

L'adattamento di impedenza e il ROS

IOZV, Francesco Cherubini

« Adattamento di impedenza » significa collegare, in maniera efficiente e valida, un generatore con un carico, allo scopo di ricavare il massimo risultato; in genere si cerca il massimo trasferimento di energia nel carico.

Volendo fare una similitudine meccanica, si può considerare, in campo automobilistico, la funzione svolta dal cambio di velocità. Esso adatta le condizioni del carico a quelle del motore, che eroga potenza entro un certo intervallo di giri, ad esempio tra 1.200 e 5.000 giri al minuto primo; per cui in « prima » noi possiamo affrontare bene le salite più ripide, ma troviamo che in pianura il motore è poco « caricato » e si imballa; mentre in « quarta » andiamo bene in pianura ma non riusciamo a superare le salite.

Tornando ai circuiti elettrici, possiamo esaminare ciò che accade in un determinato caso (vedi figura 1) in cui abbiamo un generatore caratterizzato da una resistenza interna uguale a 50Ω ($R_{int} = 50$) e che fornisce una tensione di 50 V ; con un carico esterno di 50Ω (facendo dei semplici calcoli), vediamo che otteniamo una tensione V_L in uscita, cioè sul carico R_L , pari a 25 V ; la I_L sarà $0,5 \text{ A}$ e abbiamo perciò $25 \times 0,5 = 12,5 \text{ W}$.

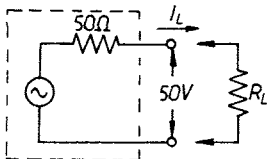


figura 1

Se $R_L = 50$, avremo il massimo di energia.

Con qualsiasi altro valore di R_L la potenza ottenibile è **inferiore**. Se infatti R_L ha un valore più elevato, si innalza V_L ma decresce I_L e il loro prodotto sarà inferiore; se R_L si abbassa, aumenta I_L ma decresce V_L e ancora otteniamo un prodotto inferiore. Al limite, se $R_L = 0$, avremo I pari a 1 A , ma $V = 0$; se R_L è infinita, avremo V_L pari a 50 V ma la I_L sarà 0 , e in entrambi i casi la potenza nel carico risulta zero. Tutto ciò è valido quando si desidera il massimo di uscita, indipendentemente da altre considerazioni; in molti casi però tali considerazioni vanno fatte. Ad esempio, se la sorgente è un trasformatore (vedi figura 2), la resistenza interna R_i rappresenta la resistenza ohmica del filo usato per il secondario, più l'effetto della resistenza del primario.

Se noi carichiamo il trasformatore sino a ottenere la massima potenza, il trasformatore prende fuoco!! Infatti la massima potenza in uscita (P_{out}), si ottiene quando $R_L = R_i$ e in tal caso si dissipa (in calore) nell'avvolgimento una potenza uguale a quella del carico. Però in questo caso l'assorbimento dalla rete è **il doppio**

della potenza in uscita e il « rendimento » del trasformatore è solo del 50 % (chiamiamo rendimento il rapporto tra potenza « resa » e potenza assorbita; tale rapporto, compreso tra 0 e 1, se viene moltiplicato per 100 ci dà la percentuale. Quindi se la potenza resa è la metà di quella assorbita, avremo: $P_{out}/P_{in} = 1/2 = 0,5$ o anche = 50 %).

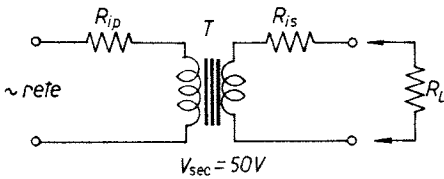


figura 2

Il carico su un trasformatore.

Esempio: sia ancora V pari a 50 V, se $R_L = 50 \Omega$, come nel caso di figura 1 i watt in uscita sono 12,5. Altrettanti sono dissipati nell'avvolgimento; quindi dalla rete sono assorbiti 25 W, di cui solo la metà vengono utilizzati nel carico.

A parte il calore dissipato nel trasformatore, e che darebbe luogo a inconvenienti, un rendimento del 50 % è certamente poco accettabile; perciò nel caso dei normali trasformatori di alimentazione si usa ridurre le R_{int} in modo che il rendimento sia almeno del 90 %; infatti un trasformatore da 50 W di uscita potrà assorbirne circa 55.

Nei trasformatori grossi il rendimento è anche più elevato, mentre in quelli piccoli scende. Tutto ciò per precisi calcoli economici.

Un altro caso in cui non si mira al massimo trasferimento di energia è quello degli alimentatori stabilizzati; essi infatti « mostrano » una R_i particolarmente bassa, e R_L deve essere molto, molto superiore. Esempio: tensione a vuoto 13 V; con assorbimento di 1 A la tensione scende a 12,8 V. Abbiamo una variazione di $13 - 12,8 = 0,2$ V con I di 1 A: da cui R_i uguale a $0,2 : 1 = 0,2 \Omega$, con un carico di 13Ω . Se analizziamo il comportamento di un alimentatore, vediamo che la tensione è tanto più stabile, quanto più è bassa R_i rispetto a R_L , il circuito riesce ad abbassare **artificialmente** R_i con l'uso della controeazione e a far rimanere V sostanzialmente stabile. La stessa cosa avviene negli amplificatori Hi-Fi, dove elevati tassi di controeazione riescono a mantenere la tensione in uscita sostanzialmente indipendente dal carico degli altoparlanti. Ciò viene fatto perché gli altoparlanti hanno una impedenza Z che varia con la frequenza, e dipende anche dalle casse entro cui sono montati; con un elevato tasso di controeazione questi effetti sono molto ridotti. Nel caso dell'alimentatore stabilizzato o dell'amplificatore Hi-Fi, la resistenza interna sembra molto bassa, abbiamo detto « artificialmente »; infatti il rendimento, inteso come rapporto tra potenza erogata e potenza assorbita (P_{out}/P_{in}) è sempre ben lontano dal 90 % del trasformatore, e in alcuni casi è particolarmente basso.

L'adattamento è invece sempre rispettato nei circuiti RF poiché si desidera il massimo trasferimento di energia. Nel caso di una antenna, questa si comporta da generatore quando viene usata per ricevere; il carico è rappresentato dai circuiti di entrata del ricevitore. In trasmissione, invece, il Tx è il generatore, e l'antenna diviene il carico. Facendo un po' di conti, si vede che spostamenti relativamente piccoli di impedenza non causano grosse riduzioni di potenza, né in ricezione, né in trasmissione, se si immagina il carico collegato direttamente, cioè senza la linea di trasmissione, che però è quasi sempre presente. Torneremo dopo su ciò, e parleremo del famigerato ROS (crucchio soprattutto dei principianti). La questione dell'adattamento va tenuta ben presente anche negli accoppiamenti fra stadi. Ad esempio, è abbastanza comune vedere dei transistori collegati come in figura 3.

In questo circuito la Z (Z è simbolo dell'impedenza) in uscita da Q_1 non è nota; essa è data da R_i in parallelo alla resistenza interna di Q_1 che è però abbastanza alta; quindi la Z risulterà poco inferiore a R_i . Il carico è la base di Q_2 , che ha un

comportamento assai variabile. Se Q_2 non è in conduzione, la Z è alta; appena inizia a scorrere la corrente di base (I_b) la Z scende a valori estremamente bassi.

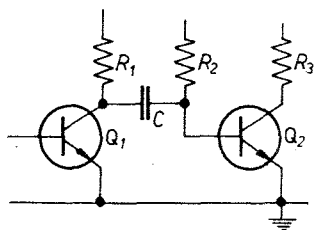


figura 3
Transistor in cascata.

Tale comportamento non lineare rende anche difficile i calcoli relativi, ed è per questo che i transistori si devono considerare pilotati in corrente, non in tensione. Infatti la corrente disponibile per la base di Q_2 è, al limite, quella assorbita da Q_1 tramite R_1 , dato che Q_1 può o essere interdetto, e in tal caso (trascurando C), la base di Q_2 riceve corrente tramite R_1 oppure Q_2 può arrivare alla saturazione e in tal caso la base di Q_2 non riceve più corrente (a parte quella di polarizzazione tramite R_2).

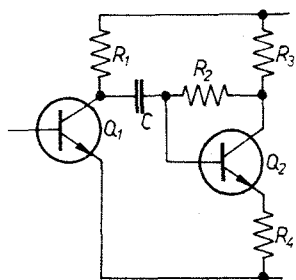


figura 4
Altro circuito tipico.

Passando al circuito di figura 4, ove è inserita R_4 sul circuito di emettitore, la Z di ingresso di Q_2 viene considerevolmente aumentata, e veniamo a trovare su R_4 (circa) le variazioni di tensione presenti sul collettore di Q_1 , dato che Q_2 si comporta da « emitter follower » (si noti che manca, deliberatamente, qualsiasi condensatore in parallelo a R_4). Ma poiché la I che transita in R_4 transita anche in R_3 (meno la trascurabile I_b), avremo che il rapporto R_3/R_4 determina anche il guadagno in tensione dello stadio Q_2 . Naturalmente questo discorso è valido se si usano elementi circuitali normali. La polarizzazione di Q_2 , tramite R_2 collegata al collettore, è inferiore di quella ottenibile con R_2 unita al positivo, perché è presente una controreazione in continua che tende a stabilizzare il punto di lavoro di Q_2 .

Adattamento e ROS

Torniamo ora al tema principale, con il traguardo del « ROS ».

Questa sigla significa « Rapporto Onde Stazionarie » e in inglese diviene « SWR » cioè « Standing Wave Ratio ».

Diciamo subito che la cosiddetta « onda riflessa » **non esiste**; è solo un'astrazione teorica cui i meno eruditi danno troppa importanza. Ho sentito una volta un OM che diceva che la potenza riflessa (dall'antenna) faceva arrossare le placche dei tubi finali. Questa è una vera aberrazione, perché non dobbiamo dimenticare che il Tx è un generatore, e il complesso cavo-antenna è il carico; punto e basta. Il carico potrà essere più o meno disadattato e quindi potrà assorbire più o meno potenza, **ma non la respinge indietro**. In uno scritto apparso su CQ americana nel mese di marzo '79 — W Vissers, K4KI, dice giustamente che parlare di onde in avanti e in ritorno è come pensare a un tubo pieno d'acqua; questa o va avanti o indietro, ma non può fare le due cose contemporaneamente!!

Vediamo adesso un piccolo esempio chiarificatore.

Torniamo alla figura 1, e supponiamo di applicare un carico diverso da 50Ω . In figura 5 sono riportati i risultati dei calcoli (molto semplici); si vede che allontanandosi da 50Ω , la potenza in uscita si riduce, ma non in modo eccessivo. Se poi il generatore è in qualche modo regolabile, si può compensare il minor trasferimento di energia.

R_L	W_{out}	ROS	$R_{L,2}$	%
50	12,5	1	—	100
70	12,15	1,4	35,7	97
100	11,11	2	25	88,9
150	9,37	3	16,67	75

figura 5

Potenza in uscita al variare di R_L (i valori $R_{L,2}$ sono equivalenti ai fini del ROS e della potenza) nel circuito di figura 1.

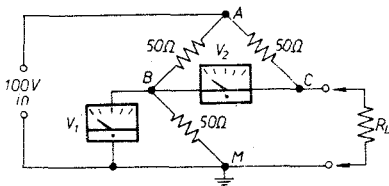


figura 6

Ponte di misura.

Esaminiamo ora la figura 6, ove è rappresentato un normale circuito ponte. Supponiamo di alimentarlo con 100 V all'entrata « in », cioè nel punto A; supponiamo anche che i due voltmetri abbiano alta resistenza interna e quindi il loro effetto viene trascurato. Il voltmetro V_1 segnerà 50, dato che le resistenze tra A e B e B e M sono uguali; nel punto B avremo appunto 50 V. Se $R_L = 50 \Omega$, il voltmetro V_2 segnerà 0, dato che anche nel punto C, per lo stesso motivo, la tensione è di 50 V. Con questo circuito, la potenza assorbita è divisa ugualmente fra le quattro resistenze; in pratica ognuna dissipa 50 W, mentre la potenza totale assorbita è di 200 W.

Se R_L è variata in 150Ω , la tensione nel punto C diviene pari a:

$$\frac{V \times R_L}{R_L + 50} = 100 \times \frac{150}{150 + 50}, \text{ cioè } 75 \text{ V.}$$

V_1 seguita a segnare 50, V_2 segna 25; in termini di ROS, ciò equivale a 3, e infatti 150 è tre volte maggiore di 50. Se R_L è fatta pari a 16,67, la tensione in C diviene: $100 \times (16,67 : 50 + 16,67) = 25 \text{ V}$; e V_2 segna **ancora** 25. Guarda caso, 16,67 è pari a un terzo di 50, e il ROS è ancora pari a 3. Quindi il nostro ponte di figura 6 ci permette di misurare quale scostamento ha R_L rispetto al valore di 50, per il quale il ponte è equilibrato e V_2 segna zero. Rispetto al normale rosmetro, V_1 misura la potenza in uscita (Forward) e V_2 la potenza di « rientro » (Reflected), e il comportamento è equivalente. A questo punto, mi pare, risulta ben evidente che **non** c'è alcuna potenza riflessa; c'è solo una variazione di equilibrio e un minore assorbimento di potenza da parte di R_L . Per giunta, tutte le considerazioni fatte **valgono per la corrente continua**. Se ora immaginiamo di alimentare il ponte con RF, per esempio a 14 MHz, nulla cambia, a parte i voltmetri che devono essere in grado di funzionare in alternata. Mettendo al posto di R_L una reattanza, cioè un condensatore (o una induttanza), la tensione nel punto C viene ad essere sfasata e di livello tale che V_2 segna 50 (come V_1) con **ROS** infinito e, **si noti**, con assorbimento di potenza **zero** da parte di R_L , cioè del condensatore (o induttanza).

Per chi si chiede come mai V_2 segna 50 **indipendentemente** dal valore della reattanza, si può dire che se il condensatore C è perfetto, la corrente circolante nel braccio di destra del ponte genera due tensioni, su R e su C, sfasate esattamente di 90° tra loro; e se la reattanza di C è pari a 50, le due tensioni sono in anticipo o ritardo di 45° rispetto alla tensione in A (vedi figura 7) e la loro somma vettoriale dà la tensione V.

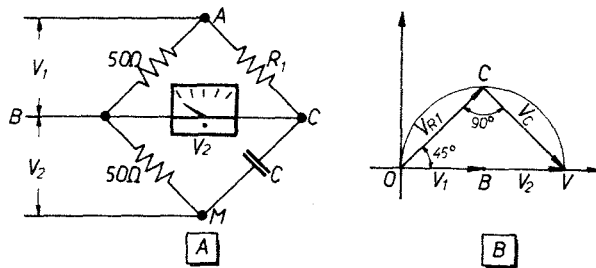


figura 7

Tensioni presenti su R e C.

Variando il valore della capacità, il punto C descrive la circonferenza 0CV, e poiché il nostro strumento V_2 è inserito tra il punto B e il punto C, la tensione indicata è **sempre** 50 qualunque sia il punto in cui C si viene a trovare. Infatti, la somma vettoriale delle due tensioni localizzate su R_1 e su C è costante, con un angolo di 90° fra loro.

Tornando a discorsi più elementari, abbiamo così visto che le indicazioni di V_1 e V_2 sono **uguali** a quelle che dà il rosmetro; ma è per noi più facile ragionare sul circuito di figura 6 che non sul circuito (ignoto) del rosmetro, ove si parla sempre di potenza riflessa, che, dovrebbe essere chiaro, non esiste. Esiste invece una indicazione di V_2 che ci dà una « misura » di quanto il carico si trova lontano dal valore ottimo di 50.

Se il carico non è troppo lontano da $50\ \Omega$, oppure ha delle modeste componenti reattive, è possibile attuare un perfetto adattamento agendo sui comandi « Load » e « Plate » di cui sono forniti la grande maggioranza dei Tx valvolari. Nei più recenti apparati a stato solido questi comandi sono scomparsi e non è più possibile effettuare le regolazioni necessarie; si ricorre perciò agli « accordatori » o « adattatori » che sono in genere composti da un paio di variabili e una bobina di adeguate dimensioni. La semplificazione costruttiva del Tx si rivela perciò alquanto aleatoria; i due comandi soppressi nel Tx si ritrovano, aumentati a 3, nell'accordatore!

ROS e linee

Abbiamo finora parlato di carichi non adattati, immaginando che questi siano collegati direttamente al ponte di misura o al Tx. In pratica, però, l'antenna è sul terrazzo, e il Tx a una sensibile distanza. Tra i due viene interposta una « linea di trasmissione », molto spesso in cavo coassiale. La linea, in teoria, non altera il disadattamento esistente, anche se il comportamento varia a seconda dei casi. Supponiamo, ad esempio, di operare su 14 MHz e di interporre un cavo lungo esattamente mezz'onda tra il ponte di figura 6 e R_L (vedi figura 8).

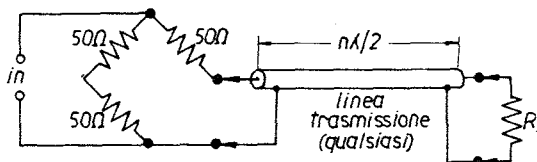


figura 8

Inserimento di una linea tra il ponte di figura 6 e carico.

Nulla varia, perché una linea lunga mezz'onda (o più multipli di mezz'onda) non cambia la situazione. Se la linea invece fosse solo di un quarto d'onda, essa si comporterebbe da trasformatore di impedenza; supponiamo di usare un cavo da 50Ω , terminato su una R di 150Ω . Chiamando Z_1 e Z_2 le impedenze agli estremi della linea e Z_c l'impedenza del cavo, vale la formula:

$$Z_1 \times Z_2 = Z_c^2$$

da cui:

$$Z_1 = \frac{Z_c^2}{Z_2} = \frac{50^2}{150} = 16,67.$$

Quindi un cavo lungo un quarto d'onda **trasforma** i 150Ω in $16,67 \Omega$ (o viceversa). In entrambi i casi il ROS è 1 : 3 e ciò conferma che la linea **non cambia** il ROS. Nei casi di lunghezze intermedie i calcoli sono molto più complessi e li lasciamo agli appassionati di matematica.

Perdite nella linea

La linea di trasmissione presenta delle perdite, dovute sia alla resistenza dei conduttori (e all'effetto pelle nel caso di RF) sia alle perdite nel dielettrico (isolante). Le perdite sono normalmente indicate nelle tabelle, ma sono anche misurabili se si dispone di un wattmetro e di un carico fittizio.

Quando la linea è terminata su di un carico diverso da quello previsto si creano le famose onde stazionarie. Con questa frase si intende dire che la tensione (e la corrente) presente lungo la linea non è costante, ma presenta dei massimi e dei minimi, intervallati in funzione della lunghezza d'onda. Ad ogni massimo di tensione corrisponde un minimo di corrente e viceversa (vedi figura 9).

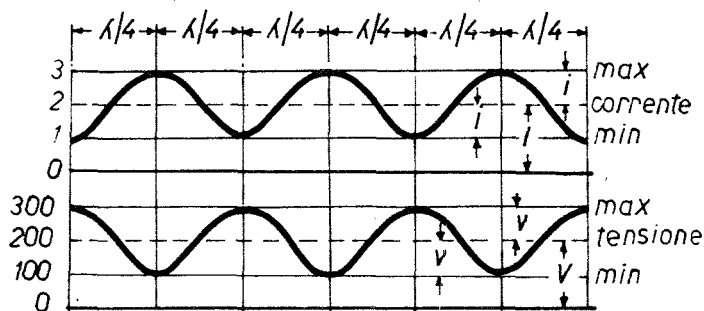


figura 9

Tensione e corrente su linea con ROS di 1 : 3.

Il rapporto tra l'ampiezza del massimo e del minimo è quello che chiamiamo ROS. Quindi se il ROS è 1, vuol dire che V è costante. Se è 1 : 3 vuol dire che il rapporto tra il minimo e il massimo è 1 a 3, ecc. ... La presenza di queste ondulazioni fa aumentare le perdite nella linea in modo tanto più marcato quanto più elevato è il ROS; e poiché le perdite aumentano anche con la frequenza di lavoro, ne viene che soprattutto alle frequenze più elevate si deve tener d'occhio il ROS. Riepilogando, noi abbiamo in successione: Tx - linea - antenna.

Se la linea è da 50Ω e l'antenna si scosta da questo valore, si creano delle onde stazionarie nella linea che fanno aumentare le perdite. Inoltre il Tx può avere difficoltà a erogare la potenza prevista. Se il rosmetro è inserito tra linea e antenna noi leggiamo il ROS esatto (ammesso che il rosmetro dica la verità), ma se lo inseriamo tra Tx e linea le indicazioni saranno, in genere, inferiori alla realtà, cioè più ottimistiche.

L'adattamento di impedenza e il ROS

Il famoso accordatore dovrebbe essere inserito tra linea e antenna; in tal modo la linea verrebbe a lavorare senza onde stazionarie. Inserito invece tra Tx e linea, realizza un buon adattamento tra questi due elementi, ma le onde stazionarie lungo la linea restano **tali e quali**.

Se vogliamo verificare il funzionamento del rosmetro possiamo effettuare le due prove indicate in figura 10 e 11.

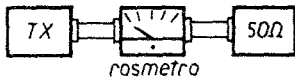


figura 10

Prova del rosmetro su carico di 50 Ω .

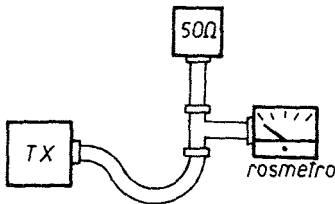


figura 11

Prova del rosmetro su circuito aperto.

In figura 10 inseriamo il rosmetro tra Tx e un carico fittizio da 50 Ω . La potenza « riflessa » deve risultare zero.

In figura 11 si usa una derivazione a T connessa a un attacco del rosmetro e anche al carico di 50 Ω . Nelle due posizioni (avanti-indietro) del rosmetro si dovrà ottenere la stessa deviazione dell'ago (a fondo scala, agendo sull'apposito comando); in tal caso, infatti, il ROS è infinito.

NOTA (per i più esperti)

L'affermazione che non esiste l'onda riflessa potrebbe essere facilmente smentita dalla considerazione che, inviando un breve impulso in una linea, si riceve, di ritorno, un impulso, se la linea non è terminata correttamente; tale tecnica, impiegata correntemente in campo professionale nei collaudi dei cavi coassiali, permette sia di controllare eventuali discontinuità, anche modeste, sia di localizzare i guasti (misurando il tempo trascorso tra l'invio dell'impulso e il ritorno della riflessione).

La discordanza viene però meno se si tiene conto che tutti i discorsi fatti si riferiscono a tensioni alternate **sinusoidali**, e la sovrapposizione di tensioni sinusoidali (di pari frequenza) genera ancora una tensione sinusoidale. Effettivamente nel caso del singolo impulso (per definizione **non** sinusoidale) siamo nel campo delle onde progressive, mentre nel caso di Tx/linea/antenna siamo nel campo delle onde stazionarie (si veda: Malatesta, Elementi di Elettronica e Radiotecnica, volume secondo, pagina 363 e seguenti). *****