

Perché abbiamo studiato i circuiti in corrente alternata?



Perché nelle telecomunicazioni i circuiti vengono utilizzati per acquisire, trasformare e trasmettere segnali elettrici. Una rete di telecomunicazione è composta da svariati circuiti collegati tra loro in cascata dal mittente al destinatario.

ESEMPIO DI UN TRASMETTITORE RADIO:



I circuiti si dividono in tre categorie in base al numero di morsetti coi quali si collegano al resto del circuito:

- Monopoli: 1 morsetto
- Bipoli: 2 morsetti
- Quadripoli: 4 morsetti

La stragrande maggioranza dei circuiti nelle telecomunicazioni sono quadripoli, come si vede dallo schema a blocchi sopra. I circuiti a 3 poli sono considerati sempre quadripoli (il 4° polo coincide col 3°).

I quadripoli sono anche detti circuiti a "2 porte", infatti hanno una porta di ingresso dei segnali (i due morsetti a sinistra) e una porta di uscita (i due a destra).

Perché si usano i quadripoli?



L'impiego dei quadripoli è molto utile per rappresentare i circuiti tramite schemi sblocchi. In questo modo è possibile studiare circuiti molto complessi suddividendoli in circuiti più semplici e studiandoli separatamente.

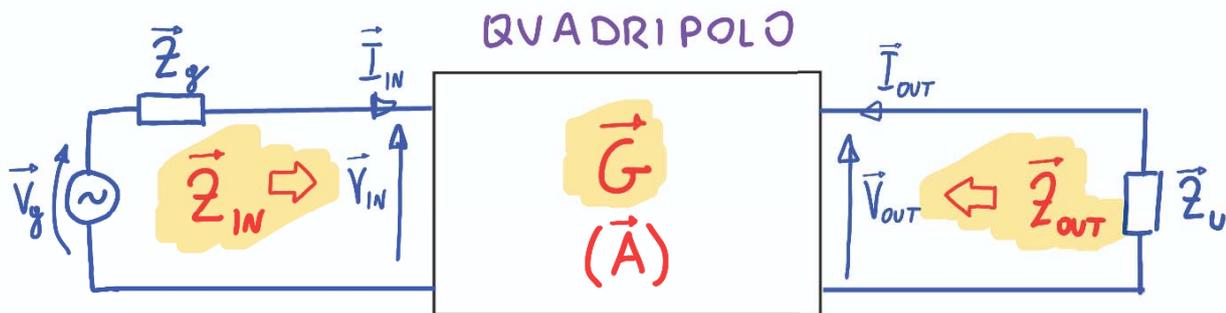
Com'è possibile studiarli separatamente?



È vero, però con alcune accortezze progettuali è possibile fare in modo che ciascun blocco influenzi solo il blocco che lo segue e quasi per niente quello che lo precede. In questo modo si può studiare la tutta la catena partendo dal primo fino all'ultimo.

## SCHEMA E CARATTERISTICHE DEI QUADRIPOLO

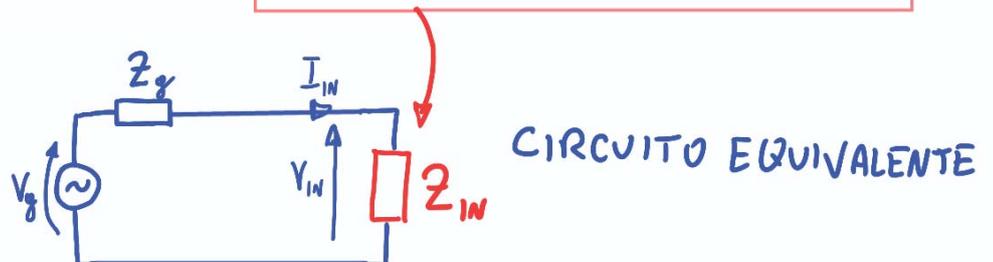
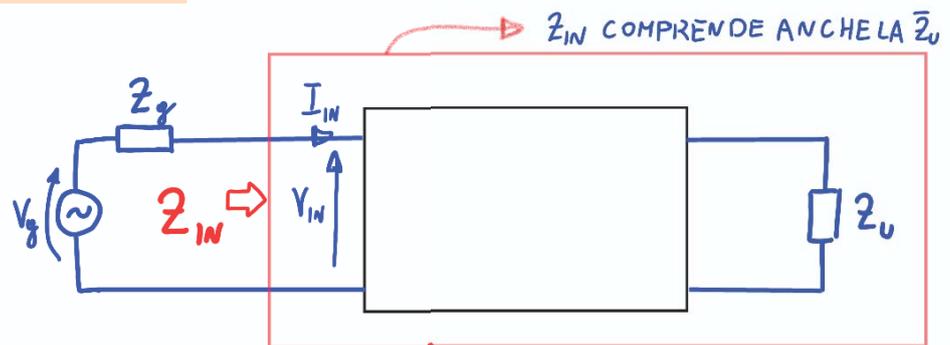
Il circuito interno di un quadripolo potrebbe contenere migliaia di componenti ma dall'esterno i 3 parametri rossi sono sufficienti per comprenderne a pieno il funzionamento.



**ATTENZIONE!** Tutte le grandezze in gioco sono fasori, però per semplicità d'ora in poi non si scriveranno più le frecce. Bisogna però ricordarsi che ognuna è composta da modulo e fase.

### 1) Impedenza di ingresso:

$$Z_{IN} = \frac{V_{IN}}{I_{IN}}$$

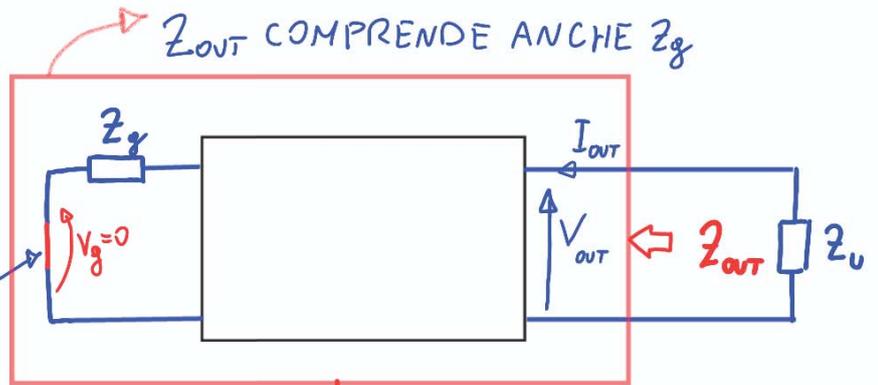


L'impedenza di ingresso è il rapporto tra la tensione e la corrente di ingresso. La  $Z_{IN}$  è l'impedenza che viene vista dai circuiti a monte, come se all'ingresso del quadripolo ci fosse collegata proprio  $Z_{IN}$ .

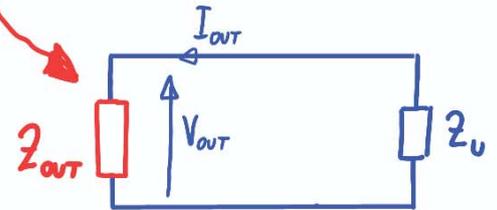
## 2) Impedenza di uscita:

$$Z_{OUT} = \frac{V_{OUT}}{I_{OUT}}$$

CALCOLATO  
ANNULLANDO  
I GENERATORI  
IN INGRESSO  
(COME  $R_{TH}$  PER THEVENIN)



CIRCUITO EQUIVALENTE



L'impedenza di uscita è il rapporto tra la tensione e la corrente di uscita calcolato quando non vi sono generatori in ingresso. La  $Z_{out}$  è l'impedenza che viene vista dai circuiti a valle, come se all'uscita del quadripolo ci fosse collegata proprio  $Z_{out}$ .

## 3) Guadagno e Attenuazione

$$G_V = \frac{V_{OUT}}{V_{IN}}$$

GUADAGNO DI  
TENSIONE

IN dB

$$G_V = 20 \log \left( \frac{V_{OUT}}{V_{IN}} \right)$$

$$G_P = \frac{P_{OUT}}{P_{IN}}$$

GUADAGNO DI  
POTENZA

IN dB

$$G_P = 10 \log \left( \frac{P_{OUT}}{P_{IN}} \right)$$

Il guadagno di tensione è il rapporto tra la tensione in uscita e la tensione in ingresso.

Il guadagno di potenza è il rapporto tra la potenza in uscita e la potenza in ingresso.

I guadagni sono quasi sempre espressi in decibel (dB).

Se  $G > 1$  (quindi se  $G > 0$  dB): la tensione/potenza di uscita è maggiore di quella di ingresso = AMPLIFICATORE.

Se  $G < 1$  (quindi se  $G < 0$  dB): la tensione/potenza di uscita è minore di quella di ingresso = ATTENUATORE.

Spesso, nel caso degli attenuatori, invece che usare il guadagno si utilizza la grandezza opposta che si chiama ATTENUAZIONE.

$A_V = \frac{1}{G_V}$	ATTENUAZIONE DI <u>TENSIONE</u>	$\xrightarrow{\text{IN dB}}$	$A_V = -G_V$
$A_P = \frac{1}{G_P}$	ATTENUAZIONE DI <u>POTENZA</u>	$\xrightarrow{\text{IN dB}}$	$A_P = -G_P$

Nel caso in cui i quadripoli siano tra collegati in cascata, il GUADAGNO TOTALE si calcola così:

- se si utilizzano unità lineari, occorre fare il prodotto dei guadagni fratto il prodotto delle attenuazioni:

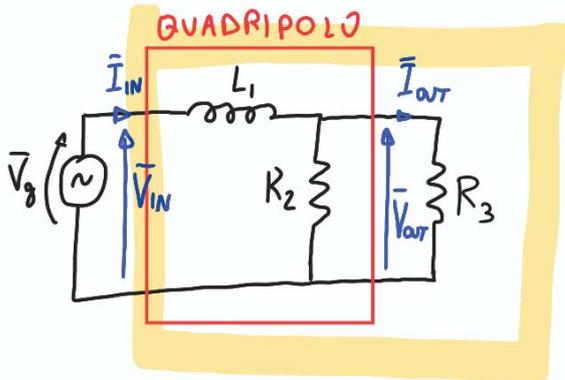
$$G_{TOT} = \frac{G_1 \cdot G_2 \cdot G_3 \cdot \dots}{A_1 \cdot A_2 \cdot A_3 \cdot \dots}$$

- se si utilizzano i dB, occorre fare la somma dei guadagni e la sottrazione delle attenuazioni:

$$G_{TOT} = G_1 + G_2 + G_3 + \dots - A_1 - A_2 - A_3 - \dots$$

# ESEMPIO 1 (SULLE IMPEDENZE DI INGRESSO/USCITA)

Si vogliono determinare le impedenze  $Z_{in}$  e  $Z_{out}$  del quadripolo in figura. Il procedimento è simile a quello usato nel teorema di Thevenin per trovare  $R_{th}$



$$L_1 = 0,8 \text{ mH}$$

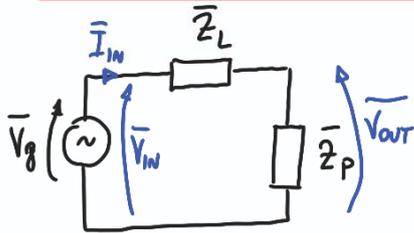
$$R_2 = 40 \Omega$$

$$R_3 = 60 \Omega$$

$$f = 10 \text{ kHz}$$

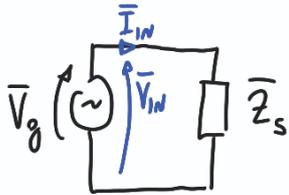
$$\bar{Z}_L = j\omega L = j50 \Omega$$

CIRCUITI PER IL CALCOLO DI  $\bar{Z}_{IN}$ :



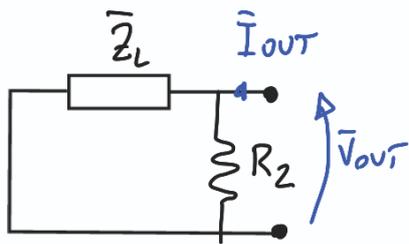
$$\bar{Z}_P = \frac{R_2 \cdot R_3}{R_2 + R_3} = 24 \Omega$$

$$\bar{Z}_S = \bar{Z}_P + \bar{Z}_L = 24 + j50 \Omega = 55 e^{j64^\circ} \Omega$$



$$\bar{Z}_{IN} = \frac{\bar{V}_{IN}}{\bar{I}_{IN}} = \bar{Z}_S = 55 e^{j64^\circ} \Omega$$

CIRCUITO PER IL CALCOLO DI  $\bar{Z}_{OUT}$  (SI AZZERA  $V_g$ )



$$\bar{Z}_{OUT} = \frac{\bar{Z}_L \cdot R_2}{\bar{Z}_L + R_2} = \frac{j2000}{40 + j50} = \frac{2000 e^{j90^\circ}}{64 e^{j51^\circ}} = 31 e^{j39^\circ} \Omega$$

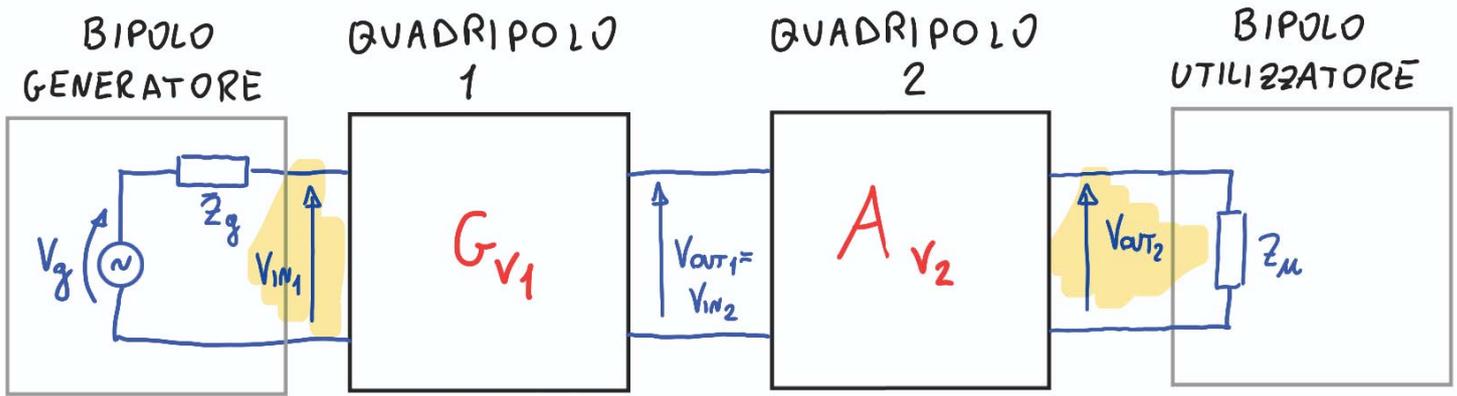
$$\bar{V}_{OUT} = \bar{V}_{IN} \cdot \frac{\bar{Z}_P}{\bar{Z}_S}$$

$$\frac{\bar{V}_{OUT} [\text{V}]}{\bar{V}_{IN} [\text{V}]} = \frac{\bar{Z}_P}{\bar{Z}_S} = \frac{24}{55 e^{j64^\circ}} = 0,44 e^{-j64^\circ} = G_V$$

ATTENUATORE

$$G_{VdB} = 20 \log 0,44 = -7 \text{ dB}$$

## ESEMPIO 2 (SU GUADAGNO E ATTENUAZIONE)



$$G_{V1} = 18 \text{ dB}$$

$$A_{V2} = 5 \text{ dB}$$

$$V_{IN1} = 3 \text{ mV}$$

$$G_{V_{TOT}} = ?$$

$$V_{OUT2} = ?$$

Per calcolare il guadagno totale, essendo i guadagni in dB, basta fare:

$$G_{V_{TOT}} = G_{V1} - A_{V2} = 18 - 5 = 13 \text{ dB}$$

Per calcolare la tensione di uscita bisogna trasformare il guadagno totale in scala lineare a poi applicare la definizione di guadagno.

$$13 \text{ dB} = 20 \log\left(\frac{V_{OUT2}}{V_{IN1}}\right)$$

$$\left(\frac{13}{20}\right) = \log\left(\frac{V_{OUT2}}{V_{IN1}}\right) \text{ SI ELEVA TUTTO A ESPONENTE DEL 10:}$$

$$10^{0,65} = \frac{V_{OUT2}}{V_{IN1}} \rightarrow 10^{0,65} = \frac{V_{OUT2}}{3 \text{ mV}} \rightarrow G_{V_{TOT}} = 4,47$$

$$\text{SE } G_{V_{TOT}} = \frac{V_{OUT2}}{V_{IN1}} \rightarrow V_{OUT2} = G_{V_{TOT}} \cdot V_{IN1} = 4,47 \cdot 3 \text{ mV} = 13,4 \text{ mV}$$

## ADATTAMENTO D'IMPEDENZA (libro di 3° pag 255-257, 264-272)

Nella prima figura di questo capitolo si vede che i sistemi di TLC sono costituiti da una serie di bipoli e quadripoli collegati in cascata.

È sempre possibile collegarli insieme?

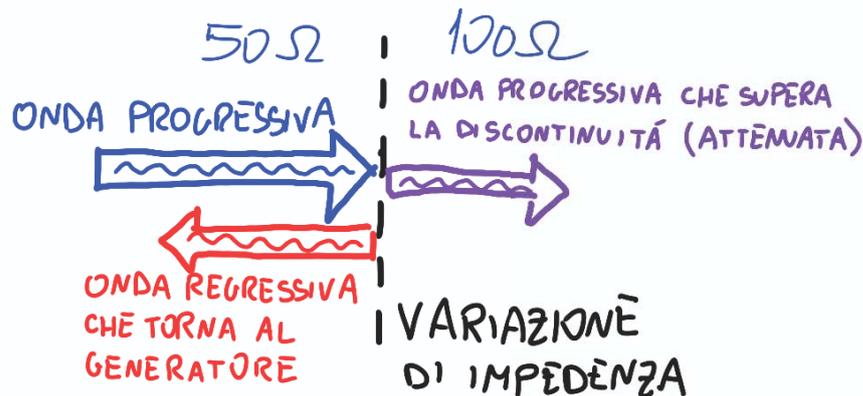
Ci sono delle condizioni da rispettare?

A cosa servono le impedenze di ingresso e di uscita?



Lo studio delle onde ci dice che, quando un segnale ad alta frequenza attraversa un punto in cui c'è variazione di impedenza avvengono delle riflessioni dell'onda (onde regressive) e quindi una parte del segnale torna indietro e non prosegue verso la destinazione. Gli effetti sono:

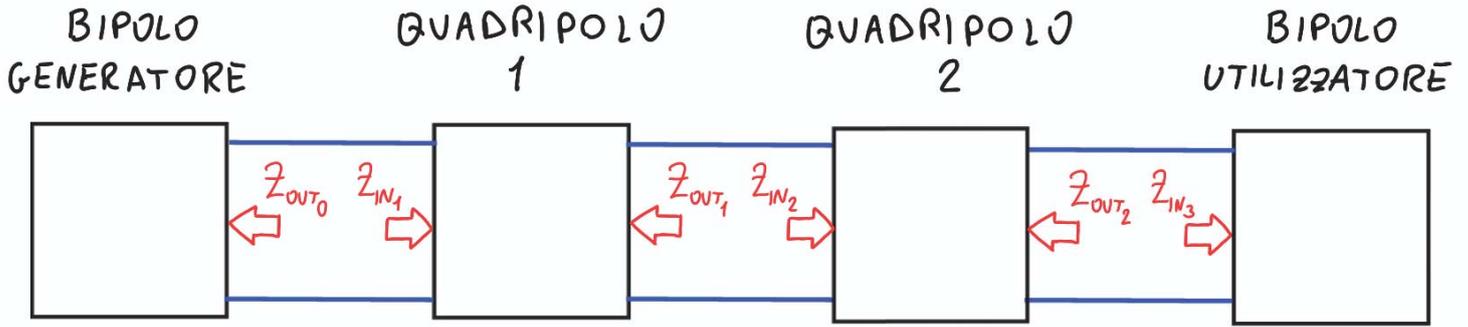
- perdita di potenza di trasmissione;
- disturbi lungo la linea;
- sovraccarico del generatore che riceve le onde regressive.



Questo fenomeno verrà studiato meglio facendo le linee di trasmissione. Una linea con questo tipo di problemi si chiama linea DISADATTATA.

Per evitare questi fenomeni è necessario effettuare il processo di ADATTAMENTO DELLE IMPEDENZE.

Considerando una serie di bipoli e quadripoli in cascata:



Per adattare bipoli e quadripoli è necessario che le impedenze rispettino la seguente CONDIZIONE DI ADATTAMENTO:

L'impedenza di uscita del blocco precedente deve essere il complesso coniugato dell'impedenza di ingresso del blocco seguente.

$$Z_{OUT \leftarrow} = Z_{IN \rightarrow}^*$$

IMPEDEZA IN  
USCITA DAL  
BLOCCO  
PRECEDENTE

IMPEDEZA IN  
INGRESSO AL  
BLOCCO  
SEGUENTE

CONDIZIONE DI ADATTAMENTO

Il complesso coniugato ha lo stesso modulo e fase cambiata di segno. Quindi la condizione si può anche leggere in questo modo:

1) In coordinate cartesiane si può dire che:

- La resistenza di uscita del blocco precedente deve essere uguale alla resistenza di ingresso di quello seguente.
- La reattanza di uscita del blocco precedente deve essere uguale ma di segno opposto alla reattanza di ingresso di quello seguente.

CONDIZIONE DI  
ADATTAMENTO IN  
COORDINATE  
CARTESIANE

$$R_{OUT \leftarrow} = R_{IN \rightarrow}$$

$$X_{OUT \leftarrow} = -X_{IN \rightarrow}$$

2) In coordinate polari si può dire che:

- Il modulo dell'impedenza di uscita del blocco precedente deve essere uguale al modulo dell'impedenza di ingresso di quello seguente.
- La fase dell'impedenza di uscita del blocco precedente deve essere uguale ma di segno opposto al modulo dell'impedenza di ingresso di quello seguente.

CONDIZIONE DI  
ADATTAMENTO IN  
COORDINATE  
POLARI

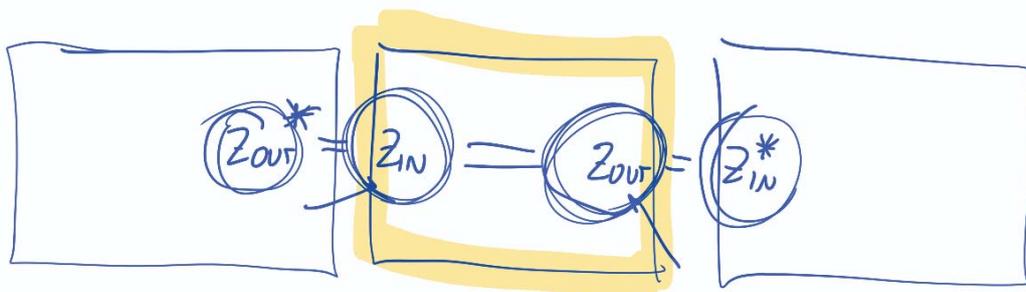
$$|Z_{OUT}| \leftarrow = |Z_{IN}| \rightarrow$$
$$\angle Z_{OUT} \leftarrow = - \angle Z_{IN} \rightarrow$$

Come si fa a sapere la  $Z_{in}$  e  $Z_{out}$  di un componente se queste dipendono a loro volta dalle impedenze  $Z_{in}$  e  $Z_{out}$  dei blocchi vicini? (vedi esercizio 1)

Come fanno i produttori a fornire i valori di  $Z_{in}$  e  $Z_{out}$  per un componente senza sapere a cosa si collegherà??



La risposta è facile: si presuppone che il quadripolo sia adattato, quindi i produttori forniscono le  $Z_{in}$  e  $Z_{out}$  considerando che in ingresso ed in uscita siano collegate impedenze che riapettano le condizioni di adattamento.



# IMPEDENZA CARATTERISTICA

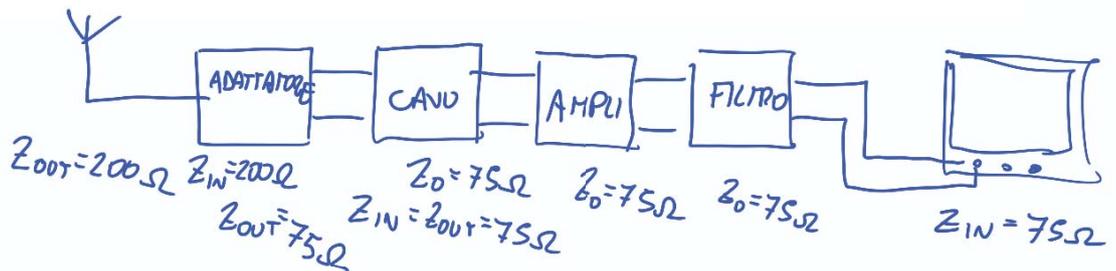
In un quadripolo, se le impedenze di ingresso e di uscita sono identiche, questo si dice SIMMETRICO e l'impedenza si chiama IMPEDENZA CARATTERISTICA del quadripolo.

SE  $Z_{IN} = Z_{OUT}$  VIENE CHIAMATA  $Z_0$  IMPEDENZA CARATTERISTICA

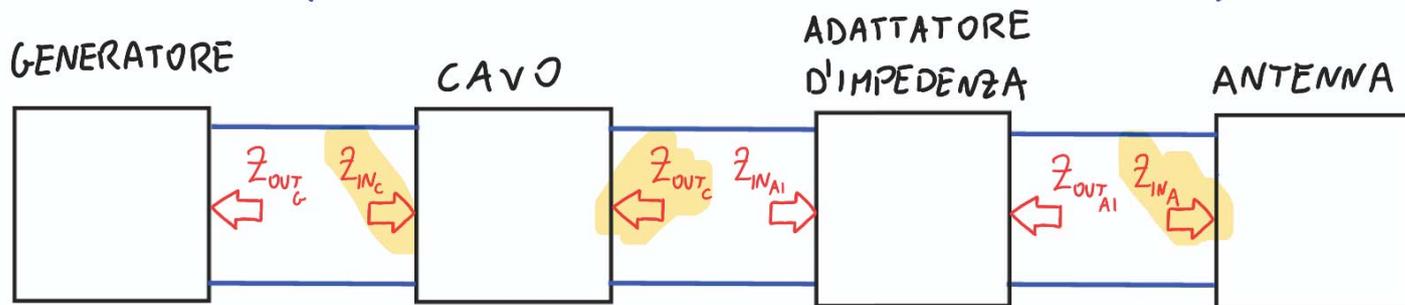
I quadripoli simmetrici sono la maggior parte dei componenti usati nel mondo delle telecomunicazioni. Per questo motivo in ciascun sistema quasi tutti i componenti avranno la stessa impedenza sia in ingresso che in uscita, pari all'impedenza caratteristica.

TABELLA 1 Valori tipici di impedenza caratteristica per le linee di trasmissione.

Tipo di linea	Campo di frequenze	Impedenza caratteristica, $Z_0$ ( $\Omega$ )
A coppie simmetriche	Frequenze vocali (1 kHz)	300 - 600 TELEFONIA, AUDIO
	Frequenze medio basse (80 kHz)	150
	Medie frequenze (150 kHz)	120
	Alta frequenza (100 MHz)	100
Cavo coassiale	Alta frequenza	75 $\rightarrow$ TV
	Alta o altissima frequenza	50 $\rightarrow$ OSCILLOSCOPIO



# ESEMPIO 3 (SULL'ADATTAMENTO DI IMPEDENZA)



$$Z_{0_c} = 75 e^{j30^\circ} \Omega \quad (\text{IMPEDENZA CARATTERISTICA CAVO})$$

$$Z_{IN,A} = 200 \Omega \quad (\text{IMPEDENZA DI INGRESSO ANTENNA})$$

Determina il valore di tutte le impedenze affinché il sistema sia totalmente adattato.

## SOLUZIONE

Per prima cosa il cavo è sicuramente un sistema simmetrico. Avendo impedenza caratteristica nota si conoscono quelle di ingresso e uscita (a condizione che anche i componenti adiacenti siano adattati):

$$Z_{IN_C} = Z_{OUT_C} = Z_{0_c} = 75 e^{j30^\circ} \Omega$$

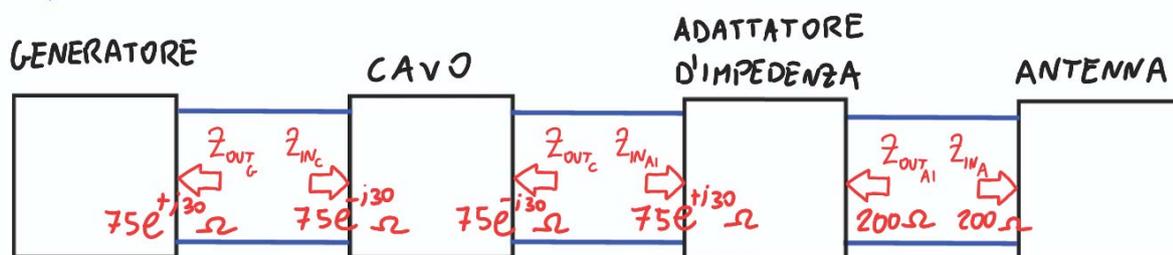
A questo punto è necessario che anche le impedenze adiacenti siano adattate:

$$Z_{OUT_G} = Z_{IN_C}^* = 75 e^{-j30^\circ} \Omega$$

$$Z_{IN_{AI}} = Z_{OUT_C}^* = 75 e^{-j30^\circ} \Omega$$

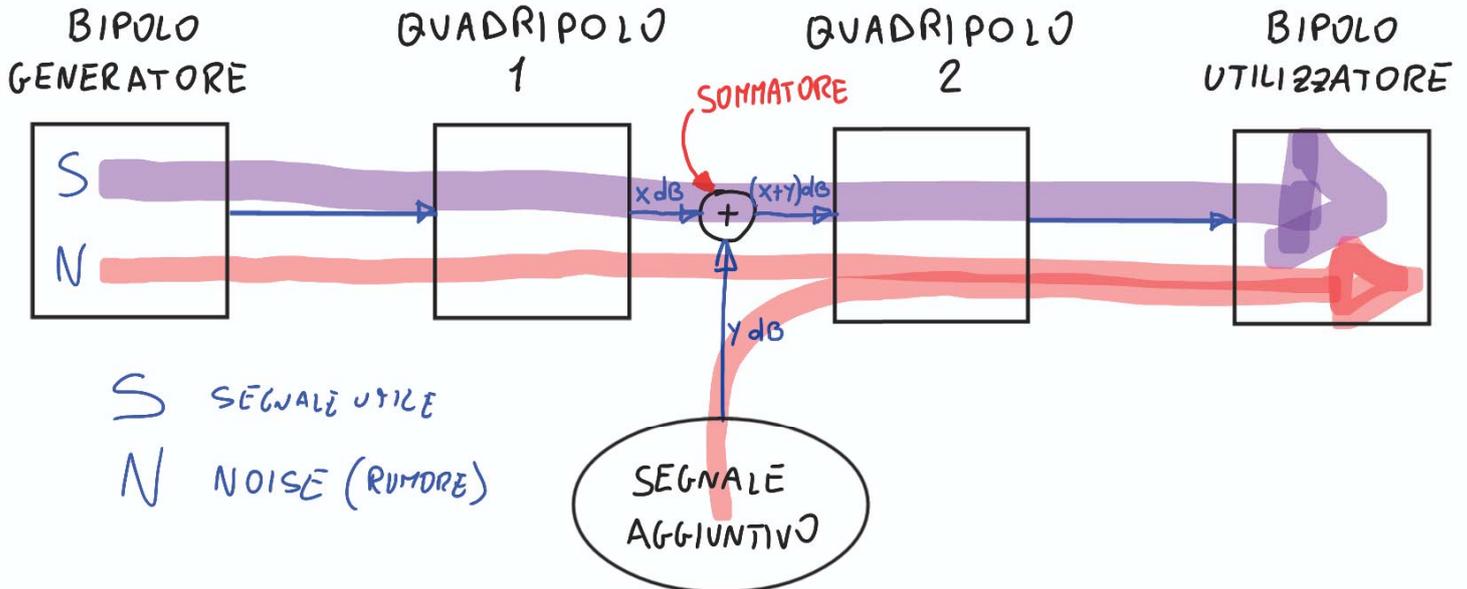
Il cavo non potrà mai essere direttamente adattato all'antenna perché hanno impedenze diverse, per questo c'è tra loro l'adattatore di impedenza che deve presentare all'ingresso l'impedenza del cavo e all'uscita quella dell'antenna, è quindi asimmetrico:

$$Z_{OUT_{AI}} = Z_{IN_A} = 200 \Omega$$



## SCHEMI A BLOCCHI UNIFILARI e SOMMATORI

Per semplificare gli schemi a blocchi, spesso si disegna **un solo filo di collegamento** e non due. Nella realtà il secondo filo c'è sempre ma nel disegno resta sottinteso. Questi si chiamano "schemi unifilari", mentre gli altri sono detti "schemi multifilari".



Inoltre possono essere presenti componenti chiamati SOMMATORI che permettono di sommare due segnali (sempre in dB).

## RAPPORTO SEGNALE/RUMORE

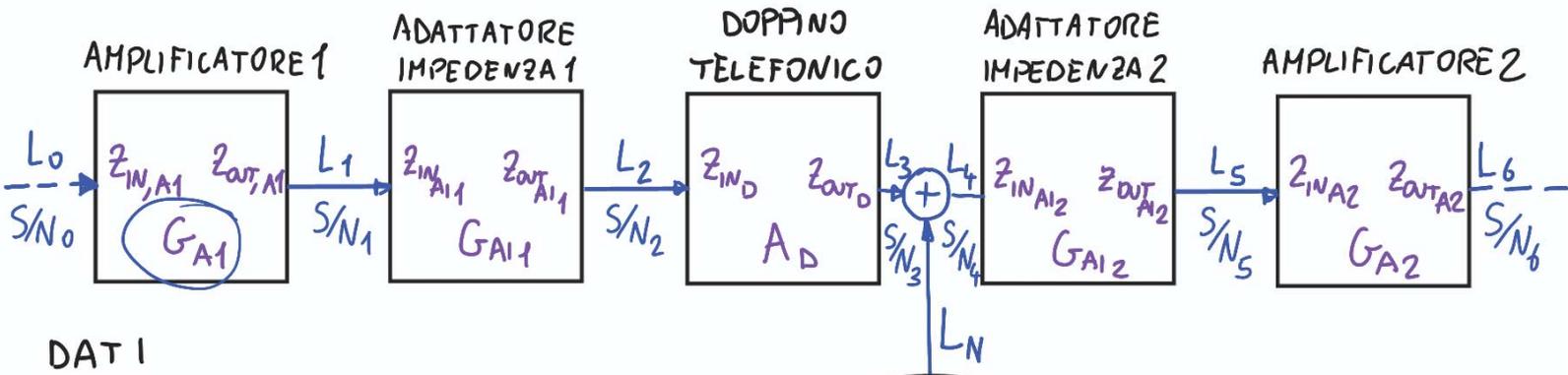
È il rapporto tra la potenza del segnale utile e quello del rumore. Si esprime solitamente in dB. Più è elevato più la trasmissione ha qualità elevata.

$$\left(\frac{S}{N}\right)_P = 10 \log \left( \frac{P_S}{P_N} \right)$$

$$\left(\frac{S}{N}\right)_V = 20 \log \left( \frac{V_S}{V_N} \right)$$

RAPPORTO  
SEGNALE (SIGNAL) /  
RUMORE (NOISE)  
IN DECIBEL PER  
POTENZE E TENSIONI

# ESEMPIO 4 (RIEPILOGATIVO)



## DATI

$L_0 = 25 \text{ dB}_{\mu}$  LIVELLO SEGNALE INIZIALE

$(S/N)_0 = 60 \text{ dB}$  RAPPORTO S/N INIZIALE

$G_{A1} = G_{A2} = 20 \text{ dB}$  GUADAGNO AMPLIFICATORI

$G_{A11} = G_{A12} = -6 \text{ dB}$  " ADATTATORI

$A_D = 10 \text{ dB}$  ATTENUAZIONE CAVO

$L_N = 30 \text{ dB}$  LIVELLO DEL RUMORE

$Z_{IN,A1} = Z_{IN,A2} = 1 \text{ k}\Omega$

$Z_{OUT,A1} = Z_{OUT,A2} = 16 \Omega$

$Z_{0,D} = 100 e^{-j20^\circ} \Omega$

1) Determina tutte le impedenze di ingresso e uscita dei blocchi nella condizione di adattamento.

2) Determina tutti i livelli e tutti i rapporti segnale/rumore ad ogni blocco.

3) Calcola la potenza del segnale e del rumore in uscita.

## SOLUZIONE

1) Per le stesse motivazioni dell'esempio 3:

SUL DOPPIO:

$Z_{IND} = Z_{OUT,D} = Z_{0,D} = 100 e^{-j20^\circ} \Omega$

QUINDI

$Z_{OUT,A11} = Z_{IND}^* = 100 e^{j20^\circ} \Omega$

$Z_{IN,A12} = Z_{OUT,D}^* = 100 e^{j20^\circ} \Omega$

SUGLI AMPLIFICATORI:

$$\boxed{Z_{IN,A11}} = Z_{OUT,A1}^* = \boxed{16 \Omega}$$

$$\boxed{Z_{OUT,A12}} = Z_{IN,A2}^* = \boxed{1 k\Omega}$$

2) Per quanto riguarda il segnale utile, si parte dal livello iniziale e si calcolano in cascata tutti i livelli:

$$\boxed{L_1} = L_0 + G_{A1} = 25 \text{ dBm} + 20 \text{ dB} = 45 \text{ dBm}$$

$$\boxed{L_2} = L_1 + G_{A11} = 45 \text{ dBm} - 6 \text{ dB} = 39 \text{ dBm}$$

$$\boxed{L_3} = L_2 - A_0 = 39 \text{ dBm} - 10 \text{ dB} = 29 \text{ dBm} = \boxed{L_4}$$

$$\boxed{L_5} = L_4 + G_{A12} = 29 \text{ dBm} - 6 \text{ dB} = 23 \text{ dBm}$$

$$\boxed{L_6} = L_5 + G_{A2} = 23 \text{ dBm} + 20 \text{ dB} = 43 \text{ dBm}$$

IL SEGNALE UTILE  
NON CAMBIA TRA  
L3 E L4, CAMBIA  
SOLO IL RUMORE

Per quanto riguarda il rapporto segnale/rumore bisogna considerare che questo varia solo se viene aggiunto o sottratto rumore, altrimenti resta sempre lo stesso.

$$\boxed{S/N_0} = \boxed{S/N_1} = \boxed{S/N_2} = \boxed{S/N_3} = \boxed{60 \text{ dB}}$$

Aggiungendo rumore, il segnale resta lo stesso, mentre il rumore si amplifica, quindi occorre sottrarre il livello di rumore:

$$\boxed{S/N_4} = S/N_3 - 30 \text{ dB} = \boxed{30 \text{ dB}} = \boxed{S/N_5} = \boxed{S/N_6}$$

3) Per trovare la potenza del segnale utile (P6) basta invertire la formula dei dBm:

$$L_6 = 43 \text{ dBm} = 10 \log \left( \frac{P_6}{10^{-3}} \right) \rightarrow \frac{43}{10} = \log \left( \frac{P_6}{10^{-3}} \right) \rightarrow 10^{4,3} = 10 \log \frac{P_6}{10^{-3}}$$

IL dBm SI RIFERISCE A  $1 \text{ mW} = 10^{-3} \text{ W}$

$$\rightarrow \frac{P_6}{10^{-3}} = 10^{4,3} \rightarrow \boxed{P_6} = 10^{4,3} \cdot 10^{-3} \text{ W} \approx \boxed{20 \text{ W}}$$

POTENZA  
SEGNALE  
UTILE

Per trovare la potenza del rumore ( $N_6$ ) basta invertire la formula del rapporto segnale/rumore:

$$\left(\frac{S}{N}\right)_6 = 30 \text{ dB} = 10 \log \left(\frac{P_6}{N_6}\right) \rightarrow 3 = \log \frac{P_6}{N_6} \rightarrow 10^3 = 10^{\log \frac{P_6}{N_6}} \rightarrow 10^3 = \frac{P_6}{N_6}$$
$$\rightarrow N_6 = \frac{P_6}{10^3} \rightarrow \boxed{N_6} = \frac{20}{10^3} = 20 \cdot 10^{-3} \text{ W} = \boxed{20 \text{ mW}}$$