

Parliamo ancora un po' di onde stazionarie

I4TIJ, ing. Alberto Ridolfi

Premessa

Avevo in animo di scrivere qualcosa sull'argomento, quando mi è capitato di leggere questa serie di articoli di W2DU/W8KHX, M. Walter Maxwell, Ingegnere, Capo del Laboratorio Antenne e della Sezione Prove del Centro Spaziale, Divisione Astro-elettronica della RCA, pubblicata su QST.

Il tutto mi è sembrato tanto incisivo da meritarme la traduzione. Io mi sono limitato ai primi due articoli, perché i successivi sono molto teorici e ad essi rimando il tecnico per l'approfondimento e la verifica matematica.

Ve ne propongo dunque la traduzione quasi letterale con la speranza che serva, più che a insegnare qualcosa, a far riflettere il radioamatore, a stimolarlo ad affinare le sue conoscenze; perché l'OM non può e non deve essere solo un operatore, ma anche uno studioso dei fenomeni collegati con la radio.

A giudicare dai discorsi che si sentono in aria, quasi tutti tendono ad avere un ROS di 1 : 1 (ROS = Rapporto di Onde Stazionarie).

Richiesti del perché, buona parte dei corrispondenti risponde « non esco su questa frequenza perché il mio ROS è di 2,5 : 1, troppa potenza torna indietro e non ne arriva abbastanza all'antenna », oppure « se alimento una linea con un ROS così alto, la potenza che viene riflessa dentro il TX può rovinarmelo », o ancora

« io non voglio che il mio cavo irradii ».

Ognuna di queste risposte dimostra la non buona conoscenza del comportamento delle onde riflesse, e sono purtroppo sintomatiche di un modesto grado di preparazione di costoro.

Per troppo tempo si è trascurata quella attività di pensiero razionale e creativa del progetto di antenne e di linee, avendo come surrogato un atteggiamento non scientifico e fatalistico, proprio come avveniva prima che Copernico dimostrasse che l'Universo non ruota attorno alla Terra.

Questa situazione nacque con l'uso dei cavi coassiali da parte dei radioamatori, subito dopo la fine della seconda guerra mondiale, raggiungendo il culmine con l'apparizione sul mercato degli strumenti indicatori di ROS e la contemporanea sostituzione dei link di antenna con il variabile di carico nel pi-greco, quale elemento di regolazione del carico.

Noi siamo in questa situazione perché sono state pubblicate e vengono tuttora pubblicate informazioni sballate sul comportamento di un'antenna non risonante, sulle prestazioni di un cavo in presenza di onde riflesse perché disadattato con l'antenna, e specialmente il significato e l'interpretazione dei ROS.

Articoli "contenenti informazioni chiaramente erranee e concetti distorti trovano la via della Stampa, diventano Vangelo e continuano a propagarsi con l'efficacia della Catena di S. Antonio. Essi comprendono queste perle di logica intuitiva come: ricercare sempre il perfetto adattamento di impedenza fra antenne e linea; incrementare le prestazioni di un'antenna, cioè l'efficienza di radiazione, solo sulla base dei ROS del cavo, più è basso e meglio è; tagliare un dipolo perché risuoni su una (unica) frequenza e alimentare con un cavo lungo esattamente un multiplo intero di mezza lunghezze d'onda, nessun'altra lunghezza va bene; regolare l'altezza, magari abbassando le estremità di una inverted-V, per rendere la componente resistiva dell'impedenza di radiazione uguale all'impedenza del cavo; sottrarre da 100 la percentuale di potenza riflessa per determinare la percentuale utile di potenza di uscita (e sono stati pubblicati normogrammi per illustrare questo metodo erroneo) .

Come risultato di questi pregiudizi, siamo stati condizionati a evitare ogni disadattamento, e a fuggire le onde riflesse come la peste.

ROS 1 : 1 a tutti i costi!

E' una esagerazione? Non credo, basta fare un po' di ascolto!

In parole povere, possiamo dire che il ROS è per noi un forte handicap! In molti casi, dal punto di vista di un buon tecnico, questo handicap ci induce a concentrare gli sforzi per adattare l'impedenza dalla parte sbagliata della linea di trasmissione.

E' grottesco che ci si debba trovare in queste condizioni, perché il radioamatore è di solito molto pratico quando deve applicare considerazioni teoriche. In questo caso noi abbiamo seguito alla lettera la teoria del perfetto adattamento di impedenza, perché molti dei sopraccitati articoli ci hanno indotto a credere che tutta la potenza riflessa è perduta, senza il più vago accenno al fatto che, opportunamente controllata, la riflessione può esser volta a nostro vantaggio per aumentare la banda passante, cosa che attualmente stiamo trascurando.

Che tanta disinformazione abbia preso piede è sorprendente se si considerano i corretti insegnamenti dell'ARRL-Handbook, ARRL Antenna book, le opere di Grammer, Goodman, McCoy, Drumelie, Smith, e specialmente due articoli di argomento assai simile a questo, di Grammer e Beer.

Il solo scopo di questo articolo, perciò, è di individuare alcune delle più erronee nozioni riguardanti i principi della riflessione con sufficiente chiarezza per consentire al lettore di riesaminare le sue cognizioni al riguardo. Una volta compresi correttamente il disadattamento e la riflessione, noi possiamo migliorare la flessibilità di un'antenna efficiente, come andare a VFO dopo aver lavorato con un solo quarzo.

E quando scopriremo quanto poco guadagneremo con l'aver un basso ROS nella linea, eviteremo inutili e lunghe modifiche all'antenna, che spesso richiedono rischiosi equilibrismi e lavoro disagiato in cima a un paio!

Uccidiamo i pregiudizi sul ROS!

Confronto fra linea aperta e cavo coassiale

La teoria della trasmissione di potenza per mezzo di una linea con minima perdita per l'eliminazione di tutte le riflessioni, terminando la linea con un adattamento perfetto, è ugualmente valida, naturalmente, sia per linee aperte che per cavi coassiali. Al tempo della linea aperta, però, prima dell'uso generalizzato del cavo coassiale, alla teoria si aggiungevano alcune considerazioni pratiche. La linea aperta era, ed è tuttora, usata con ROS elevati per ottenere larghissime bande passanti con efficienza molto alta. E ciò perché tutta la potenza riflessa a causa del disadattamento linea-antenna che ritorna all'uscita del trasmettitore viene conservata, non dissipata, e viene restituita all'antenna dall'adattatore (Transmatch o Antenna-coupler o Adattatore di antenna) posto all'inizio della linea. Ma, sebbene le perdite per riflessione ed elevato ROS non siano zero, queste perdite addizionali sono trascurabili perché la linea aperta presenta basse perdite. Se la linea fosse senza perdite (attenuazione zero dB) non si avrebbe nessuna perdita a causa della riflessione.

L'errore del nostro ragionamento, che le stazionarie in una linea coassiale debbono sempre venire completamente eliminate, è nato in modo spontaneo perché le riflessioni ammissibili, e quindi il ROS, sono minori che nella linea aperta. Se si usa il cavo per operare su una singola frequenza, ha senso adattare ragionevolmente la linea con l'antenna. Ma non ha senso adattarla nel punto di attacco al carico nella maggior parte delle applicazioni, quando si sia principalmente interessati al lavoro multigamma, o per lo meno in una estesa gamma di frequenze. Noi non siamo operatori mono-frequenza, a meno che i pregiudizi sul ROS non ci impediscano di allontanarci troppo dalla frequenza di risonanza dell'antenna.

Molti Autori sono responsabili del perpetuarsi del concetto erroneo e non scientifico che il cavo coassiale debba venire adoperato alla sua frequenza di risonanza, evidenziando la necessità di abbassare il ROS per incrementare l'efficienza della antenna, e scrivendo addirittura che l'efficienza è uguale a 100 (% potenza riflessa). Il concetto è non scientifico perché trascura il più importante fattore nell'equazione dell'efficienza, l'attenuazione nella linea. Ed è erroneo inoltre perché il legame tra l'efficienza e la potenza riflessa non è una semplice differenza. Limitare solo il ROS non ha senso perché la quantità di potenza riflessa effettivamente perduta non dipende dal solo ROS. Deve venire considerato anche il fattore di attenuazione del cavo, **perché la sola potenza riflessa perduta è quella dissipata nella linea a causa della attenuazione; il resto ritorna all'antenna.** Questi Autori ci hanno così pesantemente condizionato al riguardo, che molti di noi hanno sorvolato sulle corrette premesse all'argomento. Sia nell'ARRL Handbook che nell'ARRL Antenna book è chiaramente messo in evidenza che l'efficienza di trasmissione è una funzione di due variabili: l'attenuazione della linea e il disadattamento. Sapendo ciò e usando il grafico di questa funzione che appare nei testi citati, ognuno può determinare quanta efficienza perde per un dato ROS con l'attenuazione di quel cavo specifico. Solo allora si può decidere quale sia il limite superiore per il ROS.

Un basso ROS non è importante

Nei nostri tentativi di ottenere ROS ridotti, 1,1, 1,2 o anche 1,5 : 1 abbiamo dato la preminenza alla diminuzione di potenza riflessa anziché a un efficiente trasferimento di potenza, anche per il funzionamento su una sola frequenza, come se per fare l'impianto elettrico di casa usassimo cavo da 5 mmq; quando è sufficiente filo da 1 mmq. Il riferimento alle equazioni fondamentali delle linee di trasmissione, presenti in tutti i testi tecnici e nei manuali, verifica questa analogia, e inoltre rende più evidente il fatto che gli Autori che insistono semplicemente sul basso ROS, o che dicono che 1,5 : 1 o 2 : 1 sono troppo alti, non hanno compreso la vera relazione tra potenza dissipata e riflessa. Dal punto di vista delle comunicazioni di amatore si può dimostrare facilmente e matematicamente, e verificare in pratica, che la differenza di potenza trasferita in qualsiasi cavo con ROS di 2 : 1 è minima rispetto a quella con ROS di 1 : 1; poiché l'unica cosa che conta è la lunghezza, o attenuazione della linea, molti dei cavi che usiamo in HF con rapporti di 3, 4 o anche 5 : 1 presentano le stesse trascurabili differenze.

Quando l'attenuazione della linea è bassa, consentendo tali alti valori dei ROS, consente altresì di operare in una ampia gamma di frequenze, intorno a quella di risonanza dell'antenna, con le piccolissime perdite di potenza sopra menzionate, in spregio alla diffusa opinione contraria.

La relativa poca importanza di un basso ROS quando le perdite della linea sono scarse, è dimostrato piuttosto chiaramente da questi due esempi di applicazione delle antenne dei veicoli spaziali: primo, nei satelliti meteorologici Tiros

ESSA-Itos-APT, il progetto dei cui sistema multifrequenza di antenne fu mia opera, l'impedenza terminale dei dipolo alla frequenza del beacon per telemetria (108 MHz nei primi modelli), era $150-j100\Omega$, per un ROS di 4,4 : 1, potenza riflessa 40 %.

Fu realizzato l'adattamento all'inizio della linea, che venne alimentata da un trasmettitore da 30 mW (e non si può buttare troppa potenza!). L'attenuazione della linea e dell'adattatore insieme erano 0,2 dB e le perdite addizionali per il ROS erano 0,24 dB, per una perdita totale di 0,44 dB (9,6 %). Secondo il concetto prevalente ma erroneo che tutta la potenza riflessa è perduta (40 %), avrebbero dovuto arrivare all'antenna solo 18 mW e l'efficienza, misurata sulla solita base erronea, avrebbe dovuto essere dei 60 %. Però all'antenna furono misurati 27,1 mW. Dei 2,9 mW perduti, solo 1,6 erano dovuti al ROS. Così l'efficienza sarebbe stata dei 95,5 % nel caso di perfetto adattamento, ma si riduceva al 90,4 % a causa dei ROS.

Secondo, nel satellite NAVSAT usato per consentire alle navi di fare il punto in mare, l'impedenza dell'antenna a 150 MHz è di $10,5 + j48 \Omega$, con un ROS di 9,8 : 1, potenza riflessa 66 %. Adattato anch'esso all'ingresso della linea, perdite in linea 0,25dB, perdite addizionali per ROS 0,9dB, perdite complessive 1,15dB, pari a 1/6 di punto della scala S. Questa perdita è insignificante anche in un apparato spaziale, dove la potenza è tutto.

Perché abbiamo adattato all'inizio della linea? Perché l'insieme dei problemi elettrici, meccanici e termici rendevano non pratico l'adattamento al carico. L'adattamento all'ingresso della linea fu una soluzione semplice per consentire di sistemare l'adattatore in posizione non critica. Ci ha liberato in sede di progetto da gravi problemi di carattere tecnico, con riduzioni trascurabili dell'efficienza, con valori di ROS che molti radioamatori considerano impensabili.

Un altro fattore che contribuisce alla non comprensione è la confusione tra due diversi modi di usare una linea: a tensione di ingresso costante, o a potenza di ingresso costante. Il lavoro sperimentale e di laboratorio richiede spesso di mantenere costante la tensione di ingresso al variare del carico. Un generatore di tensione costante, di solito, si realizza inserendo un attenuatore tra generatore e linea, con attenuazione di 15 o 20 dB, per assorbire la potenza riflessa, impedendole così di raggiungere il generatore, dove potrebbe modificare l'accoppiamento tra generatore e linea, e variare la tensione del generatore. Per effetto della presenza dell'attenuatore, il generatore vede un carico sempre perfettamente adattato in tutte le condizioni, e tutta la potenza riflessa è perduta; ma queste sono condizioni di laboratorio per ottenere dati significativi. Quando noi amatori effettuiamo delle variazioni che alterano il carico della linea, cioè alteriamo l'accoppiamento trasmettitore-linea a causa della potenza riflessa, possiamo riaggiustare l'accoppiamento riportando la potenza all'ingresso della linea al valore primitivo senza preoccuparci della potenza riflessa. Noi usiamo linee con bassa attenuazione per conservare la potenza riflessa, i laboratori inseriscono attenuatori per dissiparla. La confusione tra questi due concetti ha favorito il perpetuarsi del concetto erroneo della « potenza riflessa perduta ».

Come risultato di queste inesatte cognizioni, molti OM si meravigliano che non si notino sostanziali miglioramenti realizzando un perfetto adattamento linea-antenna. Molti tuttora evitano l'uso della linea aperta, ma non gli OT (Old Timers, vecchi OM), perdendo del tutto la gioia di un QSY dall'altra parte della gamma con un solo movimento della sintonia dei transmatch, perché la paura delle riflessioni provocata dalla applicazione letterale della teoria ai cavi coassiali ha portato al disprezzo per ogni tipo di accoppiamento disadattato. Aggiungendosi per di più alla confusione la favola che la potenza riflessa viene dissipata nel TX, provocando surriscaldamento dei tubi e delle induttanze e ogni sorta di guai similari. Questo mito, ingigantito dalla ignoranza della dinamica vera delle riflessioni, è diventato la facile ma fallace spiegazione per tutto ciò che sembra comportamento anormale in un trasmettitore che alimenta una linea in presenza di onde riflesse. Ciò che in realtà avviene nel trasmettitore è soltanto una variazione nel l'accoppiamento, come sarà spiegato più avanti. E a quel punto potremo comprendere come operare senza il pericolo di danneggiare il trasmettitore quando alimenta una linea con ROS elevato.

Progettazione di un'antenna per radioamatore

La progettazione è il processo per arrivare a un compromesso realizzabile in pratica, quando i vari obiettivi derivanti da diversi punti di vista teorici sono in conflitto tra di loro rendendo impossibile la realizzazione di tutti gli obiettivi. Una buona progettazione è semplicemente la individuazione delle giuste scelte di compromesso, mettendo in risalto gli obiettivi preminenti, come nel caso dell'antenna per satelliti citata precedentemente. Noi radioamatori perdiamo molto tempo a costruire e tarare un'antenna. Non sarebbe meglio spendere un po' di quel tempo imparando a progettare, per imparare a orientarci tra varie possibilità, a valutare i diversi fattori, anziché consentire a Sua Maestà il ROS di dettare le condizioni?

Primo: dobbiamo migliorare le nostre conoscenze sulla dinamica delle riflessioni e sulla propagazione dei segnali lungo le linee di trasmissione . allo scopo di comprendere

- 1) perché la potenza riflessa in sé non è un fattore importante nel definire con quanta efficienza la potenza viene trasferita all'antenna;
- 2) l'effetto della attenuazione lungo la linea (e scoprire perché è il fattore chiave che ci dice quando tenere conto della potenza riflessa, quanto, e quando invece trascurarlo) ;
- 3) perché tutta la potenza immessa nella linea, a meno delle perdite proprie della linea, viene assorbita dal carico, senza alcun riferimento al disadattamento tra linea e antenna;
- 4) perché le perdite per riflessione (perdite dovute al disadattamento) sono bilanciate all'ingresso della linea dal **guadagno** di riflessione;
- 5) perché la lettura di un basso ROS in sé non è una garanzia che tutta' la potenza viene effettivamente irradiata, così come un ROS elevato non indica che viene dispersa;
- 6) perché il ROS non è il colpevole dei problemi di un trasmettitore che non carica, in quanto il vero colpevole è la variazione di impedenza all'ingresso della linea a causa dei ROS, e perché possiamo controllare l'impedenza di ingresso in modo completo senza dover intervenire per forza sul ROS;
- 7) l'importanza di pensare in termini di componenti resistive e reattive di una impedenza, invece che in termini di ROS soltanto, perché il ROS da solo è generico, specialmente dal punto di vista della scelta e della regolazione dell'accoppiamento e dei circuiti di adattamento.

Secondo: dobbiamo renderci conto che, con modeste lunghezze di cavo a bassa perdita, come di solito usiamo per le nostre linee, la perdita di potenza per riflessione nelle bande HF può essere trascurabile, per quanto alto sia il valore dei ROS. Per esempio, se il ROS di una linea è 3, 4 o anche 5 : 1 e la attenuazione è tanto bassa da poter trascurare la potenza riflessa, **una riduzione di ROS non porta a un incremento significativo della potenza irradiata, perché quasi tutta la potenza immessa in linea viene totalmente trasferita al carico.** Questo punto è valido soprattutto nelle antenne per uso mobile caricate al centro, per le bassissime perdite introdotte da una linea di alimentazione molto corta.

Terzo: dovremo prendere confidenza con il comportamento, prevedibile e universalmente noto, dell'impedenza di un'antenna non risonante, **e la relazione che la lega al ROS.**

Questa conoscenza ci fornisce una base scientifica per interpretare le letture dei ROSmetro, e per determinare se il comportamento della nostra stazione è normale o no, invece di accettare ciecamente i bassi ROS come buoni e respingere i ROS elevati come cattivi. I seguenti due esempi mettono in evidenza l'importanza di questo punto, e come si possa venire tratti in inganno da un basso ROS:

1^) Un sistema di terra con 100 radiali correttamente installati presenta una resistenza di terra trascurabile; molte broadcastings ne usano 240 mentre il FCC (Federal Communications Committee) ne richiede 120. Con un tale sistema di terra, l'impedenza di un quarto d'onda verticale è $36,5 + j22 \Omega$, e circa 32Ω quando viene riaccuriato per portarlo in risonanza. Alimentato con una linea a 50Ω , il ROS alla risonanza vale circa 1,6 : 1, con tendenza **presumibilmente** a salire fuori risonanza. Un sistema di terra con solo 15 radiali, sempre con la stessa antenna, avrà una resistenza di terra di circa 16Ω . Se adesso togliamo pochi radiali per volta dall'antenna con 100 radiali, la resistenza di terra aumenterà e, aggiunta alla resistenza di radiazione, aumenterà la resistenza terminata della linea, che si avvicinerà a 50Ω , riducendo il ROS. Quando avremo tolto abbastanza radiali da arrivare a 18Ω di resistenza di terra, avremo raggiunto i 50Ω , con ROS 1 : 1 ! Ma mentre scende il ROS, scende anche la potenza irradiata, perché ora la potenza in linea si ripartisce fra i 32Ω della resistenza di radiazione e i 18Ω della resistenza di terra!

Una terra riportata di due o quattro radiali può avere una resistenza di terra da 30 a 36 Ω , cosicché il ROS alla risonanza vale circa (1,4 : 1,5) : 1. Ma fuori risonanza, invece di salire a valori superiori come dovrebbe essere, il ROS si abbassa per la presenza della resistenza di terra. Un basso ROS indica semplicemente che la linea è adattata, però non dice che circa metà potenza viene irradiata e l'altra metà scalda la terra.

2') Alcuni radioamatori che usano i balun 1 : 1 credono che « 1 : 1 » significhi un adattamento perfetto tra antenna e linea.

Questo è un grave errore perché 1 : 1 significa soltanto il rapporto tra la impedenza di ingresso e quella di uscita dei balun, qualunque sia l'impedenza su cui si chiude l'uscita, che diventa in tal modo l'impedenza che si vede all'ingresso. Nonostante ciò, questi radioamatori sono convinti che il balun adatti » perché con il balun inserito il ROS spesso scende.

Spesso con il balun inserito il ROS è inferiore a 2 : 1 su tutta la gamma degli 80 m, mentre è del tutto normale avere fino a 5 : 1 agli estremi della banda. Il ROS fuori risonanza in questo caso risulta ridotto perché i nuclei in ferrite dei balun si saturano per effetto delle componenti reattive, che ora hanno valori superiori alle correnti di saturazione dei nuclei.

Avviene così che le variazioni delle componenti reattive non vengono riportate all'ingresso dei balun.

Tutta la potenza che eccede il livello di saturazione è perduta per riscaldamento del balun, mentre il basso ROS inganna l'ingenuo radioamatore.

A questo proposito vale la pena di aggiungere che, contrariamente all'opinione diffusa, il ROS non genera TVI.

La TVI nasce infatti da armoniche che, generate nel trasmettitore, raggiungono l'antenna e vengono irradiate, oppure da armoniche che vengono generate dal sistema di antenna, come avviene per la saturazione dei nuclei dei balun.

La TVI dipende sempre da una non linearità, e mai dal ROS, che dipende dal rapporto tra grandezze lineari.

Il valore vero del ROS non deve cambiare con un balun 1 : 1 e con un nucleo in grado di sopportare senza saturare le correnti circolanti se ha reattanza propria trascurabile, perché se così non fosse, quest'ultima si sommerebbe vettorialmente a quella del carico, a volte alzando, a volte riducendo il ROS.

In ogni caso il **ROSmetro** non può indicare il vero valore delle stazionarie se nel conduttore esterno del cavo e nello strumento circolano correnti a radio frequenza. Cosicché è importante sapere approssimativamente quale ROS aspettarsi, e se è basso, rendersi conto se dovrebbe esserlo. Non crediate che un basso ROS indichi un successo, o assicuri una buona antenna!

Siate sospettosi soprattutto se il ROS rimane basso o costante in una discreta gamma di frequenze, a meno di non aver progettato il sistema radiante per il lavoro a larga banda. Questo concetto è elementare ed è normale routine per i progettisti di antenne, ma considerata la sua importanza nel campo delle antenne, sono stati forniti al radioamatore troppo pochi elementi di informazione al riguardo. Mentre il comportamento dell'impedenza di una antenna al variare della frequenza è illustrato nell'ARRL Antenna Book, la correlazione tra la variazione di impedenza e il ROS sarà trattata in dettaglio più avanti, per consentirci di prevedere il valore dei ROS, entro certi limiti, per una antenna non risonante alla fine di una linea.

Quarto: dobbiamo riesaminare l'uso delle linee aperte, come linee accordate per scoprire che i principi là adoperati esprimono esattamente ciò che abbiamo detto finora. Ricordate, con le linee risonanti noi ignoriamo del tutto il disadattamento alla fine della linea, e compensiamo il disadattamento con l'adattatore all'inizio della linea, su tutta la gamma.

Il ROS può salire a 10, 15 e anche a 20 : 1 ma la potenza riflessa dal disadattamento viene di nuovo riflessa verso l'antenna dall'adattatore. Accordare per la massima corrente in linea regola semplicemente la fase dell'onda riflessa per rifletterla ancora nella linea in fase con l'onda diretta, e rimandarla di nuovo in antenna.

Allora la potenza riflessa perduta a causa del disadattamento viene compensata dal guadagno di riflessione dato dall'accordatore. Molti di noi sanno che una linea aperta a 600 Ω (la famosa « scaletta » formata di filo o trecciola di rame nudo 0,2 mm, due conduttori spazati di 15 cm con isolanti in vetro o plexiglas), funziona sempre bene.

Ci siamo interessati troppo poco per sapere come funziona, come fa a trasferire efficacemente l'energia con tutta quella potenza riflessa e quei ROS elevati, o che aggiustare la fase dell'onda riflessa per rimandarla di nuovo in fase con l'onda diretta è un altro modo di vedere l'annullamento della componente reattiva, necessario per avere la massima corrente nella linea e nella antenna.

Di qui la mancata comprensione da parte nostra della similitudine esistente tra il comportamento di una linea aperta e di un cavo coassiale in presenza di carichi disadattati. Il principio è lo stesso in entrambi i casi, anche se a livelli diversi. In altre parole, per molte applicazioni, il cavo coassiale può venire adoperato come linea accordata, esattamente come una linea aperta. I sistemi aerospaziali citati precedentemente ne sono solo alcuni esempi.

E quindi i cavi coassiali collegati direttamente all'antenna possono funzionare con disadattamenti rilevanti, In questo caso i limiti per il ROS operando fuori della frequenza di risonanza dei radiatore sono definiti unicamente dalla perdita di potenza per l'attenuazione lungo il cavo.

Le sovratensioni e il riscaldamento non dovrebbero costituire un problema alla nostra potenza legale (e ancora meno per noi in Italia) con i cavi RG-8 o 11/U, o con gli RG-59 o 59/U per potenze inferiori, perché la tensione in presenza di stazionarie è radice-quadrata del ROS. L'impedenza d'ingresso della linea non sarà più 50Ω , ma dipenderà dal disadattamento o dalla lunghezza del cavo, e potremo determinare se il finale ha una dinamica di adattamento di impedenza sufficiente (sorprendentemente alta per alcuni trasmettitori commerciali, pressoché nulla in altri) da consentire l'alimentazione diretta della

linea, o se è necessaria la interposizione di un adattatore (transmatch o altro tipo di accordatore) fra trasmettitore e linea. Il punto importante messo in risalto è che, nei limiti sopra citati, **tutto l'adattamento richiesto può venire concentrato all'uscita** del trasmettitore invece di imporre l'adattamento all'ingresso dell'antenna, senza subire perdite significative nella potenza irradiata. L'uso di questa tecnica, che può essere una sorpresa per molti, non contraddice nessuna teoria.

Ed è di fatto l'applicazione del principio fondamentale della teoria delle reti chiamata **adattamento coniugato**, e che sta alla base del funzionamento di tutti gli accordatori di antenna, sia con linea aperta che con cavo coassiale.

Carico senza riflessioni o adattamento coniugato

Ora è forse giunto il momento per il lettore di esaminare le differenze tra la teoria del carico perfettamente adattato senza riflessioni e la teoria dell'adattamento coniugato.

E' più che evidente che per una buona progettazione, e fino a che il ROS non supera quei valore oltre il quale diviene sensibile la perdita di potenza nei confronti della flessibilità di impiego, risultano ovvi la convenienza e l'aumento di banda passante realizzati con l'impedenza coniugata alla linea; che per di più ci consente di familiarizzarci con le impedenze complesse, perché ora l'ingresso della linea presenta componenti resistive e reattive, ciascuna delle quali varia, in presenza di riflessioni, con la lunghezza della linea e con la frequenza. Bisogna quindi capire le impedenze complesse per scegliere e sintonizzare il dispositivo che fornisce l'impedenza coniugata per accoppiare il trasmettitore alla linea, o di accoppiarlo direttamente alla linea se possiede una dinamica di adattamento sufficiente. Praticamente, tutti i problemi incontrati nei tentativi di ottenere un accoppiamento corretto o di caricare una linea con riflessioni, possono venire semplicemente ricondotti al non aver compreso la correlazione tra lunghezza della linea e fase tra onda diretta e riflessa, che si traduce nella esistenza di una impedenza complessa ai morsetti di ingresso della linea.

Una impedenza coniugata esiste lungo tutto il sistema (antenna più linea di trasmissione) quando la resistenza interna del generatore è uguale alla componente resistiva dell'impedenza d'ingresso della linea (o viceversa) e tutte le altre componenti reattive dell'ingresso della linea e del generatore valgono zero.

In queste condizioni il sistema è risonante. Tutta la potenza erogata dal generatore entra nella linea, e le riflessioni dovute a disadattamento terminale o a discontinuità lungo la linea vengono compensate con una riflessione complementare ottenuta

introducendo un disadattamento non dissipativo al punto di adattamento coniugato. Questo disadattamento non dissipativo è quello che, posto all'interno del sistema stesso, provocherebbe da solo la stessa ampiezza di riflessione, o ROS, di quella provocata dal disadattamento al termine della linea. Il risultato è una completa e totale nuova riflessione dell'onda riflessa in arrivo. Per quanto possa sembrare complicato, questo complesso di condizioni è automaticamente soddisfatto con una corretta procedura di accordo e carico del trasmettitore.

Non ha nessuna importanza se la linea viene alimentata da un trasmettitore con una ampia dinamica di adattamento, o se si inserisce un transmatch. Se il generatore viene sostituito da una impedenza passiva uguale alla sua impedenza interna, la linea può venire aperta in qualsiasi punto. E, guardando in una direzione, si vede l'impedenza coniugata di quella che si vede guardando nella direzione opposta (se in una direzione si vede $R + jX$, nell'altra si vede $R - jX$).

Contrariamente al nostro profondamente radicato convincimento, non è perciò vero che quando un trasmettitore eroga potenza a una linea con riflessioni l'onda riflessa vede l'impedenza interna del generatore come un carico dissipativo e viene convertita in calore e perdite. Ciò può avvenire in particolari condizioni nella trasmissione a impulsi: per esempio, se il generatore viene spento dopo aver inviato un singolo impulso in linea e la sua impedenza interna rimane inserita, l'impulso di ritorno sarà assorbito. Ma se un generatore adattato in coniugato sta erogando potenza attiva quando l'onda riflessa ritorna, questa viene totalmente ririflessa nel punto di adattamento coniugato, perché non vede mai l'impedenza interna del generatore come un carico terminale dissipativo. Ciò avviene perché tensione e corrente del generatore si sommano alla tensione e alla corrente riflessi, come se la potenza riflessa venisse erogata da un diverso generatore in serie con il precedente. E la loro somma genera una corrente che fluisce sempre in avanti. La potenza riflessa si somma con quella generata dando origine a un guadagno di riflessione che compensa le perdite per riflessione subite nel disadattamento linea-antenna.

Le perdite in una linea

Tutta la potenza riflessa che ritorna al generatore viene rimandata al carico, come componente dell'onda diretta o onda incidente. La sola potenza riflessa perduta si ha per la attenuazione della linea, sia durante il ritorno verso il generatore che durante il successivo ritorno al carico. Quanto maggiore è l'attenuazione in linea, tanto minore è la potenza riflessa che ritorna al generatore. Allora, minore è l'attenuazione in linea, maggiore è il ROS ammissibile a parità di perdite nella linea.

Se non si hanno perdite per potenza riflessa in una linea senza perdite, la potenza riflessa finirà per raggiungere il carico, qualunque sia il valore del ROS.

Ecco il motivo per cui le linee aperte lavorano così bene anche con disadattamento notevole, perché la loro attenuazione è quasi trascurabile. Nei cavi coassiali, essendo maggiore l'attenuazione, il disadattamento deve essere più contenuto e talvolta può essere necessario calcolare la perdita di potenza a causa dei ROS. Però bisogna che sia le perdite che il disadattamento siano molto alti per avere un sensibile incremento di perdite, rispetto alle perdite in una linea perfettamente adattata al carico. I cavi coassiali hanno in radiofrequenza perdite molto maggiori della linea aperta a causa della più bassa impedenza caratteristica, che a parità di potenza trasferita richiede maggior corrente e minor tensione. Ciò si traduce in un maggior $R \times I^2$ a parità di conduttore. L'effetto-pelle aumenta le perdite all'aumentare della frequenza per la diminuzione della sezione utile del conduttore, mentre le perdite nel dielettrico danno un sostanziale contributo alle perdite totali solo in VHF. Per questo è comprensibile perché il cavo RG-8/U, specialmente il tipo con dielettrico espanso e conduttore centrale molto grosso consenta un ROS (e banda passante) maggiore del cavo RG-58/U a parità di perdite addizionali.

E inoltre, più corto è il cavo e minori sono queste perdite.

Un quinto passo per meglio chiarire i problemi connessi con la potenza riflessa è di vedere la situazione obiettivamente, domandandoci: « Sono stato vittima di insegnamenti erronei? Sono in grado di comprendere l'errore, quando ne sento parlare? Ho compreso abbastanza chiaramente i concetti, in modo da poter convincere altri del corretto modo di vedere, se se ne presenta l'occasione? ».

Di seguito vengono enunciate alcune brevi affermazioni, che possono servire come materiale per un test. Esse evidenziano e riassumono alcune idee legate alla riflessione, diffuse in modo erroneo tra i radioamatori.

Vero o falso?

- 1) La potenza riflessa non rappresenta potenza perduta tranne che per un incremento delle perdite in linea, rispetto alle perdite in una linea adattata. In una linea senza perdite, non si perde potenza a causa delle onde riflesse. Solo quando l'attenuazione propria della linea e il ROS sono entrambi alti, si ha una perdita di potenza apprezzabile. Nelle gamme HF e con cavi a bassa perdita, la diminuzione di potenza per riflessione è di solito irrisoria, mentre in VHF è apprezzabile e in UHF è estremamente importante.
- 2) La potenza riflessa non ritorna dentro al trasmettitore a provocarvi dissipazioni e altri danni. I guai imputati alle riflessioni sono in realtà provocati da un errato accoppiamento della linea all'uscita, non dal ROS. Il surriscaldamento dei finali è provocato o da un sovraccoppiamento o da un carico reattivo, o da entrambi. Il surriscaldamento della bobina e gli archi tra i contatti o nel variabile sono provocati da un aumento del fattore di merito a causa di un accoppiamento troppo scarso. Con alcune manovre si può ottenere un accoppiamento corretto senza preoccuparsi del valore del ROS. Il trasmettitore non vede il ROS perché il risultato del ROS è solo un'impedenza, e le impedenze sono adattabili senza riferimento al ROS. Questo è uno dei punti sui quali c'è maggior confusione.

- 3) Ogni sforzo per ridurre un ROS di 2 : 1 in una qualunque linea coassiale, sarà inutile se tende a incrementare sostanzialmente la potenza di uscita.
- 4) Un basso ROS in un sistema di antenna non ne garantisce né la qualità né il funzionamento con efficienza elevata. Al contrario, ROS più bassi del normale su una banda abbastanza ampia, per un dipolo o per una verticale, sono sintomo di inconvenienti dovuti a resistenze di perdita non desiderate. Tali resistenze possono derivare da collegamenti non sicuri, presa di terra scarsa, cavi in perdita e così via.
- 5) Il radiatore di un sistema di antenna non deve essere risonante come lunghezza fisica per assorbire la massima corrente, la linea di alimentazione non deve avere lunghezze particolari e un consistente disadattamento nel collegamento linea-antenna non impedisce al radiatore di assorbire tutta la potenza attiva disponibile.
- 6) Se un opportuno adattatore annulla tutte le reattanze dovute a un radiatore non risonante e a una linea di lunghezza qualsiasi disadattata al carico, il sistema di antenna è risonante, il disadattamento è annullato, nel radiatore scorre la massima corrente e tutta la potenza attiva disponibile all'inizio della linea viene assorbita dal radiatore.
- 7) La maggior parte delle torri trasmettenti delle stazioni broadcasting a onde medie (da 540 a 1600 kHz) ha un'altezza che non è in relazione con la lunghezza d'onda emessa.
- 8) Il ROS in linea tra antenna e adattatore è determinato soltanto dalle condizioni di adattamento al carico e non viene abbassato dall'adattatore. Il « basso ROS » ottenuto indica soltanto il disadattamento residuo tra impedenza di ingresso dell'adattatore e impedenza di uscita del trasmettitore.
- 9) Regolare l'adattatore per la massima corrente in linea crea uno specchio perfetto per l'onda riflessa, che la ributta indietro verso il carico quando arriva al generatore. L'accordatore fornisce la reattanza opportuna per annullare la reattanza uguale ma opposta risultante dalla differenza di ampiezza e fase tra onda diretta e riflessa presenti all'ingresso. Questo fa sì che l'onda riflessa si sommi in fase con l'onda diretta, per dare la potenza incidente, che è la somma delle due.
- 10) La riflessione totale dell'onda riflessa all'inizio della linea è la ragione per cui essa non viene dissipata nel trasmettitore, ma viene conservata e irradiata.
- 11) Con un buon accordatore di antenna e una linea aperta ben costruita, a parità di potenza erogata dal trasmettitore, nella gamma degli 80 m, un dipolo di 40 m e un dipolo di 25 m irradiano all'incirca la stessa potenza, un poco di più quello di 40 m.
- 12) Un dipolo tagliato per risonare a 3,75 MHz e alimentato con RG-8/U o con RGA 1 /U, non avrà una irradiazione apprezzabile maggiore a 3,75 MHz che non a 3,5 o 4 MHz, con qualunque lunghezza di cavo fino a 50 - 60 m.
- 13) Con un dipolo tagliato per 3,75 MHz, il ROS sia a 3,5 che a 4 MHz sale al valore di 5 : 1, però con perdite trascurabili su tutta la gamma degli 80 m.
- 14) Con l'uso di un adattatore o di un semplice circuito a L all'ingresso della linea si può ottenere il corretto accoppiamento fra trasmettitore e cavo, su tutta la banda e per qualunque lunghezza di cavo.
- 15) Con riferimento alle perdite addizionali nella linea a causa dei ROS, provocato dal disadattamento di impedenza tra linea e antenna, variare l'altezza di un dipolo rispetto al terreno, o abbassarne solo le estremità facendo una inverted-V, ha un effetto trascurabile sulla potenza che il dipolo riceve dal trasmettitore.
- 16) Come linea risonante a 4 MHz, il cavo RG-8/U può sopportare 700 W continui con un ROS di 5 : 1. Considerando il duty-cycle della SSB, anche con 2 kW siamo molto lontani dalle condizioni limite. In queste condizioni (ROS 5 : 1) su una lunghezza di cavo di 30 m (circa) l'attenuazione è di appena 0,8 dB (0,46 dB a causa dei ROS), che è trascurabile in termini di segnale trasmesso.
- 17) Qualora una lunghezza di linea sia critica per soddisfare certe particolari condizioni di adattamento di impedenza, si può ottenere la stessa impedenza di ingresso con ogni lunghezza di linea, più corta o più lunga, aggiungendo un semplicissimo circuito a L realizzato con due soli componenti, o due condensatori o due induttanze o uno e uno, a seconda della particolare variazione di impedenza che si desidera. Questa affermazione trova la sua conferma nei cavi spiralizzati per uso mobile.
- 18) Un ROS elevato in una linea di trasmissione coassiale causato da un forte disadattamento non fa circolare nella linea correnti di antenna e la linea non irradia.
- 19) Un ROS elevato in linea di trasmissione aperta causato da un forte disadattamento non fa circolare nella linea correnti di antenna e la linea non irradia, se le correnti nei feeders sono equilibrate e la spaziatura tra i fili della linea è stretta rispetto alla lunghezza d'onda di lavoro (vero anche in VHF se si evitano gli spigoli vivi).
- 20) Sia il cavo che la linea possono irradiare, sia pure in misura esigua, per reirradiazione di energia trasferita dall'antenna alla linea per sistemazione asimmetrica di quest'ultima rispetto all'antenna. L'energia così trasferita si traduce in correnti di antenna che fluiscono **all'esterno** del conduttore esterno di un cavo, o in correnti in fase circolanti nei fili di una linea aperta. Ma questa condizione non ha nessun rapporto con il ROS della linea.

- 21) Per avere misure più precise, non è necessario inserire il ROSmetro nel punto di collegamento linea-antenna. Entro i limiti di precisione propri di questi strumenti, essi misurano il ROS in qualunque punto della linea. Il ROS in ogni altro punto della linea può venir calcolato tenendo conto dei ROS misurato, della distanza tra il punto in cui si esegue la misura e il punto di cui si vuole sapere il ROS, e dalla attenuazione della linea.
- 22) Il ROS in una linea non può venire modificato o controllato praticamente in nessun modo variando la lunghezza della linea.
- 23) Se le letture al ROSmetro cambiano sensibilmente spostando lo strumento lungo la linea, anche di poco, ciò probabilmente indica corrente di antenna che fluisce all'esterno del cavo, oppure uno strumento poco attendibile, o entrambe le cose, ma senz'altro non indica che il ROS cambia lungo la linea. Alcuni Autori insistono nello scrivere che lo strumento deve venire posto a una distanza dal carico pari a un numero intero di mezza lunghezze d'onda. Ciò è inesatto. Tutte le letture sono non significative se variano sensibilmente lungo la linea, anche se si ripetono dopo mezza lunghezza d'onda.
- 24) Ogni reattanza aggiunta a un carico altrimenti risonante (resistivo) , di qualsiasi valore, allo scopo di compensare per ridurre le riflessioni in linea, provoca al contrario un aumento della riflessione. E' per questa ragione, contrariamente all'insegnamento di molti Autori, che si ha il minor ROS in linea alla frequenza di risonanza dell'elemento radiante, del tutto indipendentemente dalla lunghezza della linea. Qualunque misura che contraddica ciò indica che, o gli strumenti, o la tecnica di misura sono erronei (o entrambi).
- 25) Dati diversi tipi di dipoli, aperti al centro, ripiegati, trappolati, coassiali, ecc., nessuno irradia con una intensità maggiore dell'altro, ammesso che ciascuna abbia resistenza ohmica trascurabile e sia alimentato con la stessa potenza.
- 26) Usando cavi come minimo RG-8/U o migliori nelle gamme HF (80 - 10 m) in installazioni mobili, ogni adattamento tra antenna e trasmettitore può venir realizzato dalla parte di quest'ultimo, con minime perdite di potenza, però con una miglior banda passante.
- 27) Con le antenne per uso mobile caricate al centro, di uguali dimensioni e senza adattatori all'ingresso della linea, si ottiene la miglior efficienza di radiazione nei tipi che hanno la più bassa **resistenza di radiazione (il ROS più alto alla frequenza di risonanza)**. Le **antenne che hanno il ROS** più basso perdono potenza nella bobina di carico, sia per il fattore di merito più basso, che per eccessive capacità distribuite della bobina stessa, o per entrambe le cause.

Tutte queste affermazioni sono vere.