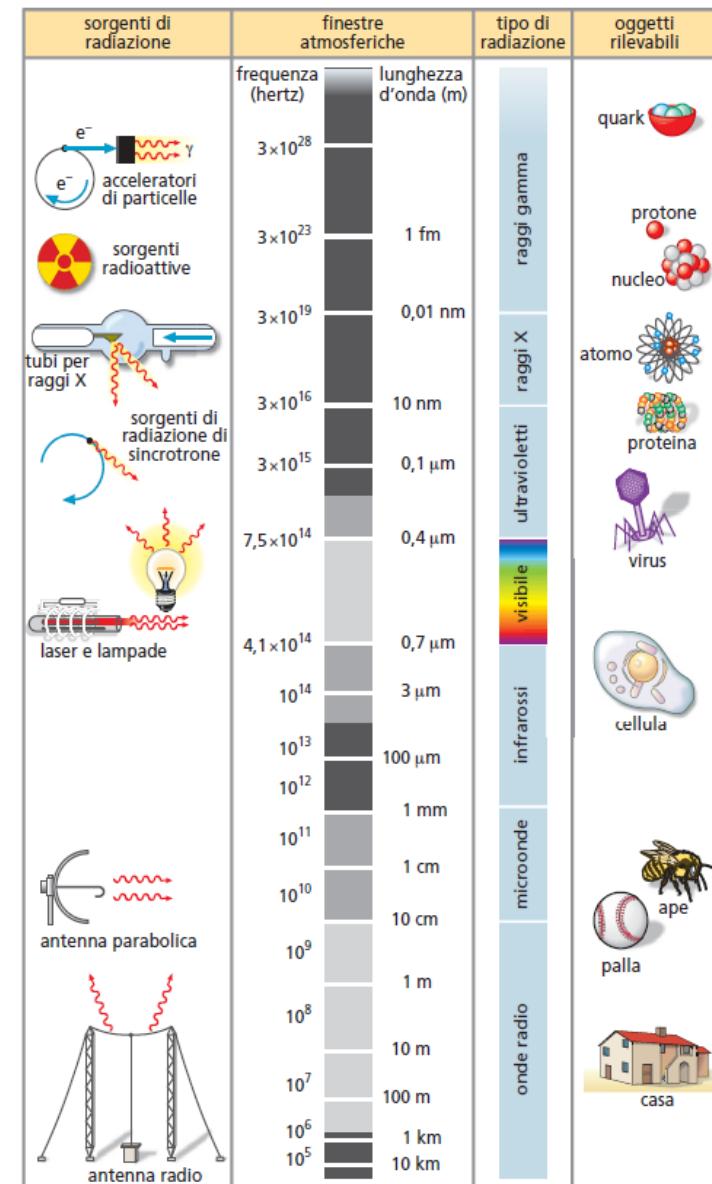
Si chiama **spettro elettromagnetico** l'insieme delle frequenze delle onde elettromagnetiche.

La figura a fianco riporta le principali proprietà dello spettro elettromagnetico. La colonna delle *finestre atmosferiche* indica qualitativamente quali radiazioni sono assorbite dall'atmosfera. Per esempio, l'atmosfera assorbe i raggi X e gamma che arrivano dallo spazio (striscia scura), impedendo che queste radiazioni danneggino la vita sulla Terra. È invece trasparente (striscia chiara) alla luce visibile e alle onde radio che provengono dal Sole e dalle stelle.

In un'onda periodica, la **lunghezza d'onda** (distanza tra due creste o due ventri dell'onda) è legata alla frequenza di un'onda elettromagnetica dalla relazione:

$$f\lambda = v$$

dove  $v$  è la velocità di propagazione dell'onda elettromagnetica, che nel vuoto è uguale alla velocità della luce  $c$ .



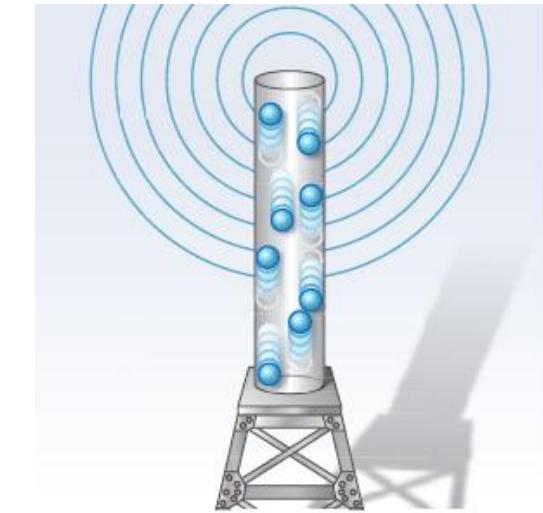
L'esistenza delle onde elettromagnetiche fu dimostrata **sperimentalmente** dal fisico tedesco **Heinrich Hertz** (1857-1894) quando nel 1888 riuscì a generare **onde radio** (un tipo di onda elettromagnetica) nelle quali campi elettrici variabili generano campi magnetici variabili e viceversa.

Un'**antenna trasmittente** è una struttura di metallo, lungo la quale gli elettroni vengono fatti oscillare avanti e indietro molto rapidamente (corrente alternata).

Il moto degli elettroni è guidato dalla tensione fornita da un apposito circuito oscillante, che determina la frequenza  $f$ .

Mentre gli elettroni oscillano di moto armonico, l'antenna emette un'onda elettromagnetica di frequenza  $f$  che si propaga nello spazio.

Gli elettroni nell'antenna ricevente (anch'essa metallica) si muovono sotto l'effetto dei due campi e creano una corrente che può essere captata e amplificata.



La possibilità di trasmettere e ricevere onde elettromagnetiche (in particolare radioonde e microonde) aprì nuove prospettive nel campo della comunicazione:

- telegrafo senza fili (Guglielmo Marconi)
- radio e televisione
- telefonia cellulare (WiFi e Bluethooth)
- comunicazioni via satellite

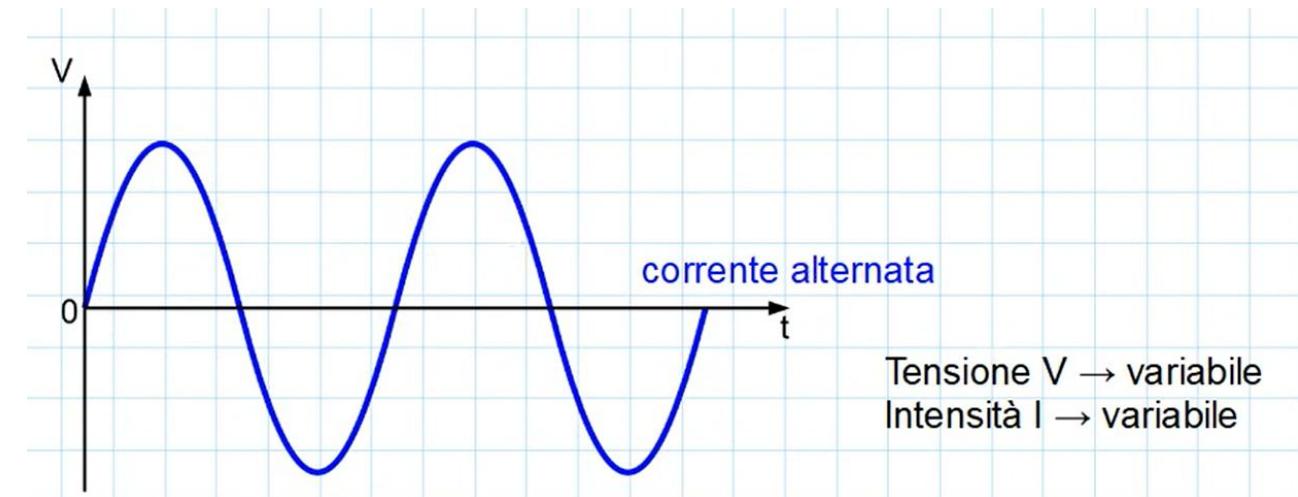
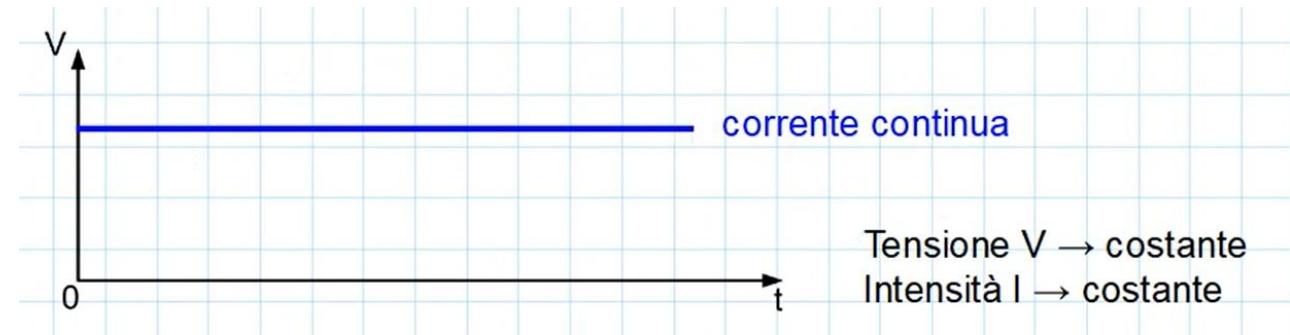
## Onde radio

La corrente prodotta dalle pile è continua: se rappresento su un grafico la variazione della tensione ai capi del filo rispetto al tempo, questa si mantiene costante.

Come conseguenza, anche l'intensità di corrente nel circuito si mantiene costante: gli elettroni si muovono conservando la stessa velocità, senza accelerazioni, e mantenendo la stessa direzione.

La corrente prodotta da un campo magnetico variabile (un magnete che gira su se stesso in prossimità di un avvolgimento di filo di rame) genera una corrente alternata. La tensione ai due capi del filo varia nel tempo (cresce, si annulla, si inverte).

Come conseguenza, anche l'intensità di corrente nel circuito è variabile: gli elettroni si muovono subendo accelerazioni e rallentamenti e invertendo la direzione di movimento (nella rete elettrica italiana cambiano direzione 50 volte in un secondo).



La corrente alternata produce onde radio: quando gli elettroni vengono bruscamente accelerati e frenati all'interno di un conduttore, l'oscillazione di campo produce una perturbazione che si propaga a distanza sotto forma di un'onda che ha lo stesso aspetto della forma d'onda di corrente alternata.

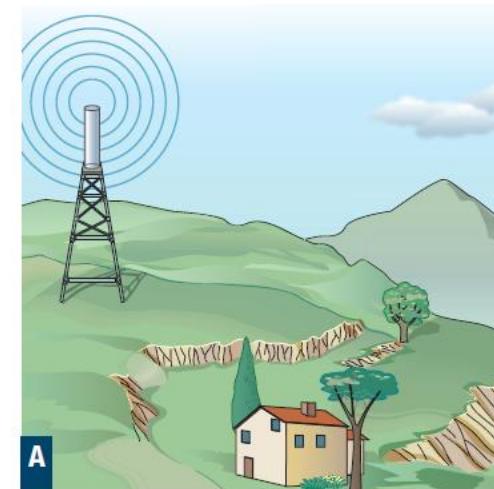
**L'onda radio** quindi non è altro che **una radiazione elettromagnetica generata da una corrente alternata**.

Le onde radio occupano la parte a bassa frequenza dello spettro, con **lunghezze d'onda comprese tra 10 km e 10 cm**.

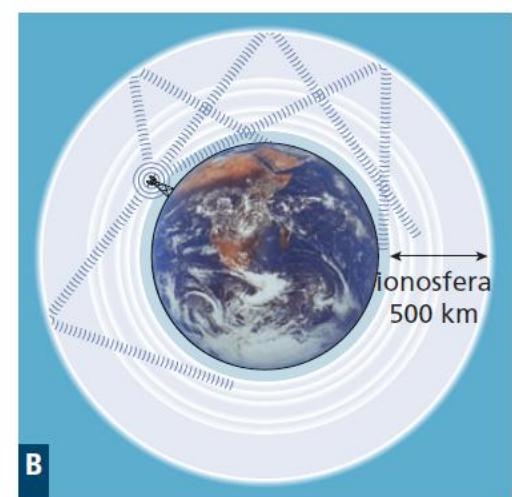
Per le trasmissioni radio si utilizzano diverse onde elettromagnetiche a seconda delle differenti esigenze.

Per esempio a lato:

Le onde medie hanno lunghezze d'onda attorno a 300 m. Grazie alla diffrazione, queste onde aggirano facilmente ostacoli piccoli come alberi e case. Sono invece fermate dalle montagne.

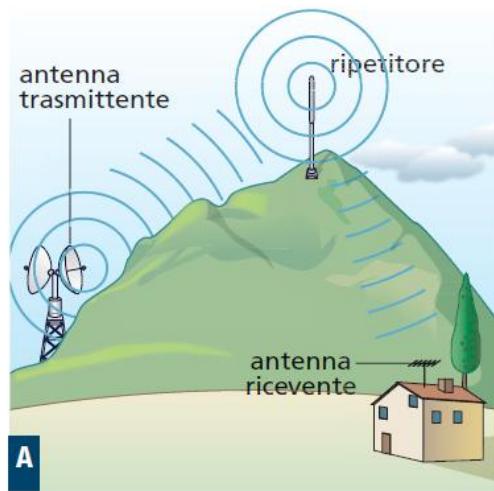


Per trasmissioni a lunga distanza sono usate onde radio con  $\lambda$  compresa tra 10 km e 30 m. Queste onde sono riflesse dagli strati ionizzati dell'atmosfera e possono così superare la curvatura terrestre.

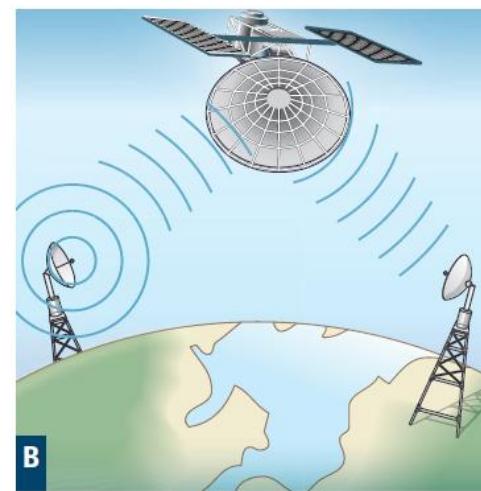


I segnali televisivi viaggiano su onde che hanno una lunghezza d'onda dell'ordine del metro. Esse possono essere bloccate facilmente anche da ostacoli di piccole dimensioni. Quindi, i segnali televisivi possono essere captati soltanto da antenne che "vedono" il trasmettitore.

Per fare in modo che il segnale televisivo possa essere visto ovunque (e anche per rinforzarlo), tra la stazione televisiva e gli utenti sono situati molti ripetitori, che ricevono il segnale e lo inviano di nuovo dopo averlo amplificato.



In alternativa, il segnale televisivo è inviato a un satellite in orbita, che lo amplifica e lo rimanda verso Terra. Poiché tutte le antenne riceventi "vedono" il satellite, non c'è bisogno di installare dei ripetitori.



Nella **telefonia mobile** vengono invece usate le microonde (lunghezze d'onda comprese fra 30 cm e 1 mm), in particolare le frequenze di 800, 1500, 2100, 2600 MHz (dove, ad esempio, a 2100 MHz la lunghezza d'onda è circa 14 cm).

# Il segnale

## Il segnale

Tutte le informazioni (i dati necessari a trasferire suoni, immagini, video, file, pagine web, ecc.) possono essere trmesse via cavo o via etere (aria) variando alcune proprietà fisiche delle onde elettromagnetiche:

- nel cavo (rete cablata), l'onda elettromagnetica è confinata all'interno o molto vicino al cavo e il segnale è una variazione di tensione/corrente che viaggia in un filo (o una luce nella fibra).
- nell'etere, l'onda si propaga liberamente nello spazio e il segnale è una variazione del campo elettromagnetico che si propaga nell'aria

Un **segnale** è una **variazione di una grandezza fisica** (come tensione elettrica, corrente, onde radio o luce) usata per **trasportare informazioni**.

*Esempi:*

Una **canzone** che ascolti in cuffia? → È una variazione di tensione elettrica che muove le membrane degli auricolari.

Un **video** su YouTube? → È una sequenza di segnali digitali che rappresentano immagini e suoni.

Una **telefonata in viva voce**? → È un segnale radio (via etere) che trasporta la tua voce trasformata in onde.

Tale variazione si propaga, con una certa velocità, lungo il mezzo di trasmissione e dopo un certo tempo arriva all'altra estremità del mezzo, dove può essere rilevata.

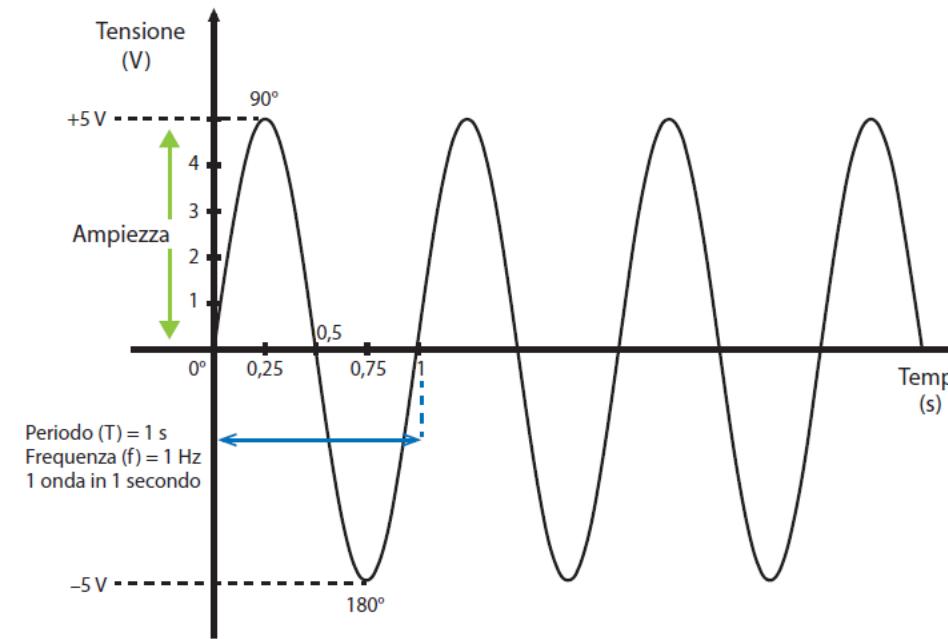
Per esempio, se il mezzo è un cavo elettrico, si può variare la tensione applicata a un'estremità. Tale variazione di tensione verrà successivamente rilevata all'altra estremità.

Qualunque sia il mezzo trasmittivo e il fenomeno fisico utilizzato, i segnali trasmessi possono essere di due tipi: **analogici e digitali**.

I **segnali analogici** possono assumere *un qualsiasi valore* all'interno di un determinato intervallo. Un segnale analogico **periodico**, cioè che si ripete ciclicamente nel tempo, è particolarmente adatto a trasportare i bit.

I segnali periodici più utilizzati sono quelli **sinusoidali**, che consentono di comporre e descrivere qualsiasi altro segnale periodico (teorema di Fourier).

Ogni segnale sinusoidale fa riferimento a una grandezza che varia nel tempo e che viene scelta per descrivere il segnale, per esempio una differenza di potenziale, un'intensità di corrente o un'intensità luminosa.

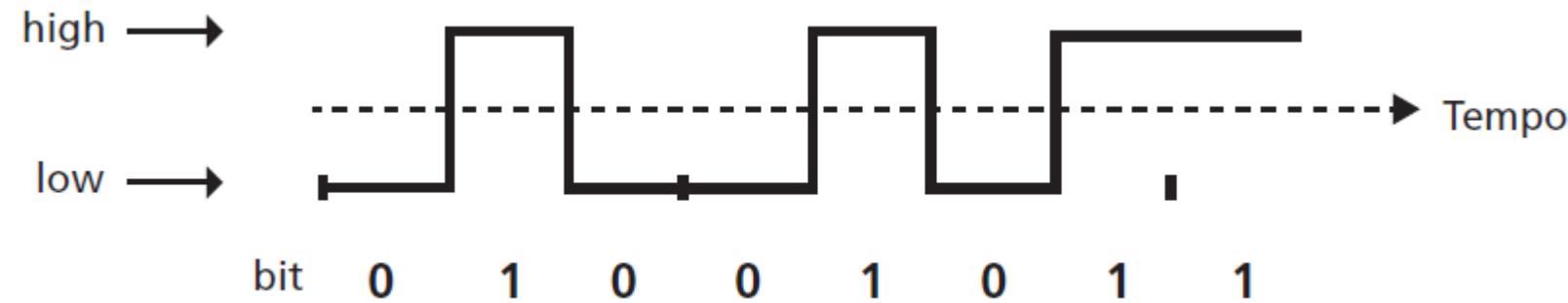


I **segnali digitali** hanno due caratteristiche che li distinguono dai segnali analogici:

- possono assumere solo un numero limitato di valori *discreti* (due nel caso di segnali **binari**)
- la transizione da un valore all'altro avviene in modo quasi istantaneo.

Un segnale digitale è rappresentato con un'onda rettangolare, che nel caso di segnali digitali binari è costituita da due possibili valori: uno alto (*high*), che rappresenta un 1, e uno basso (*low*), che rappresenta uno 0.

Un esempio di segnale digitale binario costituito da 8 bit (un byte):

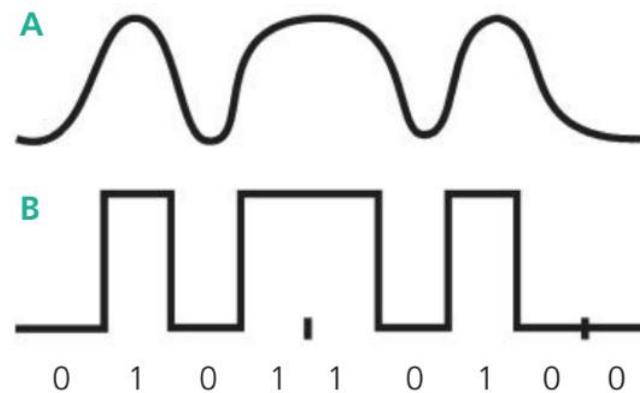


## Segnale digitale VS Segnale analogico

### MAGGIOR ROBUSTEZZA RISPETTO AL RUMORE

Rumore e disturbi, per quanto possano essere minimi, sono sempre presenti, sia nel trasmettitore, sia nel ricevitore, ma sono soprattutto presenti nel mezzo di comunicazione, sia esso un cavo o l'aria. I **segnali digitali** per loro natura sono **meno soggetti ai disturbi** rispetto ai segnali analogici.

- i segnali analogici sono costituiti da funzioni continue che possono assumere infiniti valori: il rumore inevitabilmente si sovrappone al segnale trasmesso e lo modifica rendendo difficile risalire al segnale originario
- i segnali digitali, invece, presentano solamente un numero finito di valori separati da un "salto" tra uno e l'altro, determinato dal superamento di una soglia. Se il rumore non ha ampiezza (e potenza) tale da determinare il superamento della soglia e quindi il salto tra due valori, allora il rumore non riesce ad alterare il segnale. Il destinatario, ricevendo un valore non ammissibile, (affetto da rumore e diverso da "low" e "high") provvederà a convertirlo nel valore accettabile più vicino, annullando l'effetto del disturbo (**autorigenerazione**).



Segnale digitale binario  
affetto da rumore

Segnale digitale binario  
autorigenerato

## Segnale digitale VS Segnale analogico

### MAGGIOR INTEGRAZIONE DEI SISTEMI DI TRASMISSIONE

La conversione in digitale di tutte le trasmissioni (audio, video, dati, testo, ecc.) rende ogni invio simile a tutti gli altri: un flusso di bit aperto da una intestazione (bit di *header* che specificano il tipo di informazioni trasmesse in ogni blocco) e chiuso da una coda (bit di *trailer* per marcare la fine del flusso trasmesso). Qualunque apparato dotato di connessione di rete è in grado di inviare e ricevere qualsiasi tipo di trasmissione digitale.

Anche la scelta del mezzo fisico (cavo, fibra, aria) e della tecnologia (elettrica, ottica, wireless) diventano irrilevanti, non influiscono, nella decodifica delle informazioni digitalizzate. I **flussi di bit**, raggruppati in byte e poi in pacchetti (*packet*) aventi regole precise, **uniformano le fasi di invio, trasferimento e ricezione**.

### MAGGIOR ADATTAMENTO A ESSERE ESEGUITI E MEMORIZZATI

Il linguaggio dei segnali digitali è lo stesso dei microprocessori: un linguaggio binario. Con le opportune interfacce, le sequenze di bit trasmesse possono facilmente essere lette ed eventualmente eseguite o memorizzate.

I dispositivi di memoria sono in grado di conservare grosse quantità di dati con l'utilizzo di tecniche digitali. La presenza di due soli stati fisici nei supporti di memoria, associati rispettivamente a 0 e 1, rende la **tecnologia** dei circuiti integrati **robusta e in grado di leggere e scrivere sempre più velocemente**.

## Segnale digitale VS Segnale analogico

### MAGGIORE ADATTABILITÀ A TECNICHE DI ELABORAZIONE DEL SEGNALE

Mentre l'elaborazione dei segnali analogici è generalmente limitata alle operazioni di amplificazione, di modulazione e di filtraggio, l'elaborazione dei segnali digitali può consentire operazioni complesse:

- **rilevazione e correzione degli errori:** nei sistemi digitali si possono realizzare circuiti e algoritmi per la rilevazione e la correzione degli errori in trasmissione.
- **crittografia:** con un sistema digitale l'informazione è codificata ed è quindi possibile adottare forme di crittografia per rendere incomprensibili, tranne che al destinatario, le informazioni trasmesse;
- **incapsulamento:** protezione dei dati in trasmissione con l'aggiunta di ulteriori header;
- **privacy:** i sistemi digitali consentono di modificare degli indirizzi privati dei mittenti e dei destinatari;
- **compressione:** è possibile ridurre la quantità di dati digitali da trasmettere, comprimendo opportunamente il segnale ed evitando di ripetere l'invio delle informazioni che si ripetono uguali (ad esempio le immagini in sequenza hanno spesso sfondi che restano a lungo invariati)

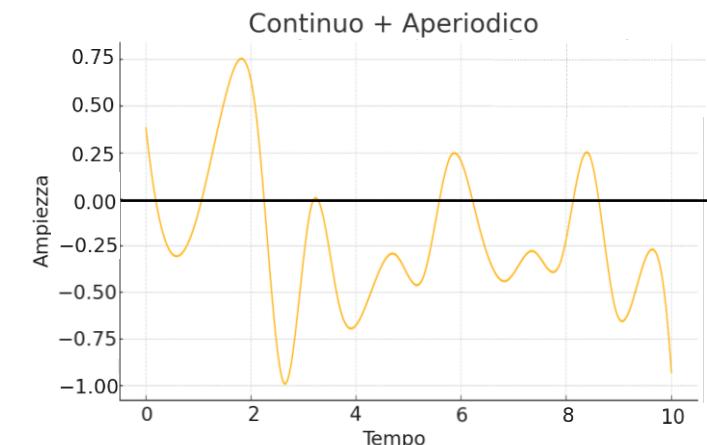
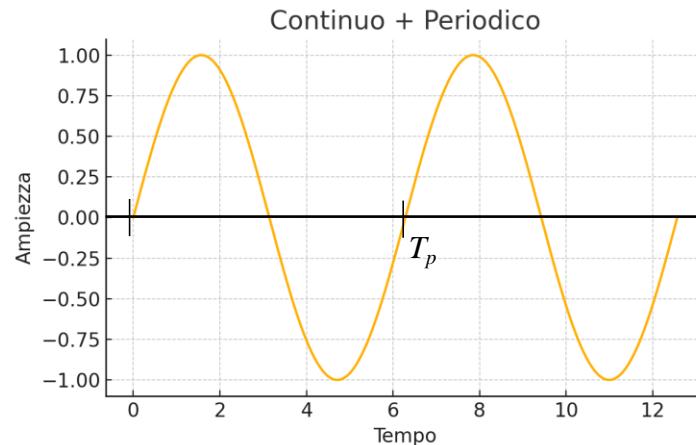
## Classificazione dei segnali

I segnali in via generale possono essere classificati come segue:

- periodici o aperiodici
- discreti o continui nel tempo
- discreti o continui nelle ampiezze

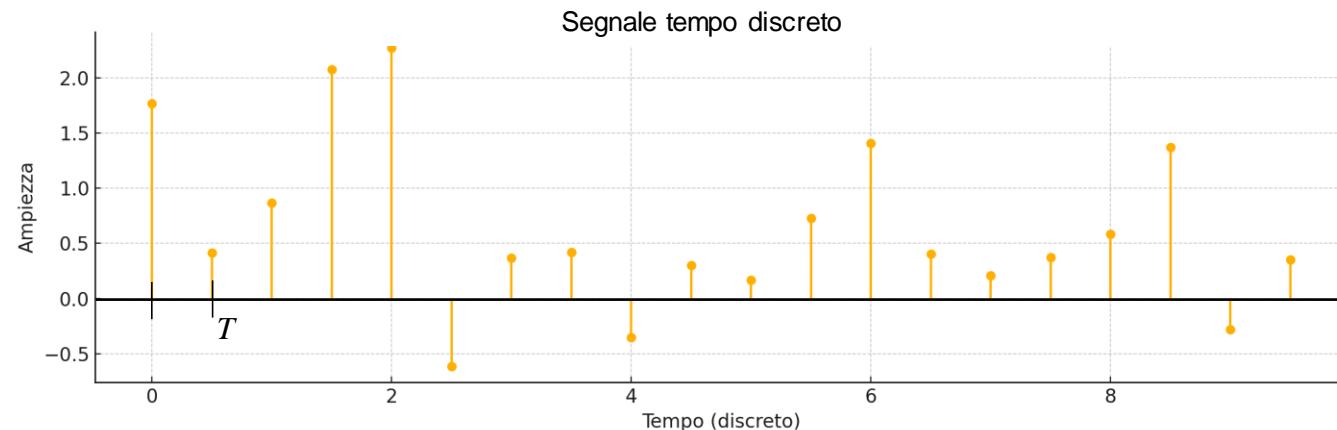
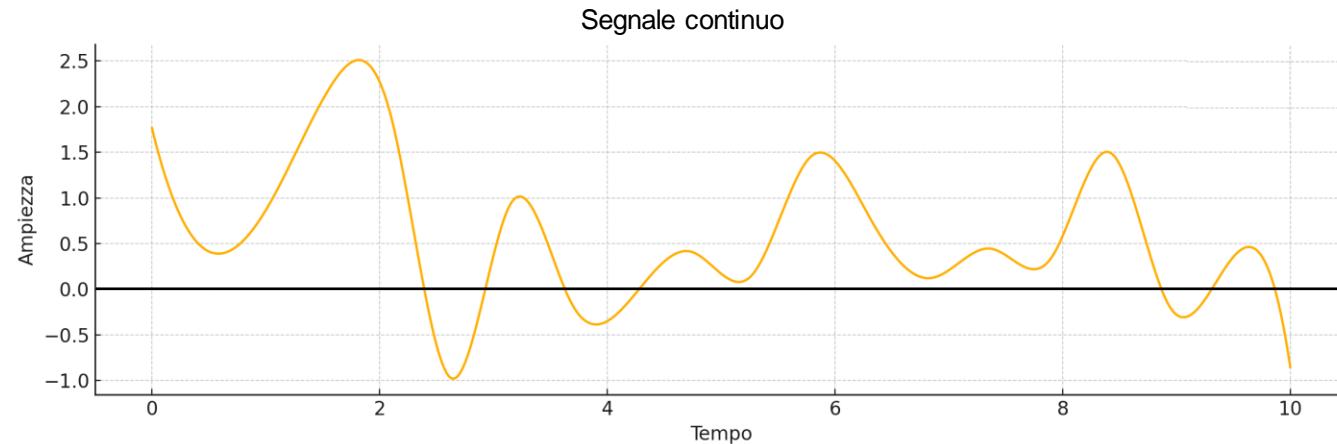
Un segnale a tempo continuo si dice **periodico** se esiste un numero reale  $T_p > 0$  detto periodo del segnale, tale che per ogni  $t \in \mathbb{R}$  si abbia:

$$s(t+T_p) = s(t)$$

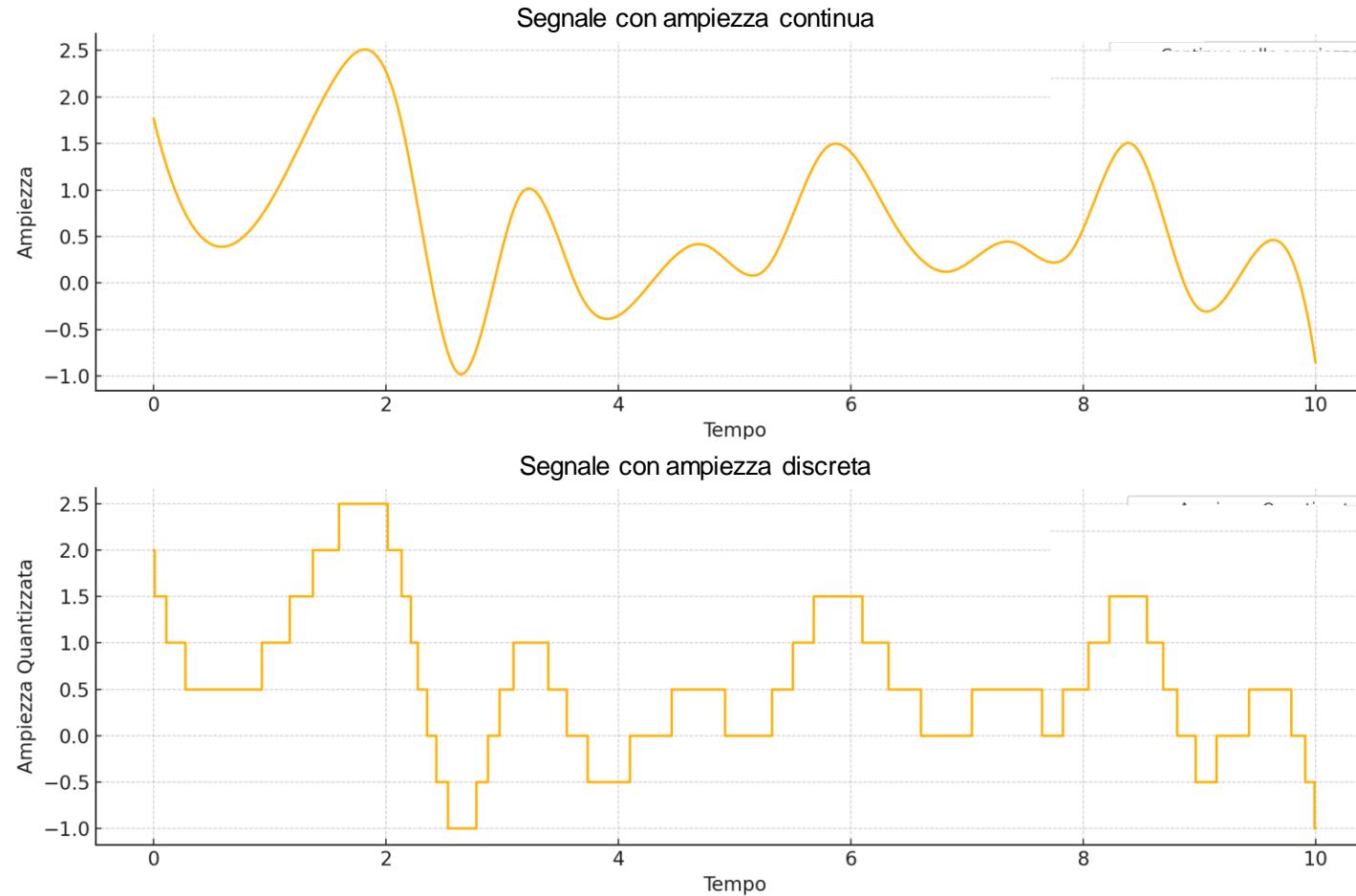


Un segnale si dice a **tempo discreto** se il suo dominio, anziché essere l'intero asse reale  $\mathbb{R}$ , è un suo sottoinsieme, costituito da istanti equispaziati di una medesima quantità  $T > 0$  chiamata **quanto temporale**:

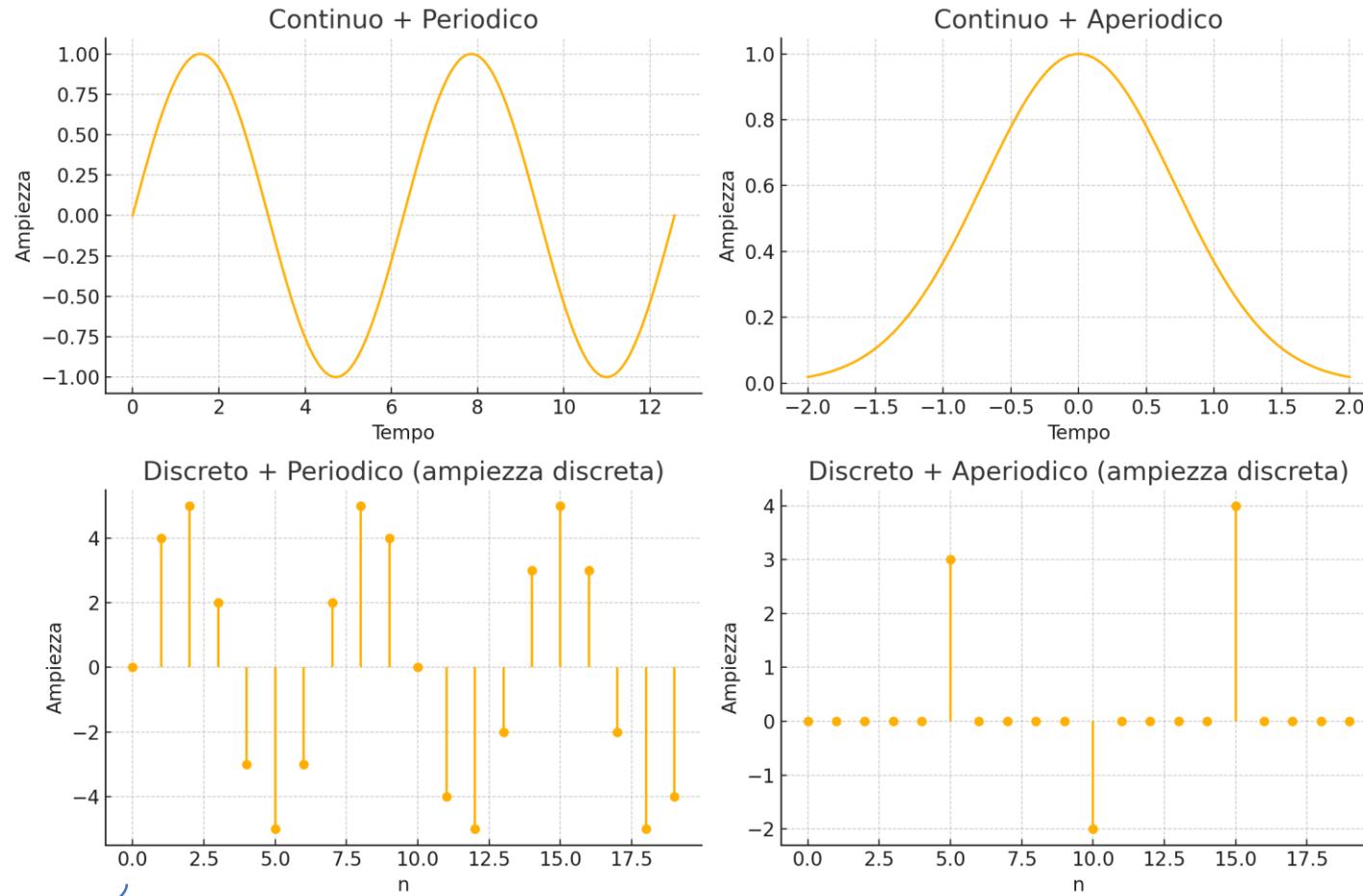
$s(t)$  con  $t \in \mathbb{Z}(T) = \{ nT \mid n \in \mathbb{Z} \} = \{ \dots, -2T, -T, 0, T, 2T, \dots \}$  dove  $\mathbb{Z}$  è l'insieme dei numeri interi



Un segnale si dice ad **ampiezza continua** se l'ampiezza assume valori in un insieme continuo ( $\mathbb{R}$  - campo dei reali - o  $\mathbb{C}$  – campo dei complessi - o loro sottoinsiemi non discreti), ad **ampiezza discreta** se l'ampiezza può assumere valori solo in un insieme finito o infinito ma numerabile (come l'insieme  $\mathbb{N}$  dei naturali):



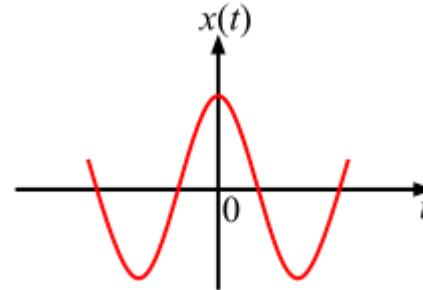
Posso poi avere delle combinazioni di queste caratteristiche, ad esempio:



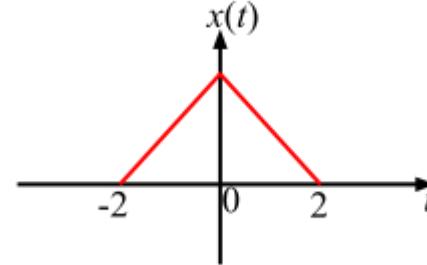
**Nota bene:** se il numero di campioni mostrati non corrisponde a un intero numero di periodi, la periodicità potrebbe non essere evidente, ma ciò non toglie che il segnale sia periodico

## Segnali pari e segnali dispari

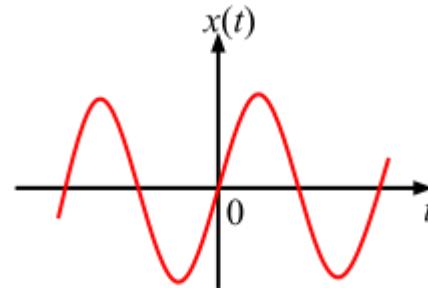
Una segnale e in generale una **funzione** si definisce **pari** se  $x(t) = x(-t)$  e quindi se assume valori simmetrici rispetto all'asse delle ordinate. Un classico esempio è la funzione coseno:



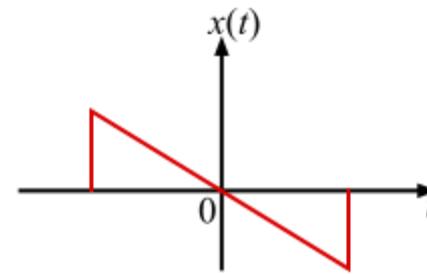
o un esempio diverso  
potrebbe essere:



Una segnale e in generale una **funzione** si definisce **dispari** se  $x(t) = -x(-t)$  e quindi se assume valori simmetrici rispetto all'origine. Un classico esempio è la funzione seno:



o un esempio diverso  
potrebbe essere:

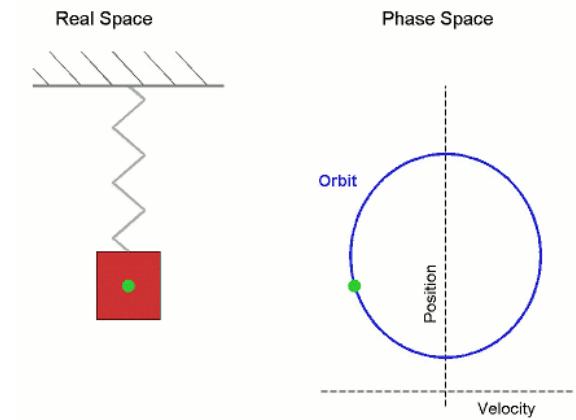
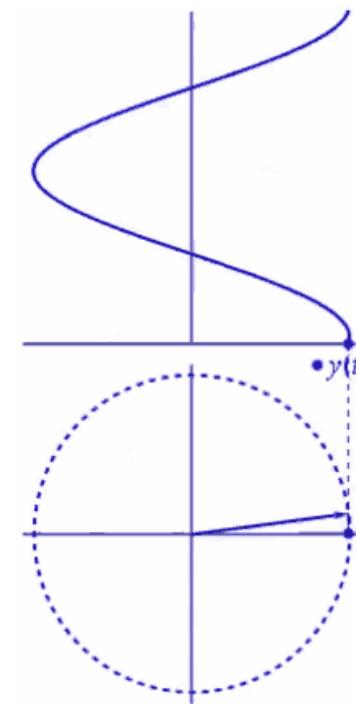
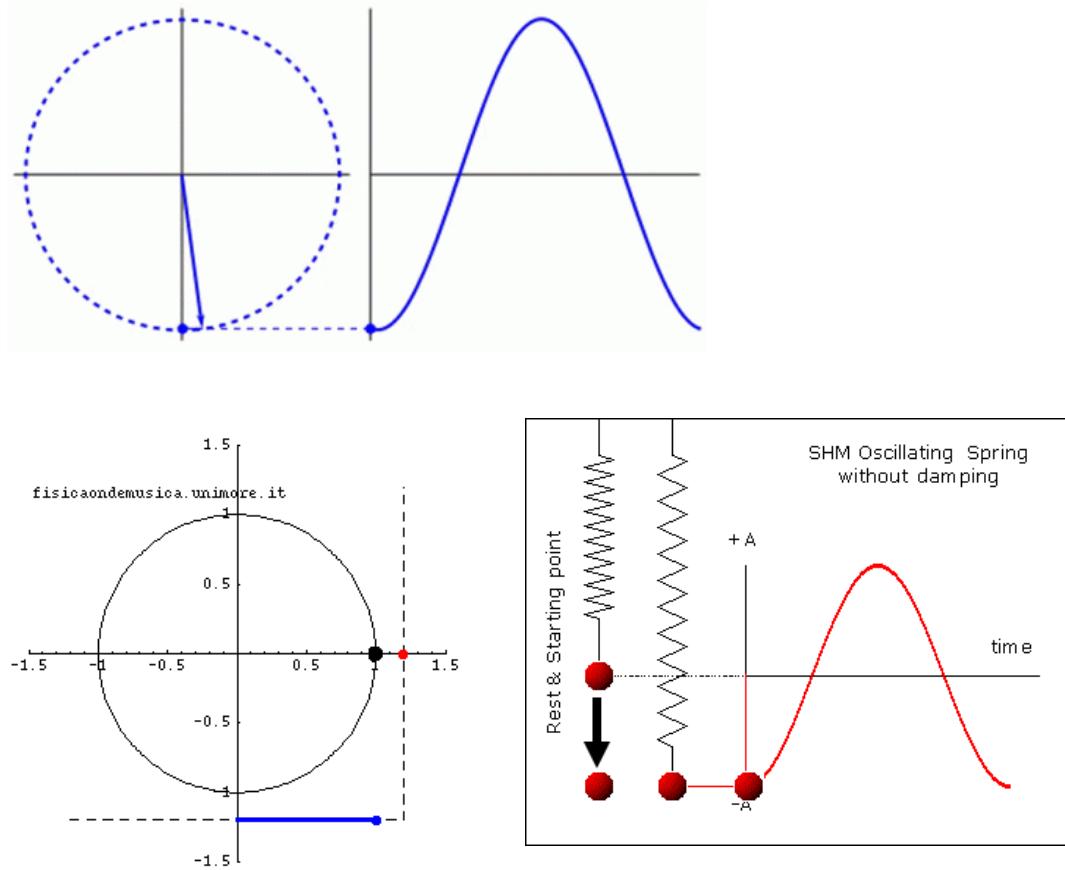


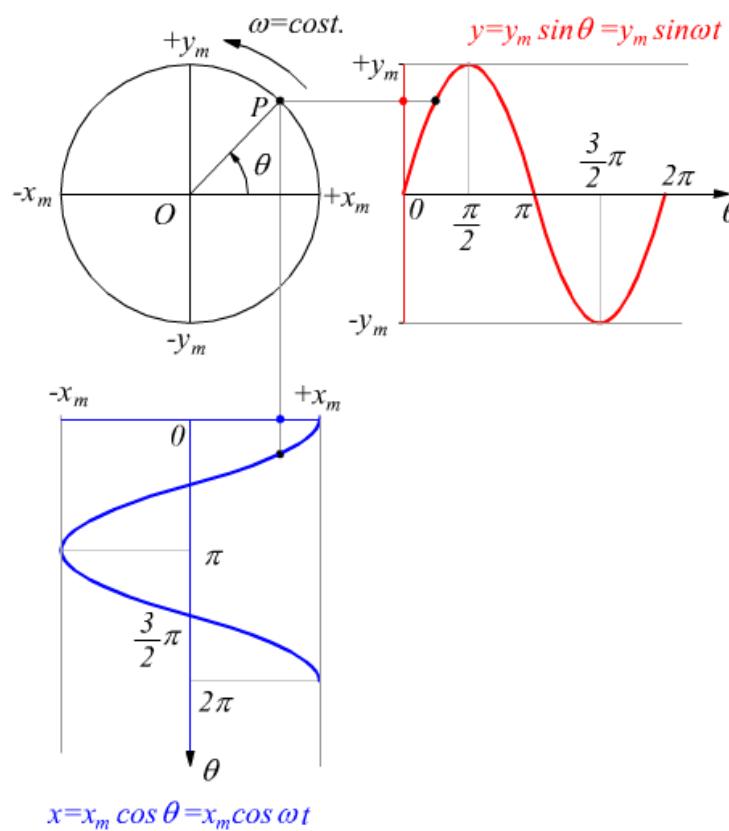
Nel caso non dovesse sussistere alcuna delle precedenti condizioni, diremo che a funzione considerata non è **né pari né dispari**.

## Segnali sinusoidali

Qualsiasi movimento che si ripeta ad intervalli regolari è chiamato **moto periodico**.

Il **moto armonico semplice** è una forma di moto periodico che ha la caratteristica di poter essere ricondotto alla proiezione lungo un asse di una particella che si muove di moto circolare uniforme.





Immaginiamo di proiettare la posizione della particella P, rotante lungo la circonferenza di centro O, sull'asse orizzontale x, osserveremo la proiezione oscillare avanti e indietro di una ugual distanza  $x_m$  a destra e a sinistra rispetto all'origine.

Il valore  $x_m$  ( $-x_m$ ) rappresenta, dunque, il valore massimo (minimo) dell'elongazione lungo l'asse x (**ampiezza**).

Se il punto materiale che percorre la circonferenza esegue un giro completo in un tempo T, allora **T** viene chiamato **periodo**, mentre  $f = 1/T$  viene chiamata **frequenza** e definisce il numero di giri che la particella esegue in un secondo.

Per percorrere un giro completo la particella deve coprire un angolo  $\theta=2\pi$  in un tempo di T secondi con **velocità angolare**  $\omega = \theta/T = 2\pi f$

La **legge oraria** che definisce la posizione lungo l'asse x sarà:

$$x(t) = x_m \cos(\omega t + \varphi)$$

mentre per la posizione lungo l'asse y:

$$y(t) = y_m \sin (\omega t + \varphi)$$

con  **$\varphi$  fase iniziale** (gradi della posizione di partenza)

Per descrivere un segnale sinusoidale periodico si utilizzano quindi tre parametri:

- **ampiezza**: la distanza tra il valore medio e quello massimo della grandezza scelta;
- **frequenza**: il numero di volte in cui si ripete il segnale in un secondo (viene misurata in hertz);
- **fase**: intervallo di tempo, espresso in gradi, tra l'inizio di un segnale sinusoidale e un tempo prefissato preso come riferimento. Ne deriva che lo **sfasamento** tra due segnali è l'intervallo di tempo, sempre espresso in gradi, che intercorre tra due segnali sinusoidali con la stessa frequenza.

*Esempio:*

I due segnali analogici rappresentati in figura hanno una differenza di fase di  $90^\circ$ . Il calcolo dello sfasamento tra due segnali con la stessa frequenza si ottiene tenendo conto che alla durata di un periodo  $T$ , corrispondono  $360^\circ$ , quindi si misura l'intervallo  $I$  e il periodo  $T$  sull'asse del tempo e successivamente si imposta la proporzione:  $I : T = \theta : 360^\circ$   
Risulta quindi che  $\theta = (360^\circ \cdot I) / T$  (espresso in gradi), dove  $\theta$  indica lo sfasamento.

Nell'esempio si ha quindi:

$$\theta = (360^\circ \cdot 0,25) / 1 = 90^\circ \text{ (il segnale rosso equivale al nero anticipato di } 90^\circ)$$

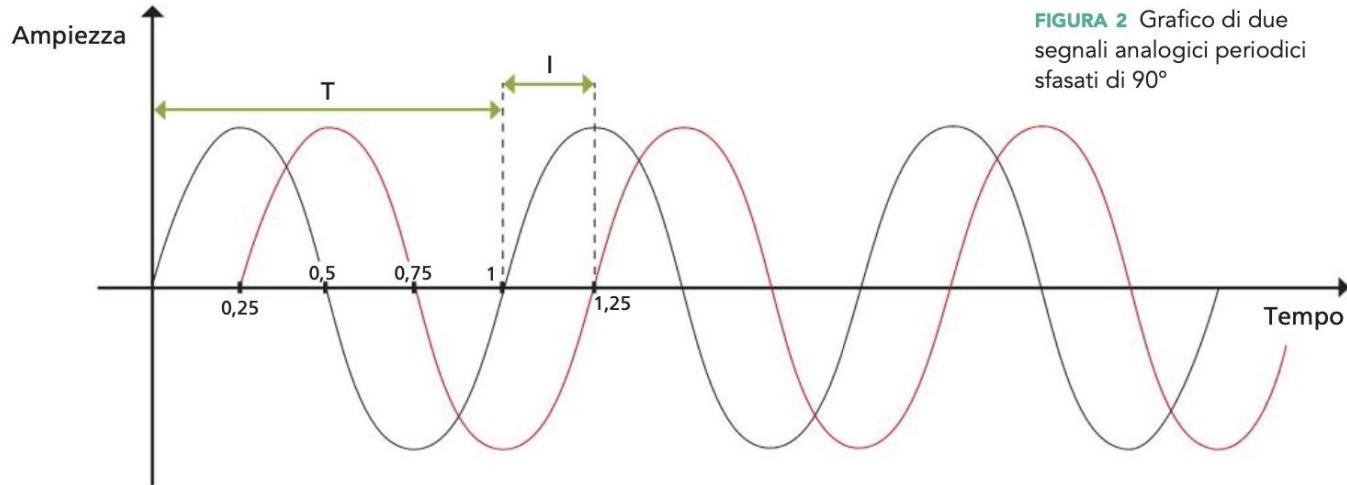


FIGURA 2 Grafico di due segnali analogici periodici sfasati di  $90^\circ$

## Analisi di Fourier

Molti segnali reali non sono semplici onde sinusoidali... sono più complessi, sembrano caotici, ma... e se ci fosse un modo per **scomporli** in onde semplici (come quando scomponiamo un numero in fattori primi, o una forza in componenti)?

Il matematico francese **Joseph Fourier**, nel 1807 ebbe un'intuizione geniale:

*qualunque funzione periodica sufficientemente regolare con periodo **T** (ad esempio un segnale sonoro, luminoso, di trasmissione ecc.) può essere ottenuta sommando un numero anche infinito di funzioni seno e coseno (serie trigonometrica) ciascuna con una certa frequenza, ampiezza e fase.* Ognuna di queste onde ha una frequenza ben precisa: la **fondamentale**, e poi i suoi **multipli**. Questi multipli si chiamano **armoniche**.

$$s(t) = \frac{1}{2}c + \sum_{n=1}^{\infty} a_n \sin(2\pi n f t) + \sum_{n=1}^{\infty} b_n \cos(2\pi n f t)$$

con:

$$a_n = \frac{2}{T} \int_0^T s(t) \sin(2\pi n f t) dt$$

dove  $f=1/T$  rappresenta la frequenza fondamentale,  
**a<sub>n</sub>** e **b<sub>n</sub>** sono le ampiezze di seno e coseno delle armoniche n-esime  
(che scalano l'ampiezza di seno e coseno che sarebbe 1)  
e **c** è una costante in grado di traslare il segnale di un offset positivo o negativo lungo l'asse delle ordinate

$$b_n = \frac{2}{T} \int_0^T s(t) \cos(2\pi n f t) dt$$

$$c = \frac{2}{T} \int_0^T s(t) dt$$

Si parla di sviluppo in **serie di Fourier** della funzione periodica  $s(t)$ .

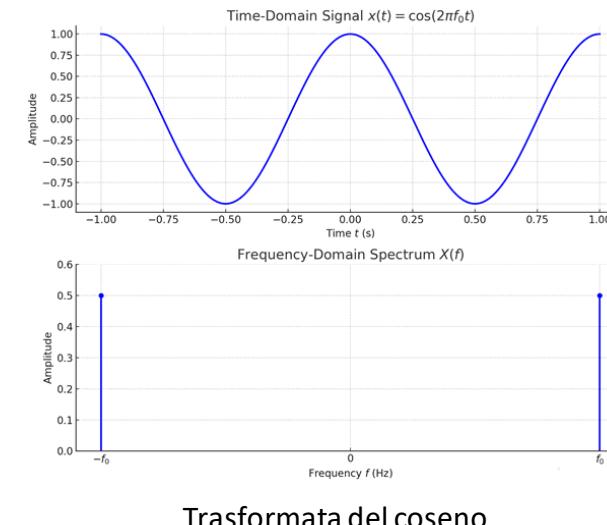
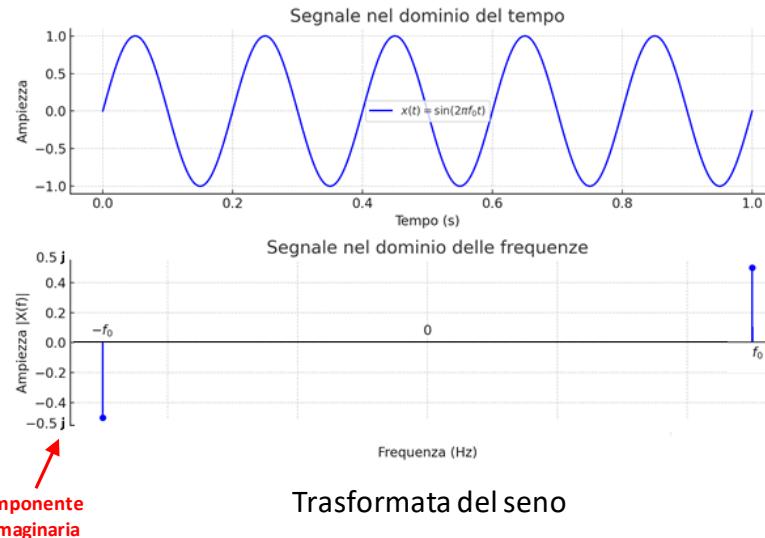
**OSSERVAZIONE 1:**

una **funzione reale pari** (come il coseno, dove  $s(t) = s(-t)$ ) ha una **serie di Fourier reale pari** del tipo:

$$s(t) = \frac{1}{2}c + \sum_{n=1}^{\infty} b_n \cos(2\pi n f t)$$

mentre una **funzione reale dispari** (come il seno, dove  $s(t) = -s(-t)$ ) ha una **serie di Fourier immaginaria dispari** del tipo:

$$s(t) = \sum_{n=1}^{\infty} a_n \sin(2\pi n f t)$$



**OSSERVAZIONE 2:**

Quando fai la **trasformata di Fourier** di un segnale (soprattutto se il segnale è reale), **ottieni componenti spettrali sia nel semipiano positivo che in quello negativo delle frequenze**.

Il motivo sta nel fatto che la sinusode in forma complessa, per la formula di Eulero, si può scrivere come:

$$e^{ix} = \cos x + i \sin x \quad \text{per ogni numero } x \text{ reale } (x \in \mathbb{R})$$

dove  $i$  è detta **unità immaginaria** ed è un numero complesso che soddisfa la proprietà:  $i^2 = -1$

La formula di Eulero permette anche di interpretare le funzioni seno e coseno come semplici varianti della funzione esponenziale:

$$\cos x = \frac{e^{ix} + e^{-ix}}{2} \quad \text{e} \quad \sin x = \frac{e^{ix} - e^{-ix}}{2i}$$

Dalla prima formula si deduce che il coseno è la parte reale di una sinusode scritta in forma complessa (mentre il seno è la parte immaginaria) e dalla seconda formula (facendo la sostituzione  $x=\omega t=2\pi f$ ) si deduce che questa parte reale è in realtà somma di due onde complesse:

- una che ruota in senso **orario** ( $e^{i\omega t}$  frequenza **positiva** dato che:  $e^{i\omega t} = e^{i2\pi(+f)t}$  )
- una che ruota in senso **antiorario** ( $e^{-i\omega t}$  frequenza **negativa** dato che:  $e^{-i\omega t} = e^{+i2\pi(-f)t}$  )

Una **sinusoide reale** nasce proprio dalla **somma di questi due movimenti opposti**, perfettamente bilanciati. Quando analizzi un segnale reale trovi **frequenze positive e negative** ma **non rappresentano fisicamente due segnali diversi**: sono la **conseguenza matematica** del fatto che hai usato esponenziali complessi per rappresentare **coseni e seni reali**.

Si è dimostrato quindi che la **frequenza reale positiva** ha anche la sua **gemella negativa**, con cui forma una cosenoide reale. Anche se nel mondo fisico lavoriamo con frequenze positive, nella matematica della trasformata di Fourier le **frequenze negative compaiono naturalmente**. Lo spettro ci mostra entrambe le componenti, ma nel mondo reale vediamo solo la **somma** (ed ecco perché l'ampiezza dello spettro di un coseno è dimezzata rispetto all'ampiezza del segnale nel tempo).

Se  $s(t)$  è **reale**, allora la sua trasformata  $S(\omega)$  ha la seguente proprietà:

$$S(-\omega) = S^*(\omega)$$

dove  $S^*(\omega)$  è il **complesso coniugato** di  $S(\omega)$  ovvero:

- la **parte reale è pari**:  $\Re\{S(-\omega)\} = \Re\{S(\omega)\}$
- la **parte immaginaria è dispari**:  $\Im\{S(-\omega)\} = -\Im\{S(\omega)\}$

e quindi:

- $|S(-f)| = |S(f)| \forall f \in R \Rightarrow$  il diagramma delle ampiezze sarà pari
- $\angle S(-f) = -\angle S(f) \forall f \in R \Rightarrow$  il diagramma delle fasi sarà dispari

cioè **lo spettro è simmetrico** rispetto all'asse  $\omega=0$  (asse delle ordinate), **a meno di un cambio di segno nella parte immaginaria** (nel caso in cui la funzione fosse dispari, come nel caso della funzione seno per esempio).

## Cosa cambia nei casi pratici?

### Se lavori con segnali reali:

- si mostrano solo le **frequenze positive**, perché le negative non aggiungono informazione
- ma **matematicamente** lo spettro è **completo** solo considerando entrambe

### Se lavori con segnali complessi:

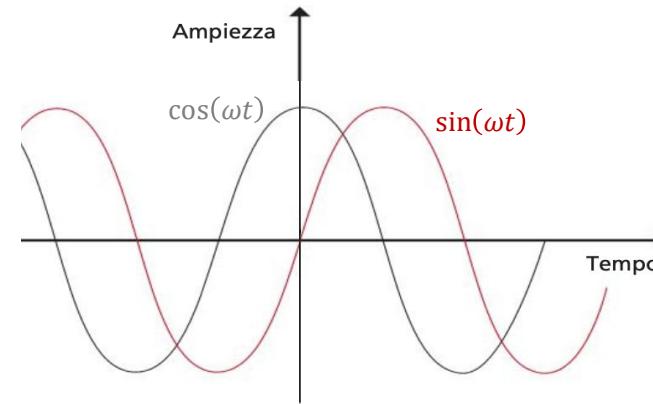
- frequenze positive e negative possono rappresentare **informazioni diverse**
- usato, ad esempio, nell'elaborazione di segnali complessi, nei radar etc.

**Per analizzare lo spettro di un segnale periodico** seguo alcune **regole e convenzioni pratiche**:

- l'angolo di fase è misurato rispetto al coseno, pertanto le eventuali componenti seno devono essere **convertite in coseno** ritardato di 90°:

$$\sin(\omega t) = \cos(\omega t - 90^\circ)$$

dai grafici a fianco si può notare come il seno sia un coseno in ritardo (parte dopo) di  $\frac{1}{4}$  di periodo,  $T/4$  ovvero  $2\pi/4 = \pi/2 = 90^\circ$   
 (allo stesso modo potremmo dire che il coseno è un seno in anticipo di  $\frac{1}{4}$  di periodo)



- l'**ampiezza A del coseno deve essere positiva**. Le eventuali ampiezze  $-A\cos(\omega t)$  devono essere trasformate in  $A\cos(\omega t \pm 180^\circ)$ :

$$-A\cos(\omega t) = A\cos(\omega t \pm 180^\circ)$$

dove la scelta +180° o -180° è indifferente

- l'**argomento (angolo) del coseno** deve essere **indicato sulla base di  $2\pi$**  (ovvero se avessi una fase di 380°, dovrebbe essere sostituita con 20°, che è equivalente ragionando in modulo  $2\pi = 360$ ). Questo permette di rappresentare lo spettro delle ampiezze e delle fasi.

**Esercizio 1:**

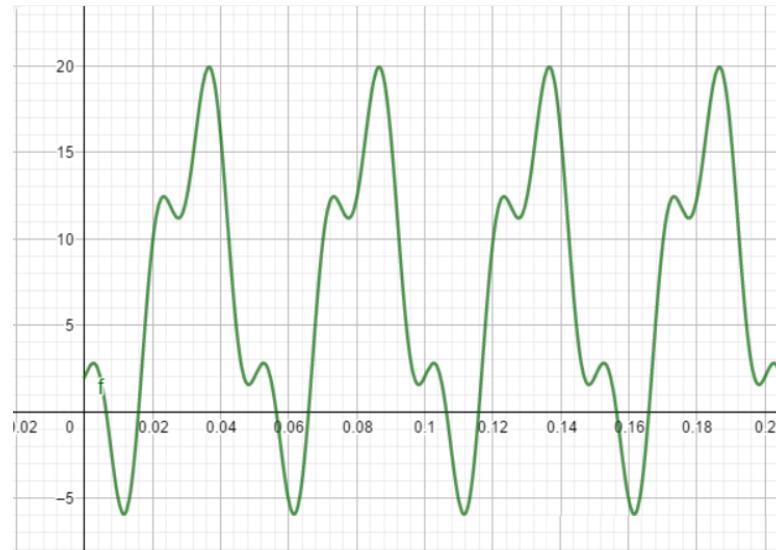
Ho il seguente segnale:

$$s(t) = 7 - 10\cos(40\pi t - 60^\circ) + 4\sin 120\pi t$$

Il mio obiettivo è portarlo il più possibile nella forma vista per la serie di Fourier per cui:

- trasformo le costanti in termini di frequenza zero:  $s(t) = 7\cos 2\pi 0t - 10\cos(40\pi t - 60^\circ) + 4\sin 120\pi t$
- converto l'ampiezza negativa in positiva aggiungendo  $+180^\circ$ :  $s(t) = 7\cos 2\pi 0t + 10\cos(40\pi t - 60^\circ + 180^\circ) + 4\sin 120\pi t$   
 $s(t) = 7\cos 2\pi 0t + 10\cos(40\pi t + 120^\circ) + 4\sin 120\pi t$
- trasformo il seno in coseno riducendo l'argomento di  $-90^\circ$ :  $s(t) = 7\cos 2\pi 0t + 10\cos(40\pi t + 120^\circ) + 4\cos(120\pi t - 90^\circ)$
- trasformo gli argomenti in  $2\pi$ :  $s(t) = 7\cos 2\pi 0t + 10\cos(2\pi \cdot 20 \cdot t + 120^\circ) + 4\cos(2\pi \cdot 60 \cdot t - 90^\circ)$

La forma d'onda del segnale nel dominio del tempo è la seguente:



l'onda ha:

- frequenza di 20Hz (periodo  $T = 1/20 = 0,05$  sec) in linea con il fatto che tutte le componenti di  $g(t)$  sono armoniche multiple di 20Hz (che è quindi la frequenza fondamentale)
- offset di +7 determinato dalla costante iniziale (che scosta la media del segnale dall'asse delle ascisse)

L'analisi dello spettro di frequenze parte dalla forma:

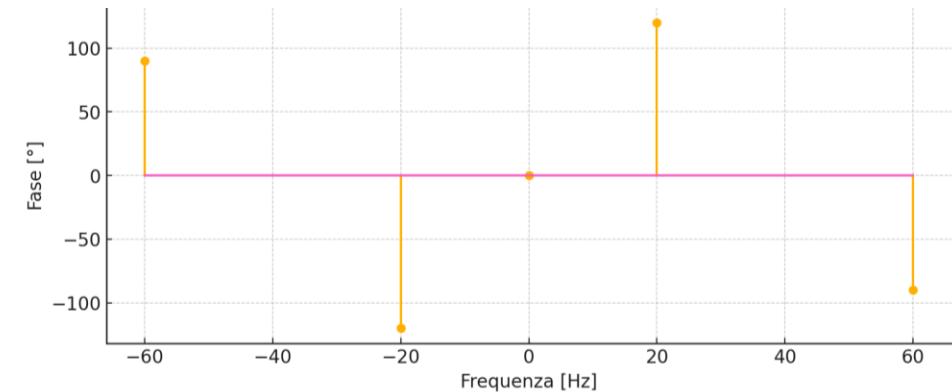
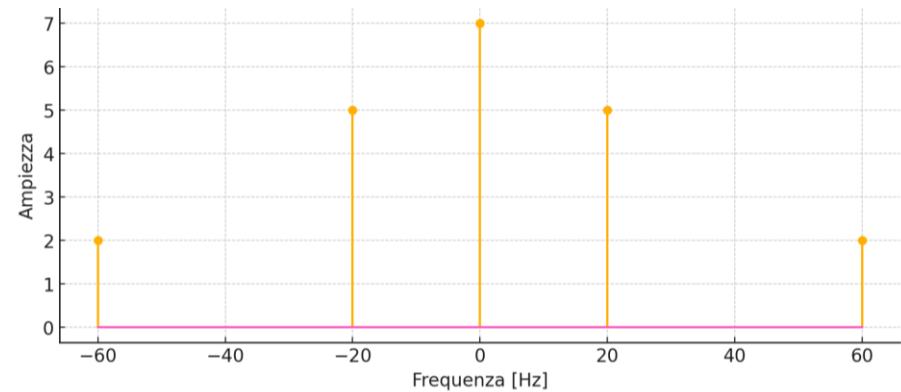
$$s(t) = 7\cos(2\pi \cdot 0 \cdot t) + 10\cos(2\pi \cdot 20 \cdot t + 120^\circ) + 4\cos(2\pi \cdot 60 \cdot t - 90^\circ)$$

e da questa posso associare le ampiezze (7, 10, 4) delle componenti del segnale alle relative frequenze (0, 20, 60). Questo mi permette di rappresentare lo spettro delle frequenze rispetto all'ampiezza e alla fase.

Vediamo subito che, **essendo  $s(t)$  reale**, per quanto visto in slide 34, **la sua trasformata di Fourier  $S(f)$  soddisfa la relazione  $S(-f)=S^*(f)$**  dove  $S^*(f)$  è il complesso coniugato di  $S(f)$  per cui:

- $|S(-f)| = |S(f)| \forall f \in R$  e quindi il diagramma delle ampiezze sarà pari (simmetrico rispetto l'asse delle ordinate);
- $\angle S(-f) = -\angle S(f) \forall f \in R$  e quindi quello delle fasi sarà dispari (simmetrico rispetto all'origine)

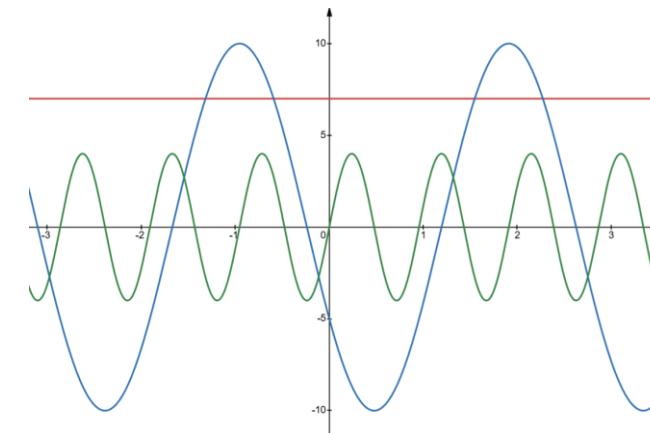
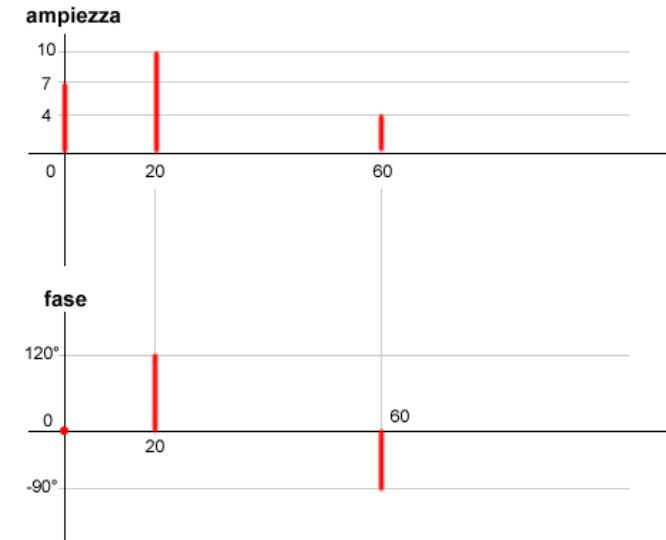
Come sappiamo, le ampiezze nello spettro saranno dimezzate, distribuite tra semipiano positivo e speculare negativo per cui le ampiezze saranno (7, 5, 2); la componente costante  $7\cos(2\pi \cdot 0 \cdot t)$  (con  $f=0$ ) non sarà dimezzata in quanto non ha una speculare nel semipiano negativo.



Per **convenzione** poi, con **segnali reali**, dato che lo spettro delle ampiezze è pari (e quindi è speculare a quanto rappresentato nel semipiano positivo) e quello delle fasi dispari, **si rappresenta solo il semipiano positivo dello spettro** facendo attenzione di rappresentare in questo caso l'**ampiezza complessiva** delle componenti (7,10,4) e **non quella dimezzata** (7, 5, 2).

È possibile ovviamente anche partire dallo spettro e ricostruire la forma d'onda nel tempo sommando tra loro le 3 componenti cosinusoidali rappresentate di fianco a partire dalle informazioni dello spettro:

- una **costante** di ampiezza 7 (segnalet a frequenza 0)
- un **coseno** ritardato di  $120^\circ = T/3$ , ampiezza 10, frequenza 20Hz
- un **coseno** anticipato di  $90^\circ = T/4$ , ampiezza 4 e frequenza 60Hz

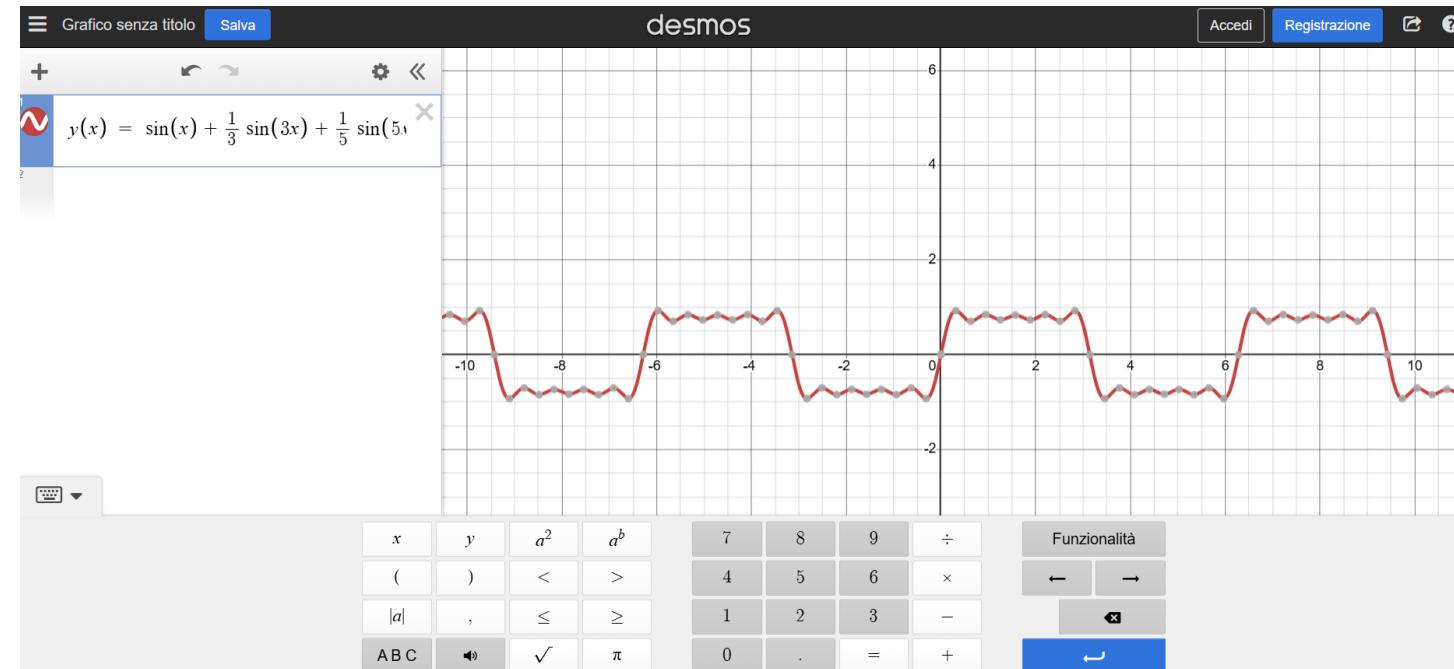


**Esercizio 2:**

possiamo provare a costruire un'onda quadra sommando diversi seni con frequenze multiple. Man mano che aggiungiamo armoniche, la forma si avvicina sempre di più a un'onda quadra.

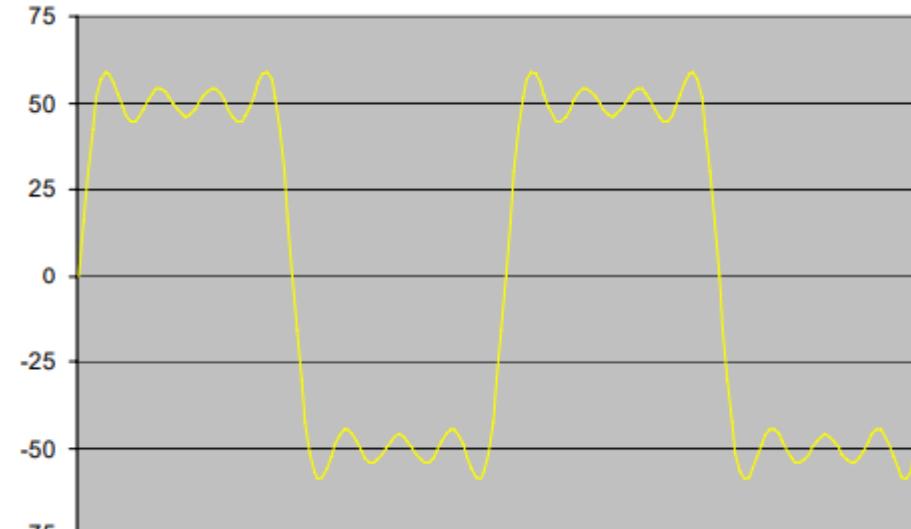
Proviamo a visualizzarlo con piattaforme come Desmos (<https://www.desmos.com/calculator?lang=it>) o GeoGebra:

$$y(x) = \sin(x) + \frac{1}{3} \sin(3x) + \frac{1}{5} \sin(5x) + \frac{1}{7} \sin(7x) + \frac{1}{9} \sin(9x)$$

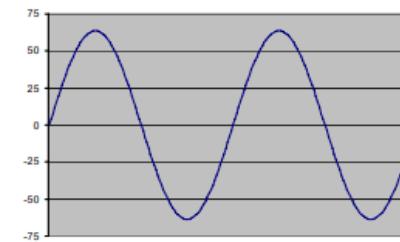
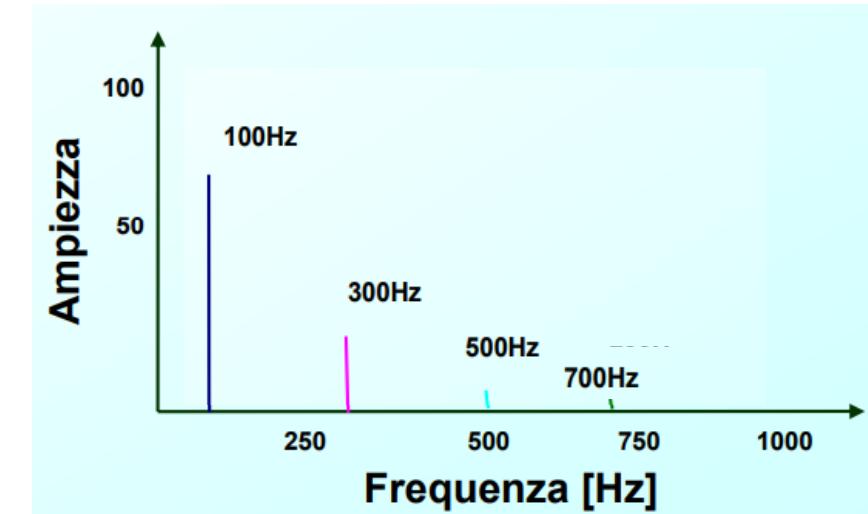


Lo spettro è la somma degli spettri dei sinusoidi che compongono l'onda. Il segnale è una somma di sinusoidi di frequenza multiple intere della frequenza del segnale ( $f_0$ ).

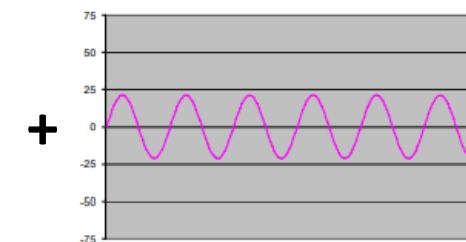
Il segnale



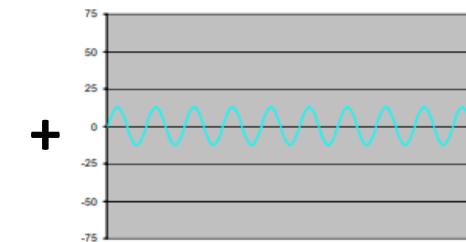
$$f_0 = 100\text{Hz}$$



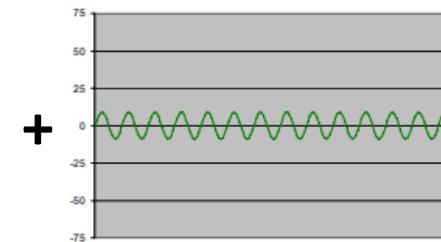
$$f = 100\text{Hz}, A = 64$$



$$f = 300\text{Hz}, A = 21$$



$$f = 500\text{Hz}, A = 6$$

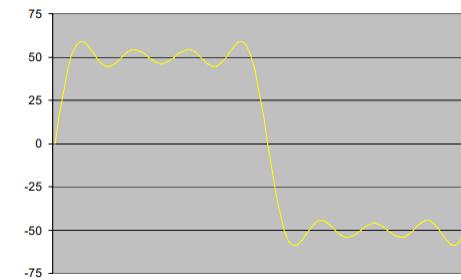
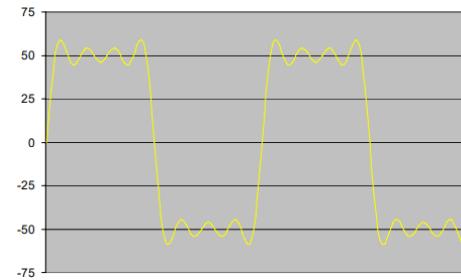
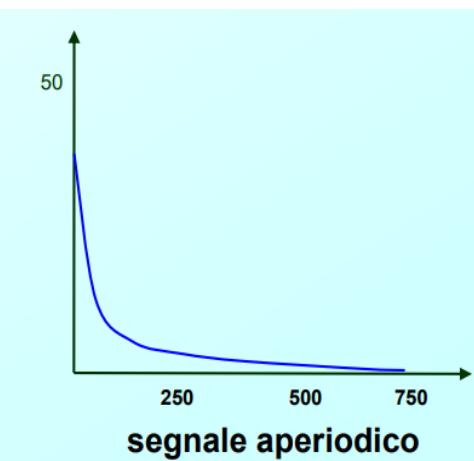
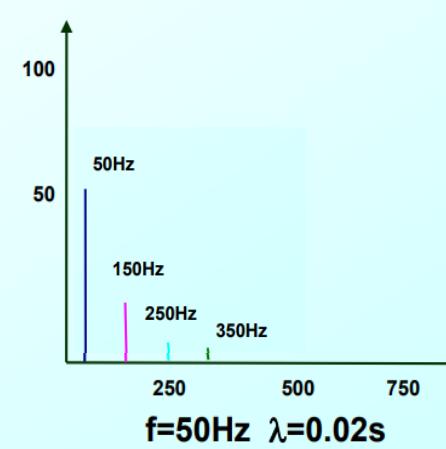
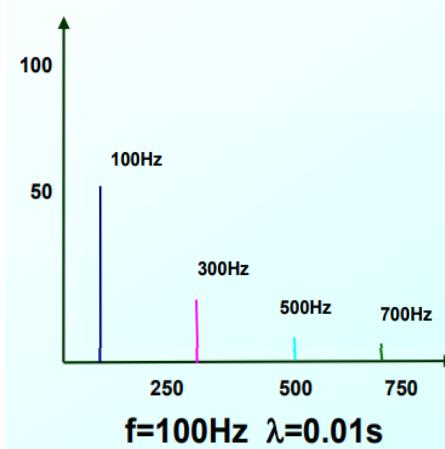


$$f = 700\text{Hz}, A = 4$$

**OSSERVAZIONE 3:**

Aumentando la lunghezza d'onda di un segnale (il suo periodo), quindi diminuendo la sua frequenza, le barre dello spettro tendono a spostarsi verso l'origine degli assi ed ad avvicinarsi le une alle altre. Intuitivamente, possiamo immaginare che se la lunghezza d'onda diventa infinita (ossia il segnale si ripete in un periodo infinito: è **non-periodico**), le barre dello **spettro si fondono in una linea continua**.

Il segnale



Esiste allora una forma di **dualità**:

### Periodicità $\leftrightarrow$ Discrezione

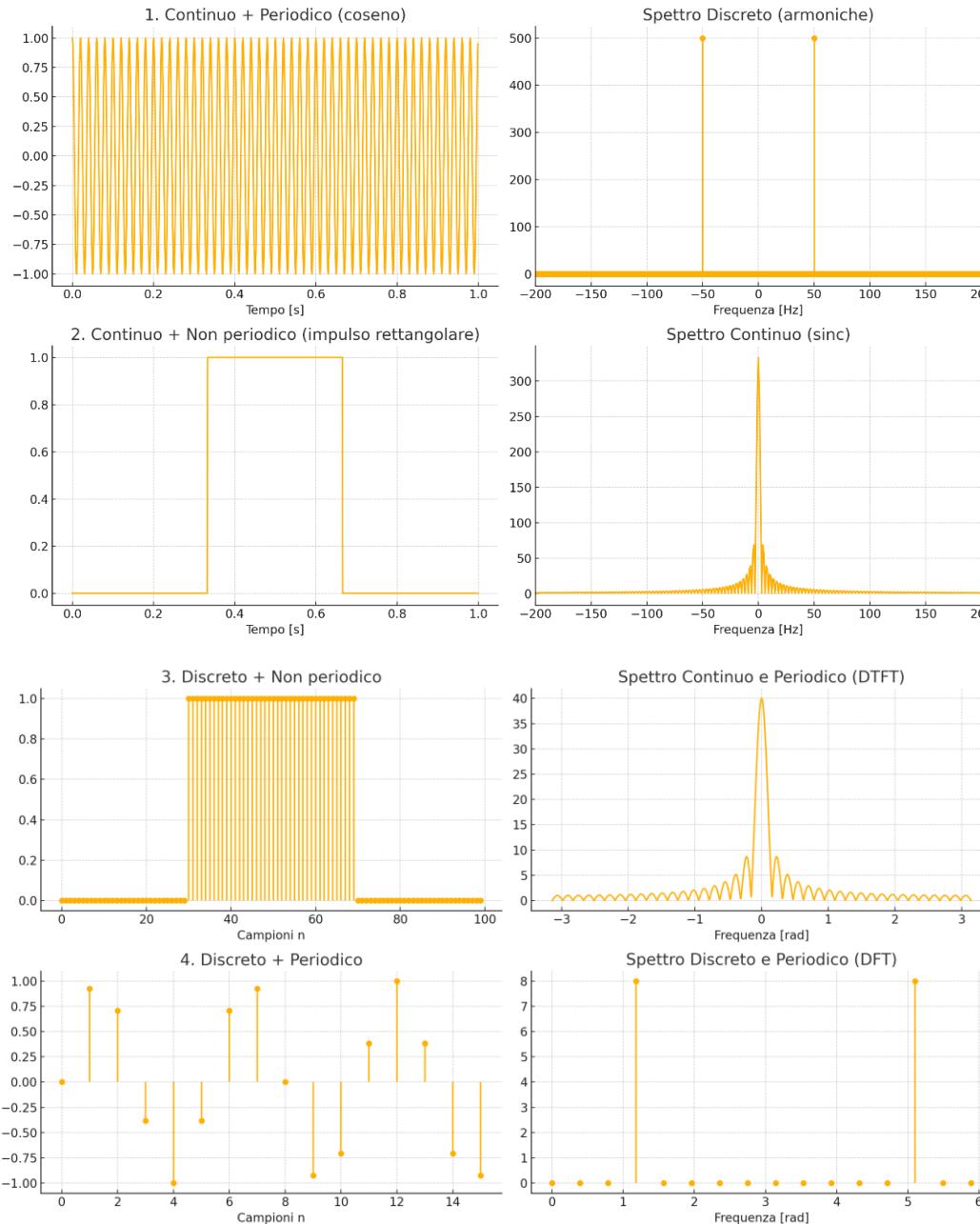
Se il segnale è periodico in un dominio, è discreto nell'altro:

- se un segnale è **periodico nel tempo**, la sua trasformata è **discreta** in frequenza (spettro è composto da **frequenze discrete**, cioè **una serie di impulsi (delta)**)
- se un segnale **non è periodico nel tempo**, allora ha **infinità di frequenze**, distribuite in modo **continuo** nello spettro.
- se un segnale è **discreto nel tempo**, la sua trasformata è **periodica** in frequenza (è il caso della DFT, *Discrete Fourier Transform*)

Tempo	Spettro
Periodico	Discreto
Non periodico	Continuo
Discreto	Periodico
Continuo	Non periodico

da cui:

Tempo	Spettro
Continuo + periodico	Discreto (Serie di Fourier)
Continuo + non periodico	Continuo (Trasformata di Fourier)
Discreto + non periodico	Continuo e periodico (DTFT, <i>Discrete Time Fourier Transform</i> )
Discreto + periodico	Discreto e periodico (DFT, <i>Discrete Fourier Transform</i> /FFT, <i>Fast Fourier Transform</i> )



Tempo	Spettro
Continuo + periodico	Discreto (Serie di Fourier)
Continuo + non periodico	Continuo (Trasformata di Fourier)
Discreto + non periodico	Continuo e periodico (DTFT, <i>Discrete Time Fourier Transform</i> )
Discreto + periodico	Discreto e periodico (DFT, <i>Discrete Fourier Transform/FFT, Fast Fourier Transform</i> )

### Nota sugli spettri dei segnali tempo discreti:

- Il grafico della DTFT convenzionalmente mostra un solo periodo. Se allargassimo l'asse delle frequenze, vedremmo che il pattern si ripete ogni  $2\pi$ ;
- il grafico della DFT per convenzione standard mostra le frequenze da 0 a  $2\pi$ : la DFT calcola solo un periodo, ma matematicamente lo spettro si ripete all'infinito

Il passaggio dalla descrizione di un segnale (inteso come fenomeno periodico) dal punto di vista del suo andamento temporale alla sua descrizione dal punto di vista della decomposizione in somma di armoniche, viene spesso chiamato **passaggio dal dominio dei tempi al dominio delle frequenze**.

Pochi ne sono consapevoli ma la trasformata di Fourier é usata di continuo in decine di campi a prima vista inconciliabili tra loro, come ad esempio l'elettronica, la musica, la medicina, la fisica, la chimica . . . Per calcolare una trasformata basta infatti ascoltare. L'orecchio esegue automaticamente un calcolo che il nostro intelletto puó effettuare solo dopo anni di studio della matematica. Usate il cellulare? Guardate la tv? Ascoltate musica? Allora questa formula (in realtà è piú corretto parlare di una coppia di formule) merita di essere compresa, almeno nelle sue basi piú semplici e "pratiche" e nella sua **definizione generale (senza il vincolo della periodicità del segnale)** ha la seguente formulazione:

**Trasformata di Fourier**

$$S(f) = \int_{-\infty}^{+\infty} s(t) e^{-i2\pi f t} dt \quad f \in \mathbb{R}$$

**Anttrasformata di Fourier**

$$s(t) = \int_{-\infty}^{+\infty} S(f) e^{i2\pi f t} df \quad t \in \mathbb{R}$$

La **trasformata di Fourier consente di scomporre un'onda qualsiasi**, anche molto complessa e "rumorosa" (un segnale telefonico o televisivo, la musica, la voce) in un **continuo di più sotto-componenti sinusoidali** (non più frequenze discrete come nella serie, bensì un continuo di frequenze).

**Perché nella serie di Fourier le armoniche sono multipli della frequenza fondamentale?**

Un segnale **periodico** è una funzione  $s(t)$  che **si ripete identica ogni T secondi**.

$$s(t) = s(t+T) \quad \forall t \in R$$

La **frequenza fondamentale** è:

$$f_0 = \frac{1}{T}$$

Questa è la **frequenza più bassa** che “sta bene” con la periodicità del segnale.

Fourier vuole **ricostruire**  $s(t)$  usando **onde sinusoidali** (seni e coseni).

Ma **quali** sinusoidi possiamo usare per essere sicuri che la somma risultante sia **anch'essa periodica con periodo T?**  
**solo quelle con periodo compatibile**, cioè:

$$\text{periodo: } \frac{T}{n} \qquad \text{ovvero frequenza: } nf_0$$

Quindi Fourier può usare solo multipli interi della fondamentale:  $2f_0, 3f_0, 4f_0, 5f_0$ , etc.

Nella pratica, se una corda di chitarra vibra a 100 Hz, **automaticamente produce** vibrazioni anche a 200 Hz, 300 Hz, 400 Hz... → **armoniche**.

La **trasformata di Fourier** (non la **serie**) si applica anche a **segnali non periodici**. In quel caso, le frequenze **non** devono essere multipli di nulla: possono essere **continue**. Parliamo allora di **spettro continuo** (non di armoniche discrete).

## La larghezza di banda (*bandwidth*) di un segnale

La larghezza di banda nello spettro delle frequenze è l'intervallo di frequenze all'interno del quale è concentrata la maggior parte dell'energia di un segnale, dove si definisce **energia di un segnale**  $s(t), t \in \mathbb{R}$ :

$$E_s = \int_{-\infty}^{+\infty} |s(t)|^2 dt \quad , t \in \mathbb{R} \quad \text{e con segnale periodico di periodo } T_p: \quad E_s(Tp) = \int_{t_0}^{t_0+T_p} |s(t)|^2 dt$$

La **larghezza di banda B** (*Bandwidth*) di un segnale è quindi definibile come la differenza tra la frequenza massima e quella minima in cui il segnale ha componenti significative (frequenze trasmesse senza una forte attenuazione, in genere si considera **attenuazione < 50%**):

$$B = f_{max} - f_{min}$$

dove  $f_{max}$  è la frequenza massima significativa nello spettro mentre  $f_{min}$  è la frequenza minima significativa.

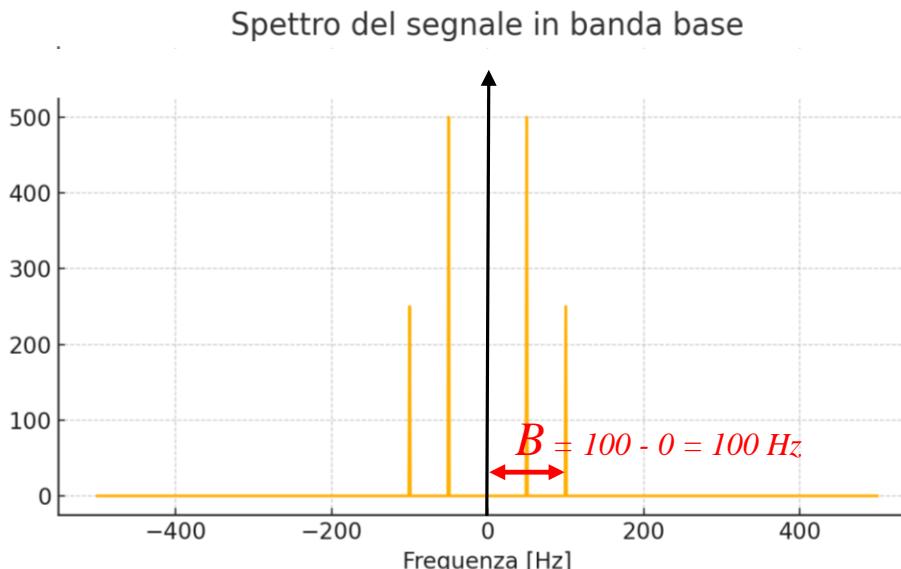
Ad esempio, se un segnale ha componenti frequenziali che vanno da 100 Hz a 1000 Hz, la larghezza di banda sarà:

$$B = 1000\text{Hz} - 100\text{Hz} = 900\text{Hz}$$

In sintesi, la larghezza di banda rappresenta l'ampiezza del "range" di frequenze utilizzato dal segnale e influisce direttamente sulle prestazioni dei sistemi di trasmissione.

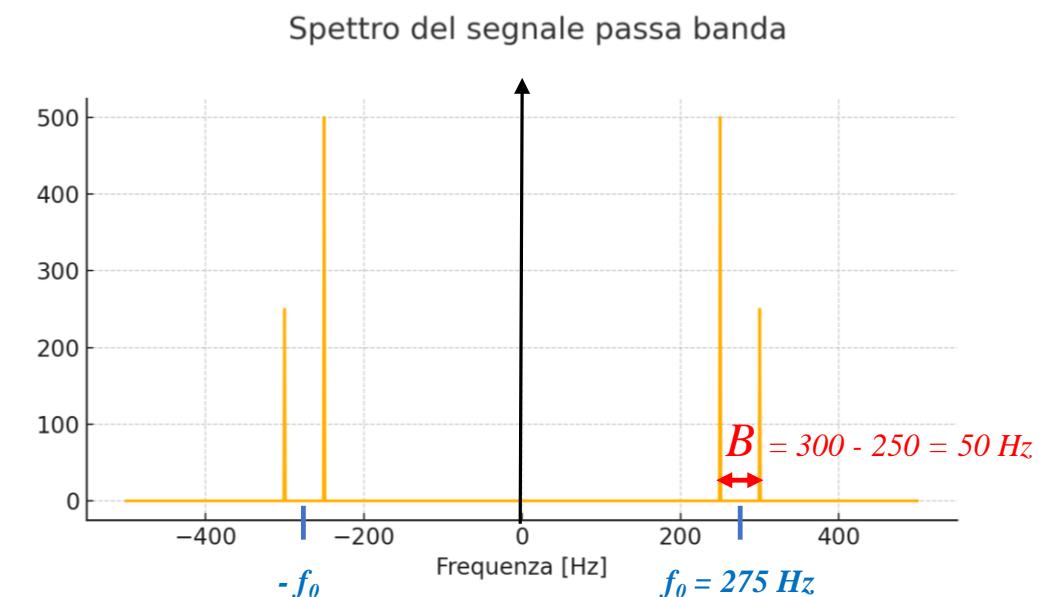
**Un segnale in banda base** ha lo spettro distribuito intorno a  $f=0$  per cui la sua banda sarà:

$$B = f_{max} - 0 = f_{max}$$



**Un segnale passa banda** ha lo spettro distribuito intorno a  $f_0 \neq 0$  per cui la sua banda sarà:

$$B = f_{max} - f_{min}$$



In un sistema di telecomunicazioni, la larghezza di banda determina la quantità di informazioni che possono essere trasmesse. **Maggiore è la larghezza di banda, maggiore è la capacità di trasmettere dati**. Ogni segnale ha una larghezza di banda finita, che dipende dalla sua natura. Segnali a larga banda (con ampie gamme di frequenze) tendono a trasportare più informazioni rispetto ai segnali a banda stretta.

Canale di  
comunicazione

## Caratteristiche della trasmissione dati

La **trasmissione dati** è l'invio di segnali da un nodo trasmittitore a un nodo ricevitore.

Ogni trasmissione, e quindi ogni rete, si caratterizza in base a vari **parametri e modalità di trasmissione**, in particolare:

1. direzione
2. numero di nodi
3. velocità di trasmissione: throughput e bandwidth
4. banda passante (bandwidth)
5. velocità massima di trasmissione di un canale

- 1) La **DIREZIONE** in cui viaggiano i segnali sui mezzi trasmissivi determina le seguenti casistiche:
- **trasmissione simplex**: i segnali viaggiano in una sola direzione (esempio: megafono);
  - **trasmissione half-duplex**: i segnali possono viaggiare in entrambe le direzioni in un mezzo trasmissivo, ma in una sola direzione alla volta (esempio: walkie-talkie);
  - **trasmissione full-duplex**: i segnali possono viaggiare in entrambe le direzioni contemporaneamente (esempio: trasmissione telefonica).

2) Un'altra caratteristica delle comunicazioni è il **NUMERO DI NODI** trasmittitori e ricevitori coinvolti in una stessa trasmissione.

Si distinguono due casi:

- **point-to-point**: trasmissione che coinvolge solo due nodi, uno che trasmette e uno che riceve (detta trasmissione di tipo *unicast*, punto a punto);
- **point-to-multipoint**: trasmissione che coinvolge un trasmittitore e molti ricevitori. A sua volta questo tipo di trasmissione si distingue in:
  - **broadcast**: la trasmissione avviene tra un trasmittitore e molti ricevitori sconosciuti senza preoccuparsi se il segnale trasmesso potrà essere usato dalla stazione ricevente (es. una stazione televisiva che trasmette un programma a molte antenne riceventi)
  - **multicast**: in questo tipo di trasmissione un nodo invia i segnali a un insieme ben definito di ricevitori (es. *un amministratore di rete che decide quali workstation delle rete locale possono ricevere un certo video*)

- 3) Un elemento molto importante nella trasmissione dati è la **VELOCITÀ DI TRASMISSIONE**, misurata in **bit per secondo (bps)** che indica il numero di bit trasmessi in un secondo.

Unità di misura della velocità di trasmissione	Simbolo	Equivalenza
bit per secondo	bps	Unità di misura
kilobit per secondo	kbps	$1\text{ kbps} = 10^3 \text{ bps} = 1.000 \text{ bps}$
Megabit per secondo	Mbps	$1\text{ Mbps} = 10^6 \text{ bps} = 1.000.000 \text{ bps}$
Gigabit per secondo	Gbps	$1\text{ Gbps} = 10^9 \text{ bps} = 1.000.000.000 \text{ bps}$
Terabit per secondo	Tbps	$1\text{ Tbps} = 10^{12} \text{ bps} = 1.000.000.000.000 \text{ bps}$

La velocità di trasmissione viene espressa attraverso due concetti:

- **THROUGHPUT**: è la quantità di dati (reale) che sono trasmessi in un certo periodo di tempo (quantità di bit trasmessi in un secondo). È una **velocità relativa** di trasmissione, un'informazione utile per capire se c'è traffico in rete;
- **BANDWIDTH** (larghezza di banda): è la quantità di dati massima (**velocità massima** di trasmissione, teorica) che può fluire in un canale in un dato periodo di tempo. Viene espresso come la quantità di bit trasmissibili in un secondo. È come il numero di corsie in autostrada: più ce ne sono e più auto (potenzialmente) possono viaggiare.

Le velocità di bandwidth e throughput **variano a seconda del mezzo fisico** utilizzato per la trasmissione (e dalle sue condizioni fisiche al momento d'uso, come interferenze, saturazione, etc.) dato che il segnale viaggia all'interno del mezzo trasmittivo con una certa frequenza e la velocità di trasmissione è strettamente legata alla frequenza del segnale e alle caratteristiche del mezzo. Anche la distanza che il segnale riesce a coprire dipende dal mezzo fisico utilizzato per la trasmissione.

La velocità massima (**bandwidth**) di trasmissione è detta anche capacità di trasmissione della linea (**capacità di canale**), mentre la quantità di informazione trasportata in un certo momento su un canale (**throughput**), minore o uguale alla capacità, è detta **portata del canale** dipende esclusivamente da quanta informazione è immessa sul canale nella trasmissione.

In altre parole, mentre il throughput è deciso dal mittente, cioè è una specifica di trasmissione, la velocità massima sul canale è invece una costante della linea.

Siccome nei sistemi di comunicazione l'informazione viene memorizzata e viaggia in forma digitale, ovvero è sostanzialmente una sequenza di bit, è naturale che la sua velocità venga misurata in bit per secondo (bit rate).

Nelle **trasmissioni analogiche**, pur non essendo definito il bit-rate, non essendo l'informazione trasportata in forma digitale, è possibile ricorrere concettualmente a un **bit-rate equivalente**, preservando così il concetto di velocità di trasmissione anche per tali tipo di trasmissioni.

In una **trasmissione digitale**, la velocità di **trasmissione** può essere **costante oppure variabile** in dipendenza dell'effettiva emissione di informazione da parte della rispettiva sorgente di informazione. Si distinguono così sorgenti:

- **CBR (Constant Bit Rate)**: rappresentano il caso della fonia digitalizzata
- **VBR (Variable Bit Rate)**: quelle proprie di un flusso video digitale dove si alternano generalmente immagini a basso movimento e colore abbastanza uniforme a immagini ad alto movimento e colore estremamente vario, con audio associato intermittente.

La velocità di trasmissione massima necessaria per trasportare flussi multimediali o solamente video è sempre molto maggiore della velocità di trasmissione massima per trasportare il solo flusso vocale a causa della differente quantità di informazione tra i due flussi. Tecniche di compressione dati (ovvero codifica di sorgente) sono in grado di abbassare, anche notevolmente, la velocità di trasmissione effettiva necessaria alla trasmissione per tutte le tipologie di flussi dati.

C'è molta **confusione sulla definizione di banda**, in quanto essa assume significati differenti nei campi dell'ingegneria elettronica delle telecomunicazioni e dell'informatica:

**Banda (analogica)** nell'elettronica: si riferisce alla gamma di frequenze utilizzabili o alla capacità di trasporto di un mezzo di trasmissione analogico. Questa banda viene misurata in Hertz (**Hz**) e indica la gamma di frequenze all'interno delle quali un sistema può operare o trasmettere segnali senza subire una forte attenuazione. Ad esempio, una linea telefonica può avere una banda di trasmissione da 300 Hz a 3.400 Hz, che indica la gamma di frequenze utilizzate per la trasmissione della voce umana.

**Banda (digitale)** nell'informatica: si riferisce al massimo tasso di trasferimento di dati attraverso un canale di comunicazione digitale. Questa banda viene misurata in bit al secondo (**bps**) e rappresenta il massimo tasso con cui il canale è in grado di trasportare dati digitali. Ad esempio, una connessione Internet ad alta velocità potrebbe avere una banda di 100 Mbps, indicando che il canale è in grado di trasportare fino a 100 milioni di bit al secondo.

Queste due definizioni di banda sono correlate, poiché la banda analogica di un mezzo di trasmissione determina la capacità massima di trasferimento di dati digitali attraverso quel mezzo. Tuttavia, è importante distinguere tra i due concetti quando si discute di comunicazioni analogiche e digitali, poiché la banda viene interpretata in modo leggermente diverso nei due contesti.

- 4) Nessun mezzo di trasmissione è in grado di trasmettere segnali senza perdere parte dell'energia durante il processo. Se tutte le componenti di Fourier fossero attenuate in modo uniforme, il segnale risultante verrebbe ridotto in ampiezza, ma non risulterebbe distorto; quindi avrebbe la stessa forma squadrata rappresentata nella Figura (a) (tra qualche slide).

Sfortunatamente i mezzi di trasmissione non attenuano le componenti della serie di Fourier in modo uniforme (attenuazione selettiva delle frequenze) e ciò genera una **distorsione**. Di solito, su un cavo, le ampiezze sono trasmesse senza modifiche da 0 fino a una certa frequenza  $f$  e attenuate per tutte le frequenze superiori a questo limite. L'intervallo di frequenze trasmesse senza una forte attenuazione è chiamato **BANDA PASSANTE** (bandwidth) del canale, che coincide con quella vista nella descrizione della velocità di un canale. Ogni mezzo fisico ha delle **caratteristiche elettriche o elettromagnetiche** che ne determinano la **banda passante naturale**. Il limite non è molto preciso, perciò spesso viene indicata la **banda passante compresa nel range di frequenze in cui la potenza del segnale è attenuata del 50%** (come si faceva anche nella definizione di banda di un segnale).

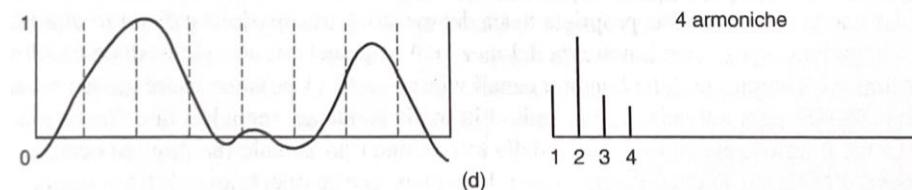
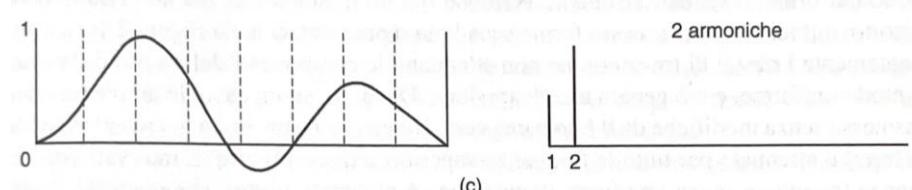
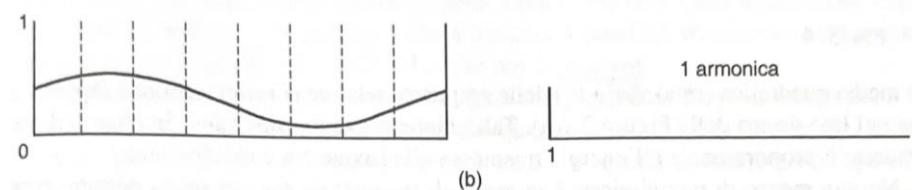
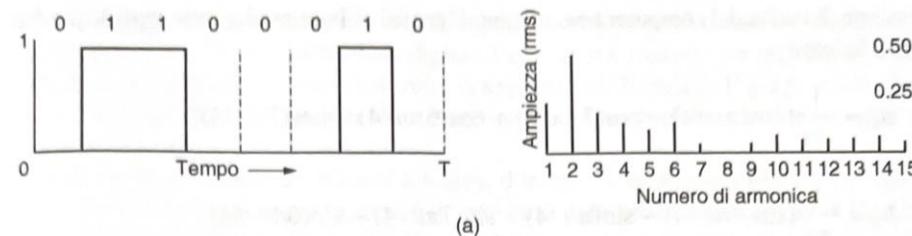
La banda passante è una proprietà fisica del mezzo di trasmissione e di solito dipende da costruzione, spessore e lunghezza del mezzo. A volte nel circuito introduce un filtro per limitare l'ampiezza della banda. Ad esempio, i canali wireless 802.11 possono usare grosso modo fino a 20 MHz, per cui le interfacce radio filtrano la banda del segnale a tale dimensione.

È importante notare che **l'informazione trasportata non dipende dalle frequenze di inizio e fine della banda, ma solo dalla sua larghezza**.

Vediamo un **esempio di come influisce una diversa banda passante del canale sulla trasmissione di un'informazione.**

Abbiamo visto che canali reali influiscono in modo non omogeneo sui segnali a diverse frequenze.

Se ad esempio vogliamo trasmettere il carattere ASCII 'b' codificato con 1 byte (01100010)

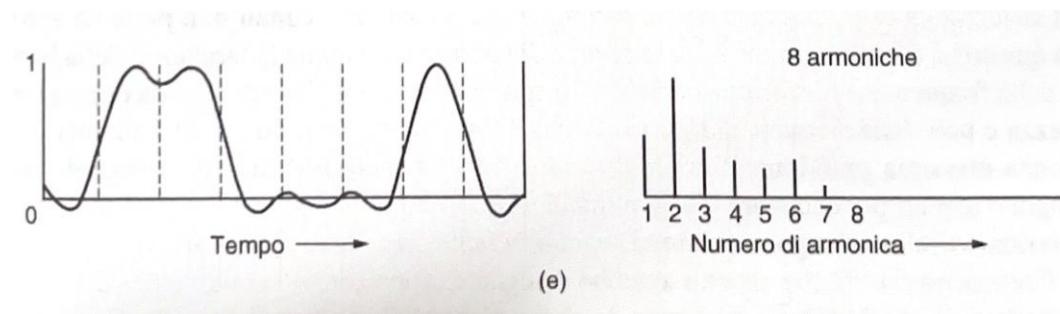


Segnale originale con lo spettro completo

Segnale trasmesso su un canale che fa passare solo la prima armonica (quella fondamentale,  $f_1$ )

Segnale trasmesso su un canale che fa passare 2 componenti armoniche

Segnale trasmesso su un canale che fa passare 4 componenti armoniche



$$a_n = \frac{1}{\pi n} [\cos\left(\frac{\pi n}{4}\right) - \cos\left(\frac{3\pi n}{4}\right) + \cos\left(\frac{6\pi n}{4}\right) - \cos\left(\frac{7\pi n}{4}\right)]$$

$$b_n = \frac{1}{\pi n} [\sin\left(\frac{3\pi n}{4}\right) - \sin\left(\frac{\pi n}{4}\right) + \sin\left(\frac{7\pi n}{4}\right) - \sin\left(\frac{6\pi n}{4}\right)]$$

$$c = \frac{3}{4}$$

Dato un **tasso di invio** dei bit pari a  $b$  bit/s, il **tempo richiesto per inviare 8 bit** (un bit alla volta) è pari a  $8/b$  al secondo, perciò la **frequenza della prima armonica** ( $f_1$ ) è  $b/8$  Hz.

Una linea telefonica ordinaria, detta anche linea voice-grade (con qualità vocale) ha una frequenza limite introdotta artificialmente appena sopra i 3.000 Hz. Questa restrizione indica che il **numero della più alta armonica che attraversa il canale di trasmissione** ( $n_{max} = (n_{max} \cdot f_1) / f_1$ ) è approssimativamente  $3.000/(b/8)$  o  $24.000/b$ .

Con 8 armoniche è già possibile ricostruire il segnale fedelmente (la sequenza di bit)

La figura di destra delle coppie di immagini rappresentate in queste due slide, rappresenta sulle ordinate la **media quadratica (rms)**:

$$\sqrt{a_n^2 + b_n^2}$$

delle ampiezze relative ai primi termini dello spettro di ciascun segnale.

Quando trasmetti un segnale digitale (es. una sequenza di 1 e 0) su un mezzo fisico analogico, il segnale digitale viene convertito in una forma d'onda (es. quadra) che può essere scomposta in armoniche, cioè in un insieme di onde sinusoidali. Più è alto il bit rate, ovvero più "veloce" è il segnale, e più armoniche servono per rappresentarlo correttamente.

Per il caso considerato nell'esempio, ovvero **una linea telefonica** con banda passante di 3000 Hz, posso osservare nella tabella a fianco **cosa succede inviando informazioni a diversa velocità (Bps)**.

Questo ci fornisce un'indicazione approssimativa del **massimo tasso di bit che il canale può trasmettere, limitato dalla sua larghezza di banda**.

Esistono schemi di codifica che consentono di superare questo limite. Ad esempio, gli schemi di modulazione a diversi livelli di tensione, come la modulazione a quadratura di ampiezza (QAM), consentono di inviare più bit per simbolo, aumentando così la velocità di trasmissione dei dati senza aumentare la larghezza di banda effettiva del segnale. Questi schemi sfruttano in modo più efficiente la larghezza di banda disponibile e sono ampiamente utilizzati nelle moderne tecnologie di comunicazione per aumentare le velocità di trasmissione dei dati.

Bps	T [ms]	Prima armonica [Hz]	Numero di armoniche trasmesse
300	26,67	37,5	80
600	13,33	75	40
1.200	6,67	150	20
2.400	3,33	300	10
4.800	1,67	600	5
9.600	0,83	1.200	2
19.200	0,42	2.400	1
38.400	0,21	4.800	0

**Bps:** tasso di invio dei bit ( $b$ ) di informazione sulla linea telefonica

**T:** tempo richiesto per inviare un'**informazione** (carattere informativo) **di 8 bit** (1 byte), un bit alla volta ( $8/b$ )

**Prima armonica:** frequenza della prima armonica del segnale informativo che si sta trasmettendo ( $b/8$ )

**Numero di armoniche trasmesse:** numero di armoniche che non vengono bocciate dalla banda passante di 3000 Hz, considerando che le armoniche sono multiple della prima armonica

- 5) Nel 1924 Henry **Nyquist** si rese conto che anche un canale perfetto ha una capacità di trasmissione limitata e ottenne un'equazione che esprimeva la **VELOCITÀ MASSIMA DI TRASMISSIONE DATI DI UN CANALE senza rumore ad ampiezza di banda limitata**.

Nel 1948 **Claude Shannon** portò avanti il lavoro di Nyquist, estendendolo al caso di un **canale soggetto a rumore casuale** (termodinamico).

Nyquist dimostrò (per canali senza rumore) che se si trasmette un segnale arbitrario attraverso un **filtro passa basso** la cui ampiezza di **banda** è pari a **B** (canale a banda superiormente limitata), il segnale filtrato può essere ricostruito completamente prendendo solo  $2B$  (esatti) campioni al secondo. Campionare la linea più velocemente di  $2B$  volte al secondo non ha senso, perché le componenti delle frequenze superiori sono già state filtrate.

Se il segnale è composto da  $V$  livelli discreti, il **teorema di Nyquist** afferma che:

$$\text{massimo tasso trasmittivo} = 2B \log_2 V \text{ bit/s}$$

Da qui si capisce ad esempio che un canale a 3 kHz senza rumore non è in grado di trasmettere segnali binari (cioè a due livelli =>  $V=2$ ) a velocità maggiore di 6.000 bps.

**ATTENZIONE:** non si tratta del famoso teorema del campionamento, MA **il teorema del campionamento aiuta a comprendere il teorema di Nyquist**, infatti:

immagina un segnale che contiene solo frequenze fino a 3.000 Hz (cioè ha larghezza di banda  $B = 3000$  Hz). Secondo il teorema del campionamento di Nyquist-Shannon, per ricostruirlo perfettamente devi campionarlo almeno a  $2B = 6000$  volte al secondo. Questo significa che il segnale non cambia più velocemente di 6000 volte al secondo. Quindi 6000 è la frequenza massima con cui può contenere “informazioni nuove”, cioè variazioni indipendenti l’una dall’altra (come per esempio il passaggio da 0 a 1)

Se sul **canale** è presente un **rumore casuale**, la situazione peggiora rapidamente, ma purtroppo il rumore casuale (termico) provocato dal movimento delle molecole del sistema è sempre presente.

Il livello di rumore termico si misura facendo il rapporto tra la potenza del segnale e la potenza del rumore chiamato **SNR** (*signal to noise ratio*, rapporto segnale-rumore).

Chiamando S la potenza del segnale e N la potenza del rumore, il rapporto segnale-rumore è pari a S/N, di solito valutato in decibel (dB) con la formula:

$$\text{SNR} = 10 \log_{10} \frac{S}{N} \quad [\text{dB}]$$

così che un rapporto S/N di 10 è pari a 10 dB, un rapporto uguale a 100 è pari a 20 dB, un rapporto uguale a 1.000 equivale a 30 dB e così via.

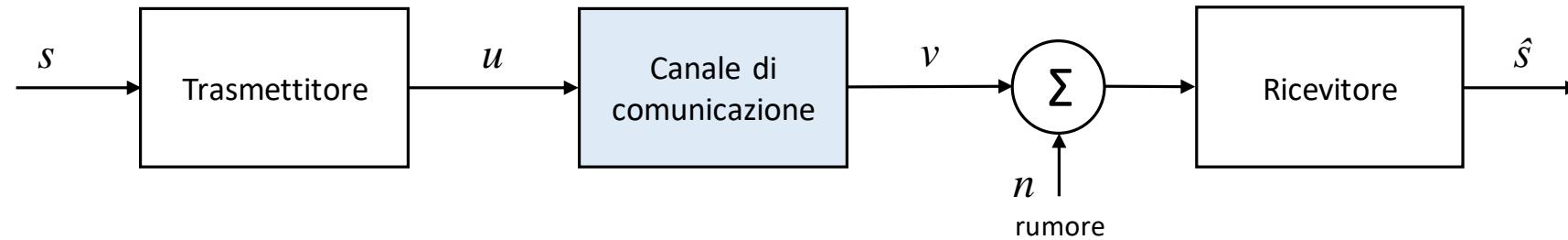
I produttori di amplificatori stereo spesso caratterizzano la banda passante (intervallo di frequenze) in cui l'apparecchio è lineare indicando i due estremi di frequenza dove l'attenuazione è pari a 3 dB: sono i punti dove il fattore di amplificazione è approssimativamente dimezzato (perché  $10 \log_{10} 0,5 \approx -3$ ).

Risultato ottenuto da Shannon: il **massimo tasso di invio dei dati** (o **capacità del canale fisico**) in bit/s su un canale **rumoroso** la cui ampiezza di banda è di B Hz e il cui rapporto segnale-rumore è pari a S/N, è dato dal numero:

$$\text{massimo numero di bit/s} = B \log_2 \left( 1 + \frac{S}{N} \right)$$

Una linea **ADSL** (*asymmetric digital subscriber line*), che fornisce connettività Internet facendo uso di canali telefonici standard, utilizza una banda di circa 1 MHz. Il rapporto segnale-rumore è fortemente dipendente dalla distanza percorsa, e un SNR di circa 40 dB per una linea ADSL di 1 o 2 km è un valore più che accettabile. Con queste caratteristiche, il canale non è in grado di trasmettere molto più di 13 Mbps (=  $1 \cdot \log_2(1+10.000)$ ), indipendentemente dalla quantità dei segnali e dalla frequenza di campionamento.

## Il canale di comunicazione



Quando un segnale deve essere trasmesso, viene inviato attraverso un **canale**, cioè un mezzo fisico di trasmissione.

I canali possono essere **logici** o **fisici**:

- sono **logici** quando si realizzano più percorsi distinti utilizzando lo stesso mezzo fisico (per esempio lo stesso cavo di rame)
- sono **fisici** quando si realizzano più percorsi distinti utilizzando mezzi fisici diversi.

La **tecnica che consente di separare un mezzo fisico in più canali logici** viene detta **multiplexing** e permette di far viaggiare più segnali simultaneamente su uno stesso mezzo fisico.

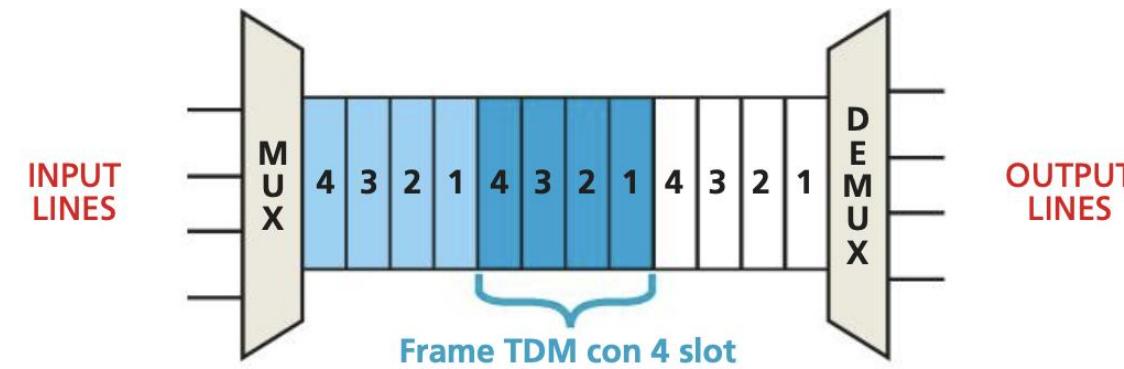
Esistono diverse tecniche per effettuare il multiplexing dei segnali, in base al parametro su cui si basano:

- **TDM** (Time Division Multiplexing)
- **FDM** (Frequency Division Multiplexing)
- **WDM** (Wavelength Division Multiplexing)
- **CDM** (Code Division Multiplexing)

## TDM (TIME DIVISION MULTIPLEXING)

Questa tecnica prevede di **suddividere il tempo** rappresentato dai **frame** (quantità di bit inviati per ogni unità di trasmissione; ha dimensione fissa ed è suddiviso in campi predefiniti) in **intervalli (slot) di tempo regolari** e assegnare ogni slot a un dispositivo di input. Ogni sorgente (o flusso di dati) ha assegnato un determinato **time slot** in cui può trasmettere. In questo modo ogni frame inviato contiene una parte di dati di ciascun mittente.

Il risultato è quello di portare avanti più trasmissioni simultaneamente, distribuendo il canale fisico, anziché concederlo a turno a un solo mittente per volta, così che ogni sorgente sembra avere un flusso continuo.



Esempio di multiplexing TDM sincrono con politica round-robin

Il dispositivo di multiplexing (**MUX**) è dotato di un buffer, in cui prepara il frame prima di inviarlo.

Qualora non tutte le linee di input avessero dati da trasmettere, il MUX può comunque trasmettere il frame con bit riempitivi (padding) o riempirlo, assegnando più slot a uno stesso mittente.

Si distinguono dunque **2 tipi di TDM**:

#### TDM Sincrono:

- ogni sorgente ha sempre lo stesso slot riservato nel tempo, anche se non ha dati da inviare. Gli utenti fanno i turni secondo una politica round-robin e ognuno di loro, periodicamente, prende possesso della banda completa per un tempo limitato
- è semplice da implementare, ma poco efficiente in caso di sorgenti che non trasmettono continuamente

#### TDM Asincrono o Statistico (STDM):

- gli slot sono assegnati dinamicamente solo quando una sorgente ha dati da trasmettere
- più efficiente nell'uso della banda, ma richiede una gestione più complessa

La tecnica STDM è anche conosciuta come "commutazione di pacchetto" (*packet switching*)

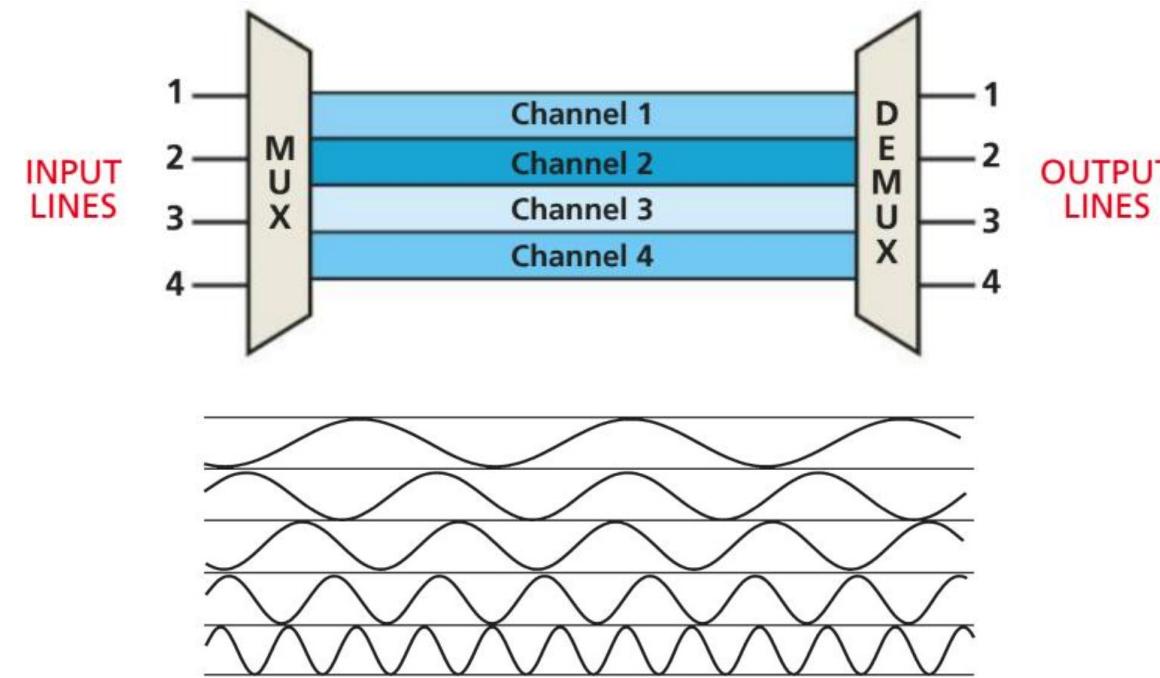
Il dispositivo di demultiplexing (**DEMUX**) mantiene su ciascuna linea di output lo slot relativo al destinatario corrispondente. Il DEMUX riceve il frame multiplexato e lo smista sui corrispondenti dispositivi di output in base alle assegnazioni degli slot. Ogni dispositivo di output riceve solo i dati destinati ad esso.

## FDM (FREQUENCY DIVISION MULTIPLEXING)

Questa tecnica prevede di suddividere il canale in **sottocanali** logici distinti, uno per ciascun mittente: **ogni sottocanale opera in una data porzione dello spettro**, con una separazione tra canali abbastanza grande da evitare interferenze reciproche.

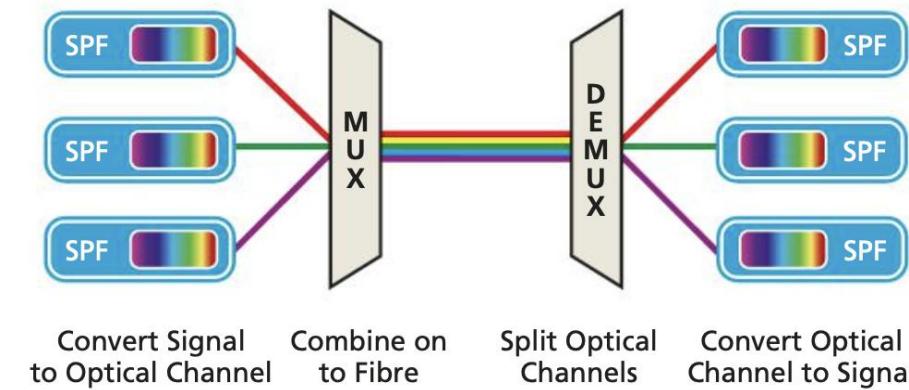
Prima della trasmissione, i dati vengono **modulati** su diverse frequenze per ciascun sottocanale. Alla ricezione, i segnali vengono **demodulati** per separare i dati trasmessi su ciascun sottocanale.

Questa tecnica è ampiamente utilizzata in diverse applicazioni, come le trasmissioni radio e televisive, le reti telefoniche e le reti di comunicazione dati, dove è necessario trasmettere più segnali attraverso un unico canale fisico senza interferenze.



## WDM (WAVELENGTH DIVISION MULTIPLEXING)

È una tecnica implementata nelle attuali **reti in fibra ottica**, che permette di usare in simultanea su una singola fibra tra gli 80 e i 160 canali logici, **trasmessi e ricevuti su diverse lunghezze d'onda ( $\lambda = v/f$ )** mediante opportuni **SPF (Signal Processing Facility)** in grado di analizzare, ottimizzare e correggere i segnali.



Diversi segnali possono viaggiare attraverso la stessa fibra ottica utilizzando lunghezze d'onda diverse, garantendo l'isolamento tra di essi. Questo multiplexing viene definito "denso", quando la differenza tra le lunghezze d'onda di canali adiacenti è inferiore a 1 nm (nanometro =  $10^{-9}$  m).

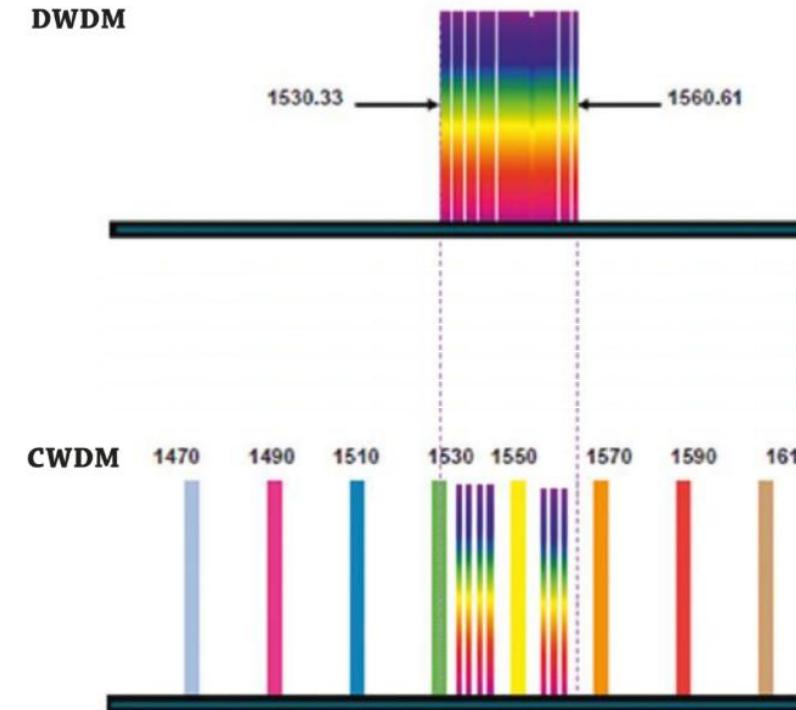
Dal momento che c'è una relazione inversa tra frequenza e lunghezza d'onda, di fatto **le tecnologie FDM e WDN sono analoghe: si parla di WDM quando il mezzo fisico di trasmissione è una fibra ottica, cioè quando il segnale è ottico (e non elettrico)**.

Ci sono due tipologie di WDM: **Dense** e **Coarse**, abbreviati rispettivamente in DWDM e CWDM:

Il **DWDM** ospita 16 o più canali (si arriva anche a 160) in uno spettro di lunghezze d'onda ridotto, incentrato attorno alla lunghezza d'onda di 1550 nanometri, che consente di ridurre l'attenuazione del segnale dovuta al mezzo fisico (fibra ottica). Ridurre lo spettro, quindi lo spazio tra una lunghezza d'onda e l'altra, richiede l'utilizzo di ottiche più precise e costose, ma offre una maggiore scalabilità.

Il DWDM è generalmente utilizzato nei contesti in cui è richiesta un'alta capacità in relazione a una limitata disponibilità di fibra.

Il **CWDM** utilizza un ampio spettro di lunghezze d'onda e ospita 8 canali. Questa spaziatura ampia fra i canali consente di utilizzare ottiche economiche, ma offre meno capacità di banda. Il CWDM è tipicamente impiegato nelle situazioni in cui la distanza di trasmissione è breve e si vogliono contenere i costi.



C'è poi la linea di prodotto **EWDM** (*Enhanced Wavelength Division Multiplexing*) di **Cisco** che offre la possibilità di sovrapporre fino a 8 lunghezze d'onda "dense" agli 8 canali di un sistema CWDM (1470, 1490, 1510, 1530, 1550, 1550, 1590 e 1610 nanometri). Il principio di funzionamento si basa su un approccio interessante: le 8 lunghezze d'onda "dense" vengono inserite fra i canali CWDM. Quindi, un totale di 16 lunghezze d'onda (8 CWDM e 8 DWDM) possono essere supportate da una stessa infrastruttura di fibra (*figure 17, 18 e 19*).

## CDM (CODE DIVISION MULTIPLEXING)

Si tratta di una forma di comunicazione a spettro distribuito in cui un segnale a banda stretta viene sparso su una banda di frequenza più ampia: ogni trasmettitore usa un **codice pseudo-casuale unico per ciascun utente** (chiamato **spreading code**) per "espandere" il proprio segnale su una **banda molto più ampia** di quella originaria. Il ricevitore, conoscendo il codice, può "ricostruire" il segnale originale, filtrando gli altri (si dice che viene **filtrato il rumore di fondo** generato dalle trasmissioni simultanee è decodificato, e solo i dati relativi alla connessione specifica vengono estratti).

Ciò rende il segnale più tollerante alle interferenze e permette a più segnali di **utenti diversi di condividere la stessa banda di frequenza**. Siccome CDM viene spesso usato per il secondo scopo, viene anche comunemente chiamato **CDMA** (*Code Division Multiple Access*, accesso con multiplexing a divisione di codice).

La **CDMA** è la tecnica di accesso multiplo a un canale condiviso più diffusa nelle **reti wireless**. Il suo principio di funzionamento prevede che più stazioni possano trasmettere contemporaneamente utilizzando lo stesso canale fisico, senza la necessità di suddividerlo in slot di tempo o bande di frequenza specifiche per ciascun utente. Ciò permette un utilizzo più efficiente delle risorse spettrali disponibili.

Con la CDMA:

- ogni utente trasmette sullo stesso intervallo di frequenza e nello stesso momento, ma con codici diversi
- il segnale trasmesso viene moltiplicato per un codice ad alta frequenza (spreading), che lo distribuisce su una banda larga
- il ricevitore usa lo stesso codice per decodificare solo il segnale che gli interessa (gli altri appaiono come rumore)

## Esempio di confronto tra le tecniche di multiplexing dei segnali

Per capire meglio la differenza tra le diverse tecniche viste per il multiplexing dei segnali in un canale logico di trasmissione, immaginiamo di trovarci in una sala d'aspetto di un aeroporto con molte coppie di persone che parlano.

- **TDM** equivale a coppie di persone che fanno a turno per parlare (globalmente, non tra loro)
- **FDM**, invece, equivale ad avere coppie che parlano ognuna con toni di voce diversi (chi più acuto, chi più grave), in maniera tale che ognuna possa avere la propria conversazione contemporaneamente, ma indipendentemente dalle altre
- **CDMA** equivale invece ad avere ogni coppia che parla contemporaneamente, ma in un linguaggio diverso; la coppia francese si sintonizza sulla lingua francese e rifiuta tutte le altre come rumore. Quindi, il punto centrale di CDMA è essere in grado di estrarre il segnale e rifiutare tutto il resto come rumore casuale



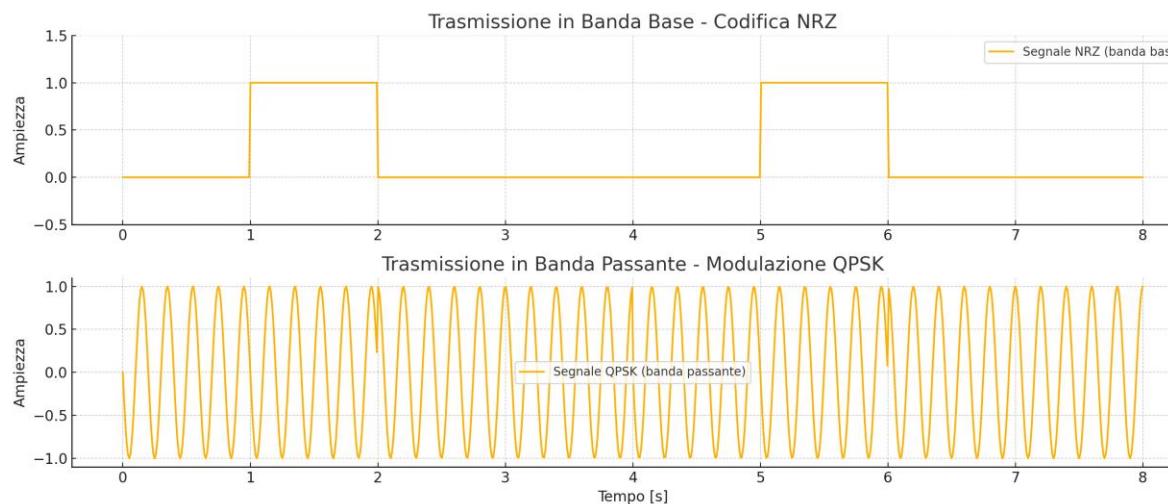
## Trasmissione di dati digitali

I **canali**, sia cablati che wireless, **trasportano segnali analogici** che possono essere voltaggi, intensità di luce o suoni che variano in maniera continua nel tempo. Per inviare allora **informazioni digitali** (provenienti dai dispositivi trasmettitori di cui ci occupiamo come informatici) dobbiamo usare dei **segnali analogici per rappresentare i bit sul canale**.

La trasmissione dei dati digitali può avvenire inviando in **due modalità** i segnali analogici che li rappresentano:

- in banda base o
- in banda passante

Le principali differenze (che poi approfondiremo) tra le due modalità sono riscontrabili in modo intuitivo da un grafico che rappresenta una tecnica di trasmissione in banda base confrontata con una tecnica di trasmissione in banda passante:



Il segnale **varia tra due livelli discreti** (0 e 1) **pur trattandosi** comunque di una tensione o corrente continua nel tempo, quindi **fisicamente un segnale analogico**.

Nessuna portante: il segnale è "diretto", adatto a trasmissioni su cavi per brevi distanze.

Il segnale è una sinusoide (portante) a **frequenza costante** ma con **fase diversa** per rappresentare coppie di bit.

Quindi:

### Trasmissione in banda base

**Supporto:** tipicamente cavi (rame, fibra, ecc.) o connessioni punto-punto

**Segnale trasmesso:** **digitale**, cioè direttamente derivato dalla sequenza di bit (nonostante il segnale viaggi come un'onda elettrica continua, cioè analogica, la forma d'onda trasmessa ha livelli di tensione o corrente che rappresentano i simboli digitali)

**Tecniche utilizzate:** **codifiche di linea** (es. NRZ, Manchester, etc.) che servono per adattare il segnale al mezzo trasmissivo, in particolare:

- garantendo la sincronizzazione (cioè transizioni regolari per permettere al ricevitore di recuperare il clock)
- riducendo o eliminando componenti continue (DC) che non possono essere trasmesse (es. in certe fibre ottiche o trasformatori)
- facilitando il riconoscimento degli 1 e degli 0 anche in presenza di rumore o attenuazione
- garantendo l'equilibrio del segnale (numero simile di livelli positivi e negativi in media)

**Conversione D/A:** **non necessaria** (il segnale può essere direttamente "digitale" o meglio con livelli discreti di tensione)

### Trasmissione in banda passante

**Supporto:** canali a **banda limitata centrata attorno a una portante** (es. radio, cavi coassiali per lunga distanza, fibre ottiche con modulazione coerente, ecc.)

**Segnale trasmesso:** **analogico modulato**, portante continua modulata da un segnale digitale

**Tecniche utilizzate:** **modulazione digitale** (es. ASK, FSK, PSK, QAM, ecc.) le quali servono per spostare lo spettro del segnale digitale in una banda centrata su una frequenza portante, adatta al canale

**Conversione D/A:** **necessaria** perché il segnale modulato è continuo nel tempo e nei valori (anche se rappresenta dati digitali).

## TRASMISSIONE IN BANDA BASE

Il segnale informativo che viene trasmesso ha una frequenza (o banda) centrata intorno ai **0 Hz**. Questo tipo di trasmissione si usa in collegamenti (tipicamente cablati: rame, fibra, etc.) **a breve distanza** e/o su **mezzi dedicati** (connessioni punto-punto in cui il canale è riservato a un solo trasmettitore e un solo ricevitore) come ad esempio: il segnale elettrico in uscita da un microfono, un segnale digitale che va trasmesso su un cavo Ethernet oppure un segnale ottico che viaggia su fibra ottica punto-punto (e quindi dedicata).

In questo tipo di trasmissioni, si usa la **Codifica di linea** (*Line Code*) per:

- convertire il segnale fisico digitale in un segnale analogico (a livelli discreti) adatto al particolare mezzo trasmissivo
- permettere di mantenere il **sincronismo tra trasmettitore e ricevitore**. Il segnale di sincronismo è il segnale di clock che sincronizza le schede di rete delle macchine, quindi una caratteristica importante della codifica di linea è quella di mettere insieme i dati con il segnale di sincronismo, cosa che permette al ricevitore di effettuare correttamente la decodifica del segnale ricevuto.

La trasmissione dei dati in forma digitale prevede che ai valori 1 e 0 dei bit da inviare si associno determinati valori del fenomeno fisico che è stato scelto per la trasmissione (per esempio la differenza di potenziale).

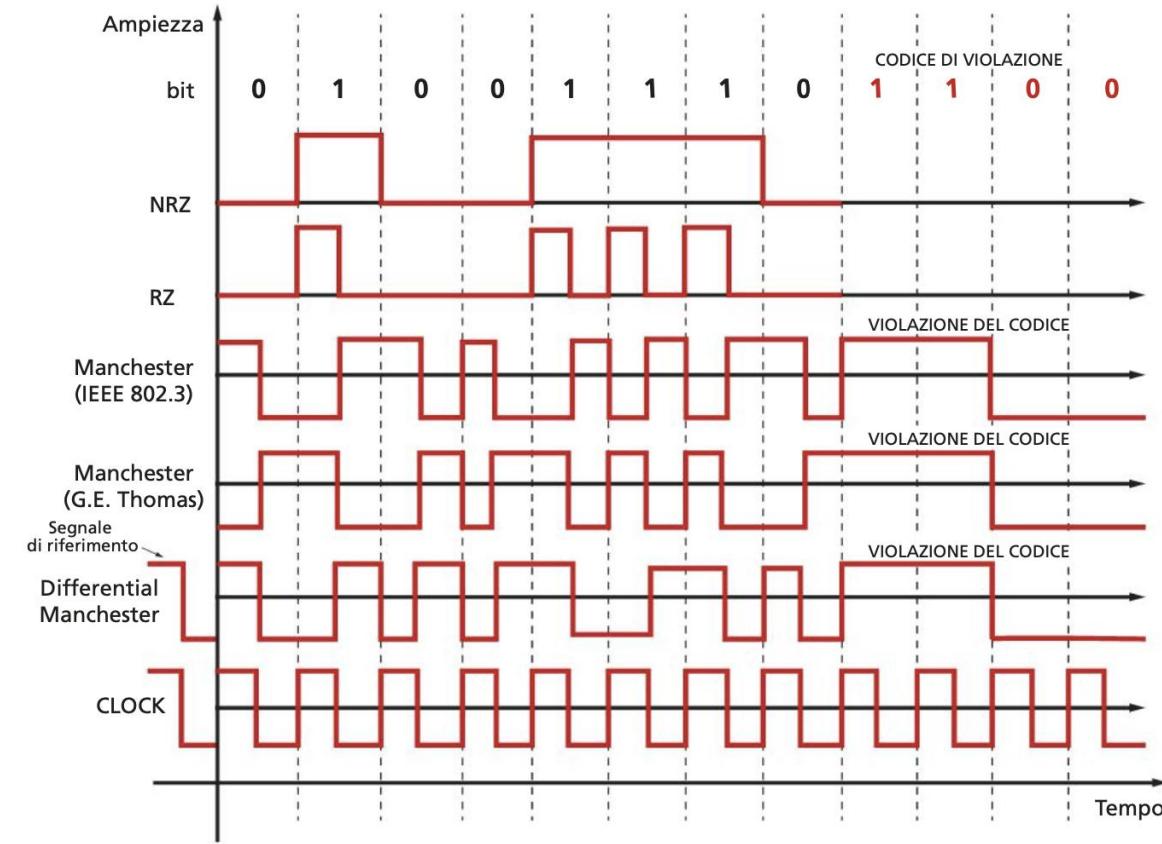
La semplice scelta di associare due differenti valori fisici (uno per lo 0 e uno per l'1) non è quella ottimale, in quanto comporta problemi di sincronismo tra trasmettitore e ricevitore.

Immaginiamo ad esempio di inviare questa sequenza: 00000000. Se 0 = 0 volt, allora il segnale resta piatto per tanto tempo. Il ricevitore non capisce più dove finisce un bit e dove inizia il successivo, perché non ci sono cambiamenti nel segnale da cui capire il ritmo (clock). Questo è il **problema di sincronismo: il ricevitore non riesce a restare "a tempo" con il trasmettitore**.

Per evitare questi problemi, si usano codifiche di linea come:

- **NRZ** (Not Return to Zero), molto semplice, usata nei computer e nelle centrali numeriche
- **RZ** (Return to Zero), usata nelle centrali telefoniche
- **Manchester** e le sue varianti, usate soprattutto nelle reti dati locali

Queste tecniche **modificano il segnale** in modo che **ci siano abbastanza transizioni** (cambiamenti) per mantenere sincronizzati trasmettitore e ricevitore. Anche se si trasmette tanti 0 o tanti 1 di fila, il segnale continuerà a cambiare e il ricevitore riuscirà a capire **quando leggere** un bit.



Vediamo come si converte il segnale digitale di partenza nelle tre principali codifiche di linea:

### **NRZ (Not Return to Zero)**

È la codifica più semplice e **associa un valore alto al bit 1 e un valore basso al bit 0**. Si tratta di un metodo che non richiede circuiti complicati perché i dati che entrano come 1 o 0 vengono passati direttamente all'uscita senza modifiche. Il problema principale di questa codifica è la difficoltà a mantenere il sincronismo a fronte di una lunga sequenza di bit uguali (tutti 1 o tutti 0) che porta il segnale ad avere lo stesso valore per un lungo intervallo di tempo: un minimo disallineamento nel clock del ricevitore comporterà un'interpretazione errata della sequenza di bit.

### **RZ (Return to Zero)**

È **simile a NRZ, con la differenza di portare il segnale a zero a ogni semiperiodo**. Il bit 1 è quindi rappresentato da un valore alto per metà del periodo di clock e poi da un valore basso per la restante metà. Questa codifica risolve il problema di lunghe sequenze di bit 1 (valore alto) ma non di quelle di bit 0 (valore basso).

### **MANCHESTER**

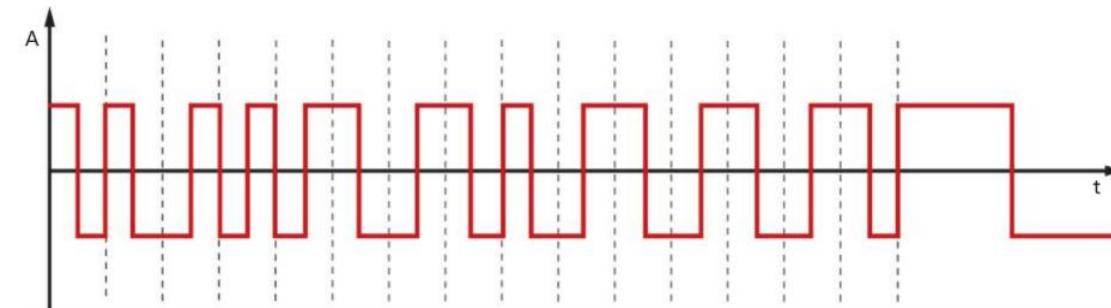
In questa codifica, definita all'Università di Manchester da cui prende il nome, il segnale di clock del trasmettitore e il segnale dei dati vengono combinati per **garantire una transizione per ogni bit**. Esistono due opposte convenzioni (entrambe con numerosi sostenitori) su come rappresentare il bit 1 e il bit 0:

- la prima è specificata nello standard Ethernet (IEEE 802.3) da cui il nome Manchester 802.3 e afferma: **il bit 1 è rappresentato da una transizione basso-alto al semiperiodo e il bit 0 da una transizione alto-basso al semiperiodo;**
- la seconda è quella proposta da G.E. Thomas, che specifica l'opposto: **il bit 1 è rappresentato con una transizione alto-basso al semiperiodo, il bit 0, viceversa, è rappresentato con una transizione basso-alto al semiperiodo.**

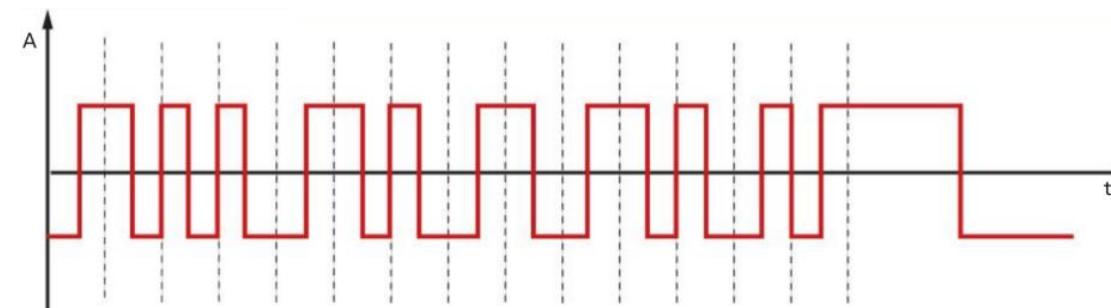
Esempio1:

Codificare secondo le regole della codifica Manchester (nella versione di G.E. Thomas) la seguente sequenza di bit:  
1100010110101011**1100** (dove i bit in blu sono un codice di violazione che vedremo nella slide successiva e che indicano la fine del messaggio)

Soluzione:

Esempio2:

Data la seguente successione di bit codificati secondo la codifica di Manchester (nella versione di G.E. Thomas), determinare il flusso di bit ricevuto.



Soluzione: la sequenza di bit ricevuti è: 01110110101100**1100**

Le tecnica Manchester (più della RZ e diversamente dalla NRZ) è una tecnica **auto-sincronizzante**, cioè consente al ricevitore di riconoscere il clock (il ritmo dei bit) direttamente dal segnale ricevuto (leggendo il ritmo di transizione a metà di ogni bit), **senza bisogno di un segnale di clock separato**.

### Pro e contro della codifica Manchester:

Pro (vantaggi):

- si elimina il problema delle lunghe sequenze di bit con uguale valore: infatti **il sincronismo tra trasmettitore e ricevitore è mantenuto grazie alle continue transizioni**
- **permette di essere violata in modo controllato e intenzionale** per **trasmettere segnali speciali**, come ad esempio la fine di un messaggio, una condizione di controllo, una segnalazione di errore.

Normalmente, ogni bit in Manchester ha una transizione (alto-basso o basso-alto) nel mezzo del bit originale, ma se si trasmette due bit di fila senza alcuna transizione, come 1100 tutto piatto, il ricevitore se ne accorge subito, perché **non è un segnale valido in codifica Manchester** e quindi lo interpreta come un codice speciale, un "**codice di violazione**", ad esempio 1100 per la fine messaggio (il trasmettitore può emettere una sequenza di bit 1 o 0 senza effettuare la transizione, così da fornire un'informazione che il ricevitore può facilmente codificare come fine del messaggio)

Contro (svantaggi):

- **l'efficienza della codifica Manchester è molto inferiore rispetto alle precedenti** in quanto per ogni bit da trasmettere vengono trasferiti due valori e quindi **il consumo di banda è doppio**
- ogni bit da trasmettere è diviso in due metà uguali nel tempo così da avere una transizione al centro di ogni bit. Ma per sapere **dove si trova il "centro" del bit**, bisogna conoscere **il ritmo del clock, e all'inizio della trasmissione, il ricevitore non sa ancora dove sono i confini dei bit**
- se il segnale subisce un'**inversione di polarità** (es: a causa di un cavo invertito, una riflessione o una distorsione), le direzioni delle transizioni si **invertono** e il ricevitore **interpreta 1 al posto di 0**, e viceversa

Approfondiamo gli **ultimi due svantaggi** per vedere le **possibili soluzioni**.

Per quanto riguarda il **secondo svantaggio**, quando il **ricevitore** inizia ad ascoltare il segnale trasmesso (codificato in Manchester), vede un cambio di livello, cioè una transizione, come ad esempio: da basso ad alto ( $0 \rightarrow 1$ ) oppure da alto a basso ( $1 \rightarrow 0$ ). Il problema è che il ricevitore non sa ancora se quella transizione è:

- la transizione centrale di un bit oppure
- una transizione tra bit (e quindi mi trovo all'inizio o fine di un bit) oppure
- rumore o instabilità all'avvio

perché **non conosce ancora il ritmo del clock** (cioè quanto dura un bit). La **soluzione** questo svantaggio è allora quella di fare in modo che il **trasmettitore invii un preambolo** (es: 101010...) per creare un pattern di transizioni **regolari**, così il ricevitore possa osservare **più transizioni consecutive** e calcolare la **frequenza del clock**. Si tratta di un segnale di riferimento iniziale necessario per codificare il primo bit in trasmissione, come nelle modulazioni DPSK e QAM (che vedremo tra poco).

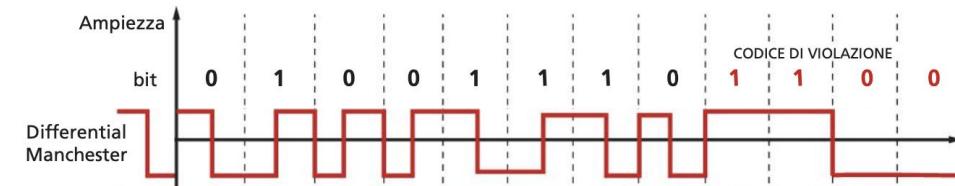
Per quanto riguarda il **terzo svantaggio**, la soluzione consiste nell'utilizzare una codifica variane della Manchester classica, chiamata **Differential Manchester Coding**.

## DIFFERENTIAL MANCHESTER CODING

Codifica i bit **non sulla direzione** della transizione, ma sulla **presenza o assenza** di una transizione all'inizio del bit.

In questa codifica la transizione usata per codificare il dato è all'inizio del periodo invece che nel semiperiodo. Rimane poi comunque, come nella normale codifica di Manchester, la transizione nel semiperiodo necessaria per la sincronizzazione. Quindi:

- **al centro di ogni bit** da trasmettere: c'è sempre una transizione (cambio di livello) a metà del periodo di ogni bit necessaria per la sincronizzazione tra trasmettitore e ricevitore
- **all'inizio del bit** da trasmettere: la presenza o assenza di una transizione determina il valore del bit che sto trasmettendo:
  - se devo trasmettere un bit a 1: nessuna transizione all'inizio del periodo del bit, si mantiene lo stato
  - se devo trasmettere un bit a 0: transizione all'inizio del periodo del bit



Se il segnale viene invertito, tutte le transizioni si **ribaltano**, ma la **sequenza di transizioni (presenza/assenza)** rimane identica. Di conseguenza, conoscendo lo stato del primo bit (o almeno il primo stato logico del segnale), posso ricostruire tutta la sequenza di bit successivi. Si è dimostrato come questa codifica sia robusta a inversioni di polarità.

La Differential Manchester Coding si usa quando:

- **l'affidabilità del collegamento è critica**
- c'è il rischio di **inversioni di polarità del segnale** (es. sistemi embedded dove c'è rischio di rumore o distorsioni)
- si vogliono **minimizzare gli errori hardware** in ambienti industriali, cablaggi lunghi, connessioni rumorose (es. reti o bus industriali)

## TRASMISSIONE IN BANDA PASSANTE

Il segnale informativo che viene trasmesso ha una frequenza (o banda) centrata a  $f \neq 0$  Hz.

Questo tipo di trasmissione si rende necessario:

- per vincoli sia tecnologici che normativi (come nel caso delle reti wireless) o
- per far coesistere su uno stesso mezzo trasmittivo diversi tipi di segnali (come nel multiplexing FDM)

Ciò che permette di spostare un segnale in banda passante è la **modulazione**, e dato che nel nostro caso dobbiamo trasmettere segnali informativi di tipo digitale, tratteremo nello specifico la **modulazione digitale** che si occuperà anche di convertire i segnali digitali in analogici adatti al canale.

La **modulazione** è un processo fondamentale nella trasmissione dei segnali attraverso un canale fisico, sia esso una linea telefonica, un cavo coassiale, un'antenna o una fibra ottica.

Nella sua definizione generale, la modulazione si occupa di **adattare un segnale informativo, spesso in bassa frequenza** (come la voce umana) affinché possa essere **trasmesso** su un mezzo fisico che opera in una **banda differente**, come nel caso delle linee telefoniche analogiche **o che richiede determinate caratteristiche**.

Se ci si connette a Internet tramite una linea telefonica tradizionale, i dati **digitali** generati dal computer devono essere convertiti in segnali **analogici** prima di essere inviati sulla linea telefonica, poiché la linea telefonica è progettata per trasportare segnali nella banda della voce (circa 300 Hz – 3400 Hz). Per questo motivo, i dati devono essere **modulati**, cioè convertiti in un segnale analogico compatibile con la banda trasmittiva della linea, prima di poter essere trasmessi.

Al momento della ricezione, il segnale viene riconvertito in dati digitali tramite un processo inverso, detto **demodulazione**. L'intero processo, noto come **modulazione/demodulazione**, è svolto da un dispositivo chiamato **modem**.

# Tecniche di Modulazione

## Processo di modulazione

La **modulazione** è un processo in cui una **grandezza portante** (*carrier signal*, onda sinusoidale ad **alta frequenza**) viene **modificata in base a un segnale modulante** (*modulating signal*, segnale informativo, tipicamente a **frequenza più bassa**, come ad esempio voce o dati digitali) producendo un unico segnale che trasporta l'informazione da un sistema a un altro.

L'obiettivo è:

- adattare il segnale al **canale trasmittivo** (es. linea telefonica)
- consentire la **trasmissione simultanea** di più segnali (multiplexing)
- migliorare la **resistenza al rumore e alle interferenze**

Quando questo nuovo segnale arriva a destinazione l'apparato ricevente separa il segnale modulante da quello portante (**demodulazione**), ricostruendo in tal modo il segnale originario.

## Tipologie di modulazione

Esistono **diversi tipi di modulazione**, a seconda del **tipo di segnale che si vuole trasmettere**. È proprio qui che si distingue tra **modulazione analogica e modulazione digitale**:

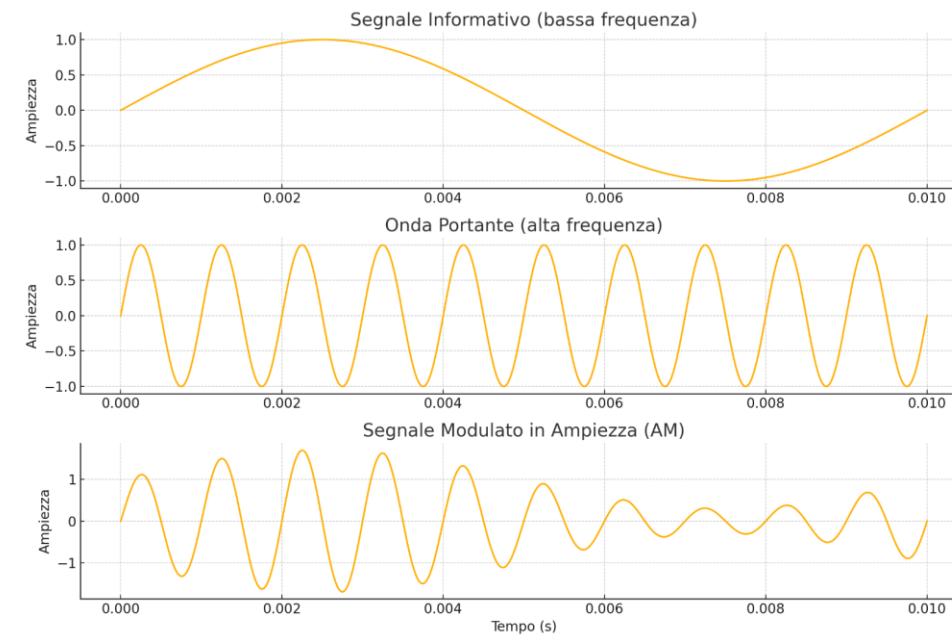
- nella **modulazione analogica**, si trasmette un **segnale continuo**, come la voce in una telefonata o la musica in una trasmissione radiofonica. In questo caso, le caratteristiche di un'onda portante – come l'ampiezza, la frequenza o la fase – vengono modificate in modo continuo per riflettere il segnale originale. Le **radio tradizionali** usano AM o FM (modulazioni analogiche);
- la **modulazione digitale**, nasce invece dall'esigenza di trasmettere **dati digitali**, ossia sequenze di bit. Qui, la portante viene modificata in modo discreto, secondo schemi prestabiliti, per rappresentare simboli digitali. Tecniche come **ASK, FSK, PSK e QAM** permettono di trasportare un numero crescente di bit per simbolo, aumentando l'efficienza della trasmissione. Le **trasmissioni Wi-Fi, 4G, 5G, la fibra ottica, le reti satellitari moderne** impiegano **modulazioni digitali complesse** come QAM o OFDM.

La **scelta** tra modulazione analogica e digitale dipende soprattutto da due fattori:

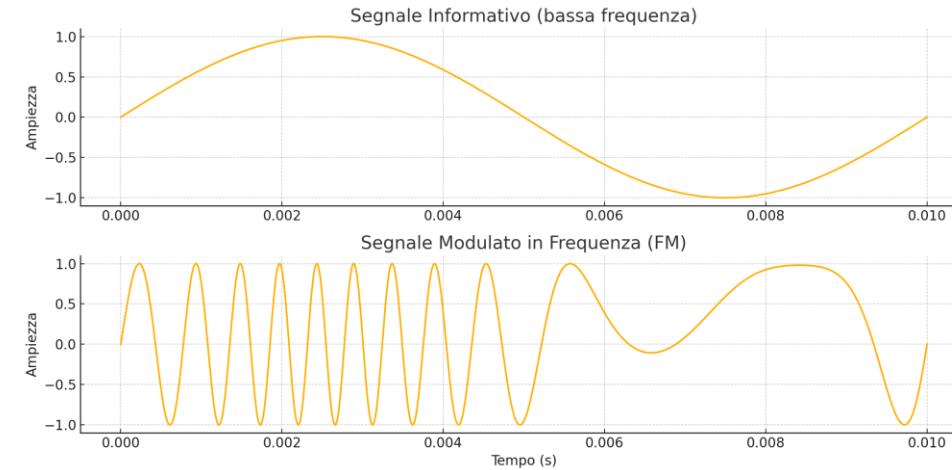
- la natura del segnale da trasmettere
- il contesto tecnologico in cui si opera

Nel passato, quando i segnali erano prevalentemente analogici (voce, immagini televisive), si utilizzavano tecniche di modulazione analogica. Oggi, con l'avvento dell'informatica e delle comunicazioni digitali, la modulazione digitale ha preso il sopravvento per la sua **maggior efficienza, robustezza al rumore e compatibilità con i sistemi di elaborazione digitale**.

Esempio di modulazione AM:



Esempio di modulazione FM:



## Tipologie di modulazione digitale

Le modulazioni digitali si basano sulla trasformazione della sequenza di bit in un segnale digitale modulante che, opportunamente combinato con una portante analogica sinusoidale, origina il segnale analogico da trasmettere.

Le **modulazioni digitali** fondamentali sono:

- **ASK** (Amplitude Shift Keying): modulazioni a cambiamento di ampiezza;
- **FSK** (Frequency Shift Keying): modulazioni a cambiamento di frequenza;
- **PSK** (Phase Shift Keying) e **DPSK** (Differential PSK): modulazioni a cambiamento di fase;
- **QAM** (Quadrature Amplitude Modulation): modulazioni di più bit alla volta.

Le prime tre (o quattro) modulazioni digitali fondamentali modulano un bit per volta, cioè associano un'onda (di una determinata frequenza e ampiezza) o una regola (di sfasamento) a un singolo bit.

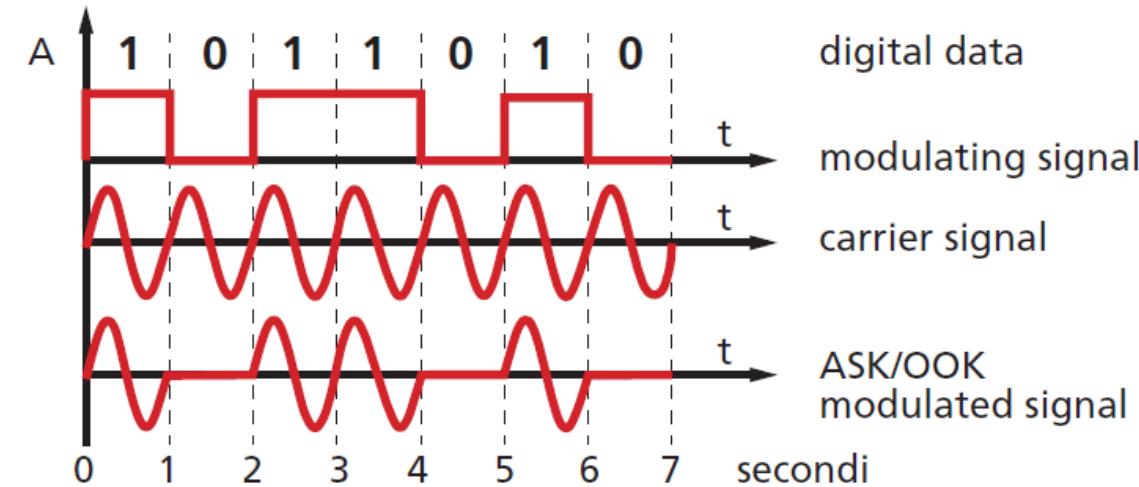
Attraverso le modulazioni QAM è possibile fare in modo che un'onda porti più di un bit d'informazione.

## Modulazione ASK (Amplitude Shift Keying)

Nella ASK il segnale modulante **decide tra due diverse ampiezze di una portante sinusoidale**, che per semplicità di rappresentazione grafica supporremo a frequenza 1 Hz (un ciclo per secondo). Poiché ogni ciclo del segnale trasporta un bit, la velocità di trasmissione risulta di un bit al secondo.

La più usata, mostrata nella figura sotto, è la **OOK** (*On-Off Keying*), che associa all'1 la presenza della portante (con **ampiezza invariata**) e allo 0 l'assenza della portante (**ampiezza zero**). È possibile realizzare modem che lavorano su due diversi valori di ampiezza, sempre da associare all'1 e allo 0.

La ASK è stata la prima modulazione a essere usata (telescriventi e ponti radio) ed è la più semplice da realizzare. È poi caduta in disuso per l'estrema sensibilità al rumore.



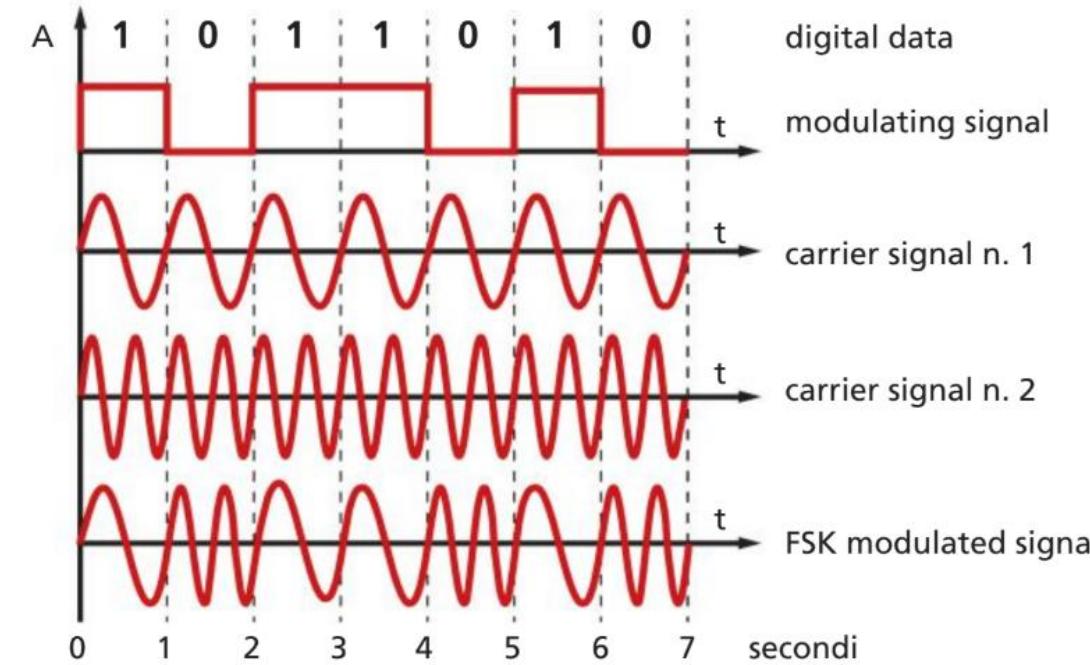
## Modulazione FSK (*Frequency Shift Keying*)

Nella FSK il **segnale modulante decide tra due portanti sinusoidali a frequenze diverse** (figura sotto).

Alla frequenza di una portante è associato l'1, alla frequenza dell'altra lo 0.

Nella figura si sono usate la frequenza 1 Hz per i bit a 1 e la frequenza 2 Hz (due cicli in un secondo) per i bit a 0

La FSK è stata utilizzata dai primi modem per Internet (voce e dati) e per le trasmissioni tra cellulari GSM (*Global System for Mobile Communications*).

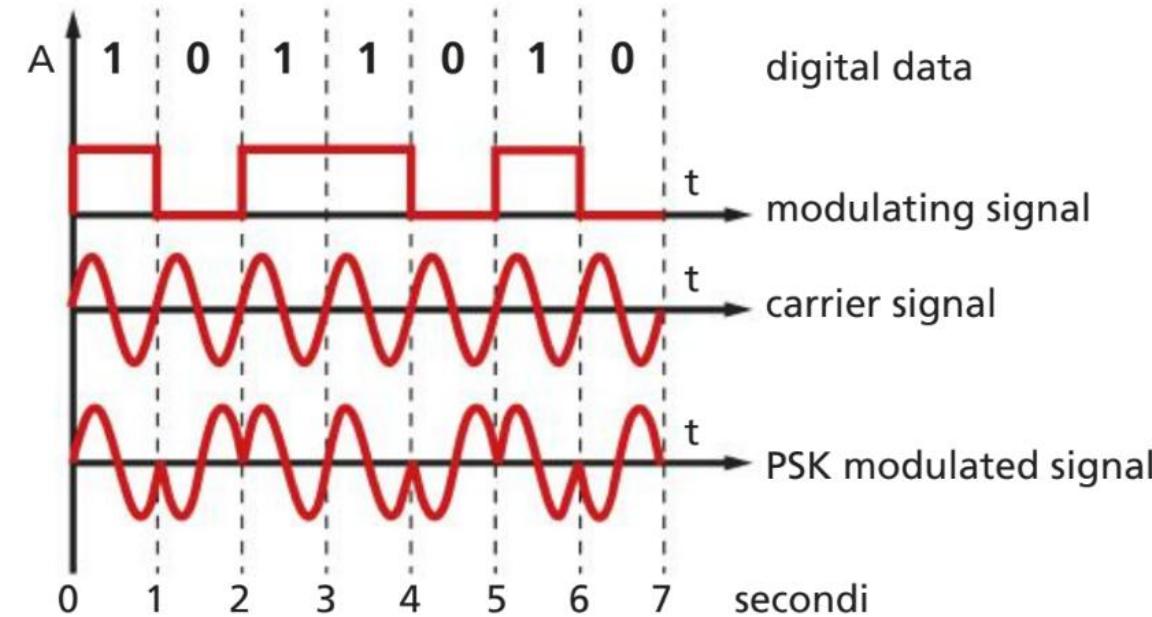


## Modulazione PSK (*Phase Shift Keying*)

Nella PSK il **segnale modulante decide tra due diverse fasi di una portante sinusoidale** (figura sotto).

A una fase della portante è associato l'1, all'altra fase lo 0.

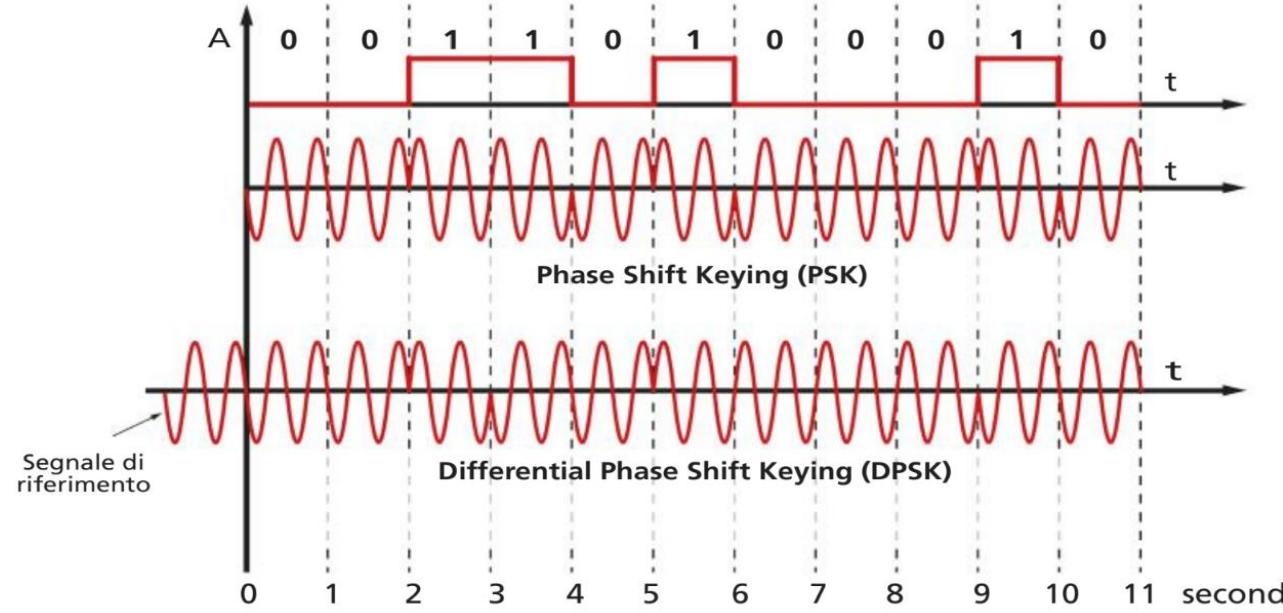
La PSK utilizza le fasi  $0^\circ$  (nessuno sfasamento della portante) e  $180^\circ$  (sfasamento di  $180^\circ$  della portante) rispettivamente per l'1 e lo 0 ed è la più attuale tra le modulazioni fondamentali.



## Modulazione DPSK (*Differential PSK*)

Si tratta di una variante della PSK che, invece di associare un'onda ben precisa e sempre la stessa a ogni bit, segue una regola basata sullo **sfasamento rispetto al bit precedente**: al bit 0 non corrisponde alcun cambio di fase rispetto al bit precedente, al bit 1 corrisponde un cambio di fase di  $180^\circ$  rispetto al bit precedente. Serve quindi un **segnale di riferimento** prima del primo bit da trasmettere, poi ogni bit fa da riferimento per il bit successivo.

Affinché l'intero processo funzioni, mittente e destinatario devono accordarsi sul segnale di riferimento da usare. Quindi con la DPSK, a differenza di tutte le altre tecniche viste, uno stesso bit può essere rappresentato a volte da un'onda e a volte da un'onda opposta: dipende dal bit che lo precede.



La figura a lato mostra il confronto tra le due modulazioni. In questa figura ogni bit è rappresentato da un segnale con una frequenza di 2 Hz. In altre parole, ogni 2 periodi del segnale sinusoidale trasmesso rappresentano un bit.

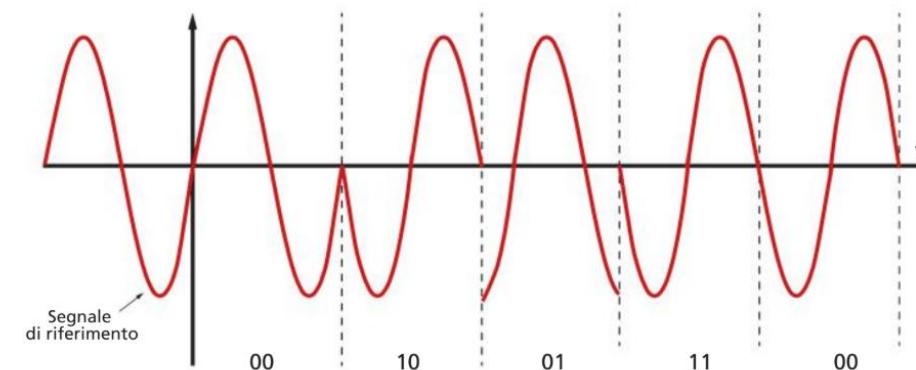
## Modulazione QAM (*Quadrature Amplitude Modulation*)

Le prime modulazioni di tipo QAM trasportavano 2 bit per volta utilizzando 4 fasi e creando quindi un'associazione del tipo PSK, come per esempio:

$$00 \rightarrow 0^\circ \quad 01 \rightarrow 90^\circ \quad 10 \rightarrow 180^\circ \quad 11 \rightarrow 270^\circ$$

nota come **4-QAM**. Il modem realizza uno **sfasamento** tra un segnale e l'altro pari ai gradi indicati.

Il procedimento è dunque simile alla DPSK, ma utilizzando 4 fasi anziché 2 è possibile trasmettere una coppia di bit anziché un bit solo. Quindi, anche in questo caso, una coppia di bit non è sempre espressa dalla stessa onda e serve un segnale di riferimento per la prima coppia di bit.



Con **8 fasi** (usando per esempio i valori multipli di  $45^\circ$ ) si possono trasportare 3 bit per modulazione (**8-QAM**), con **16 fasi** 4 bit (**16-QAM**) e così via. Vale la regola:

$$\text{numero fasi} = 2^{\text{numero bit}}$$

oppure

$$\text{numero bit} = \log_2(\text{numero fasi})$$

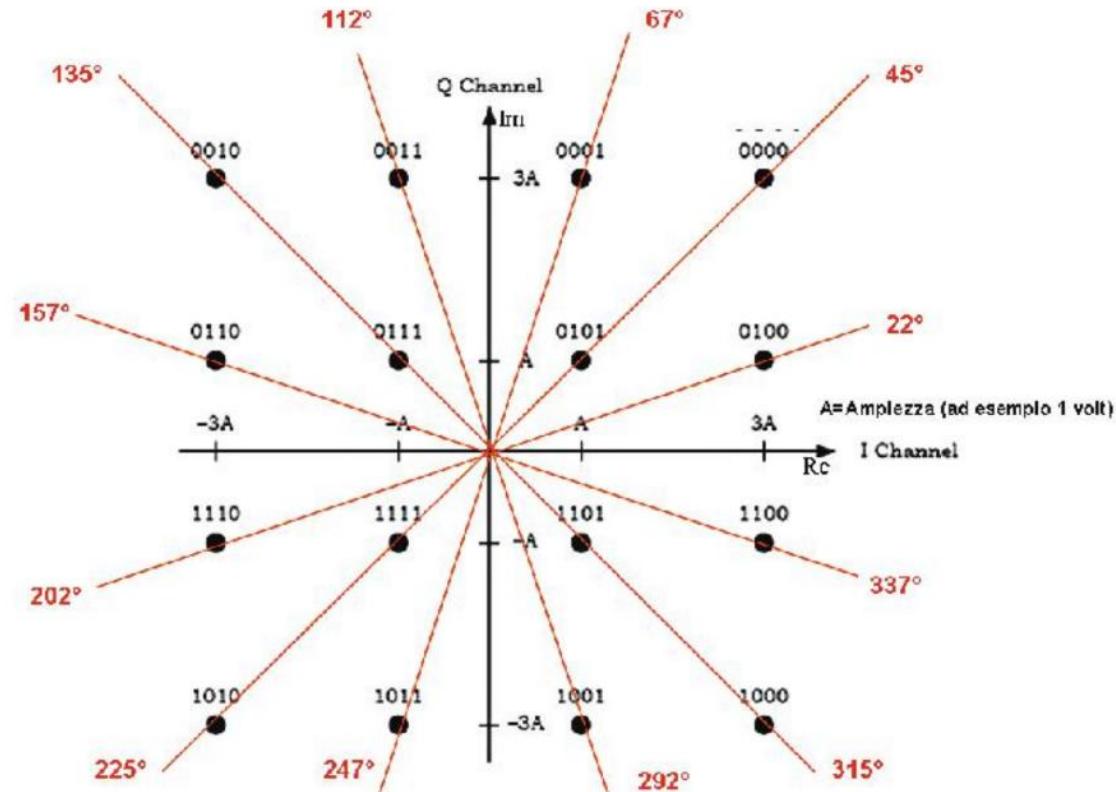
Poiché c'è la necessità di trasmettere ancora più bit per volta senza correre rischi di errore in demodulazione dovuti a sfasamenti troppo ravvicinati, si è pensato di aggiungere contemporaneamente alla variazione di fase una variazione di ampiezza (PSK + ASK).

**Le modulazioni QAM sono le uniche che modulano più di un bit per volta**, associandoli a più valori di una stessa grandezza (di solito la fase) oppure agendo su due grandezze (di solito ampiezza e fase), mentre ogni altra modulazione modifica una sola delle grandezze che caratterizzano un segnale analogico (o ampiezza o frequenza o fase) e lascia inalterate le altre due.

Un esempio è dato dalla **16-QAM quadribit**, realizzata con 12 fasi e 4 ampiezze ( $\pm A$  e  $\pm 3A$ ), che dà origine alla “costellazione” mostrata a lato.

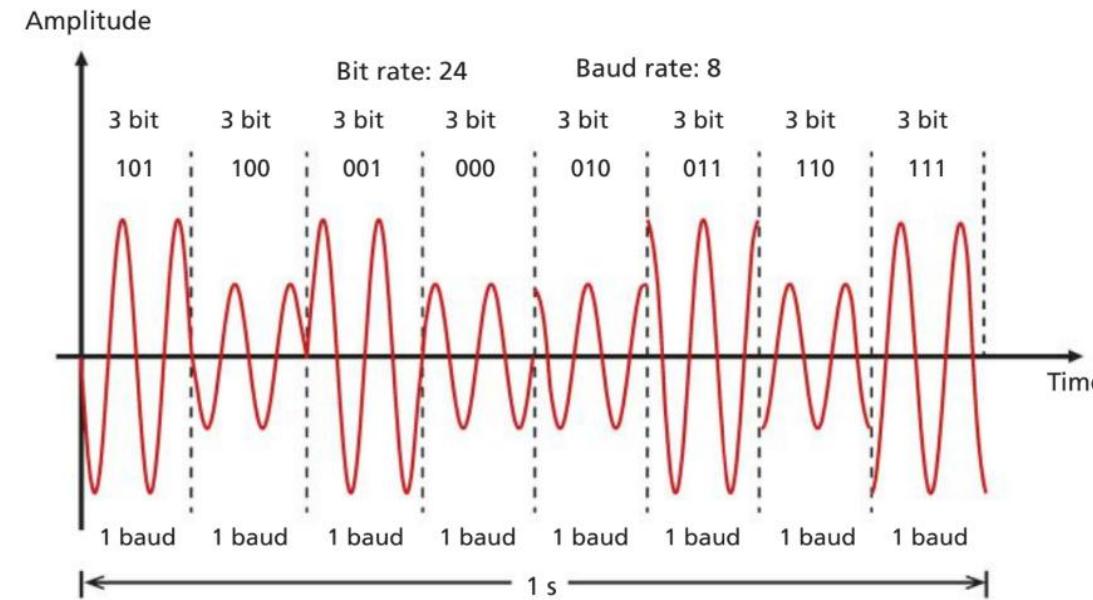
I valori di **ampiezza** sono rappresentati da **numeri complessi**, con componente reale (assi I Channel) e immaginaria (asse Q Channel).

Per esempio, la stringa di dati digitale 1001 è associata a un'onda sfasata di  $292^\circ$  e con ampiezza  $A$  in componente reale e  $-3A$  in componente immaginaria.



Le modulazioni QAM, che consentono la trasmissione di più bit con un'unica modulazione, introducono il concetto di **baud rate**, che è il numero di “unità” di segnale per secondo.

Nella figura sotto vediamo un esempio di **8-QAM tribit** (4 fasi e 2 ampiezze), che in un secondo trasmette 24 bit (bit rate = 24 bps) con un baud rate di 8 baud/s.



Essendo il **bit rate** il numero di bit per secondo, il baud rate è necessariamente inferiore o uguale al bit rate. In generale, vale la formula:

$$\text{(Bit rate)} = \text{(Baud rate)} \times (\text{N}^{\circ} \text{ bit trasmessi a ogni baud})$$

Mezzi di  
trasmissione