

## Le Modulazioni

Le modulazioni sono delle tecniche, che si applicano al segnale da trasmettere a distanza, allo scopo di **adattarlo alle caratteristiche del canale di comunicazione**, mantenendo però invariata la sua informazione.

Le modulazioni sono di tre tipi:

- Modulazioni analogiche
- Modulazioni impulsive
- Modulazioni numeriche

Si Immagini una trasmissione radio, per ipotesi assurda, senza alcuna modulazione, in cui, cioè, la voce umana, trasformata da un microfono in corrente elettrica, venga irradiata vi a etere da un'antenna e catturata tramite un'altra antenna ricevente, da un secondo utente.

La banda utile della voce umana non supera i 5KHz, per cui, senza un'opportuna modulazione, anche la frequenza delle onde elettromagnetiche irradiata via etere sarebbe la stessa, con una serie di inaccettabili conseguenze:

Le dimensioni delle antenne, cioè  $\lambda/4$  o  $\lambda/2$  sarebbero, non dico proibitive, ma assolutamente impensabili, visto che alla frequenza di 5KHz, la lunghezza d'onda corrispondente è di 60 Km e quindi le antenne, per avere una buona efficienza, dovrebbero essere lunghe o 15 Km o 30 Km.

- La potenza necessaria ad alimentare un'antenna di queste dimensioni sarebbe enorme.
- Il trasmettitore risulterebbe pesante e voluminoso.
- Le frequenze sarebbero le stesse di tutti gli utenti, cioè il canale, senza modulazione, sarebbe unico, per cui tutti ascolterebbero tutti, cioè tutti gli utenti d'Italia, di Francia, della Cina si ascolterebbero contemporaneamente, rendendo assolutamente impossibile qualunque trasmissione.

Da quanto detto se ne deduce l'assoluta necessità della modulazione che, traslando in frequenza il segnale, ed allocando in canali diversi le trasmissioni di utenti diversi, invece, produce esattamente tutti i vantaggi opposti:

Essendo la frequenza della trasmissione molto elevata, la lunghezza delle antenne diventa umanamente e praticamente possibile, per esempio in FM a 100 MHz, risulta: 75 cm

Conseguentemente la potenza impiegata diventa molto minore.

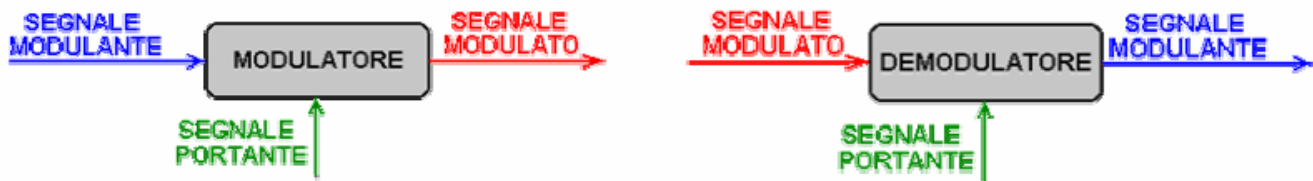
Le dimensioni del trasmettitore diventano minime, basti guardare quelle di un moderno cellulare.

Le frequenze sono diverse per ogni trasmissione, quindi sono possibili moltissime trasmissioni contemporanee senza interferenza reciproca.

## Componenti della modulazione

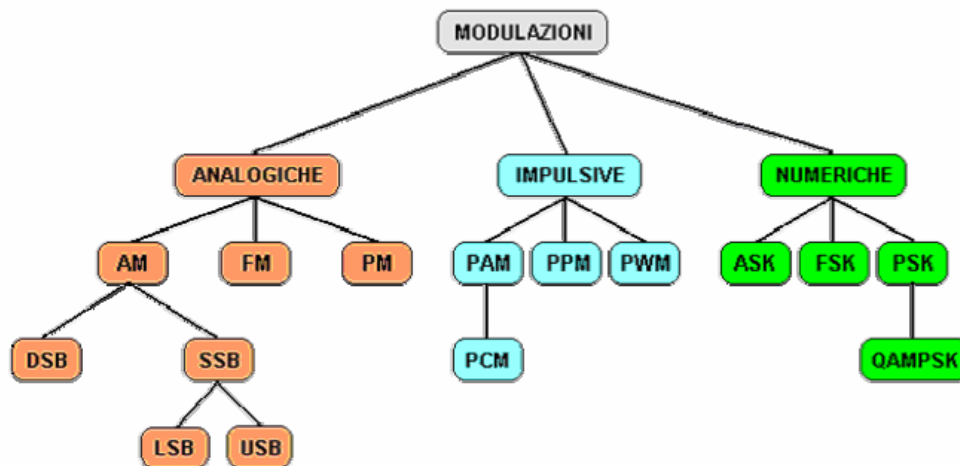
Si tratta di adattare le caratteristiche dello spettro del segnale da trasmettere in modo che possa transitare bene attraverso il canale e, nel contempo, consentire la multiplazione, cioè la trasmissione contemporanea di molti segnali sullo stesso canale senza interferenza.

- Dunque deve essere sempre presente il segnale informativo, cioè l'informazione da trasmettere sotto forma di corrente elettrica o di tensione elettrica. Questa prende il nome di modulante.
- Deve essere però sempre presente anche un altro segnale, detto portante, che consentirà la traslazione in frequenza del segnale modulante, per consentirne tutti quei vantaggi della modulazione di cui si è detto.



### Classificazione delle modulazioni

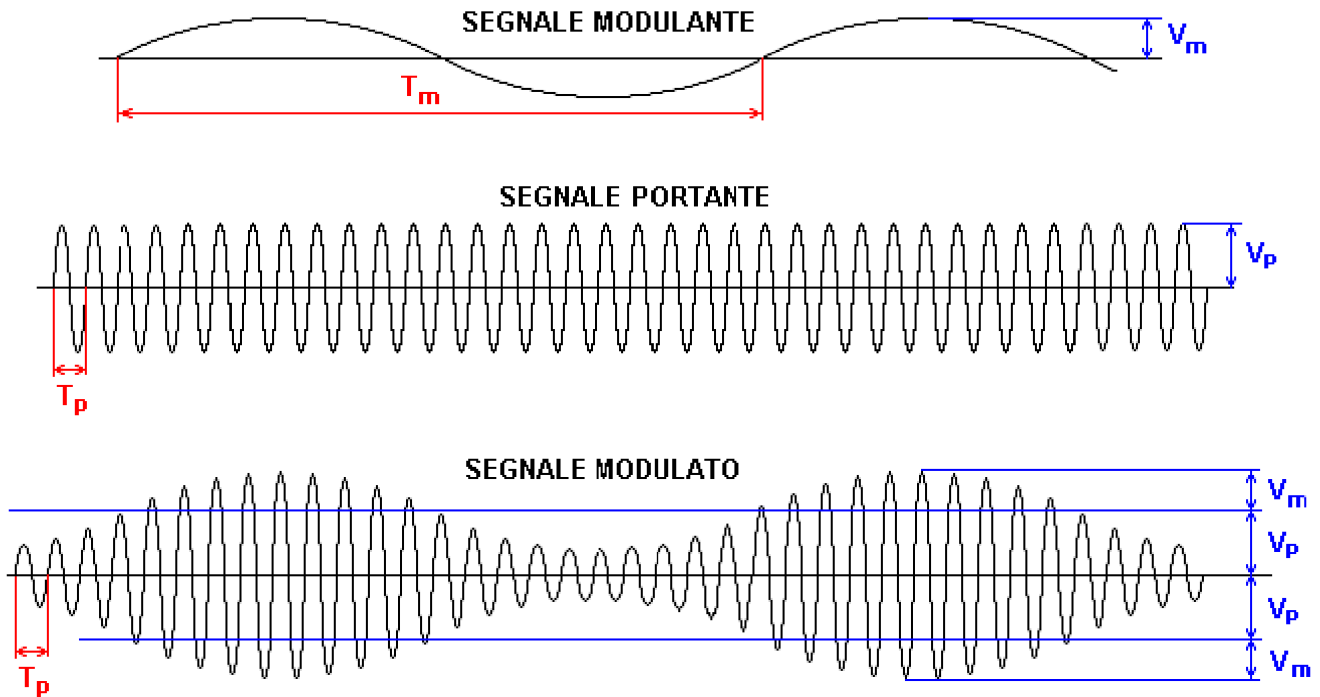
Vista la varietà e la generalità delle operazioni connesse con la modulazione, in quanto l'adattamento, per esempio, del segnale al canale si può intendere e realizzare in modi del tutto diversi a seconda che il segnale sia analogico o numerico, e che il canale sia un doppino telefonico, una fibra ottica, o l'etere, che hanno caratteristiche fisiche alquanto differenti, se ne deduce, come conseguenza, che si ha una classificazione delle modulazioni.



### Modulazione analogica

Le grandezze fondamentali che interessano un processo di modulazione, sia analogico sia numerico, sono:

- Il **segnale modulante**, costituito da un segnale elettrico  $v_m(t)$  avente una certa banda  $B$ , che contiene l'informazione da trasmettere;
- La **portante**, cioè un segnale  $v_p(t)$  sul quale è "caricata" l'informazione da trasmettere (il segnale modulante);
- Il **segnale modulato**, cioè un segnale  $v(t)$  risultante dall'operazione di modulazione, che deve essere compatibile con le caratteristiche del mezzo trasmissivo.

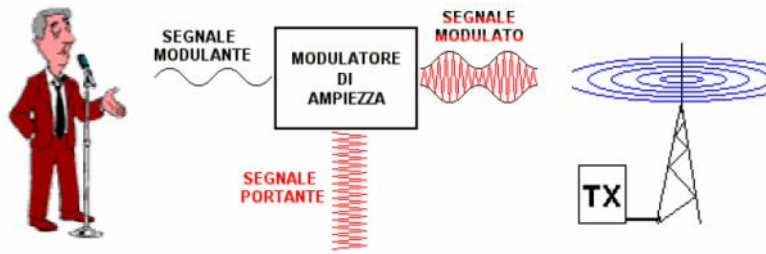


Nella trasmissione analogica esistono due metodologie per trasferire sulla portante le caratteristiche del segnale modulante: variare la sua ampiezza  $A_M$  oppure la sua fase istantanea  $\phi(t)$ . Nel primo caso si ha la famiglia delle **modulazioni analogiche lineari**, la cui più nota è la **modulazione di ampiezza**, nel secondo caso la famiglia delle **modulazioni analogiche angolari**, che comprende la **modulazione di frequenza e di fase**.

Modulazioni analogiche lineari	Modulazioni analogiche angolari
<b>AM</b> (Amplitude Modulation): modulazione di ampiezza	<b>FM</b> (Frequency Modulation): modulazione di frequenza
<b>DSB</b> (Double Side Band): modulazione a doppia banda laterale	<b>PM</b> (Phase Modulation): modulazione di fase
<b>SSB</b> (Single Side Band): Modulazione a banda laterale unica	

La modulazione di ampiezza è stata la prima modulazione impiegata nelle trasmissioni via etere da Guglielmo Marconi agli inizi del secolo, in quanto la più facile da concepire e da realizzare, sia nella fase di trasmissione che di ricezione, specialmente in quei tempi, quando l'elettronica ancora non disponeva di apparecchiature specifiche.

Modulare in ampiezza vuol dire far variare l'ampiezza di una portante a radiofrequenza secondo l'ampiezza di una modulante a bassa frequenza.



L'onda **portante** è costituita da un'oscillazione sinusoidale di adeguata ampiezza e frequenza, la cui espressione è del tipo:

$$v_p(t) = V_p \cos(\omega_p \cdot t + \phi)$$

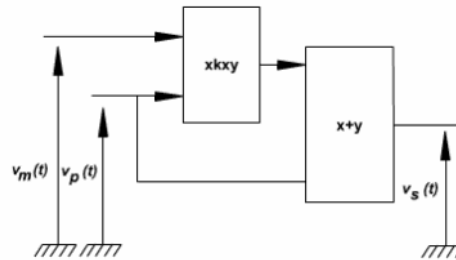
Mentre la **modulante**, con  $\omega_m \ll \omega_p$ , è costituita da un'oscillazione sinusoidale avente espressione:

$$v_m(t) = V_M \cos(\omega_m \cdot t).$$

Per semplicità supponiamo  $\phi = 0$  in quanto la fase iniziale della portante, non avendo alcun contenuto informativo, è insignificante.

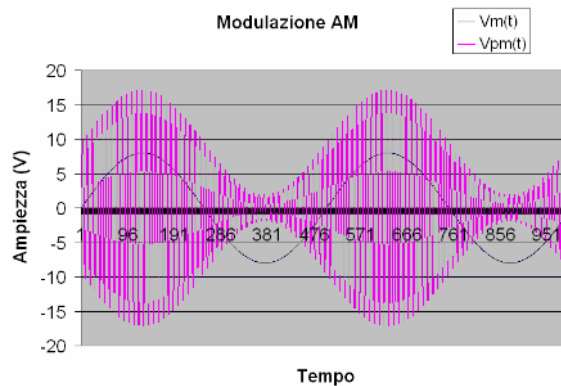
**La modulazione di ampiezza consiste nel far variare l'ampiezza del segnale portante proporzionalmente al valore istantaneo del segnale modulante.**

Essa si effettua grazie a 2 circuiti elettrici: un moltiplicatore (con costante moltiplicativa K) e un sommatore:



Il segnale modulato in ampiezza assume l'espressione:

$$v(t) = (V_p + K_a V_M \cos \omega_m t) \cos \omega_p t = V_p \left( 1 + \frac{K_a V_M}{V_p} \cos \omega_m t \right) \cos \omega_p t$$



Essendo  $\omega_p \gg \omega_m$ , in un periodo del segnale modulante è contenuto un numero elevatissimo di oscillazioni del segnale portante.

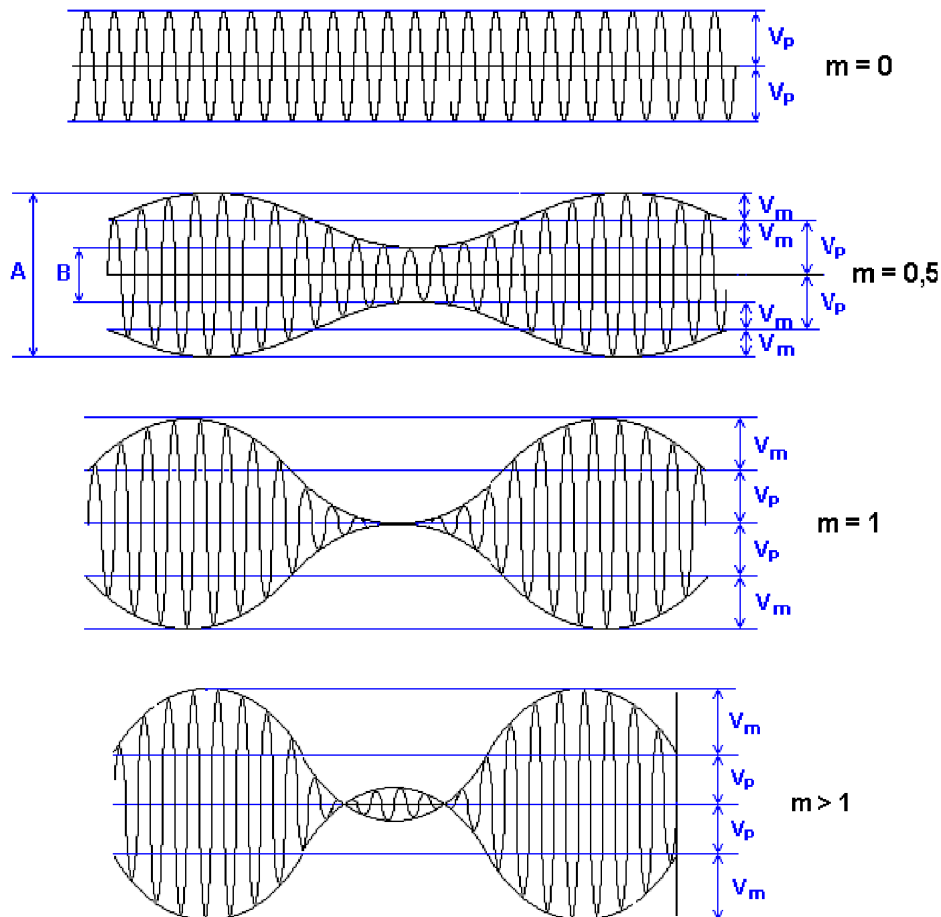
L'equazione precedente può essere scritta nella forma:

$$v(t) = V_p (1 + m_a \cos \omega_m t) \cos \omega_p t$$

Dove il fattore:  $m_a = \frac{K_a V_M}{V_p}$  prende il nome di **indice di modulazione** o **profondità di modulazione** e deve essere  $m_a \leq 1$  affinché l'involuppo del segnale modulato abbia lo stesso andamento dell'informazione da trasmettere.

In particolare:

- se è  $m_a = 0$  vuol dire che non c'è modulante, quindi non si trasmette alcuna informazione, pur impegnando il canale con la portante;
- se è  $m_a = 0,5$  siamo nelle condizioni ottimali;
- se è  $m_a = 1$  siamo di fronte al massimo della modulazione;
- se è  $m_a > 1$  allora siamo in **sovramodulazione**. In tal caso si introducono notevoli distorsioni da **crossover** nell'involuppo del segnale modulato che non consentono, in ricezione, una ricostruzione fedele dell'informazione.



Normalmente  $m_a \cong 40\%$ .

Componenti di un segnale modulato in ampiezza con modulazione sinusoidale.

Sviluppando l'equazione  $v(t) = V_p(1 + m_a \cos \omega_m t) \cos \omega_p t$  si ottiene:

$$v(t) = V_p \cos \omega_p t + V_p m_a \cos \omega_m t \cos \omega_p t$$

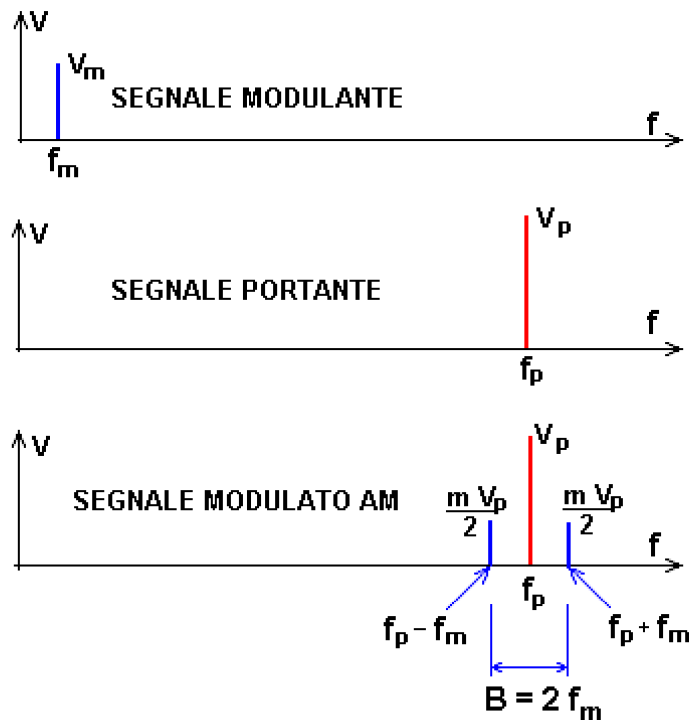
e ricordando la formula trigonometrica di Werner secondo cui:

$$\cos \alpha \cos \beta = \frac{1}{2} [\cos(\alpha - \beta) + \cos(\alpha + \beta)]$$

possiamo scrivere:

$$v(t) = V_p \cos \omega_p t + \frac{V_p m_a}{2} \cos(\omega_p - \omega_m)t + \frac{V_p m_a}{2} \cos(\omega_p + \omega_m)t$$

Da quest'ultima equazione si ricava che il segnale modulato risulta formato dalla somma, istante per istante, di tre componenti sinusoidali: la portante, avente ampiezza  $V_p$  e frequenza  $f_p$  e di due segnali a frequenza  $f_p - f_m$  ed  $f_p + f_m$  aventi ampiezza  $\frac{V_p m_a}{2}$  detti rispettivamente **componente laterale inferiore** e **componente laterale superiore**.



Si osservi come l'operazione di modulazione ha dato luogo ad una traslazione in frequenza del segnale modulante  $f_m$  della quantità  $f_p$ .

Si osservi la larghezza di banda del segnale modulato che risulta essere il doppio della frequenza  $f_m$  modulante, infatti:

$$B = (f_p + f_m) - (f_p - f_m) = 2f_m$$

Si può osservare che in ciascuna componente laterale sono contenuti i parametri caratteristici del segnale modulante (ampiezza e frequenza), dato che le loro ampiezze  $\frac{V_p m_a}{2}$  risultano proporzionali all'ampiezza del segnale modulante mediante l'indice di modulazione  $m_a = \frac{K_a V_M}{V_P}$ .

### Potenza di un segnale modulato AM

Poiché un segnale modulato in ampiezza è costituito dalla somma di tre segnali distinti (come si può vedere chiaramente dal suo spettro nel dominio delle frequenze) la sua potenza sarà la somma delle potenze dei tre segnali:

$$P_{AM} = P_p + P_{left} + P_{right}$$

dove, naturalmente, con  $P_p$  si è indicata la potenza della portante, con  $P_{right}$  la potenza della riga destra e con  $P_{left}$ , la potenza della riga sinistra.

Indicando con  $R_0$  la resistenza di radiazione dell'antenna trasmittente, dai valori delle tensioni, espresse in valori massimi, indicate in figura, e nota  $R_0$ , si trova la potenza complessiva del segnale modulato in **AM** in funzione dell'indice di modulazione  $m_a$ :

$$\begin{aligned} P_{AM} &= \frac{V_{eff}^2}{R_0} = \frac{\left(\frac{V_p}{\sqrt{2}}\right)^2}{R_0} + \frac{\left(\frac{V_p m_a}{\sqrt{2}}\right)^2}{R_0} + \frac{\left(\frac{V_p m_a}{\sqrt{2}}\right)^2}{R_0} = \frac{V_p^2}{2R_0} + \frac{\left(\frac{V_p m_a}{2}\right)^2}{2R_0} + \frac{\left(\frac{V_p m_a}{2}\right)^2}{2R_0} = \frac{V_p^2}{2R_0} + \frac{V_p^2 m_a^2}{4} + \frac{V_p^2 m_a^2}{4} = \\ &= \frac{4V_p^2 + V_p^2 m_a^2 + V_p^2 m_a^2}{2R_0} = \frac{4V_p^2 + V_p^2 m_a^2 + V_p^2 m_a^2}{4} \cdot \frac{1}{2R_0} = \frac{4V_p^2 + 2V_p^2 m_a^2}{8R_0} = \frac{2V_p^2 + V_p^2 m_a^2}{4R_0} = \frac{V_p^2}{2R_0} \cdot \frac{2 + m_a^2}{2} = \\ &= P_p \left(1 + \frac{m_a^2}{2}\right) \end{aligned}$$

Si evidenzia, quindi, che l'onda portante, pur non avendo alcun contenuto informativo, contiene la maggior parte della potenza e che in ciascuna componente laterale la massima potenza, che si ha per  $m_a = 1$ , è uguale al 25% di quella della portante.

Si definisce rendimento di modulazione il rapporto tra la potenza associata a una banda laterale e quella totale:

$$\eta = \frac{\frac{m_a^2 V_P^2}{8R_0}}{\frac{V_P^2}{2R_0} \left(1 + \frac{m_a^2}{2}\right)} = \frac{m_a^2}{2(2 + m_a^2)}$$

Questa relazione ci dice che il rendimento dipende dalla profondità di modulazione  $m_a$ . La formula mette in evidenza che la maggior parte della potenza del segnale modulato è attribuito alla portante che è priva di informazione. La restante potenza comprende le due bande simmetriche, quindi la potenza utile è la metà di quella restante. Di conseguenza il rendimento di una trasmissione AM è molto basso. Se per esempio l'indice di modulazione è uguale a 1 il rendimento è del 16,7%.