IIS DI VITTORIO LATTANZIO

TELECOMUNICAZIONI / SISTEMI E RETI

SEGNALI:

tipologie, grandezze caratteristiche, rappresentazione nel dominio del tempo e della frequenza

Prof. Ing. Marco Cecconi

cecconi.mar@gmail.com

Versione del 15/09/2021

MENTRE STUDI GUARDA ANCHE IL VIDEO CLICCANDO QUI: https://youtu.be/LPxBmqrHlLY

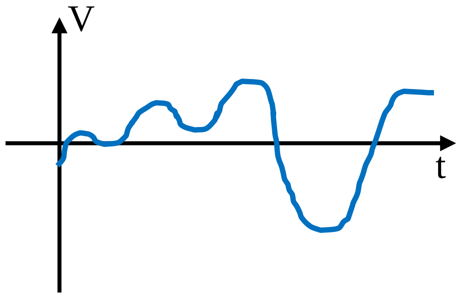
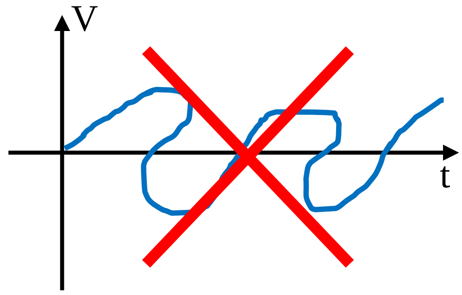
INDICE

1. Segnali continui e discreti nel dominio del tempo

1.1. Introduzione

Un **segnale è una grandezza fisica a cui è associata un'informazione**. Nel mondo elettrico la grandezza fisica per eccellenza è la **tensione** ma in alcune applicazioni si usa anche la corrente.

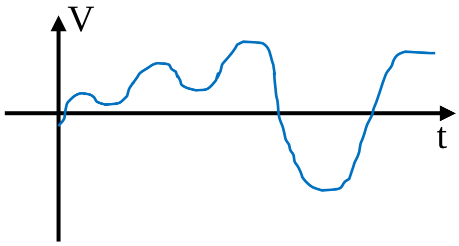
I segnali "**nel dominio del tempo**" si rappresentano sul piano cartesiano mettendo sulle ascisse il tempo (t) e sulle ordinate l'ampiezza del segnale, rappresentata dalla tensione (V) o dalla corrente (I). Nei grafici si scriverà "V" perché nella maggior parte dei casi si tratta di tensione. **Il grafico dei segnali nel tempo si chiama "<u>forma d'onda</u>"**.

Segnale nel dominio del tempo = "forma d'onda"	***Errore!*** *Il segnale non può tornare indietro nel tempo, procede sempre verso destra.*
	

Dalla forma d'onda è possibile distinguere vari tipi di segnali.

1.2. Segnali continui (ANALOGICI)

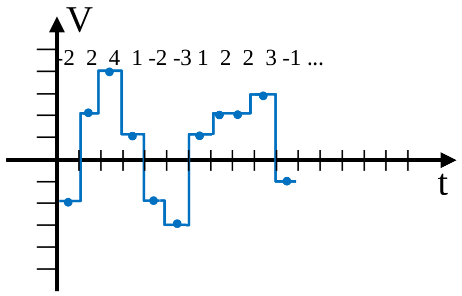
Segnali che **sono definiti in ogni istante di tempo** e **possono assumere qualsiasi valore**. Ogni valore è significativo e quindi ogni valore porta informazione. Ogni punto della curva è descritto da un valore di tempo e un valore di tensione che sono entrambi numeri reali con infinite cifre dopo la virgola perché ognuno è infinitamente vicino a quello successivo. Si dicono anche "**analogici**" perché la loro forma d'onda è analoga alle grandezze fisiche a cui si riferiscono (temperatura, pressione sonora, ecc).



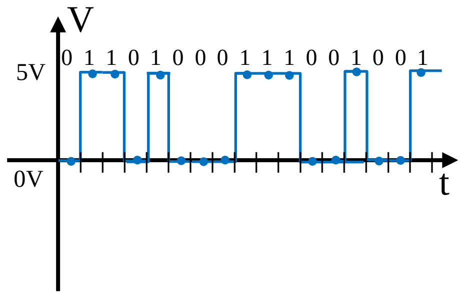
1.3. Segnali discreti (DIGITALI)

Segnali che **sono definiti solo in precisi istanti di tempo** e **possono assumere solo un numero limitato di valori.** Solo questi valori sono significativi, quindi solo questi portano informazione. Si dicono anche "**digitali**" (dall'inglese "digit" che significa "cifra") perché ciascun punto è descritto da un valore di tempo e uno di tensione che sono numeri interi o con un numero limitato di cifre dopo la virgola. Se questi valori sono solo 2, si parla di segnali "**binari**"

Segnale digitale



Segnale digitale binario



<u>**I segnali digitali binari**</u> sono particolarmente utili perché possono essere rappresentati attraverso una sequenza di numeri binari e quindi elaborati da un qualsiasi processore.

Ogni segnale binario può assumere **due soli valori:**

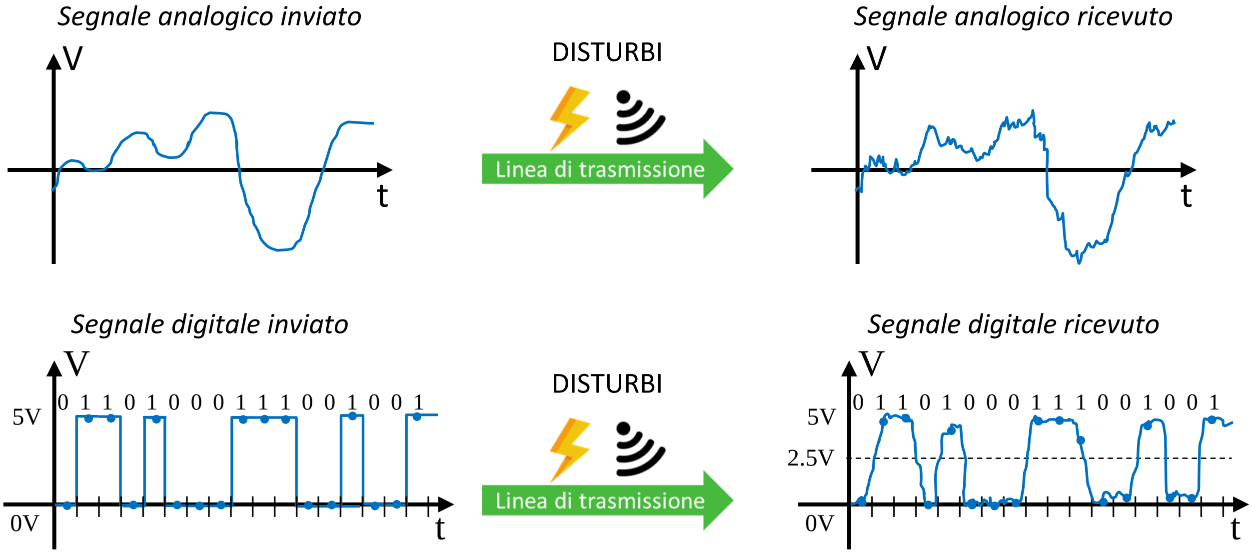
Valore logico "1"	Valore logico "0"
↓ Si associa un **valore fisico** "**ALTO**", "**HIGH**", "**H**", cioè **una tensione** che dipende dal sistema in uso, di solito **5V**. ↓ Indica un **segnale di attivazione** ("**ON**", "**VERO**")	↓ Si associa un **valore fisico** "**BASSO**", "**LOW**", "**L**" cioè **una tensione** che dipende dal sistema in uso, di solito **0V**. ↓ Indica un **segnale di disattivazione** ("**OFF**", "**FALSO**")

<u>**Attenzione!**</u>
Questo vale se i componenti lavorano in "**logica diretta**" (anche detta "**attiva alta**"). Invece alcuni componenti lavorano in "**logica inversa**" (anche detta "**attiva bassa**"), in quel caso il segnale di attivazione è "0" e quello di disattivazione è "1".

1.4. Vantaggi del digitale rispetto all'analogico

1. Un segnale digitale è a tutti gli effetti un numero binario e quindi **può essere caricato ed elaborato dai processori** (pc, telefoni, ecc) **e può essere trasmesso tramite internet**.

2. Un segnale digitale è **maggiormente immune ai disturbi**, quindi si può facilmente copiare, trasmettere ed elaborare senza perdere di qualità.



Entrambi i segnali si deteriorano nella trasmissione, ma l'informazione del segnale digitale resta più fedele all'originale: cambia solo se il disturbo è così forte che il segnale passa da 1 a 0 o viceversa. Avendo il segnale di destra è possibile ricostruire quello di sinistra senza errori. Nell'analogico invece l'informazione si deteriora sempre e non è più possibile ricostruire il segnale originario. Infatti possiamo copiare un file quante volte vogliamo senza rischiare di perdere dati (file = dati digitali), mentre se facciamo una fotocopia di fotocopia decine di volte alla fine non si leggerà più nulla (fotocopia = dati analogici).

3. Un segnale digitale **può essere maggiormente compresso**, quindi **occupa meno spazio nelle memorie** e **si possono inviare più dati nella stessa linea di trasmissione** (minore occupazione di banda).

   Ad esempio un tempo la TV analogica aveva poche decine di canali, mentre il digitale terrestre ne ha centinaia.

2. Segnali periodici nel dominio del tempo.

2.1. Introduzione

I segnali possono appartenere a tre categorie: **periodici, aperiodici e quasi periodici**.

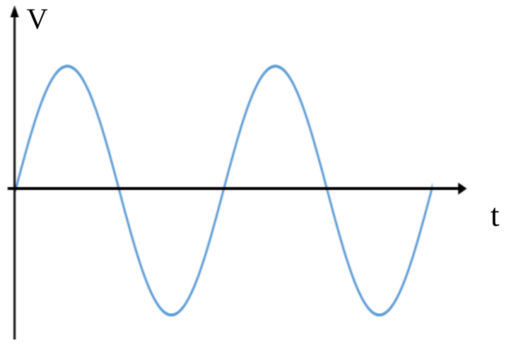
I **segnali periodici** hanno una forma d'onda che si ripete in modo identico dopo un certo intervallo di tempo chiamato "periodo" (T).

Possono essere di 2 tipi:

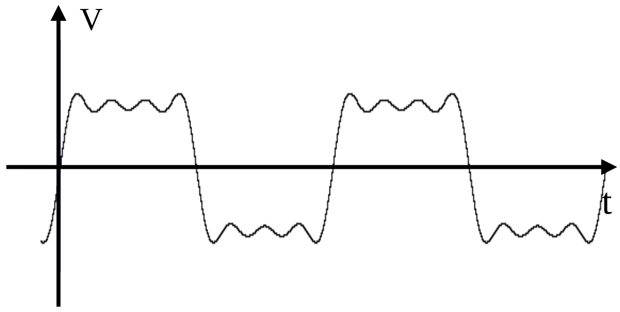
A. periodici sinusoidali: la forma d'onda è una sinusoide.

B. periodici non sinusoidali (composti): la forma d'onda è qualsiasi.

Segnale analogico periodico sinusoidale



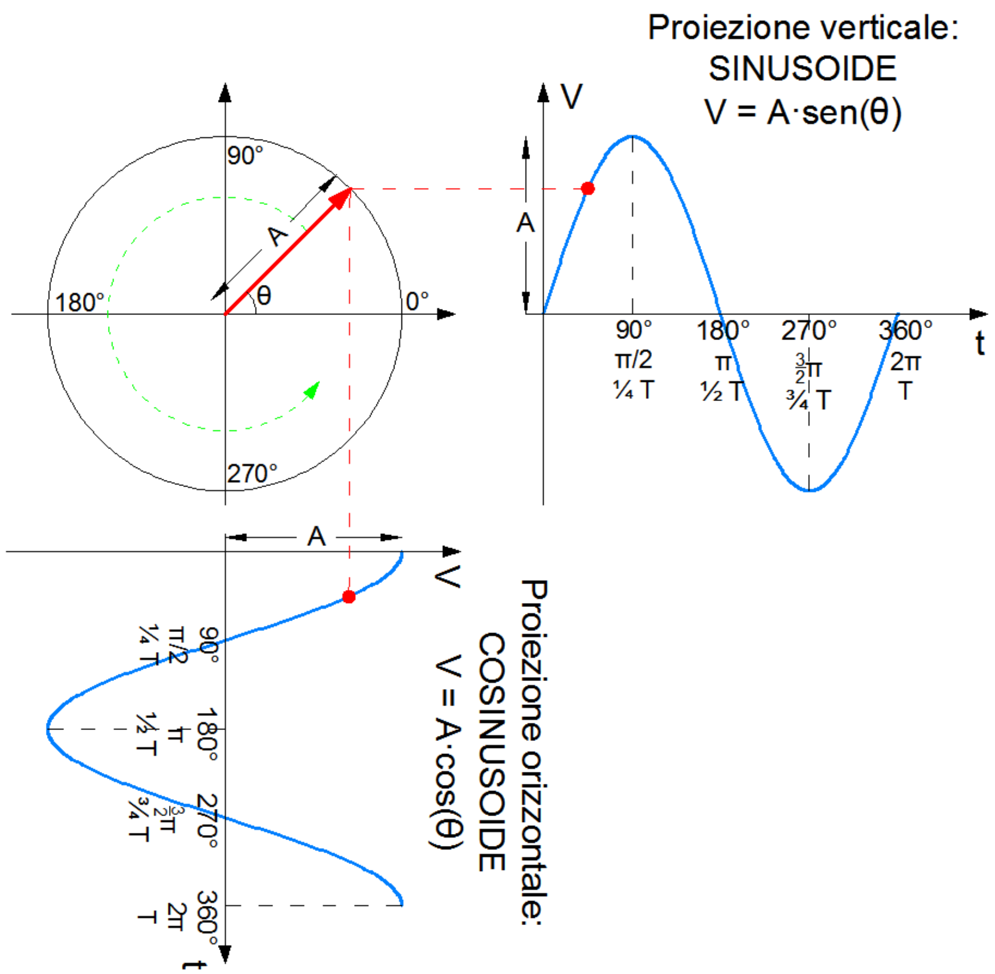
Segnale analogico periodico non sinusoidale



2.2. Segnali periodici sinusoidali

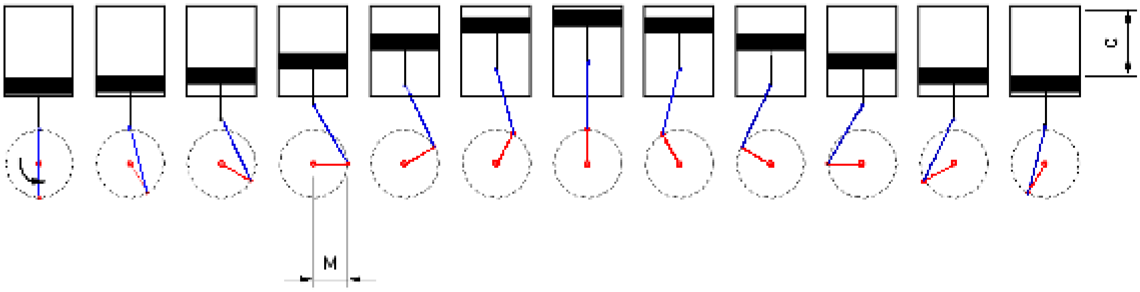
L'onda sinusoidale è in assoluto la forma d'onda più importante e conosciuta. Perché?

Per capirlo bisogna sapere che **la sinusoide è la proiezione del moto circolare di un punto** (guarda il grafico sotto e clicca qui per vedere l'animazione interattiva). Il punto può essere indicato con una freccia che si chiama "**vettore**".

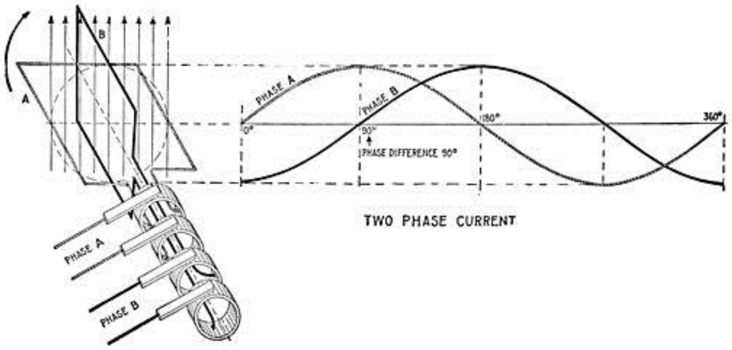


Esempi

1. Il movimento del pistone di un'auto è sinusoidale perché è la proiezione della rotazione del motore:



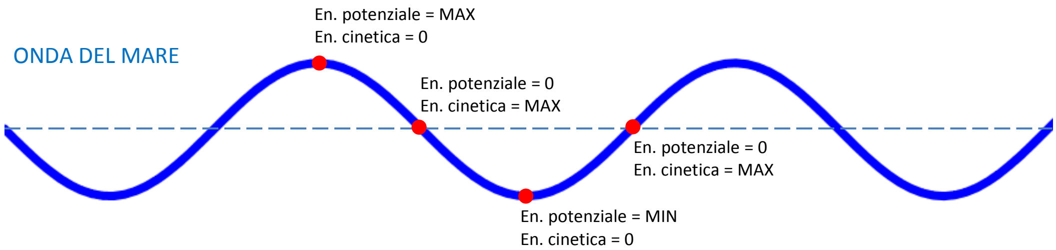
2. La tensione presente nelle nostre abitazioni ha forma sinusoidale perché è la proiezione della rotazione dell'alternatore nella centrale elettrica:



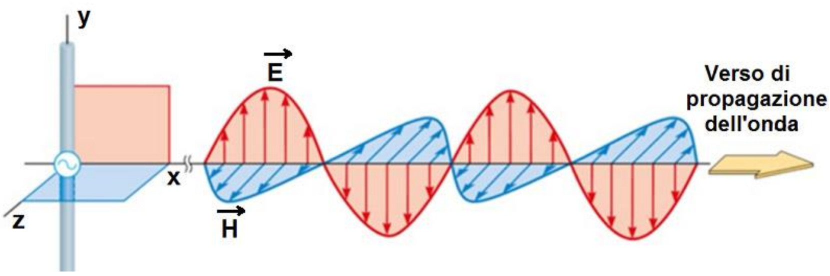
Inoltre **la sinusoide si crea anche quando vi è un equilibrio tra due grandezze fisiche che si scambiano energia**, ciò permette all'energia di propagarsi anche molto lontano.

Esempi

3. Le onde del mare si creano perché vi è un continuo scambio tra due forme di energia: quella cinetica (velocità di salita e discesa dell'onda) e quella potenziale gravitazionale (altezza dell'onda). E' un continuo gioco. Quando l'onda è al suo punto più alto ha la massima energia potenziale e energia cinetica zero (è ferma). Quando l'onda sta a metà altezza ha energia potenziale zero (sta al livello medio del mare) e energia cinetica massima (sta scendendo molto veloce). Quando l'onda sta al punto più basso ha energia potenziale negativa (è molto bassa) e energia cinetica zero. Poi il ciclo continua, propagando così la sua energia nel mare fino a molto lontano (pensa agli Tsunami).



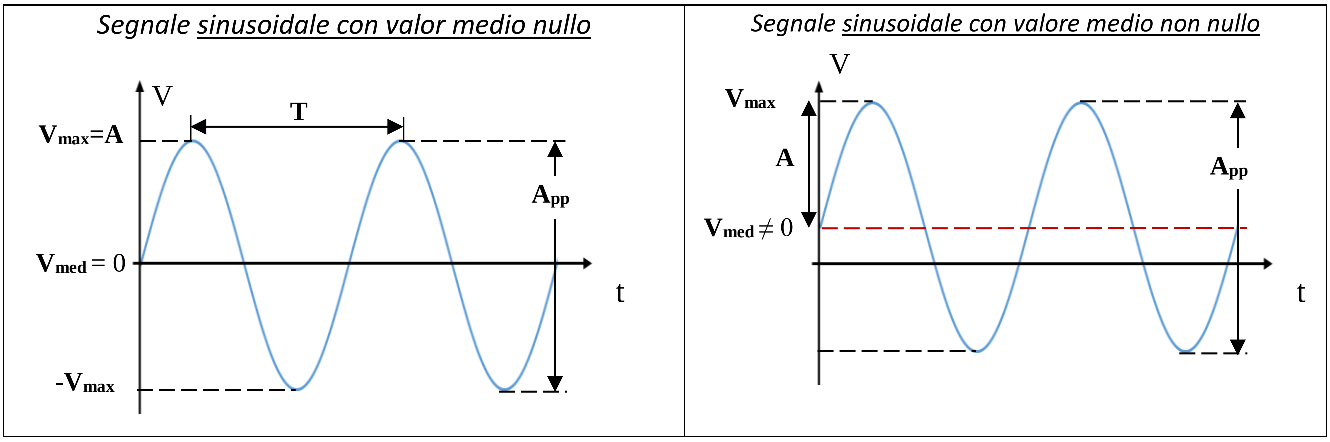
4. Le onde elettromagnetiche, alla base delle comunicazioni radio, tv e telefoniche cellulari, sono anch'esse possibili grazie all'equilibrio di due grandezze fisiche: il campo elettrico (E) e quello magnetico (H) che "palleggiano" continuamente la loro energia, permettendo di propagare il segnale molto lontano. Anche la luce è un'onda elettromagnetica e può viaggiare per miliardi di miliardi di km.



2.3. Grandezze fondamentali di un segnale periodico

In questo paragrafo vengono presentate le grandezze fisiche fondamentali dei segnali periodici. Verrà indicato quali di queste sono applicabili anche ai segnali non periodici.

<u>Sono riportate le grandezze per segnali in tensione</u> (V). Le stesse grandezze si applicano anche a segnali in corrente (I) o altri tipi di segnali non elettrici. Le ampiezze hanno la stessa unità di misura del segnale, quindi Volt per segnali in tensione e Ampère per segnali in corrente.



1) VALOR MEDIO (V_{med})
Valore medio del segnale. Per segnali che hanno parti positive e parti negative identiche, il valor medio è nullo (vedi sinusoide di sinistra), altrimenti è diverso da zero (vedi sinusoide di destra). Applicabile anche ai segnali non periodici.

2) VALORE MASSIMO (o DI PICCO) (V_{max} o V_p)
Valore massimo del segnale (può essere positivo o negativo). Coincide con l'ampiezza (A) se il valor medio è nullo. Applicabile anche ai segnali non periodici.

3) AMPIEZZA (A)
Modulo della differenza tra il valore di picco ed il valor medio $|V_{max} - V_{med}|$. Il "modulo" significa che si prende il valore sempre col segno positivo. L'ampiezza coincide con il modulo del valore di picco $|V_{max}|$ se il valor medio è nullo. Si usa solo per le sinusoidi, le onde quadre o altri segnali simmetrici rispetto al valor medio.

4) AMPIEZZA PICCO-PICCO (A_{pp} o V_{pp})
Differenza tra il valore di picco superiore ed il valore di picco inferiore del segnale. Se il segnale ha valor medio nullo è pari al doppio dell'ampiezza positiva ($=2V_{max}$). Applicabile anche ai segnali non periodici.

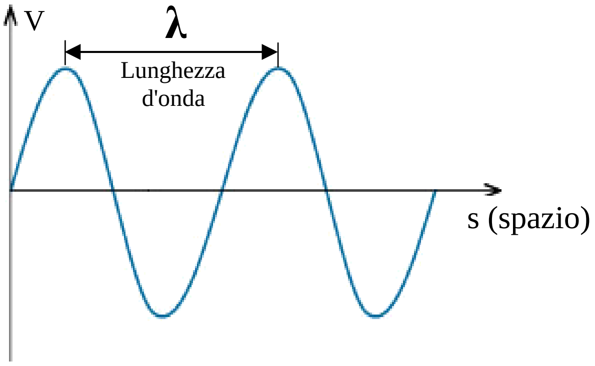
5) PERIODO (**T** maiuscolo)
Tempo trascorso tra due ripetizioni del segnale. Si misura in secondi [s] o sottomultipli.

6) FREQUENZA (**f** minuscolo)
Numero di ripetizioni del segnale al secondo. Si misura in **Hertz** [Hz]. 1 Hz = 1 ripetizione al secondo.
La frequenza è il reciproco del periodo:

$\boxed{f = \frac{1}{T}}$ e quindi $\boxed{T = \frac{1}{f}}$

7) LUNGHEZZA D'ONDA (**λ** "lambda")

Spazio che separa due ripetizioni del segnale (due creste). E' visibile se si pone sulle ascisse lo spazio anziché il tempo. Si misura in metri e sottomultipli.



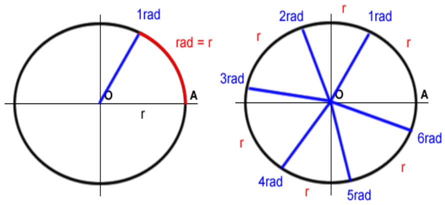
La lunghezza d'onda, come tutte le lunghezze, si trova come prodotto tra la velocità ed il tempo:

$$\boxed{\lambda = c \cdot T}$$

Dove 'c' è la velocità di propagazione dell'onda.
Nel caso delle onde elettromagnetiche è la velocità della luce. Nel vuoto $c \cong$ **$3 \cdot 10^8$ m/s**.
Nel caso delle onde acustiche è la velocità del suono (in aria $\cong$ **340 m/s**).

8) PULSAZIONE (ω "omega")

E' una grandezza direttamente proporzionale alla frequenza. Abbiamo visto che le sinusoidi sono generate dalla proiezione del un moto circolare di un vettore. La pulsazione non è altro che la cosiddetta "velocità angolare" ossia quanto velocemente si muove il punto lungo il suo moto circolare. Ad esempio se il punto si muovesse alla velocità di 2 m/s lungo il cerchio la sua velocità angolare sarebbe proprio 2 m/s. Per la pulsazione, però, invece che misurare il numero di metri al secondo si misura il numero di "radianti" al secondo. Ricordo che **un radiante equivale alla misura del raggio**. Quindi in definitiva la pulsazione ci dice quante volte al secondo viene percorsa la distanza di un raggio durante il movimento circolare. Ricordo anche che in un giro completo di 360° ci sono 2π radianti (cioè circa 6,28 radianti).



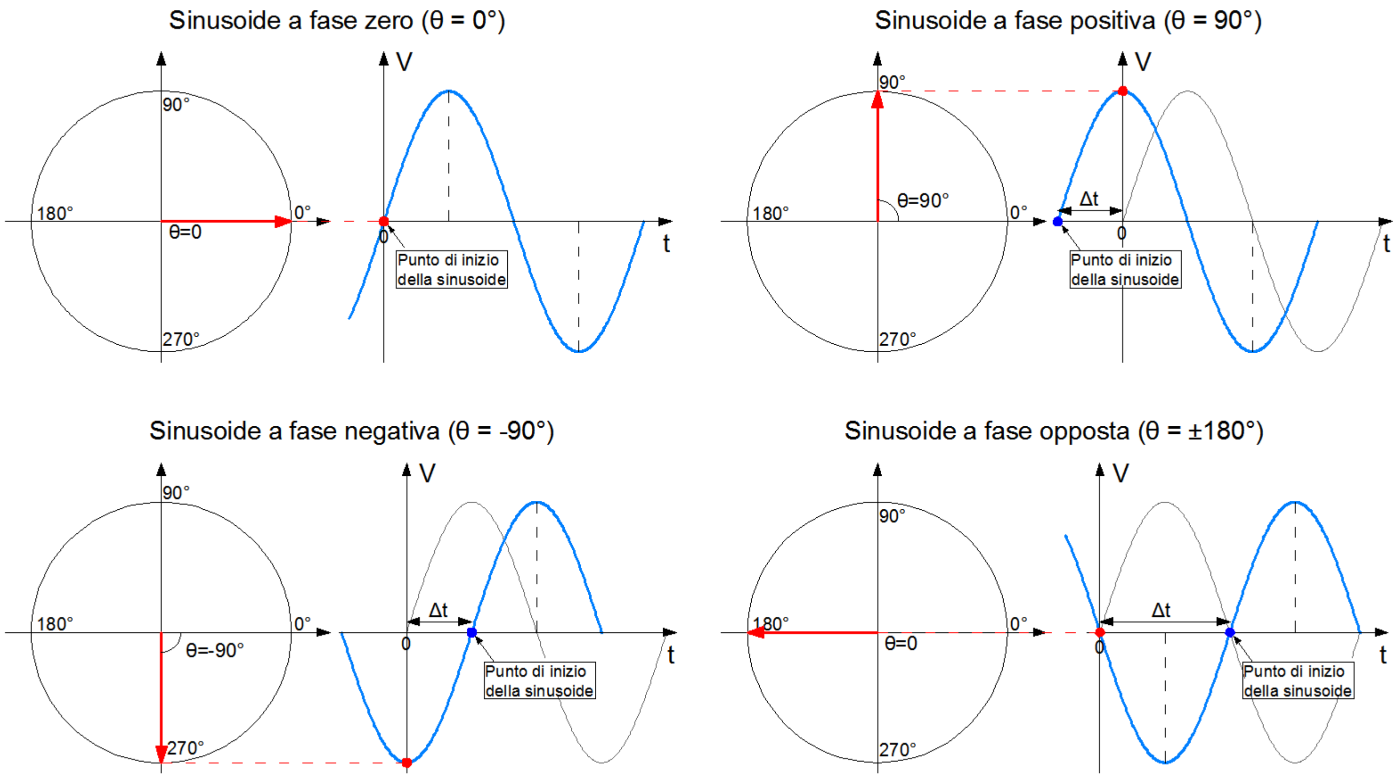
Quindi **ω rappresenta il numero di radianti che vengono percorsi in un secondo nel movimento circolare**. Si misura in "radianti al secondo" [***rad/s***]. La pulsazione può essere calcolata semplicemente così :

$$\boxed{\omega = 2\pi \cdot f}$$

Ad esempio se il punto si muovesse a π rad/s, significa che ogni secondo percorrerebbe 3,14 radianti, cioè metà circonferenza. Se il punto si muovesse a 6,28 rad/s significa che ogni secondo percorrerebbe l'intera circonferenza (2π radianti).

9) FASE (**θ** teta minuscolo)

Per capire la fase bisogna di tenere sempre presente che la sinusoide è generata dal movimento di un vettore su una circonferenza. **La fase è l'angolo a cui si trova il vettore al tempo zero**. In figura si possono vedere gli esempi grafici di quattro fasi: la forma d'onda è identica ma, cambiando fase, il segnale viene traslato. Infatti **la fase è responsabile della traslazione dell'onda sull'asse dei tempi.** Se la fase è **positiva** il segnale si dice "**in anticipo**", perché anticipa quello a fase zero, se è **negativa** si dice "**in ritardo**".



Le unità di misura della fase possono essere i **gradi** oppure i **radianti** [**rad**].

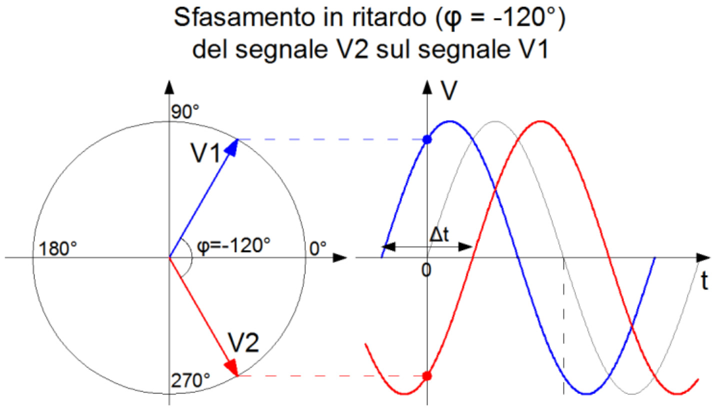
<u>**La conversione tra gradi a radianti**</u> si esegue risolvendo una semplice proporzione, considerando che l'angolo giro misura 360 gradi oppure 2π radianti:

$$\boxed{\theta_{gradi}: 360 = \theta_{rad}: 2\pi}$$

La fase rappresenta a tutti gli effetti anche un ritardo o un anticipo in termini temporali. Questo intervallo di tempo, chiamato ΔT (vedi i grafici sopra), si misura in secondi [**s**] e può essere calcolato anch'esso con una semplice proporzione, considerando che un giro completo del vettore corrisponde al tempo di un periodo:

$$\boxed{\Delta t: T = \theta_{gradi}: 360} \qquad \boxed{\Delta t: T = \theta_{rad}: 2\pi}$$

Frequentemente può succedere che si debba indicare la differenza di fase tra due diversi segnali. In questo caso si parla di **SFASAMENTO** dei segnali (simbolo **φ** 'phi' minuscolo), ossia l'angolo che c'è tra i due vettori. Clicca qui per vedere l'animazione interattiva. Come si vede nell'animazione i due vettori possono avere anche diverse ampiezze.



Lo sfasamento tra due segnali si trova semplicemente come differenza tra le fasi dei due vettori.

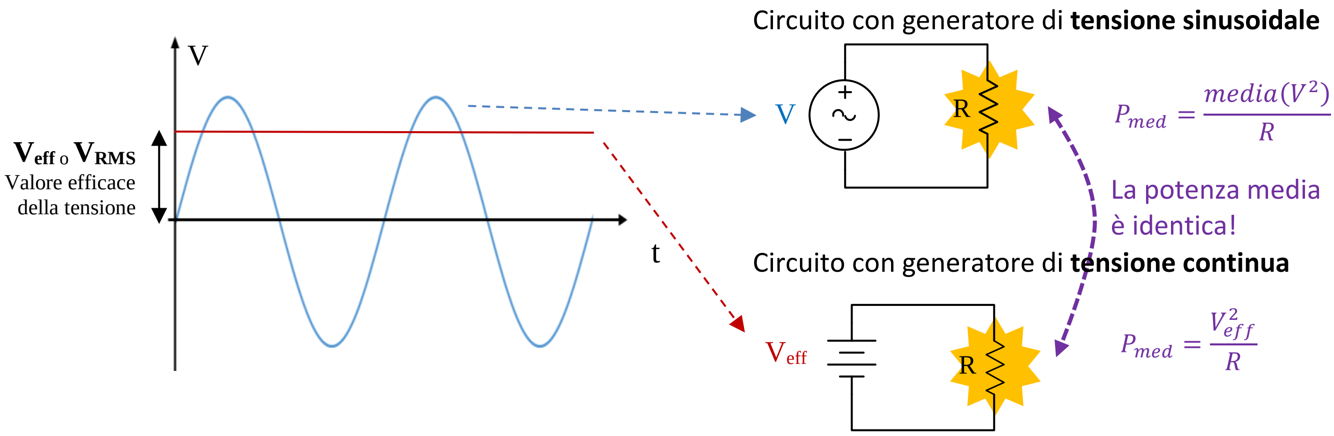
$$\boxed{\varphi_{V2-V1} = \theta_{V2} - \theta_{V1}}$$

Così è stato calcolato lo sfasamento del vettore V2 rispetto al V1. Se si vuole sapere invece lo sfasamento di V1 rispetto a V2 basta fare: $\varphi_{V1-V2} = \theta_{V1} - \theta_{V2}$.

Chiaramente lo sfasamento di V1 rispetto a V2 sarà identico ma di segno opposto rispetto all'altro.

10) VALORE EFFICACE (RMS)

Il valore efficace di un segnale **è l'ampiezza che dovrebbe avere un segnale costante per fornire mediamente la stessa potenza del segnale originario**.



Il segnale sinusoidale è variabile nel tempo, quindi la potenza che trasporta (P=V·I oppure P=V²/R) è anch'essa variabile nel tempo. Ci sono momenti in cui P=0 (quando V=0) e momenti in cui è al massimo (quando $V=V_{max}$). A causa di questo problema, invece che considerare la potenza istantanea, si considera la potenza media: $P_{med} = \frac{media(V^2)}{R}$.
A questo punto ci si può chiedere: "esiste una tensione costante che mi genera quella stessa potenza?".
La risposta è sì e si chiama proprio valore efficace di quella tensione. La potenza generata da questa tensione costante sarà la seguente: $P_{med} = \frac{V_{eff}^2}{R}$.
Per trovare il valore di V_{eff} basta uguagliare i due membri di destra di entrambe le equazioni:
$\frac{media(V^2)}{\cancel{R}} = \frac{V_{eff}^2}{\cancel{R}}$, semplificando le R e cambiando di posto si ricava: $V_{eff}^2 = media(V^2)$, applicando la radice quadrata ad entrambi i membri si ottiene:

$$\boxed{V_{eff} = \sqrt{media(V^2)}}$$

Ora si capisce perché in inglese il valore efficace si chiama "**RMS**" che sta per "Root = radice", "Mean = media", "Square = quadrato". Infatti per trovare il valore efficace si fa proprio la radice quadrata, della media dell'ampiezza del segnale al quadrato. Questa definizione è applicabile anche ai segnali non periodici.

In caso di **segnali sinusoidali** si può dimostrare che:

$$\boxed{V_{eff} = V_{med} + \frac{A}{\sqrt{2}} = V_{med} + 0{,}71 \cdot A}$$

Questo ci è molto familiare, infatti la tensione 230V alle nostre prese non è altro che il valore efficace dell'onda sinusoidale che ci viene inviata. Quanto varrà il valore di picco? Basta fare la **formula inversa** dell'equazione sopra:

$$A = \sqrt{2} \cdot (V_{eff} - V_{med}) = 1{,}41 \cdot (230 - 0) = 324\, V$$

Spesso si può trovare anche la sigla "**TRMS**" dove la "T" sta per "true = vero". Questo serve a sottolineare che il valore efficace viene calcolato in modo completo secondo la prima formula e non con la formula semplificata che si utilizza per le sinusoidi. Il TRMS è garanzia di una maggiore affidabilità nella determinazione del valore efficace, soprattutto se il segnale in questione non è puramente sinusoidale. Ad esempio quando si acquista un amplificatore audio c'è una notevole differenza tra il valore RMS e TRMS.

2.3.1. Equazione della generica sinusoide

Grazie ai parametri studiati, è possibile esprimere matematicamente una **generica sinusoide nel dominio del tempo**:

$$\boxed{s(t) = V_{med} + A \cdot sen(\omega \cdot t + \theta)}$$

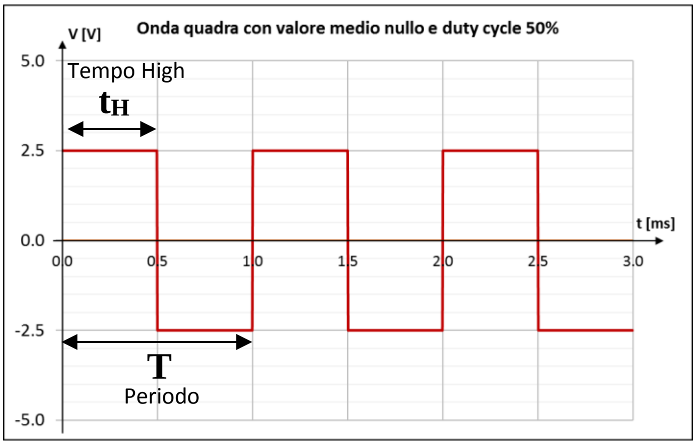
Questa funzione può creare qualsiasi tipo di sinusoide possibile. Da notare che in questo caso la fase deve essere espressa in radianti.

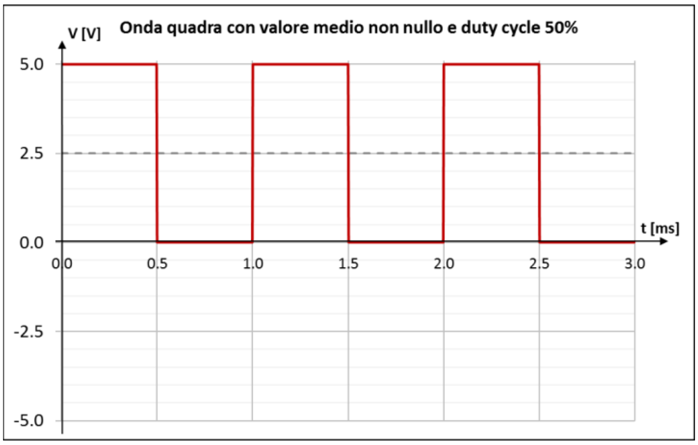
2.4. Segnali periodici non sinusoidali

I segnali periodici possono avere anche forma d'onda non sinusoidale. Ad esempio la forma d'onda di pag. 7 in alto a destra è periodica ma non sinusoidale. Un'altra forma d'onda periodica non sinusoidale molto usata è l'onda quadra, spiegata nel prossimo paragrafo. I segnali periodici non sinusoidali sono molto diffusi e hanno proprietà interessanti che verranno studiate nei prossimi paragrafi.

2.4.1. Onda quadra e Duty Cycle

Il segnale periodico non sinusoidale per eccellenza è l'**onda quadra**. Si tratta di un segnale digitale binario prodotto dell'alternanza dei valori logici "0" e "1". A seconda delle tensioni utilizzate per rappresentare i valori logici si possono distinguere due principali tipologie di onde quadre: a **valor medio nullo** (fig. a sinistra) o a **valor medio non nullo** (fig. a destra).



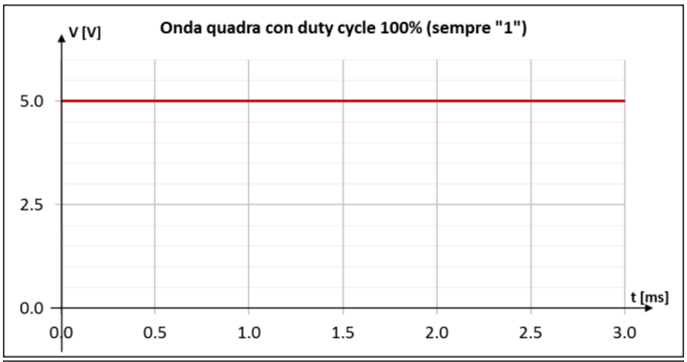


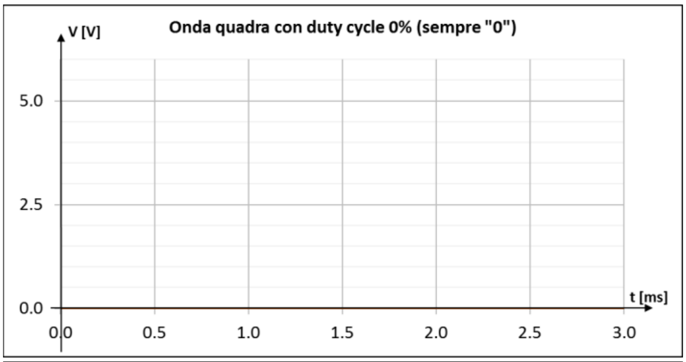
Un'altra caratteristica fondamentale dell'onda quadra è il **Duty Cycle definito come il rapporto tra il tempo in cui l'onda ha valore logico alto e il tempo totale di oscillazione dell'onda (cioè il periodo T)**:

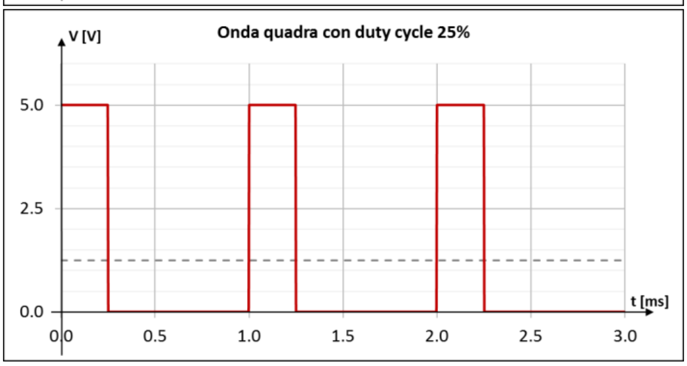
$$\boxed{D = \frac{t_H}{T}}$$

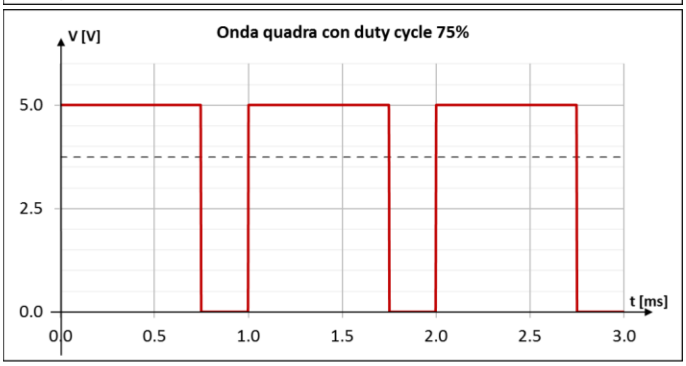
(se si vuole il valore percentuale basta moltiplicare per 100)

In altre parole il duty cycle indica la percentuale di tempo in cui l'onda è alta nel periodo. Se D=100% l'onda sarà sempre al valore alto (fig. in alto a sinistra), se D=0% l'onda sarà sempre al valore basso (fig. in alto a destra), se ha un valore intermedio l'onda potrà avere diverse conformazioni (fig. in basso).









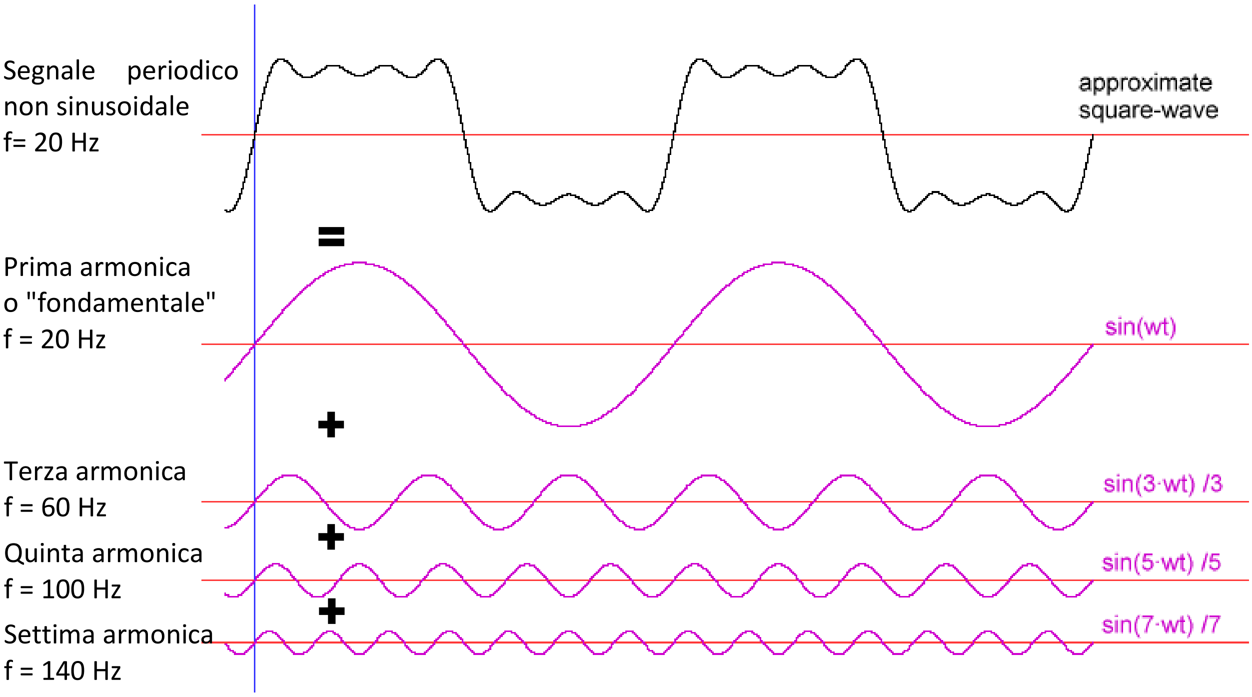
Il duty cycle influenza il **valor medio** del segnale:

$$\boxed{V_m = V_{min} + D \cdot V_{pp}}$$

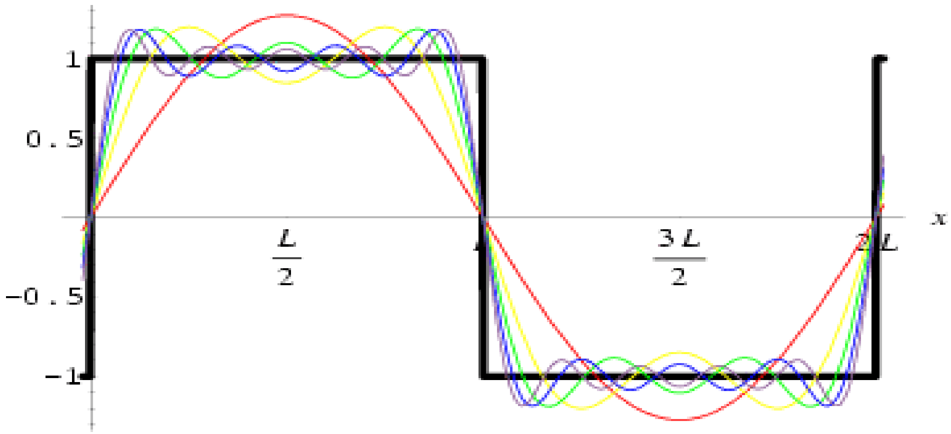
La possibilità di variare facilmente il valor medio del segnale agendo sul duty cycle è alla base della tecnica PWM (*Pulse Width Modulation*) che è un modo semplice per regolare a proprio piacimento la tensione di uscita di un circuito. Questa tecnica è molto utilizzata in numerose applicazioni elettroniche (regolazione delle sorgenti luminose, azionamento dei motori elettrici, regolazione del livello di tensione, ecc).

2.4.2. Scomposizione di un segnale periodico non sinusoidale (sviluppo in serie di Fourier)

Si può dimostrare che <u>qualsiasi segnale periodico non sinusoidale può essere generato dalla sovrapposizione di molteplici sinusoidi a diversa frequenza</u> (sviluppo in serie di Fourier). Ciascuna sinusoide ha **frequenza (o pulsazione) multipla della frequenza del segnale composto e si chiama** "**armonica**".
Nella figura sottostante si vede che il segnale nero non è altro che la somma, istante per istante, dei segnali viola. Supponendo che il segnale nero abbia frequenza di 20 Hz, la prima armonica, chiamata anche "fondamentale" è la prima curva viola a 20 Hz. La seconda armonica, che dovrebbe essere a 2 x 20 = 40 Hz, non è presente. Non tutti i segnali hanno tutte le armoniche. E' presente però la terza armonica a 3 x 20 = 60 Hz. La quarta e la sesta non sono presenti ma ci sono la quinta a 5 x 20 = 100 Hz e la settimana 7 x 20 = 140 Hz.



Il segnale ad **onda quadra**, già visto nei precedenti paragrafi, è uno dei segnali periodici più complessi, perché è **composto da un numero infinito di armoniche**.

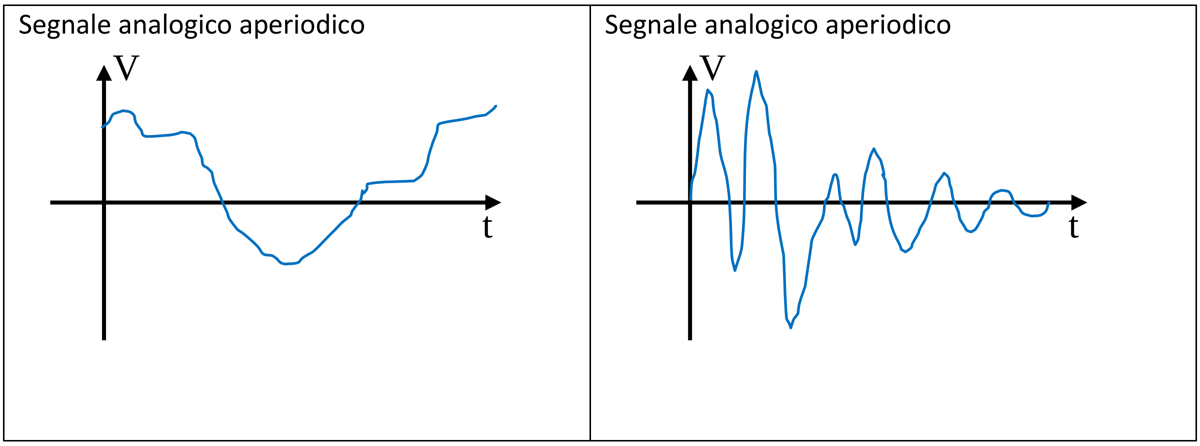


In generale, più il segnale è "spigoloso", cioè ha transizioni brusche, più è necessario un gran numero di armoniche per descriverlo.
Considerando che qualsiasi segnale periodico è una somma di sinusoidi a frequenza multipla, possiamo anche esprimere matematicamente un **<u>generico segnale periodico</u>**:

$$\boxed{s(t) = V_{med} + A_1 \cdot sen(\omega \cdot t + \varphi_1) + A_2 \cdot sen(2 \cdot \omega \cdot t + \varphi_2) + A_3 \cdot sen(3 \cdot \omega \cdot t + \varphi_3) + \ldots.}$$

2.5. Segnali aperiodici

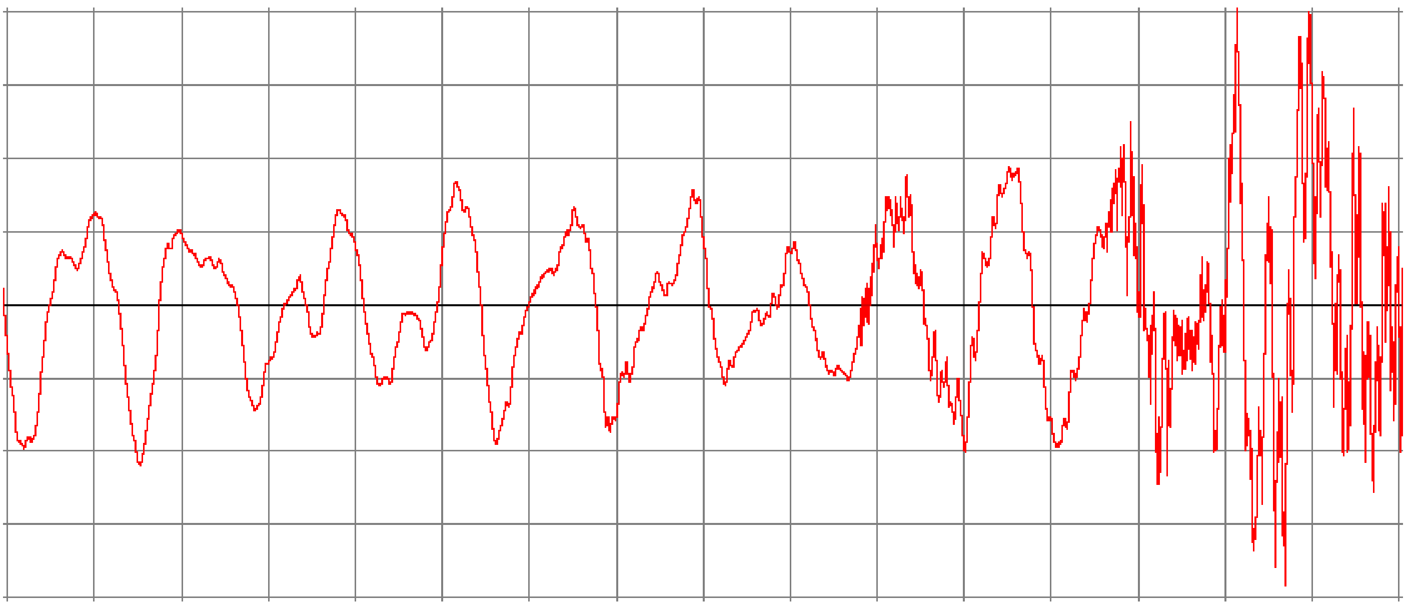
Hanno una forma d'onda che non si ripete mai.



Si può dimostrare che anche i segnali aperiodici possono essere generati dalla sovrapposizione di molteplici sinusoidi a diversa frequenza (trasformata di Fourier). In questo caso però, **le sinusoidi sono infinite e coprono tutte le possibili frequenze**. **<u>Non esistono quindi le armoniche</u>**. Vedi i segnali nel dominio della frequenza.

2.6. Segnali quasi periodici

Sono segnali che risultano essere **periodici solo per periodi limitati di tempo e non totalmente**. In figura si vede l'esempio di una canzone, in cui si vede che la forma d'onda si ripete in modo simile ma non identico per alcuni periodi. Se il tempo di osservazione si allunga si nota un sostanziale cambiamento della forma d'onda. Sono segnali molto comuni, ad esempio la voce e tutti gli strumenti musicali emettono segnali quasi periodici. **Lo spettro di questi segnali è una via di mezzo tra quelli periodici e aperiodici**.



3. Segnali nel dominio della frequenza

I segnali "**nel dominio della frequenza**" si rappresentano sul piano cartesiano mettendo **sulle ascisse la frequenza (f) e sulle ordinate l'ampiezza del segnale (V o I) oppure altre grandezze (ad esempio potenza o fase)**. Il grafico dei segnali in frequenza si chiama "**spettro**". **Lo spettro permette di evidenziare da quali frequenze è composto il segnale**.
Ad esempio, lo spettro di un segnale audio permette di determinare due caratteristiche importanti:

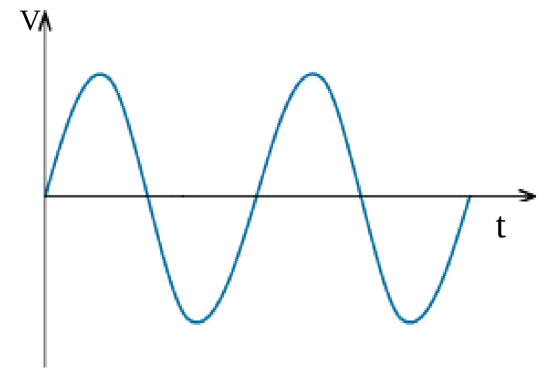
1. Altezza: suono acuto (alta frequenza) o grave (bassa frequenza);
2. Timbro: tipo di suono (pianoforte, voce, violino, ecc).

Lo spettro permette anche di evidenziare la "**larghezza di banda del segnale**" ossia l'intervallo di frequenza in cui il segnale fornisce la gran parte della sua energia (solitamente si considera il 90% dell'energia totale).
Ciascun segnale ha uno spettro ben preciso, vediamo quello dei segnali periodici e aperiodici.

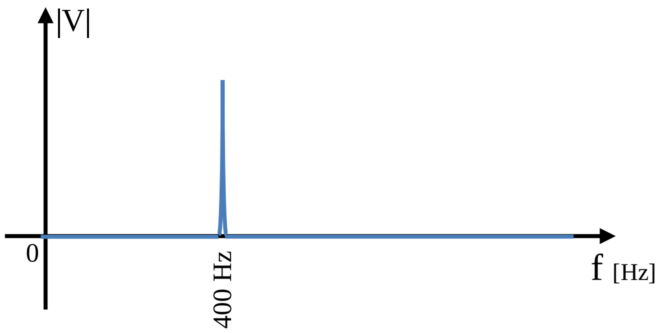
3.1. Spettro dei segnali periodici

Il segnale periodico per eccellenza è la sinusoide. **Ogni sinusoide ha una frequenza ben precisa, quindi lo spettro di una sinusoide è composto da un unico picco a quella frequenza**.

Sinusoide nel dominio del tempo (forma d'onda)



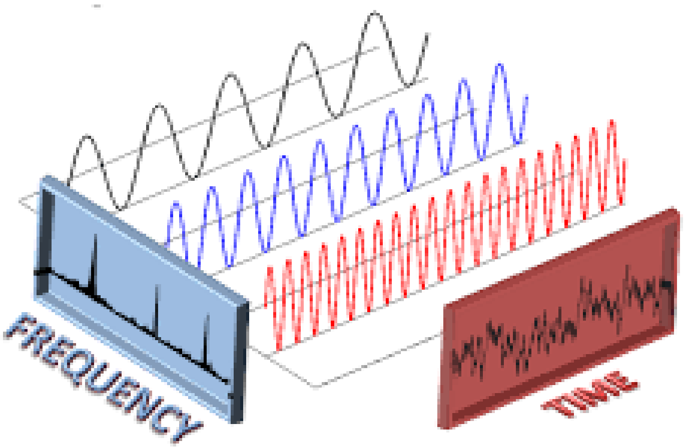
Sinusoide nel dominio della frequenza (spettro)



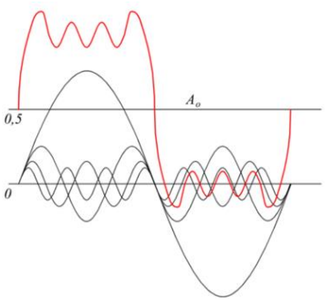
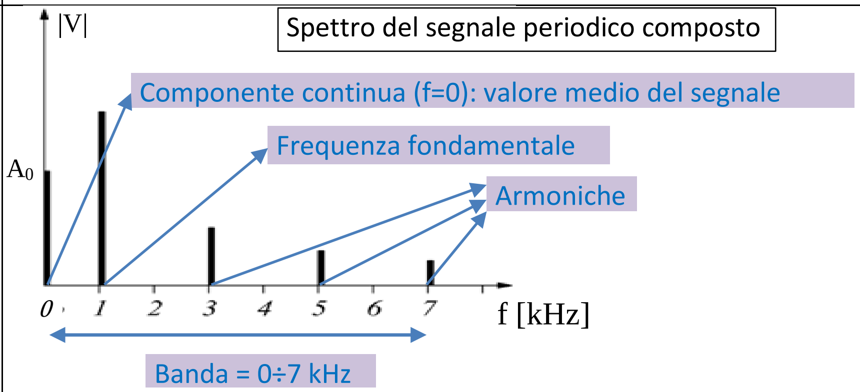
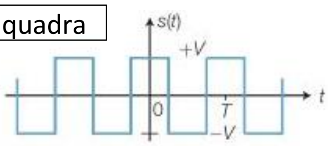
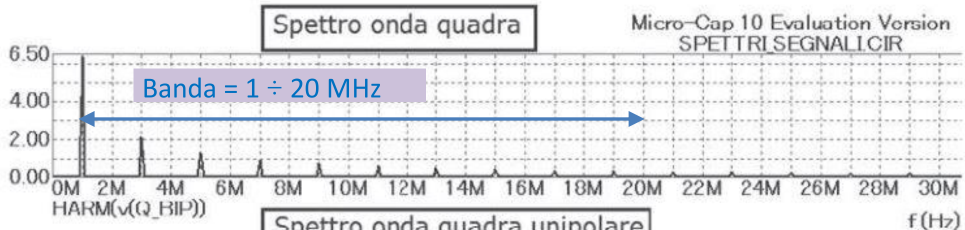
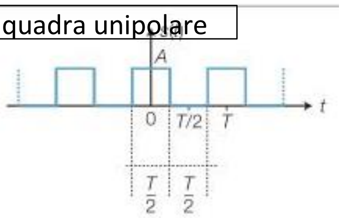
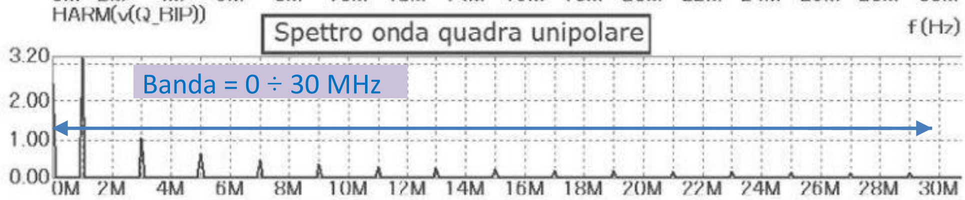
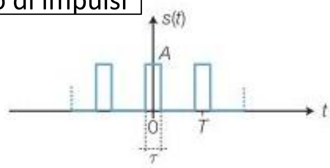
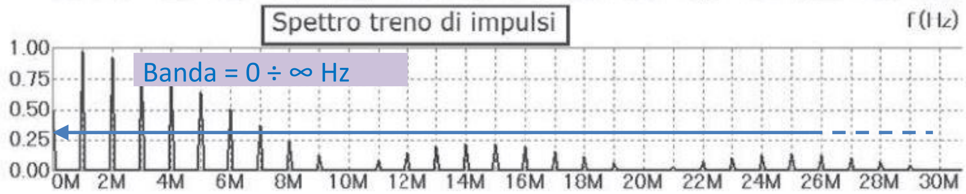
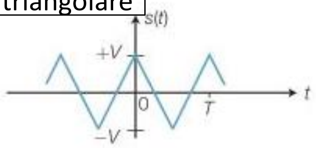
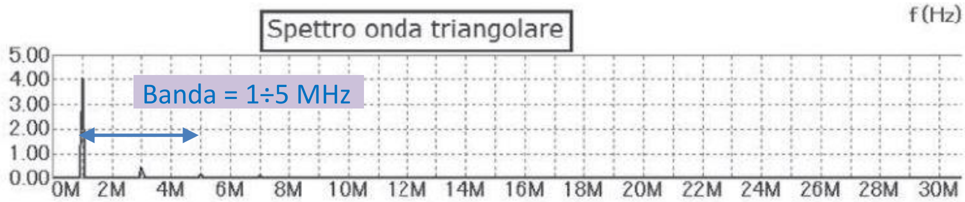
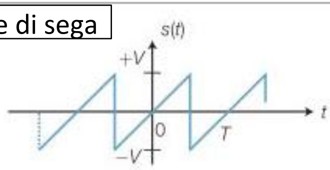
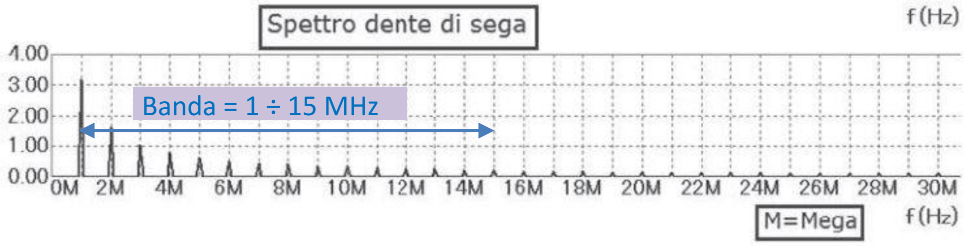
Curiosità.
Un segnale sinusoidale a 400 Hz può essere ascoltato: rappresenta il 'LA' emesso dal diapason o anche il tono "libero" del telefono.

Tuu..

Grazie allo sviluppo in serie di Fourier si sa che **ogni segnale periodico** è dato da una **sovrapposizione di un certo numero di sinusoidi (armoniche) a frequenze multiple della frequenza di base, detta fondamentale**.



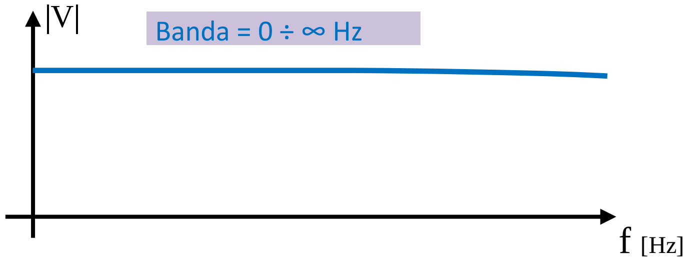
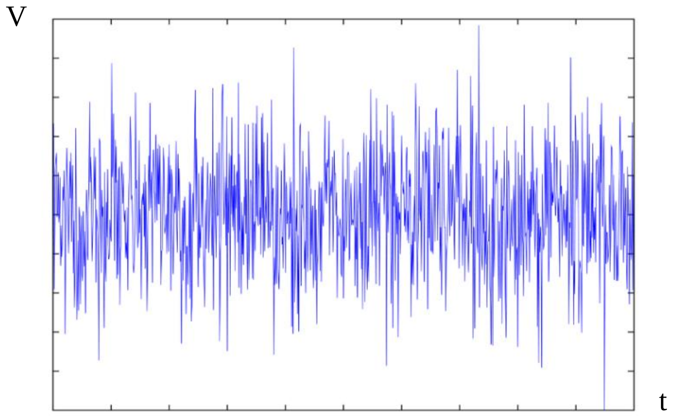
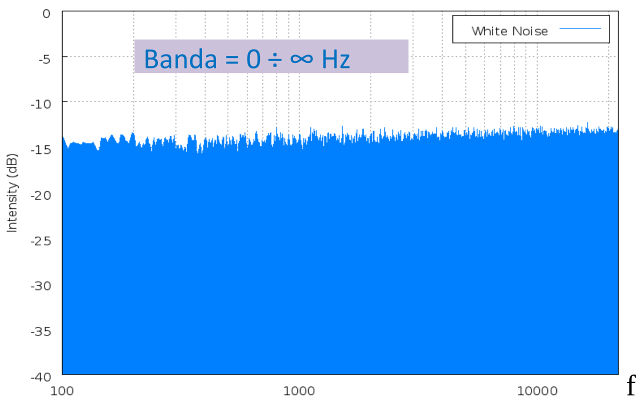
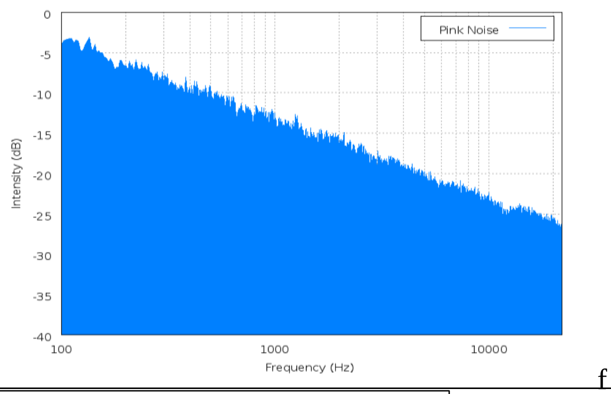
Quindi **lo spettro di un segnale periodico è sempre discreto**, poiché composto da una serie di picchi a frequenze multiple della fondamentale. Ciascun picco nel dominio della frequenza corrisponde ad una sinusoide nel dominio del tempo (fondamentale + armoniche).

Segnali periodici nel dominio del tempo (forme d'onda)	Segnali periodici nel dominio della frequenza (spettri)
Segnale periodico composto 	
Onda quadra 	
Onda quadra unipolare 	
Treno di impulsi 	
Onda triangolare 	
Dente di sega 	

Si nota che **più la forma d'onda è simile alla sinusoide, più la banda è stretta**, mentre più la forma d'onda diventa simile ad un segnale impulsivo (cioè un'onda quadra con i picchi molto brevi), più si allarga.

3.2. Spettro dei segnali aperiodici

Lo spettro di un segnale aperiodico è sempre <u>continuo</u>, poiché composto da un'infinità di picchi a tutte le frequenze. Ciascun picco nel dominio della frequenza corrisponde ad una sinusoide nel dominio del tempo. Quindi un segnale aperiodico è la **<u>composizione di infinite sinusoidi a frequenza diversa</u>**.

Segnali <u>aperiodici</u> nel dominio del <u>tempo</u> (forme d'onda)	**Segnali <u>aperiodici</u> nel dominio della <u>frequenza</u> (spettri)**
Impulso singolo  	Spettro dell'impulso singolo 
Rumore bianco  	Spettro del rumore bianco 
Rumore rosa La forma d'onda del rumore rosa è molto simile a quella del rumore bianco. Impossibile distinguerle, per questo si usa il dominio della frequenza.	Spettro del rumore rosa 
Rumore sulla rete elettrica Rumore che si può misurare dalle prese elettriche. Stessa considerazione del rumore rosa.	Spettro del rumore sulla rete elettrica