PROBLEMATICHE GENERALI
NELL'USO DELLA STRUMENTAZIONE

1. I COLLEGAMENTI FRA STRUMENTI ELETTRONICI E CIRCUITO SOTTO MISURA

1.1 Precauzioni necessarie per la sicurezza d'uso della strumentazione

Nell'impiego dell'attuale strumentazione elettronica devono essere tenute presenti alcune precauzioni per evitare che le differenze di potenziale fra le parti dell'intero complesso, comprendente sia il sistema sotto misura sia gli strumenti utilizzati per questa attività, assumano valori troppo elevati che potrebbero provocare danni alle persone o agli strumenti oppure falsare i risultati della misura stessa.

Nel seguito si farà implicitamente riferimento a strumenti elettronici che devono essere alimentati prelevando l'energia elettrica dalla rete di distribuzione. Per l'utilizzazione di tale energia si richiedono alcuni accorgimenti, in particolare tutte le parti accessibili normalmente all'operatore, ma che accidentalmente potrebbero venire in contatto con parti a potenziale elevato, devono essere vincolate al potenziale di terra. Nella classica situazione di carichi monofasi, come è il caso degli strumenti elettronici, si può schematizzare il sistema elettrico come in Fig. 1.

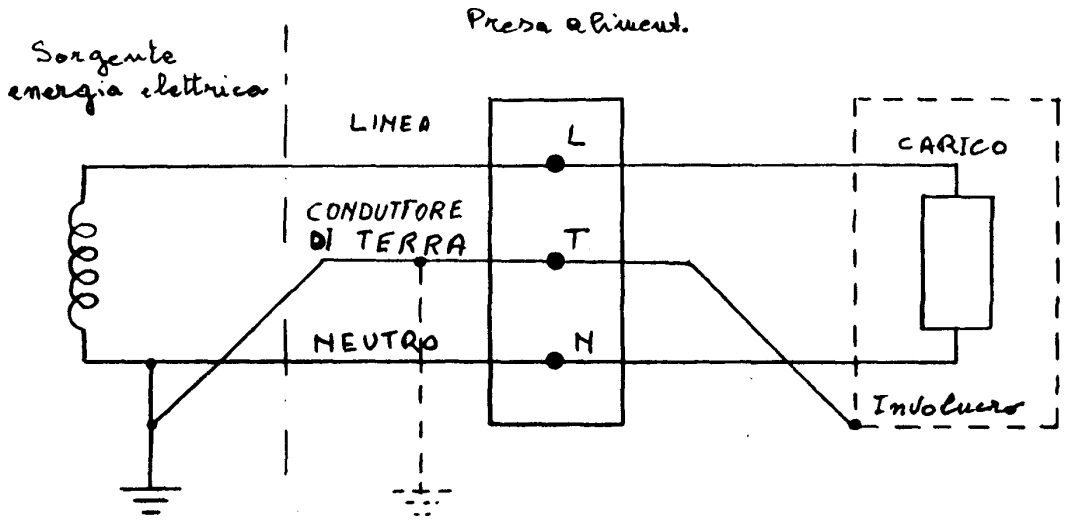

Fig. 1 Alimentazione di un carico monofase con linea bifilare e conduttore di terra.

L'energia elettrica viene prelevata dal secondario di un trasformatore, che si può trovare nello stesso edificio dove il carico monofase viene usato, oppure nella sottostazione più vicina. Uno dei due conduttori di collegamento è il neutro, collegato a terra direttamente in uscita dal trasformatore; l'altro conduttore è quello che prende il nome di "linea", e si trova al potenziale di rete rispetto al conduttore neutro (il valore di questa d.d.p. dipende dalle caratteristiche della rete di distribuzione. e anche dalla nazione ove ci si trova; esso può essere ad esempio 127 V, 220 V, ecc. Il generico carico è normalmente isolato dal contenitore

esterno ed il sistema elettrico in condizioni normali funziona regolarmente. Se però accidentalmente si ha una rottura dell'isolamento fra contenitore e carico, quest'ultimo assume un potenziale uguale a quello che il carico presenta nel punto di rottura; tale potenziale può essere uguale all'intera tensione di rete, o anche superiore, con conseguente pericolo per l'operatore a contatto con il contenitore. Per evitare questa situazione di pericolo, nel collegamento di alimentazione si utilizza un terzo conduttore, detto conduttore di terra. Dalla parte dell'utilizzatore tale conduttore viene collegato all'involucro esterno, come indicato in fig. 1, mentre dalla parte della sorgente di energia elettrica viene collegato a terra. In fig. 1 questo collegamento è stato eseguito nello stesso punto in cui si è messo a terra il neutro, ma potrebbe essere eseguito anche in un altro punto, in modo autonomo (collegamento tratteggiato di fig. 1). Se accidentalmente l'involucro esterno andasse a contatto con il conduttore di linea, o con qualche altra parte sotto tensione, si viene a formare una maglia con una resistenza complessiva molto bassa; in tal caso si avrebbe la circolazione di una corrente molto elevata sul conduttore di linea, con il conseguente intervento di protezioni quali "fusibili", o relè di massima corrente. Si ottiene così una interruzione fra linea e carico e pertanto l'involucro ritorna ad assumere il potenziale di terra, evitando ogni situazione di pericolo per l'operatore.

Le condizioni di esercizio sopra illustrate devono essere soddisfatte per ogni strumento elettronico, anche se le modalità con cui vengono realizzate variano sia con il tipo di strumento sia con la casa costruttrice.

1.2 Riferimento dei potenziali nella strumentazione

Oltre a problemi di sicurezza, che vincolano certi potenziali, nell'organizzare un sistema di misura è necessario che la grandezza da misurare non venga influenzata da elementi di disturbo che potrebbero venire introdotti a causa sia delle modalità di funzionamento degli strumenti e del circuito sotto misura sia dalle modalità con cui viene effettuato il collegamento fra questi blocchi.

Si consideri la classe di strumenti in grado di misurare segnali di tensione, come ad esempio i voltmetri, i multimetri, gli oscilloscopi, cioè strumenti in grado di fornire indicazioni sulla differenza di potenziale fra due morsetti di ingresso uno dei quali preso come riferimento. Dal punto di vista dei legami fra il potenziale del morsetto di riferimento e quello dell'involucro esterno si possono suddividere gli strumenti elettronici in tre diversi tipi, anche se questa suddivisione non esaurisce tutte le situazioni che si possono riscontrare in pratica.

Appartengono al primo tipo gli strumenti nei quali il potenziale di riferimento coincide con il potenziale di terra. E' in genere il costruttore che provvede a collegare il morsetto di riferimento all'involucro esterno, quest'ultimo automaticamente posto per sicurezza al potenziale di terra tramite la presa di alimentazione. Nella Fig. 2 viene schematizzato l’ingresso di uno strumento con il riferimento dei potenziali collegato a terra.

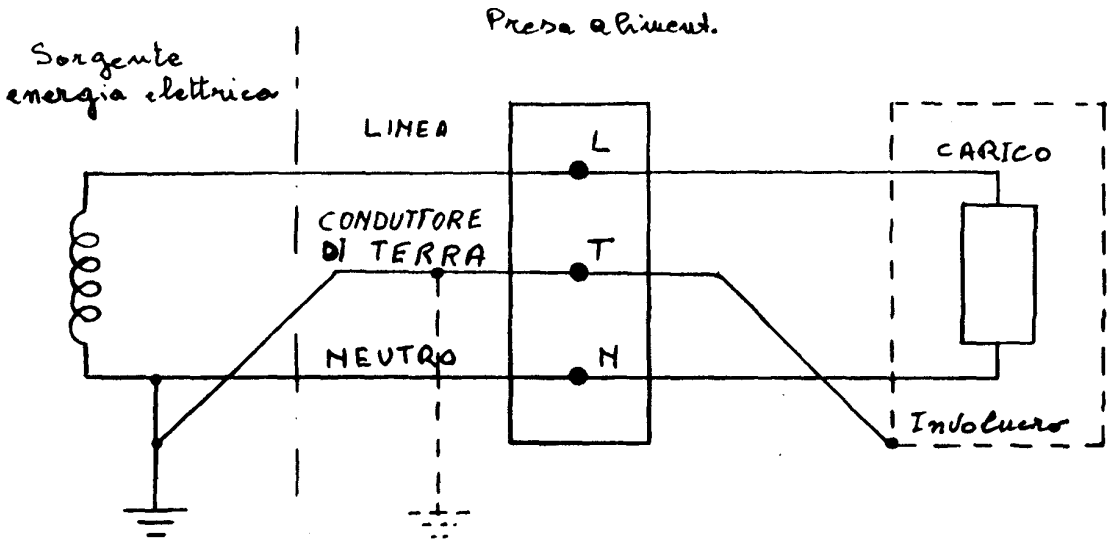

Fig. 2 Schematizzazione di uno strumento con il riferimento dei potenziali collegato a terra.

Molti strumenti elettronici sono organizzati in questo modo. Spesso le grandezze da misurare sono introdotte nello strumento tramite cavi coassiali e connettori di tipo BNC. La parte metallica esterna di questi connettori è accessibile all'operatore e quindi non deve poter assumere un potenziale pericoloso; essa viene pertanto collegata al conduttore di terra, imponendo in tal modo anche il potenziale di riferimento per i segnali da misurare. Questo tipo di strumenti non può essere utilizzato nel caso che si misuri una tensione non riferita a massa come nella situazione di Fig. 3.

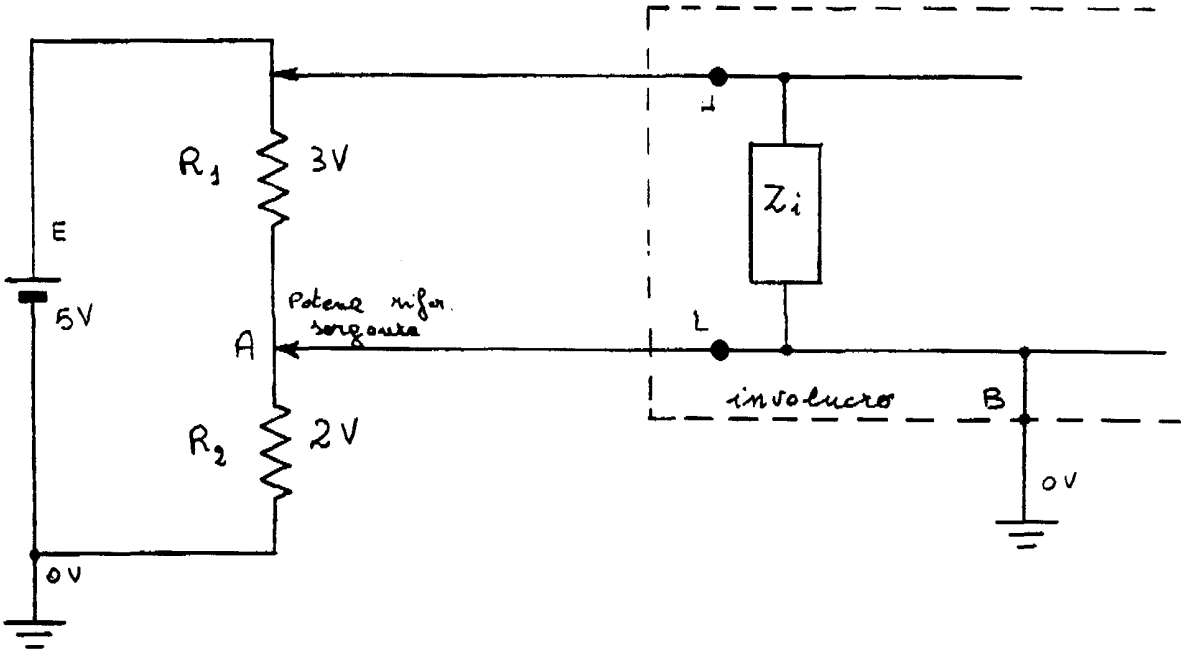

Fig. 3 Misura di una tensione non riferita a massa.

Nel secondo tipo di strumenti, detti ad ingresso fluttuante, il potenziale di riferimento per i segnali da misurare non è vincolato a quello di sicurezza. Gli strumenti così organizzati sono meno numerosi rispetto a quelli appartenenti al primo gruppo; in qualche caso si possono trovare degli oscilloscopi, ma molto più spesso si tratta di multimetri e di voltmetri. Spesso è prevista sul pannello dello strumento una piastrina metallica mediante la quale si può effettuare da parte dell'operatore il collegamento fra morsetto di riferimento e terra a seconda del tipo di misura che si deve eseguire. Nelle Fig. 4 e 5 sono riportate le strutture tipiche di strumenti con ingresso fluttuante. In particolare nel caso della Fig. 5 è prevista, nello strumento, la possibilità di comunicare con organi I/O.

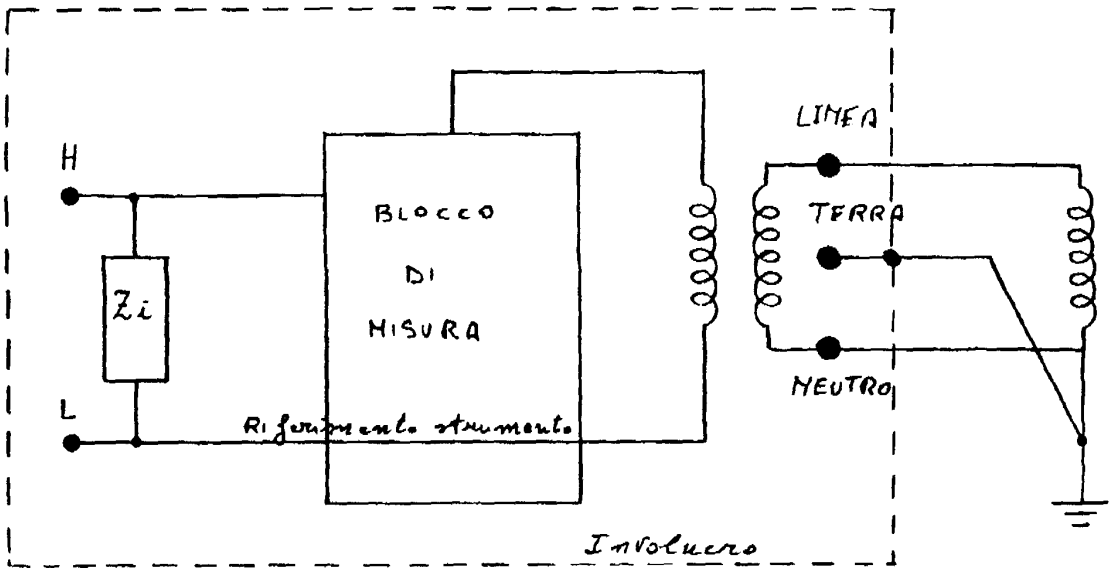

Fig. 4 Struttura di uno strumento con ingresso fluttuante.

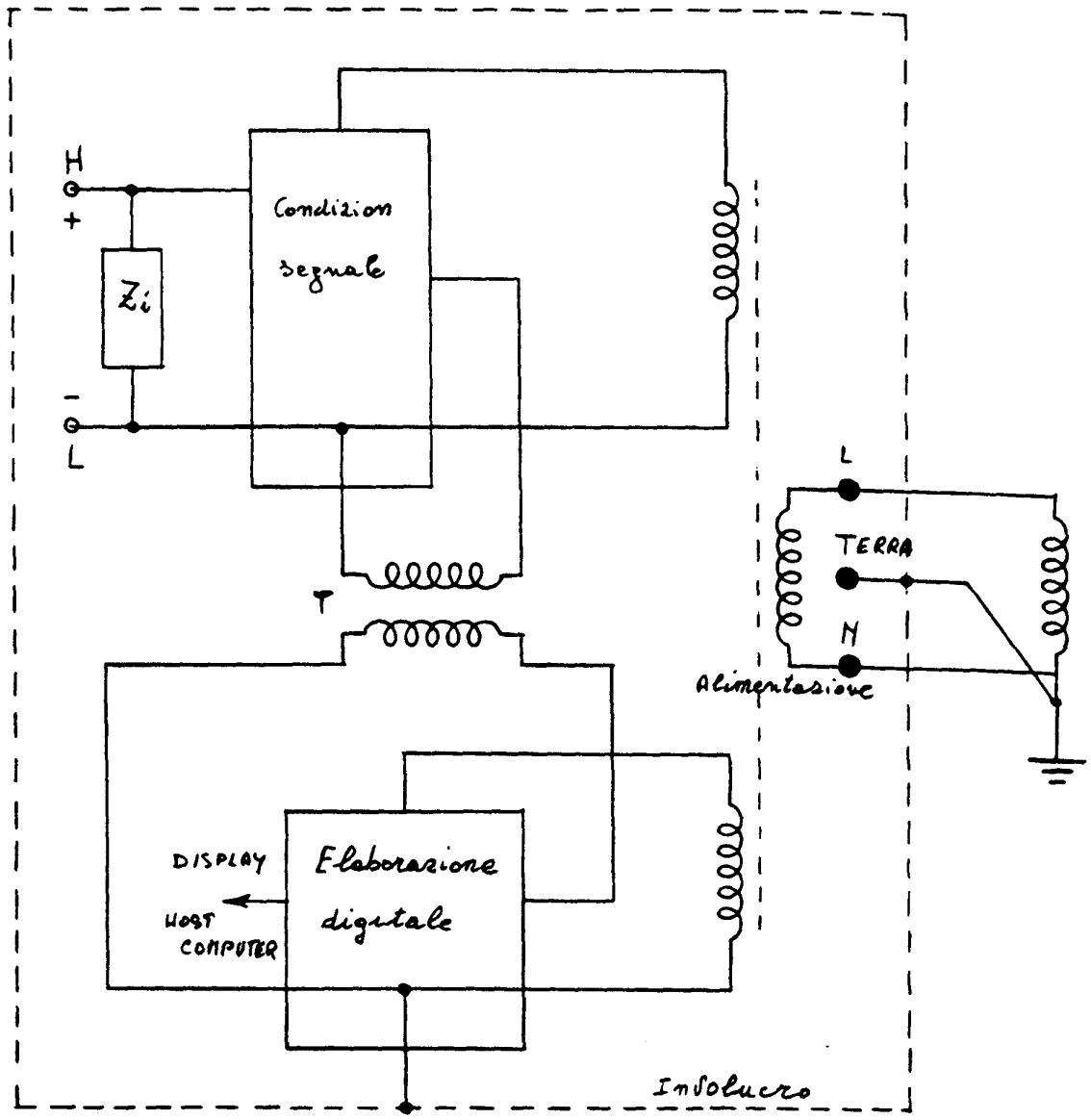

Fig. 5 Struttura di uno strumento con ingresso fluttuante ma con possibilità di comunicare con organi di I/O.

Gli strumenti del terzo tipo presentano, oltre ad un ingresso fluttuante, anche uno schermo accessibile dall'esterno e che, come si vedrà, permette di attenuare l'influenza di disturbi che possono sovrapporsi al segnale utile qualora sia correttamente utilizzato. Gli strumenti così organizzati sono normalmente di buone prestazioni, come ad esempio voltmetri e multimetri di qualità. Nella Fig. 6 è indicata la modalità di utilizzazione del morsetto di guardia per ridurre l'influenza della tensione di modo comune che può essere causata dalla differenza di potenziale tra il punto a terra dello strumento (T) ed il riferimento del segnale da misurare (B).

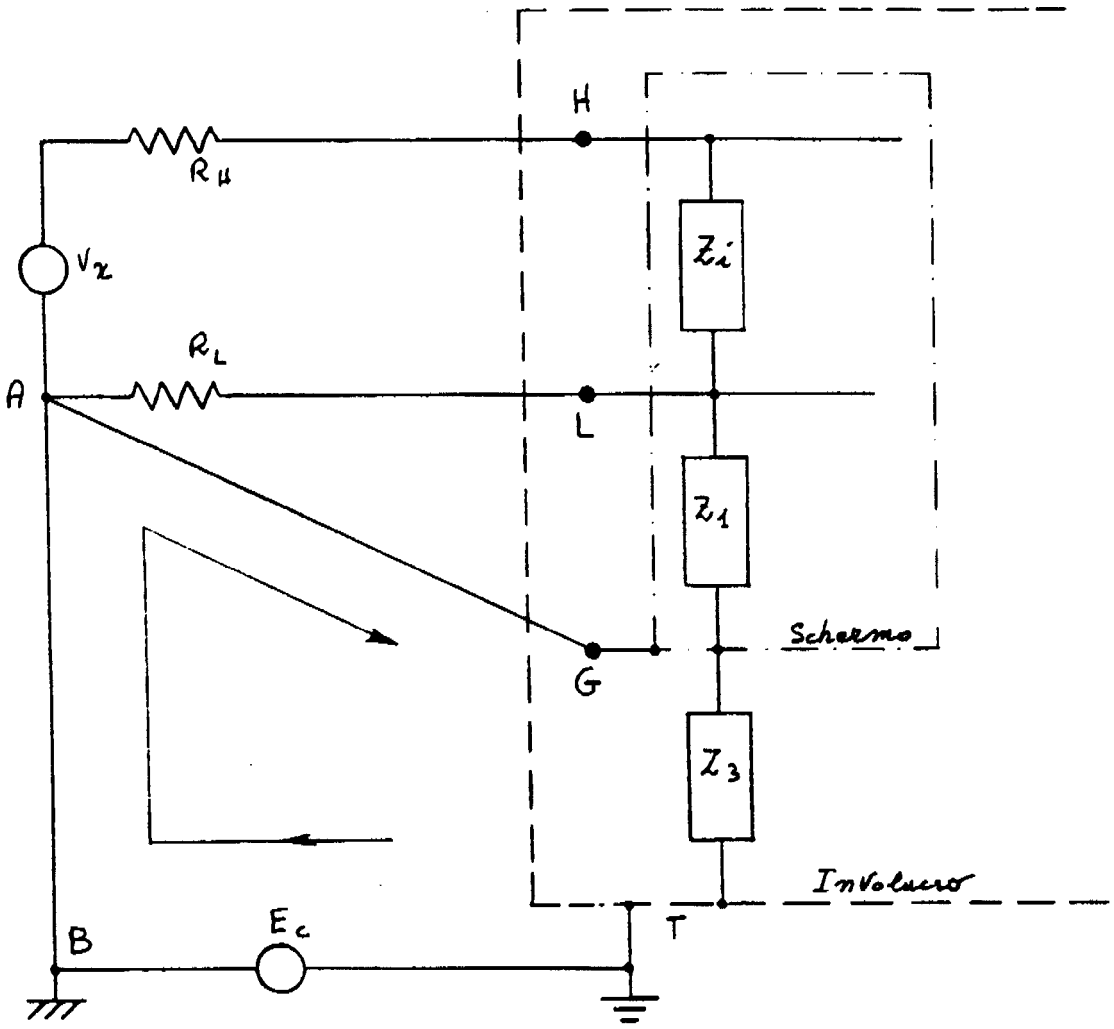

Fig. 6 Utilizzazione del morsetto di guardia per ridurre l'influenza della tensione di modo comune.

2. Effetti di carico

2.1 Impedenza di ingresso e di uscita

2.1.1. Impedenza di ingresso

L'impedenza di ingresso di un dispositivo elettrico è il rapporto della tensione applicata ai morsetti di ingresso e la corrente che circola tra gli stessi morsetti (Fig. 7)

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

dove Z_{in} = impedenza di ingresso

V_{in} = tensione applicata ai morsetti di ingresso

I_{in} = corrente che circola nei morsetti di ingresso

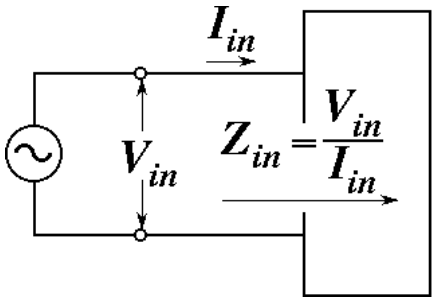

Fig. 7

Nel caso di tensioni in c.c., l'impedenza di ingresso è una resistenza; nel caso di un segnale in a.c. occorre tenere presente la relazione di fase tra tensione e corrente. Solo se la corrente di ingresso risulta in fase con la tensione applicata, l'impedenza di ingresso è una pura resistenza. Un dispositivo a bassa impedenza di ingresso assorbe più corrente da una data sorgente di tensione applicata rispetto ad un dispositivo ad elevata impedenza di ingresso. Un dispositivo a bassa impedenza di ingresso si dice che carica la sorgente maggiormente di un dispositivo ad elevata impedenza.

2.1.2 Impedenza di uscita

L'impedenza di uscita di un dispositivo è l'impedenza della sorgente equivalente vista dal carico. L'impedenza di uscita ha significato solo per un dispositivo attivo. Il termine "impedenza equivalente" implica che il dispositivo può essere rappresentato da un circuito equivalente come quello illustrato nella Fig. 8.
L'impedenza di uscita può essere specificata nel modo seguente:

$$Z_{out} = \frac{V_{oc} - V_L}{I_L}$$

dove Z_{out} = impedenza di uscita
V_{oc} = tensione della sorgente a circuito aperto
V_L = tensione di carico
I_L = corrente di carico

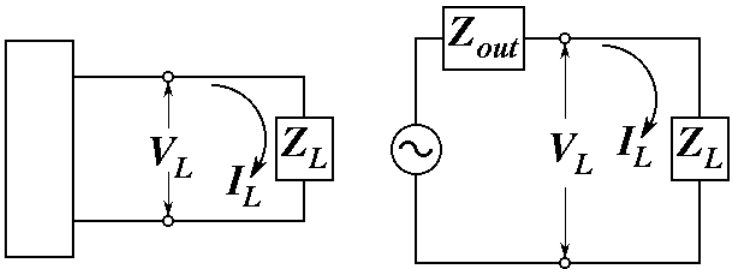

Fig. 8

La tensione (V_{oc} - V_L) è determinata dall'impedenza di uscita, quando il dispositivo viene caricato. Più bassa è l'impedenza di uscita minore effetto avrà il carico sulla tensione di uscita.

3.1.3 Determinazione dell'impedenza di ingresso e di uscita

Le impedenze di ingresso e di uscita possono essere determinate misurando il rapporto tra tensione e la corrente, o possono essere calcolate se sono noti i parametri interni degli strumenti. In genere, ciò non è necessario poiché il manuale delle istruzioni che accompagna gli strumenti usati per le misurazioni fornisce le impedenze di ingresso e di uscita che, per una fissata frequenza, vengono approssimate a resistenze pure.

Dizioni come "impedenza di 50 Ω" e "impedenza di uscita di 50 Ω" implicano che la reattanza è essenzialmente nulla all'interno del campo di frequenze di impiego dello strumento.

Questi parametri di solito possono essere misurati con adeguati strumenti.

Nel caso di impedenze di ingresso, occorre misurare la tensione e la corrente di ingresso, e la loro relazione di fase. Il metodo più conveniente è quello di usare un ponte o un altro strumento di misura di impedenza e rilevare direttamente l'impedenza con lo strumento alle frequenze desiderate.

L'impedenza di uscita può anche essere misurata con un ponte. Se l'impedenza di uscita può essere considerata una resistenza pura, la sua ampiezza può essere determinata semplicemente osservando la tensione in uscita a circuito aperto, caricandola con un resistore noto, e misurando la tensione sul carico.

$$R_{out} = \frac{R_L (V_{oc} - V_L)}{V_L}$$

dove R_{out} = resistenza di uscita
R_L = resistenza di carico
V_{oc} = tensione a circuito aperto
V_L = tensione sul carico

3.2. Effetti delle impedenze di ingresso e di uscita dello strumento nelle misure

È in genere auspicabile che lo strumento di misura non assorba alcuna potenza apprezzabile dal dispositivo su cui viene eseguita la misura. Il dispositivo di misura può essere collegato in derivazione al circuito o connesso in serie.

3.2.1 Strumenti connessi in derivazione (Voltmetri, Oscilloscopi, Sonde logiche, ecc.)

Per la misura o la visualizzazione di tensioni in un circuito, lo strumento viene connesso in parallelo come illustrato nella Fig. 9. A causa dell'effetto di carico dello strumento la tensione nel punto A rispetto al punto B sarà modificata dalla corrente I_v assorbita dal voltmetro. Solo se questa corrente è trascurabile rispetto alla corrente I_c del circuito, il voltmetro legge lo stesso valore che era presente in A prima che lo strumento di misura fosse connesso.

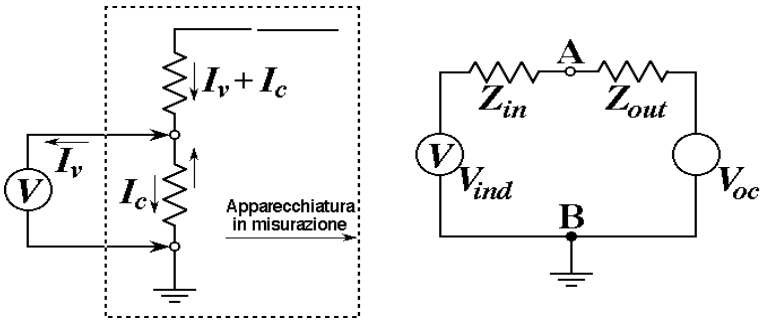

Fig. 9

Idealmente, per questi strumenti, l'impedenza di ingresso dovrebbe essere infinita, in altri termini dovrebbe apparire come un circuito aperto che non assorbe corrente e quindi che non costituisca un carico per il circuito. Sebbene questa condizione sia impossibile da ottenere, l'effetto di carico dello strumento può essere trascurabile se l'impedenza di ingresso dello strumento è molto grande rispetto all'impedenza di uscita del componente o dispositivo sotto misura. Facendo riferimento al circuito della Fig. 10, risulta:

$$V_{ind} = \frac{V_{oc} \cdot Z_{in}}{Z_{in} + Z_{out}}$$

dove V_{ind} = tensione indicata
V_{oc} = tensione a circuito aperto
Z_{in} = impedenza di ingresso dello strumento
Z_{out} = impedenza equivalente di uscita del circuito sotto prova

Occorre ricordare che Z_{out} e Z_{in} sono, in generale, dipendenti dalla frequenza, e di conseguenza anche la tensione indicata dipende dalla frequenza.
L'effetto di Z_{in} diventa maggiore alle frequenze più alte a causa della capacità di ingresso dello strumento (Fig. 10). Inoltre, forme d'onda non sinusoidali fortemente variabili vengono deformate a causa del tempo impiegato per caricare la capacità (Fig. 11).

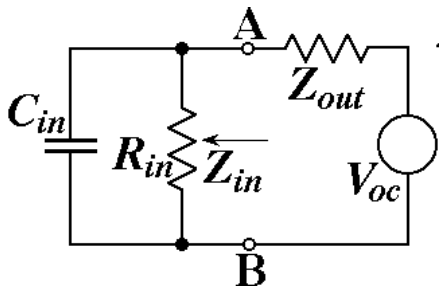

Fig. 10

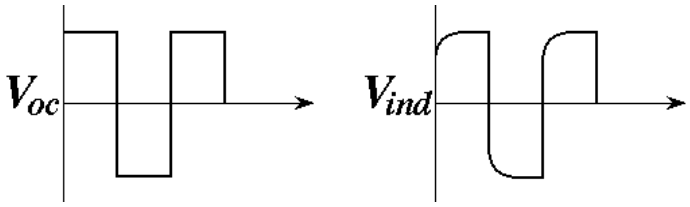

Fig. 11

L'effetto di carico degli strumenti può essere ridotto a spese della sensibilità mediante l'uso di una sonda che divide la tensione. Una sonda 10:1 comunemente usata è riportata nella Fig. 12. Questo dispositivo determina un aumento di 10:1 del valore di impedenza ma attenua anche il segnale di un fattore di 10. La sonda deve essere opportunamente regolata.

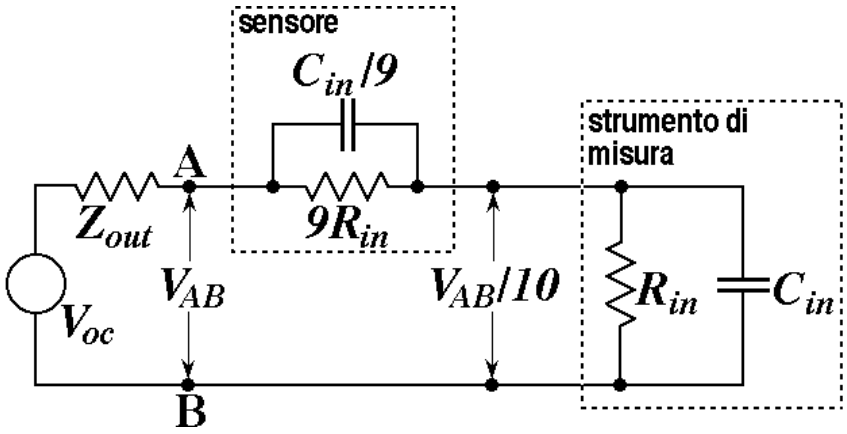

Fig. 12

Esempi numerici

(a)Effetto di carico di un voltmetro

Una sorgente di tensione presenta una resistenza di uscita di 100 kΩ che viene misurata tramite un voltmetro con resistenza interna di 20.000 Ω/V. Si deve trovare l'errore percentuale nella lettura dovuto all'effetto di carico di un voltmetro con fondo scala di 10 V (Fig. 13).

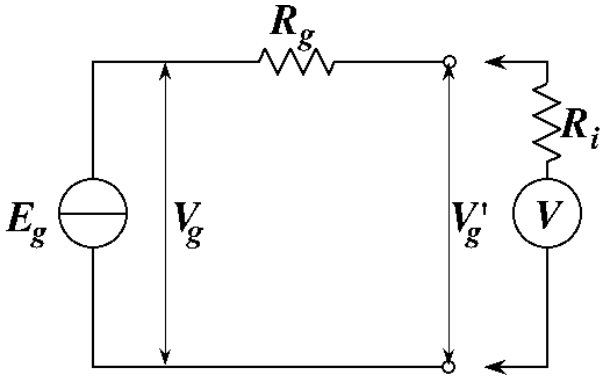

Fig. 13

La resistenza di ingresso di un voltmetro con fondo scala di 10 V è:

$$R_i = 20.000\ \Omega/V \times 10\ V = 200\ k\Omega.$$

La tensione indicata sarà:

$$V_{ind} = \frac{V_{oc} \cdot R_i}{R_i + R_f} = V_{oc}\,\frac{200k\Omega}{300k\Omega} = 0{,}67V_{oc}$$

Pari al 67% del vero valore di tensione a vuoto.

Il problema illustrato è tipico qualora si utilizza un multimetro portatile a basse prestazioni. Multimetri di questo tipo di solito modificano sensibilmente le tensioni normalmente rilevate nei circuiti elettronici.

(b)Effetto di carico dovuto ad un oscilloscopio a due diverse frequenze di impiego

Un oscilloscopio con resistenza di ingresso di 1 MΩ e capacità in parallelo di 50 pF è connesso su un circuito con una impedenza di uscita di 10 kΩ. Se la tensione del circuito a vuoto è una sinusoide di 100 kHz con valore di picco 1 V, quale sarà la tensione indicata sull'oscilloscopio ? Ripetere per un segnale sinusoidale di 1 MHz.
Il circuito equivalente per il sistema di misura è mostrato nella Fig. 10. L'impedenza di ingresso dell'oscilloscopio è un resistore di 1 MΩ con in parallelo la reattanza capacitiva del condensatore di 50 pF.
A 100 kHz risulta:

$$X_{in} = \frac{1}{2\pi fC} = \frac{1}{2\pi \cdot 10^5 \cdot (50 \cdot 10^{-12})} = 32k\Omega$$

L'impedenza equivalente Z_{in} data dal parallelo di R_{in} e $-jX_{in}$ fornisce:

$$Z_{in} = \frac{Z_1 Z_2}{Z_1 + Z_2} = \frac{(R_{in})(-jX_{in})}{R_{in} - jX_{in}} = \frac{10^6 \cdot (-j3{,}2 \cdot 10^4)}{10^6 - j3{,}2 \cdot 10^4} = -j3{,}2 \cdot 10^4\,\Omega$$

la tensione indicata V_{ind} sarà:

$$V_{ind} = \frac{V_{oc} Z_{in}}{Z_{in} + Z_{out}} = 1{,}0 \cdot \frac{-j3{,}2 \cdot 10^4}{-j3{,}2 \cdot 10^4 + 10^4} = \frac{3{,}2 \cdot 10^4 \angle -90°}{3{,}4 \cdot 10^4 \angle -73°} = 0{,}94 \angle -17°\ V$$

Ciò significa che l'ampiezza della tensione indicata è di 0,94 V (il 6% in meno del valore effettivo) e traslata nella fase di 17° in ritardo rispetto al valore a vuoto.
Alla frequenza di 1 MHz, la reattanza capacitiva in ingresso all'oscilloscopio vale:

$$X_{in} = \frac{1}{2\pi \cdot 10^6 \cdot 50 \cdot 10^{-12}} = 3200\,\Omega$$

dando:

$$Z_{in} = \frac{(R_{in})(-jX_{in})}{R_{in} - jX_{in}} = \frac{10^6 \cdot (-j3{,}2 \cdot 10^3)}{10^6 - j3{,}2 \cdot 10^3} = -j3200\,\Omega$$

$$V_{ind} = 1{,}0 \cdot \frac{-j3{,}2 \cdot 10^3}{-j3{,}2 \cdot 10^3 + 10^4} = \frac{3{,}2 \cdot 10^3 \angle -90°}{1{,}0 \cdot 10^4 \angle -18°} \approx 0{,}32 \angle -72°\ V$$

In questo caso, la tensione osservata è minore di un terzo del valore a vuoto ed è ritardata di 72°. Questo caso tipico mostra come il problema diventa rilevante all'aumentare della frequenza. L'effetto di carico illustrato in questo esempio potrebbe essere attenuato utilizzando una sonda di tensione. Una sonda 10:1 applicata ad un oscilloscopio determina, sullo stesso oscilloscopio, una impedenza di ingresso di 10 MΩ con una capacità di 5 pF in parallelo. L'uso della sonda, poi, introduce un'impedenza di ingresso di circa -j32.000 Ω ad 1 MHz, e la tensione indicata sarà 0.94 ∠-17° V, lo stesso che si avrebbe a 100 kHz senza la sonda.
Il fattore di riduzione di 10 della tensione dovuto alla sonda viene compensato aumentando il guadagno dell'oscilloscopio di un fattore di 10.

(c) Effetto di carico su un segnale ad onda quadra

Consideriamo l'effetto dell'oscilloscopio sul circuito considerato nell'esempio precedente quando la tensione è un segnale ad onda quadra a 250 kHz con 1 V di picco (Fig. 14). Il circuito equivalente del sistema è identico a quello riportato nell'esempio precedente. In questo caso, i fronti ripidi vengono arrotondati come mostrato in Fig. 11 da cui traspare il concetto del tempo di salita di un segnale. Questo è facilmente dedotto in termini della costante di tempo del circuito:

$$\tau = RC_{sh}$$

dove τ = costante di tempo del circuito
R = resistenza attraverso la quale il condensatore è caricato
C_{sh} = capacità di ingresso dell'oscilloscopio

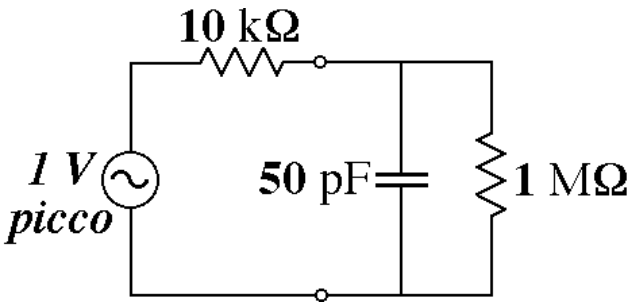

Fig. 14

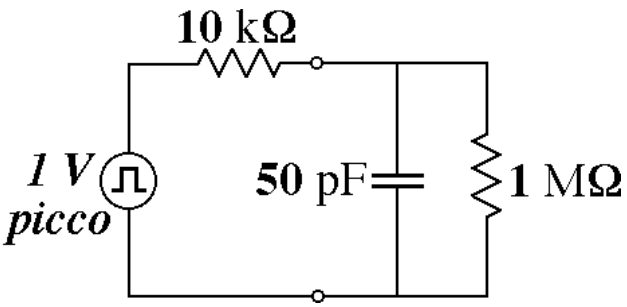

Fig. 15

Se la resistenza di ingresso dell'oscilloscopio è elevata rispetto ad R_{out}, allora R coincide essenzialmente con R_{out}. Matematicamente, la costante di tempo è il tempo richiesto ad un segnale di tensione per variare del 63 percento del valore finale. Dopo circa cinque volte la costante di tempo, la tensione ha raggiunto praticamente il valore finale. In questo caso,

$$\tau = 10^4 \cdot 50 \cdot 10^{-12} = 5 \cdot 10^{-7} \text{ s} = 0{,}5\ \mu\text{s}$$

Dal 10 al 90 percento del valore finale, il tempo di salita vale 2.2 τ o, come in questo caso, 1.1 μs.

Perdita di accordo di un circuito dovuto all'effetto di carico di un oscilloscopio

Si consideri l'effetto causato dalla connessione di un oscilloscopio ad un circuito accordato costituito dal parallelo tra un condensatore di 20 pF e una bobina di 50 nH. L'oscilloscopio ha una impedenza di ingresso costituita dal parallelo di una resistenza da 1 MΩ e di una capacità di 50 pF.

Prima della connessione dell'oscilloscopio, il circuito accordato risuona ad una frequenza di:

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} = \frac{1}{2\pi\sqrt{50\cdot10^{-6}\cdot20\cdot10^{-12}}} \approx 5\,\text{MHz}$$

L'applicazione dell'oscilloscopio rende la capacità totale della bobina di 70 pF e trasla il punto di risonanza a:

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{50\cdot10^{-6}\cdot70\cdot10^{-12}}} \approx 2{,}7\,\text{MHz}$$

L'effetto potrebbe essere notevolmente ridotto mediante l'uso di una sonda di tensione. Tuttavia per i circuiti in radio frequenza è difficile eseguire la misura senza perdere l'accordo.

3.2.2 Strumenti connessi in serie (amperometri)

In poche situazioni di misura è necessario disporre gli strumenti in serie. La situazione ben nota è quella della misura di corrente come nella Fig. 16.

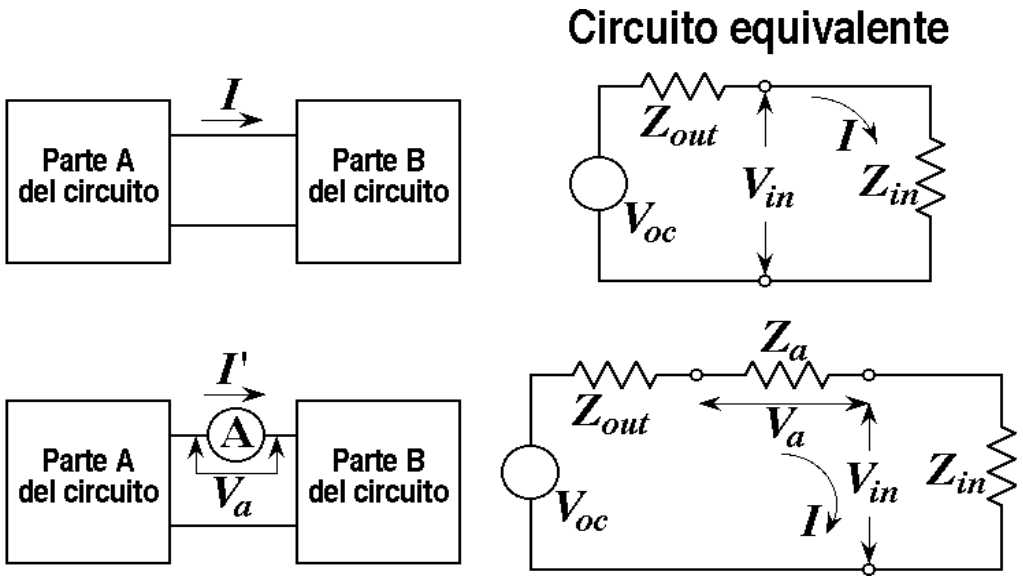

Fig. 16

In questo caso, l'impedenza di ingresso dello strumento di misura Z_A dovrebbe apparire come un corto circuito ($Z_A = 0$).

Il problema può essere analizzato con riferimento al circuito equivalente di Fig 16a. Affinché il circuito non sia influenzato dall'inserzione dell'amperometro, sia la corrente I che la tensione V_{in} dovrebbero essere le stesse di quelle di Fig. 16b. Questo significa che la caduta di tensione V_A dovuta all'amperometro deve essere trascurabile.

In pratica gli amperometri hanno sempre una impedenza di ingresso diversa da zero, pertanto occorre fare in modo che l'impedenza dell'amperometro sia molto più piccola (di un fattore di circa 20) dell'impedenza del circuito.

L'effettivo fattore richiesto dipende dall'accuratezza desiderata. Comunque occorre correggere l'errore sistematico prodotto dall'amperometro.

3.3 Adattamento di impedenza

3.3.1 Adattamento dell'impedenza di uscita al carico

Casi tipici nei quali è importante considerare l'adattamento di impedenza sono quelli che riguardano impieghi di generatori di forme d'onda (generatori di impulsi trasmettitori a rf, ecc.) che utilizzano linee di trasmissione, generalmente un cavo coassiale, per trasferire energia dalla sorgente all'ingresso del dispositivo da provare.
Inoltre, ci sono molti casi a frequenza relativamente bassa, come gli amplificatori audio per microfoni e trasduttori di tipo elettromeccanico per i quali l'adattamento di impedenza è utilizzato per raggiungere il massimo trasferimento di potenza. Se la sorgente ha una impedenza resistiva di R_0 [Ω], l'adattamento di impedenza può essere ottenuta facendo in modo che il carico o l'impedenza di ingresso del successivo dispositivo sia uguale ad R_0 [Ω] (trascuriamo per il momento l'effetto dei cavi di interconnessione che sarà discusso successivamente) (Fig. 17).

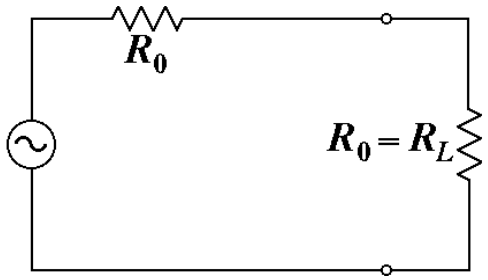

Fig. 17

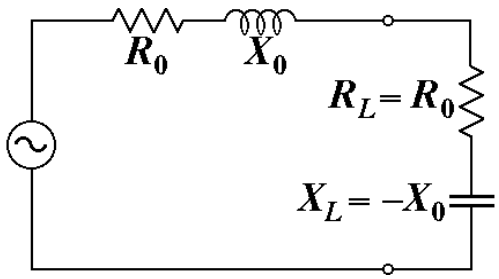

Fig. 18

Questa condizione di adattamento è necessaria per il massimo trasferimento di potenza al carico. Se l'impedenza di uscita della sorgente contiene una parte reattiva ($Z_{out}=R_o +jX_o$), possono essere definite due condizioni di adattamento. La prima avviene quando l'impedenza del carico è anche uguale ad $R_o +jX_o$. La seconda, che è generalmente più desiderabile per raggiungere il massimo trasferimento di potenza, è detta anche adattamento coniugato o di potenza, ottenuta rendendo la resistenza del carico uguale a quella della sorgente e la reattanza uguale a quella della sorgente ma opposta in segno come mostrato in Fig. 18.
Sommando l'impedenza totale del circuito le parti reattive si annullano reciprocamente rimanendo solo R_0. Questa condizione equivale a rendere risonante il circuito serie e nel caso in cui le sorgente è perfettamente adattata si ha il massimo trasferimento di potenza.

3.4 Effetti delle linee di trasmissione

Tutte le linee di trasmissione sono caratterizzate da un parametro definito impedenza caratteristica. Questa può essere definita come impedenza di ingresso di una sezione infinitamente lunga di una linea di trasmissione.
Nel campo di frequenza più utilizzato, l'impedenza caratteristica è approssimativamente una resistenza costante che assume valori compresi tra 25 e 600 Ω. Molte sorgenti di segnale che hanno componenti in alta frequenza hanno impedenza di uscita sui 50 Ω Se un tale dispositivo è connesso su di un carico di 50 Ω il sistema è adattato, utilizzando anche un cavo di impedenza caratteristica di 50 Ω. La mancanza di adattamento comporta fenomeni di riflessioni e l'insorgere di onde stazionarie sulla linea.

Infine a titolo di esempio si riporta nelle figure successive l'effetto dell'errore di adattamento di un carico in seguito alla trasmissione di un segnale rettangolare (Fig. 19 - a), b), c) e d)).

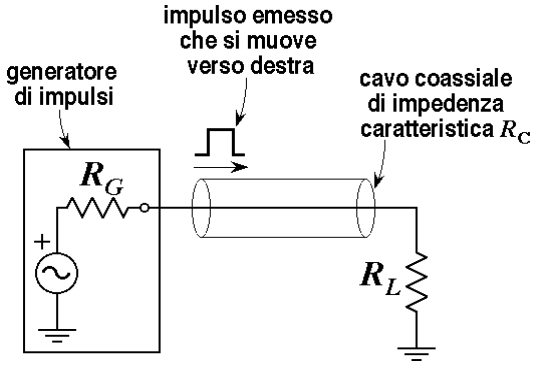

Fig. 19 (a)

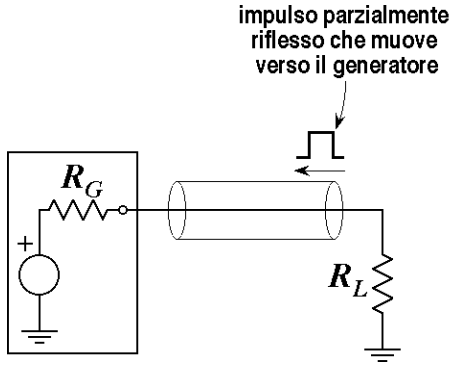

Fig. 19 b

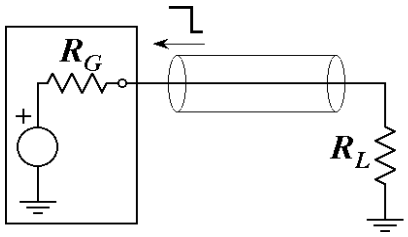

Fig. 19 (c)

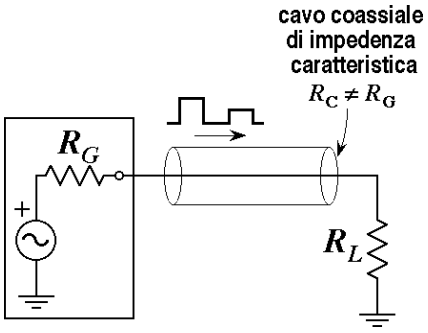

Fig. 19 (d)