

**A.R.I. - Sezione di Parma**

**ROS, attenuazione di linea e  
potenza irradiata dall'antenna**

**Carlo Vignali, I4VIL**

**2 dicembre 2016**

## **IMPEDENZA CARATTERISTICA $Z_0$ di una linea**

**Quando applichiamo un segnale ad una linea – un cavo coassiale, per esempio – inizia a circolare una corrente che dipende solo dall'impedenza caratteristica  $Z_0$  della linea stessa. La tensione applicata, infatti, vista la sua limitata velocità di propagazione, non può “vedere” se la linea è lunga o corta oppure se è terminata su un corretto valore di impedenza resistiva o su un valore di impedenza con una forte componente reattiva.**

**Il valore dell'impedenza caratteristica  $Z_0$  è dovuto solo alle caratteristiche fisiche della linea (rapporto diametri, costante dielettrica dell'isolante, ecc...)**

In generale la costante di propagazione è :  $\gamma = \alpha + j \beta$

con  $\alpha$  = costante di attenuazione e  $\beta$  = costante di fase.

La costante di attenuazione  $\alpha$  indica la rapidità con cui si riduce l'ampiezza dell'onda che si propaga lungo la linea e si misura in Np/m [1 Np = 8.686 dB] e la costante di fase  $\beta$  indica la rapidità con cui cambia la fase lungo la linea. Vale  $\beta = 2\pi/\lambda$  e si misura in rad/s.

I conduttori, secondo le dimensioni e la posizione, sperimentano un campo elettrico; la corrente che vi scorre, inoltre, si circonda di un campo magnetico. Potremo parlare di capacità ed induttanza per unità di lunghezza

Se le perdite sono limitate , con buona approssimazione si ha:

$$Z_0 = \sqrt{\frac{L}{C}} \left[ 1 + j \left( \frac{G}{2 \omega C} - \frac{R}{2 \omega L} \right) \right]$$

con  $L$  ,  $C$  ,  $R$  e  $G$  valori di induttanza , capacità , resistenza e ammettenza della linea per unità di lunghezza..

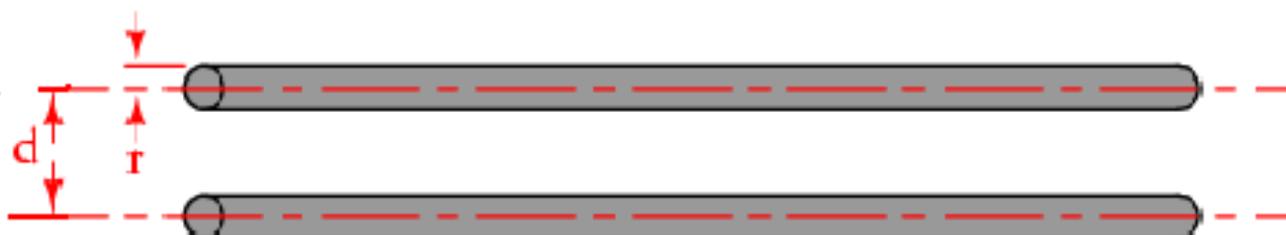
**Se si può trascurare l'attenuazione della linea (  $\alpha = 0$  ), la costante di propagazione diviene  $j\beta$  (puramente immaginaria); conseguentemente il valore di  $Z_0$  è reale ed è:**

$$Z_0 = \sqrt{\frac{L}{C}}$$

**con  $L$  e  $C$  valori di induttanza e capacità della linea per unità di lunghezza.**

## ESEMPI:

### Linea bilanciata



$$Z_0 = \frac{276}{\sqrt{\epsilon}} \log \frac{d}{r}$$

$\epsilon$  = costante dielettrica dell'isolante

### Cavo coassiale

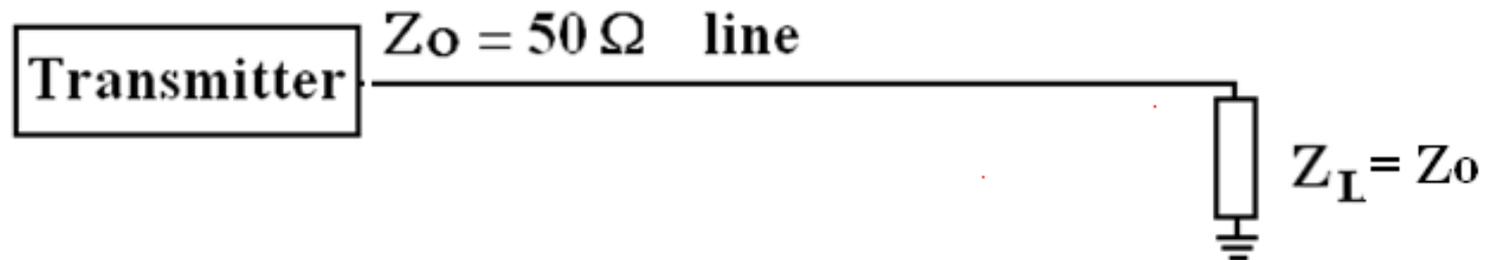


$$Z_0 = \frac{138}{\sqrt{\epsilon}} \log \frac{d_1}{d_2}$$

## Potenza trasferita al carico.

### 1) Linea senza attenuazione.

- a) carico  $Z_L = 50 \Omega$  , TX matched alla linea di  $Z_0 = 50 \Omega$ .  
Il trasmettitore immette 160 W sulla linea adattata.



Il trasmettitore fornisce tutta la potenza disponibile. Sono misurati valori di tensione e corrente uguali in qualunque punto della linea. Non c'è riflessione dal carico ( $\Gamma = 0$ ) . ( $P_r = 0$ ).  
Tutta la potenza viene trasferita al carico  $P_{Load} = 160 \text{ W}$

## Potenza trasferita al carico.

**E' possibile trovare un valore di resistenza di carico posta al secondo estremo della linea che assorba tutta la potenza in arrivo e che non dia luogo ad alcuna riflessione.**

**Il valore della resistenza di carico deve essere uguale al valore dell'impedenza caratteristica della linea (linea e carico adattati).**

**Se, invece, il carico presenta un'impedenza reattiva o, se resistiva, diversa dal valore dell'impedenza caratteristica della linea, una frazione dell'onda che arriva al carico è costretta a ritornare indietro sulla linea stessa.**

**Il coefficiente di riflessione  $\Gamma$  è proprio il rapporto tra le ampiezze delle due onde ( $V_r$  e  $V_d$ ) con le rispettive fasi.**

**Le due onde, sommandosi con le rispettive fasi lungo la linea danno luogo a dei massimi e dei minimi in posizione ben definite lungo la linea ( $V_{\max}$  e  $V_{\min}$ ).**

**Il rapporto tra  $|V_{\max}|$  e  $|V_{\min}|$  è il rapporto onde stazionarie, ROS ovvero VSWR.**

# COEFFICIENTE DI RIFLESSIONE

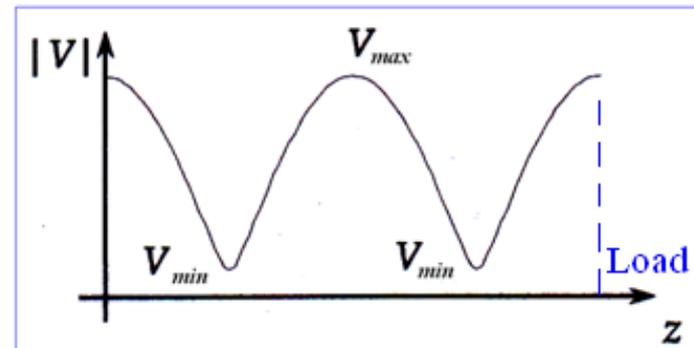
Il coefficiente di riflessione  $\Gamma$ , al carico, è dato da:

$$\Gamma = \frac{\text{Onda riflessa}}{\text{Onda diretta}} = \frac{V^-}{V^+}$$

Il coefficiente di riflessione si evolve lungo la linea e, nel caso di attenuazione nulla, si ha:

$$\Gamma(z) = \frac{\text{Onda riflessa}}{\text{Onda diretta}} = \frac{V_0^- e^{+j\beta z}}{V_0^+ e^{-j\beta z}} = \frac{V_0^-}{V_0^+} e^{+j2\beta z} = \Gamma_0 e^{+j2\beta z}$$

Il segno dell'esponenziale dipende dal verso delle  $z$  crescenti.



Il modulo del coefficiente di riflessione,  $|\Gamma|$ , è sempre minore di 1.

Con linea senza attenuazione, il modulo del coefficiente di riflessione,  $|\Gamma|$  non dipende da  $z$  (è costante lungo la linea).

La fase del coefficiente di riflessione cambia lungo la linea al variare di  $z$  con una periodicità  $\lambda/2$ .

Il segno dell'esponentiale dipende dall'origine delle coordinate (se posto al trasmettitore o al carico).

# IMPEDENZA LUNGO LA LINEA

L'impedenza, osservata verso il carico, cambia lungo la linea.  
Vale:

$$\mathbf{Z}(z) = \frac{V(z)}{I(z)} = \mathbf{Z}_L \frac{1 + \Gamma(z)}{1 - \Gamma(z)}$$

e, viceversa, vale:

$$\Gamma(z) = \frac{\mathbf{Z}(z) - \mathbf{Z}_L}{\mathbf{Z}(z) + \mathbf{Z}_L}$$

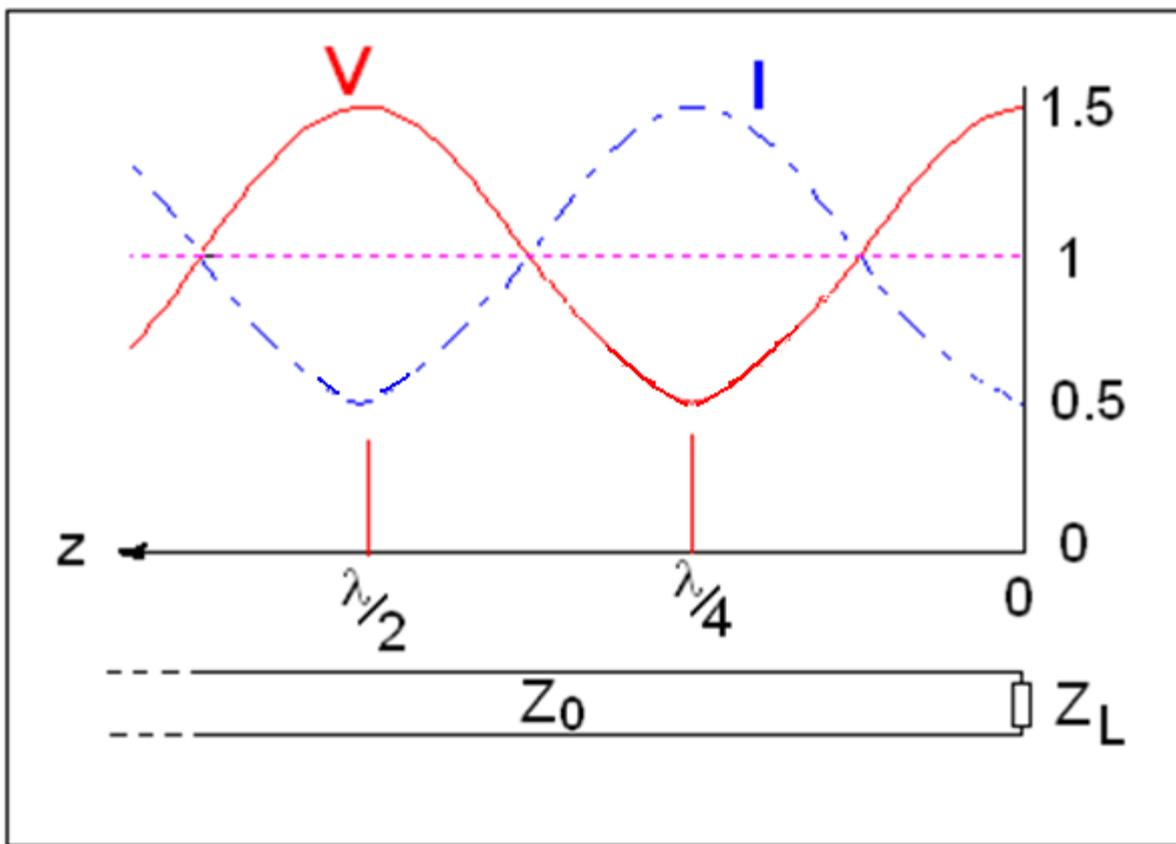
## RAPPORTO ONDE STAZIONARIE ( ROS o SWR )

La tensione (e la corrente) cambia lungo la linea per la presenza di onde che si propagano in direzione opposta. La tensione (e la corrente) presenta un andamento periodico (stesso periodo di  $\Gamma$ ) con massimi e minimi lungo la linea. Il Rapporto Onde Stazionarie (ROS) o Voltage Standing Wave Ratio (VSWR o, anche, solamente SWR) è il rapporto tra la tensione massima e la tensione minima che si riscontrano lungo la linea.

$$\mathbf{SWR} = \frac{V_{max}}{V_{min}}$$

$$V_{max} \propto 1 + |\Gamma|$$

$$V_{min} \propto 1 - |\Gamma|$$



**Esempio di pattern della tensione e corrente lungo una linea con carico resistivo, ma non matched. Nell'esempio :  $Z_L = 150 \Omega$  e  $Z_0 = 50 \Omega$ .**

**I pattern hanno aspetto solo simile a sinusoidi, ma non lo sono.**

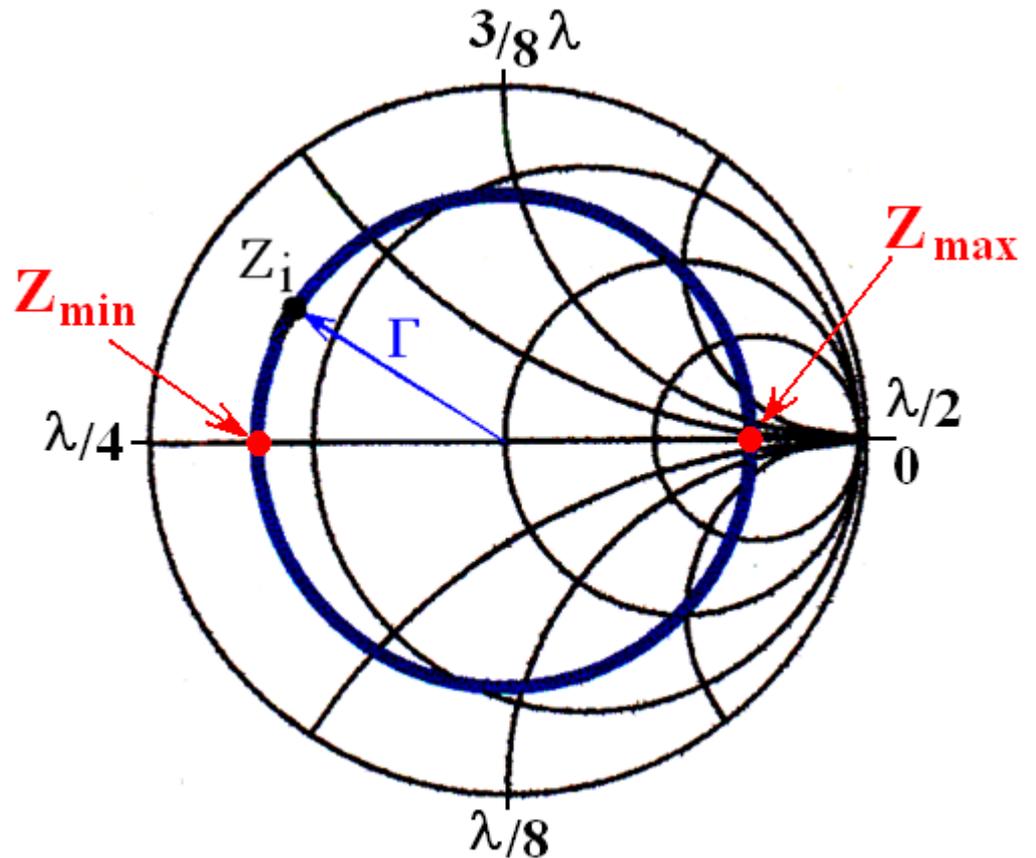
**Il coefficiente di riflessione, al carico, diviene:  $\Gamma = 0.5$  Il VSWR = 3**

**La  $V_{\max}$  lungo la linea diviene 1,5 volte più grande della tensione in assenza di stazionarie ( $V_{\max} = 1 + |\Gamma|$ ). Lo stesso per la corrente.**

**La  $V_{\min}$  lungo la linea diviene 0.5 volte la tensione in assenza di stazionarie.**

**( $V_{\min} = 1 - |\Gamma|$ ).**

I massimi (ed i minimi) si ripetono a distanza  $\lambda/2$  e la posizione della  $V_{\max}$ , in questo caso di carico resistivo con  $Z_L > Z_0$ , si ritrova al carico e, più in generale, a  $n \cdot \lambda/2$  dal carico (con  $n = 0, 1, 2, \dots$ ).



Tra massimo e minimo  
la distanza è  $\lambda/4$ .

**Il coefficiente di riflessione ed il conseguente manifestarsi di onde stazionarie lungo la linea dovuto ad onde che si propagano in versi opposti descrivono un unico fenomeno: il disadattamento tra impedenza caratteristica della linea e impedenza del carico.**

**Ci sono varie grandezze che descrivono il fenomeno, tutte legate tra loro (vedi tabella seguente).**

**C'è una differenza importante, però: alcune sono grandezze complesse (ovvero sono descritte da un numero complesso), altre no.**

**Ed una grandezza complessa contiene molta più informazione di una grandezza scalare.**

**Risultato: da una grandezza complessa si può ottenere la grandezza scalare che descrive lo stesso fenomeno, ma non viceversa.**

**La impedenza vista all'ingresso della linea, il coefficiente di riflessione al carico, sono esempi di grandezze complesse.**

**Il ROS (rapporto onde stazionarie) è una grandezza scalare.**

**Così come il Return Loss, sempre espresso in dB.**

**In ogni frazione di linea lunga  $\lambda/4$  vi sono due punti dove  $\Gamma$  è reale, ovvero dove l'impedenza della linea è puramente resistiva.**

**I valori di impedenza in questi punti sono legati al SWR (ed al  $\Gamma$ , ovviamente) presentando un valore massimo e minimo. Ovvero:**

$$Z_{\max} = Z_0 \cdot \text{SWR}$$

$$Z_{\min} = \frac{Z_0}{\text{SWR}}$$

### TABELLA VSWR

	$\Gamma$	$Z_L$	VSWR	RL	$V_r, V_d$	$V_{Max}, V_{min}$	$P_r, P_d$
$\Gamma$	—	$\frac{Z_L - Z_0}{Z_L + Z_0}$			$\frac{V_r}{V_d}$		
$ \Gamma $	$ \Gamma $	$\left  \frac{Z_L - Z_0}{Z_L + Z_0} \right $	$\frac{VSWR - 1}{VSWR + 1}$	$10^{-\frac{RL}{20}}$	$\frac{ V_r }{ V_d }$	$\frac{V_{Max} - V_{min}}{V_{Max} + V_{min}}$	$\sqrt{\frac{P_r}{P_d}}$
VSWR	$\frac{1 +  \Gamma }{1 -  \Gamma }$	$\frac{ Z_L + Z_0  +  Z_L - Z_0 }{ Z_L + Z_0  -  Z_L - Z_0 }$	—	$\frac{1 + 10^{-\frac{RL}{20}}}{1 - 10^{-\frac{RL}{20}}}$	$\frac{ V_d  +  V_r }{ V_d  -  V_r }$	$\frac{V_{Max}}{V_{min}}$	$\frac{1 + \sqrt{\frac{P_r}{P_d}}}{1 - \sqrt{\frac{P_r}{P_d}}}$
RL	$-10 \text{ Log }  \Gamma ^2$ $-20 \text{ Log }  \Gamma $	$-10 \text{ Log } \left  \frac{Z_L - Z_0}{Z_L + Z_0} \right ^2$	$-20 \text{ Log } \frac{VSWR - 1}{VSWR + 1}$	—	$-20 \text{ Log } \frac{ V_r }{ V_d }$	$-20 \text{ Log } \frac{V_{Max} - V_{min}}{V_{Max} + V_{min}}$	$-10 \text{ Log } \frac{P_r}{P_d}$
$\frac{P_r}{P_d}$	$ \Gamma ^2$	$\left  \frac{Z_L - Z_0}{Z_L + Z_0} \right ^2$	$\left( \frac{VSWR - 1}{VSWR + 1} \right)^2$	$\frac{1}{10^{-\frac{RL}{10}}}$	$\left  \frac{V_r}{V_d} \right ^2$	$\left( \frac{V_{Max} - V_{min}}{V_{Max} + V_{min}} \right)^2$	—
$\frac{P_L}{P_d}$	$1 -  \Gamma ^2$	$1 - \left  \frac{Z_L - Z_0}{Z_L + Z_0} \right ^2$	$\frac{4 VSWR}{(VSWR + 1)^2}$	$1 - \frac{1}{10^{-\frac{RL}{10}}}$	$1 - \left  \frac{V_r}{V_d} \right ^2$		$1 - \frac{P_r}{P_d}$
$V_r, V_d$			$\frac{ V_r }{ V_d } = \frac{VSWR - 1}{VSWR + 1}$			$ V_r  = \frac{V_{Max} - V_{min}}{2}$ $ V_d  = \frac{V_{Max} + V_{min}}{2}$	
$V_{Max}, V_{min}$					$V_{Max} =  V_d  +  V_r $ $V_{min} =  V_d  -  V_r $		

**Le varie grandezze riportate in tabella si riferiscono a ciò che segue lo strumento di misura. Notare che non c'è nulla che riguardi ciò che è presente prima dello strumento (il generatore, per esempio, o altre sorgenti di riflessioni).**

**Riguardano, quindi, il risultato di una sola riflessione (quella del carico, per esempio).**

## ROS e POTENZA RIFLESSA

<b>VSWR</b>	<b>Tensione riflessa [%]</b>	<b>Potenza riflessa [%]</b>
1	0	0
1.1	5	0.2
1.2	9	0.8
1.3	13	1.7
1.4	17	2.8
1.5	20	4
1.6	23	5.3
1.7	26	6.7
1.8	29	8.2
1.9	31	9.6
2.0	33	11
2.5	43	18.4
3.0	50	25
4.0	56	36
5.0	67	44.4
10.0	82	67

**Il ROS è un modo semplificato, allora, per descrivere il disadattamento tra impedenza caratteristica della linea e impedenza del carico.**

**Ma è così importante ? Serve sicuramente per fare dei conti..... al matematico interessato.**

**Ma al radioamatore ....?**

**Probabilmente il radioamatore è più interessato a sapere quanta potenza, così faticosamente generata dal trasmettitore, viene irraggiata dall'antenna.**

**Molto meno interessato a sapere qual è l'impedenza in un punto qualunque della linea o a conoscere il valore del ROS presso il trasmettitore o vicino all'antenna od in un punto qualunque della linea.**

**C'è solo un legame molto lasco tra i due fenomeni.**

## Potenza trasferita al carico.

Con un accoppiatore direzionale si misurino, al carico, la potenza diretta e la potenza riflessa (  $P_d$  e  $P_r$  ).

Siano:  $P_d = 120 \text{ W}$ ,  $P_r = 40 \text{ W}$ .

Quale potenza viene trasferita al carico ?

Quale potenza fornisce il trasmettitore?

**Utilizzando le formule tabulate e sostituendo i valori dati, si ottiene:**

$$|\Gamma| = \sqrt{\frac{P_r}{P_d}} = \sqrt{\frac{40}{120}} = 0.577$$

$$VSWR = \frac{1 + \sqrt{\frac{P_r}{P_d}}}{1 - \sqrt{\frac{P_r}{P_d}}} = 3.73$$

$$P_L = P_d \left(1 - \frac{P_r}{P_d}\right) = 80 \text{ W}$$

**E quale potenza deve fornire il trasmettitore ?**

**In assenza di attenuazione della linea: 80 W o 120 W. Dipende....**

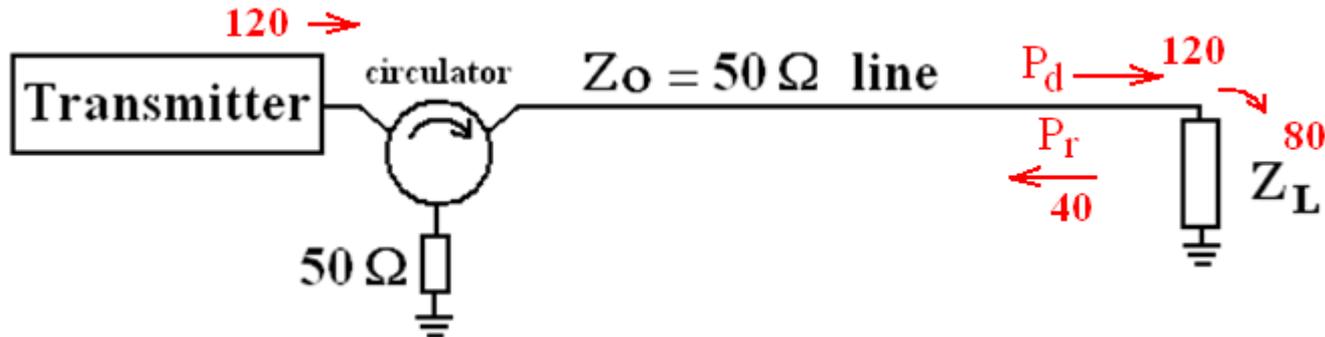
**Da che cosa ? Ma è proprio vero?**

## 1) Linea senza attenuazione.

Il VSWR non cambia lungo la linea. Le potenze misurate al termine della linea sono le stesse misurate in qualunque punto della linea.

- a) - UHF e microonde (sistemi banda larga, TV, circuiti stato solido con protezioni , ecc..)

Il trasmettitore vede sempre un carico di  $50 \Omega$ , qualunque sia l'impedenza  $Z_L$  del carico..

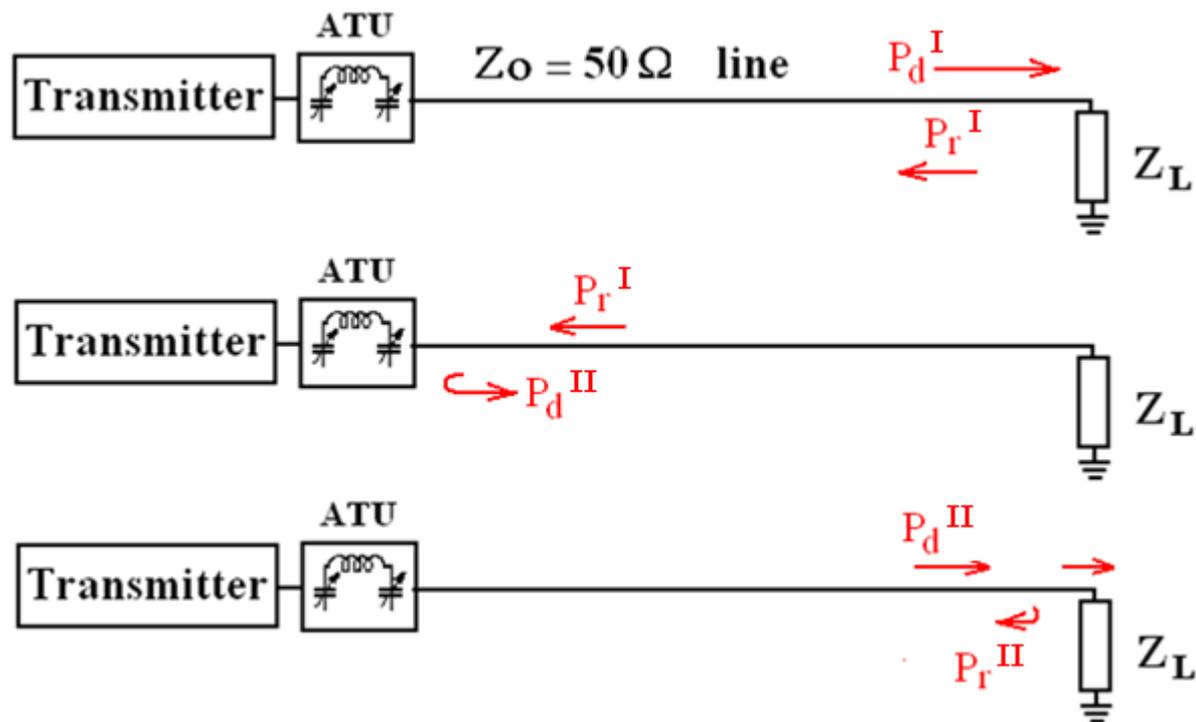


La potenza  $P_r = 40 \text{ W}$  , attraverso il circolatore, viene dissipata nella resistenza di  $50 \Omega$  . Il carico  $Z_L$  vede la  $P_L = P_d - P_r = 80 \text{ W}$ .

Il generatore eroga  $P_{TX} = 120 \text{ W}$ .

b) Frequenze basse (HF) – Sistemi radioamatoriali.

Il trasmettitore è sempre matched alla linea (con ATU o con circuito pi-greco)



Il segnale che giunge al carico, trovando una  $Z_L$  diversa da  $Z_0$ , viene in parte riflesso. Si avrà, in questo caso un primo contributo alla “Potenza diretta”,  $P_d^I$  e un primo contributo alla “potenza riflessa”,  $P_r^I$ .

Il coefficiente di riflessione è dato, in ogni caso, da:

$$\Gamma = \frac{V_r}{V_d} \quad \text{ovvero:} \quad |\Gamma|^2 = \frac{P_r}{P_d}$$

### **Cosa succede alla potenza riflessa ?**

Se il TX è matched alla linea (con ATU o circuito Pi-greco), la potenza riflessa verso il generatore viene qui re-riflessa verso il carico. Se l'attenuazione della linea è trascurabile, questa potenza ritorna verso il carico e si aggiunge, come secondo contributo, a formare la potenza diretta.

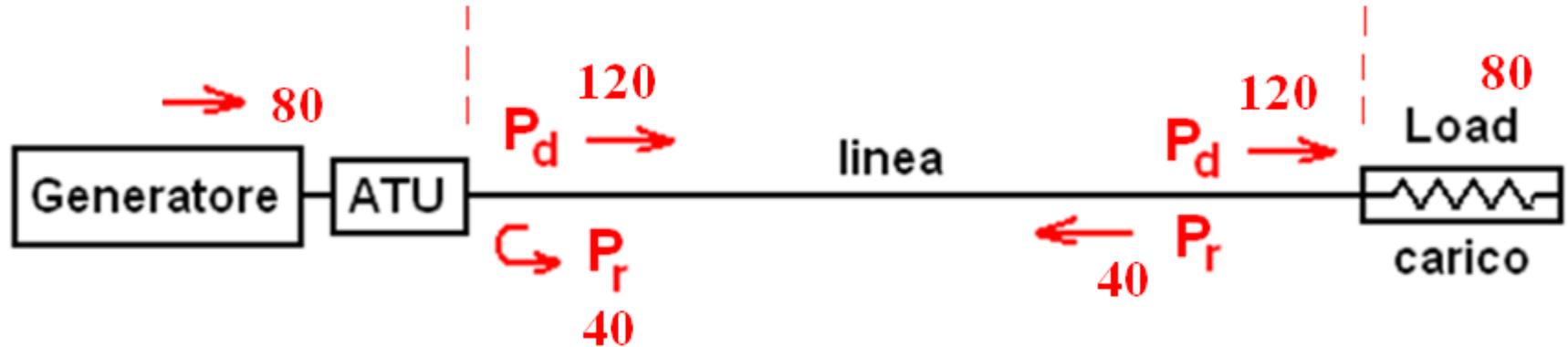
Chiaramente, quando questo contributo giungerà al carico subirà ancora una parziale riflessione (dovuta al mismatch).

Questa potenza riflessa riprende lo stesso andirivieni e. dopo tante altre riflessioni, **tutta la potenza giungerà al carico.**

Se il tipo di trasmissione tollera questo comportamento (segnali multipli al carico a breve distanza di tempo) questa configurazione è molto vantaggiosa.

In questo caso, tutta la potenza del trasmettitore giunge al carico.

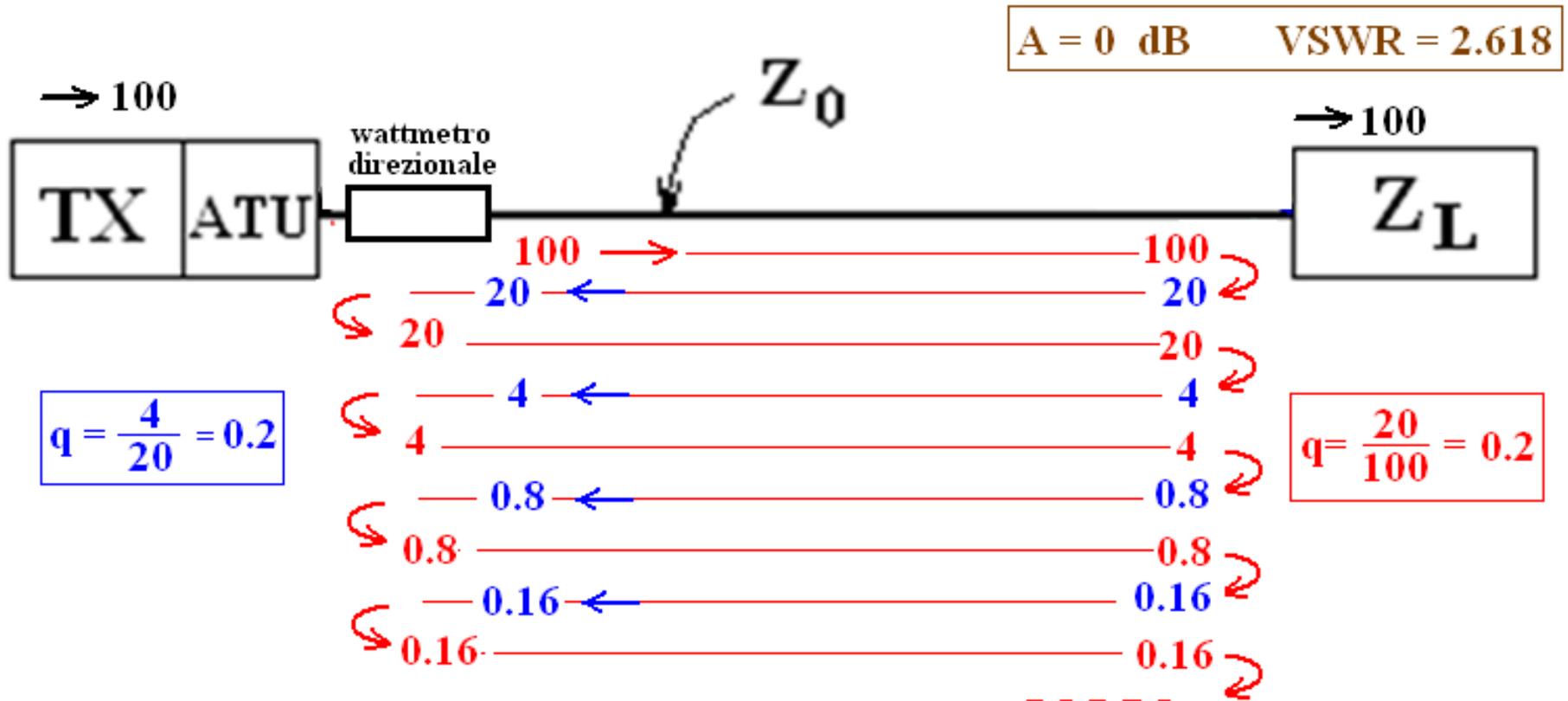
**Il trasmettitore deve fornire, quindi, 80 W.**



**In questo secondo caso, il sistema comprende, infatti, due discontinuità che si elidono a vicenda: l' ATU, quando l'accordo è fatto bene, si comporta come una seconda discontinuità che presenta una impedenza complessa coniugata dell'impedenza presentata dalla linea. Le due riflessioni si annullano ed il trasmettitore vede una linea perfettamente matched.**

**In linea il ROS rimane inalterato, ma il trasmettitore vede la sua corretta impedenza di carico e fornisce la sua massima potenza.**

**Esempio:** Attenuazione  $A = 0$  dB ,  $SWR \neq 0$



$$P_r = 20 + 4 + 0.8 + 0.16 + \dots$$

$$= 20 \cdot \frac{1}{1-q} = 25$$

$$P_{TX} = P_d - P_r = 100$$

$$P_d = 100 + 20 + 4 + 0.8 + 0.16 + \dots$$

$$= 100 \cdot \frac{1}{1-q} = 125$$

$$P_L = P_d - P_r = 100$$

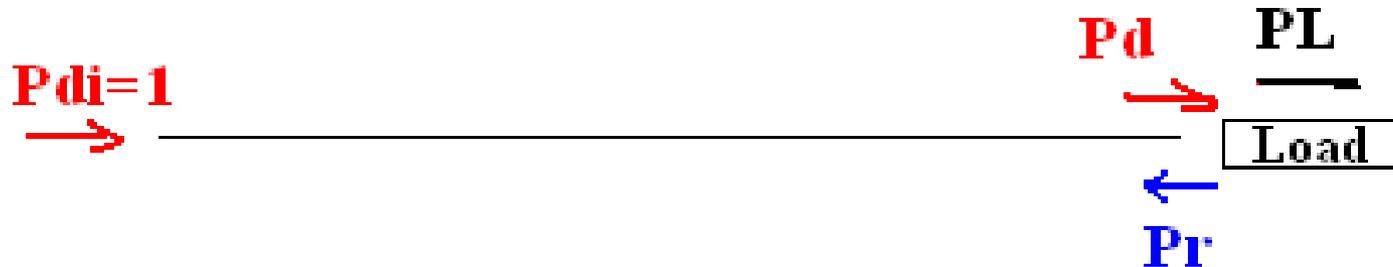
## 2) Linea con attenuazione

Se la linea presenta attenuazione, parte della potenza che transita in linea viene da essa dissipata e non giungerà al carico.

Indichiamo con  $a$  il fattore di attenuazione in potenza (numerico) della linea, e con  $A$  lo stesso fattore espresso in dB.

Utilizzato anche il fattore di trasmissione  $t$  (è l'inverso di  $a$ ).

Ogni volta che il segnale transita sulla linea (in andata o ritorno) viene attenuato di  $A$  dB.



Se il trasmettitore immette in linea la potenza  $P_{di}$ , al termine della linea giunge la potenza:  $P_d = P_{di} \cdot t$

In parte viene riflessa:  $P_r = P_d \cdot |\Gamma|^2$

La potenza assorbita dal carico, in questo primo passaggio, è:  $P_L = P_d - P_r$

La potenza riflessa torna verso il generatore percorrendo nuovamente la linea (e subendo ulteriore attenuazione) e, qui giunta, a seconda del tipo di circuito, può essere dissipata dal dummy del circolatore (UHF e microonde) oppure, nel caso sia installato un sistema di matching adatto, venire reindirizzata verso il carico aggiungendosi alla potenza diretta.

In caso di forte attenuazione della linea, praticamente poco verrà ad aggiungersi alla potenza che, al termine della linea (ulteriore attenuazione) viene trasferita al carico.

Se l'attenuazione è modesta o quasi trascurabile, questo contributo può portare al fatto che quasi tutta la potenza immessa in linea viene trasferita al carico!

**Per applicazioni a banda stretta (tipicamente amatoriali) l'utilizzo di un'antenna non perfettamente adattata alla linea con conseguente presenza di ROS in linea non deve essere colta come una situazione drammatica !**

**Se la linea avesse attenuazione trascurabile, c'è il modo (uso di ATU o simili) di far giungere tutta la potenza al carico!**

Ovviamente, con linee con attenuazione, le misure di ROS, modulo del coefficiente di riflessione , potenza diretta e potenza riflessa dipendono dalla posizione lungo la linea dello strumento di misura.

Posizionando il wattmetro direzionale all'inizio della linea (vicino al trasmettitore) misuriamo ciò che entra in linea e che torna indietro, non quello che viene assorbito dal carico (e irraggiato se è un'antenna).

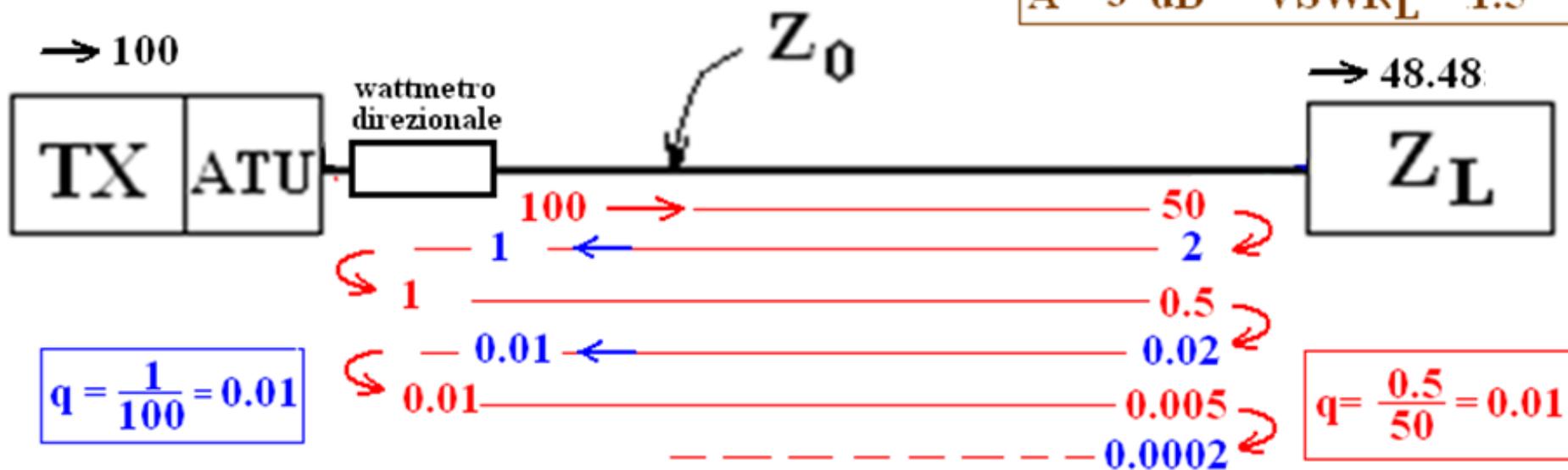
Per calcolare quanto viene irraggiato bisogna conoscere i parametri della linea: la sua lunghezza e la sua attenuazione.

E' importante, quindi, quando si installa un'antenna, prendere nota della lunghezza del cavo utilizzata. Le caratteristiche del cavo (attenuazione) sono facilmente recuperabili sui data sheets del produttore.

**Se il ROS è molto contenuto, si può supporre che l'attenuazione della linea rimanga quella nominale. Qualche esempio.....**

# ESEMPIO

$$A = 3 \text{ dB} \quad \text{VSWR}_L = 1.5$$



$$q = \frac{1}{100} = 0.01$$

$$q = \frac{0.5}{50} = 0.01$$

$$P_{ri} = 1 + 0.01 + \dots$$

$$= 1 \cdot \frac{1}{1 - q} = 1.0101$$

$$P_{rL} = 2 + 0.02 + 0.0002 = 2.0202$$

$$P_{di} = 100 + 1 + 0.01 + \dots$$

$$= 101.01$$

$$P_{dL} = 50 + 0.5 + 0.005 + \dots$$

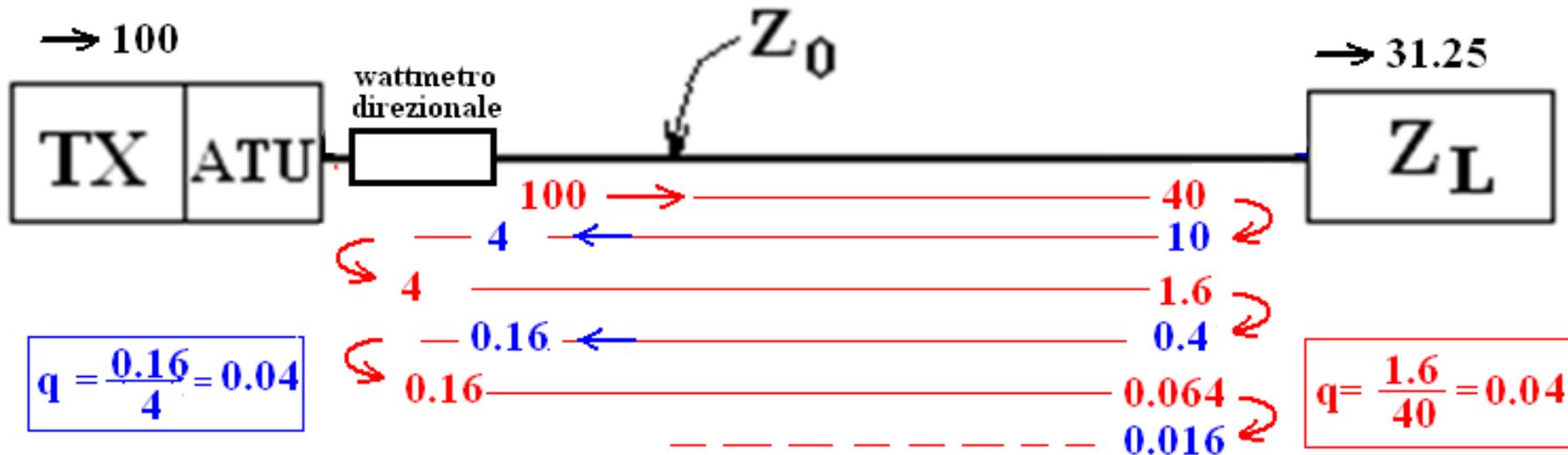
$$= 50 \cdot \frac{1}{1 - q} = 50.505$$

$$P_{TX} = P_{di} - P_{ri} = 100$$

$$P_L = P_{dL} - P_{rL} = 48.48$$

# ESEMPIO

$$A = 4 \text{ dB} \quad \text{VSWR}_i = 1.5 \quad \text{VSWR}_L = 3$$



$$q = \frac{0.16}{4} = 0.04$$

$$q = \frac{1.6}{40} = 0.04$$

$$P_{ri} = 4 + 0.16 + \dots$$

$$= 4 \cdot \frac{1}{1-q} = 4.1666$$

$$P_{rL} = 10 + 0.4 + 0.016 + \dots = 10.42$$

$$P_{di} = 100 + 4 + 0.16 + \dots$$

$$= 104.166$$

$$P_{dL} = 40 + 1.6 + 0.064 + \dots = 41.664$$

$$= 40 \cdot \frac{1}{1-q} = 41.6666$$

$$P_{TX} = P_{di} - P_{ri} = 100$$

$$P_L = P_{dL} - P_{rL} = 31.249$$

Si suppone che l'attenuazione della linea rimanga inalterata anche se in presenza di ROS.

$$a = \frac{P_{di}}{P_{dL}} = \frac{104.166}{41.666} = 2.5 \quad \text{pari a: } A = 4 \text{ dB}$$

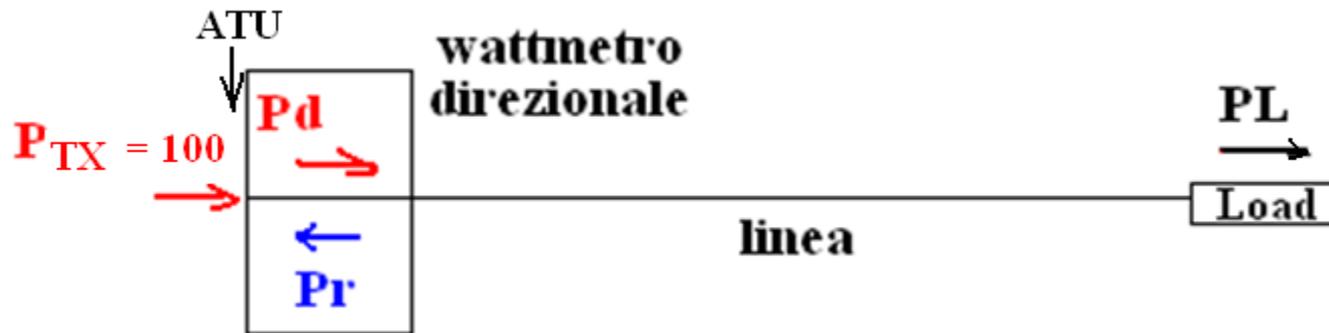
Con questa approssimazione, l'attenuazione effettiva totale del sistema è:

$$a_{tot} = \frac{P_{TX}}{P_L} = \frac{100}{31.249} = 3.2 \quad \text{pari a: } A_{tot} = 5.05 \text{ dB}$$

**Stesso esempio, visto sperimentalmente:** Una linea di trasmissione presenta fattore di trasmissione  $t = 0.4$  pari a  $\alpha = 2.5$  (fattore numerico di attenuazione) ed a  $A = 4$  dB.

Con il wattmetro direzionale posto all'ingresso della linea si misurano:  $P_d = 104$  W ,  $P_r = 4.2$  W con un  $VSWR_i = 1.5$ .

Qual è la vera potenza trasferita all'antenna e qual è il vero VSWR dell'antenna ?



**Calcolo valori al termine della linea e potenza trasferita al carico.**

La potenza  $P_d$  misurata all'ingresso viene attenuata di 4 dB percorrendo la linea. Al carico (Load) la potenza diretta  $P_d$  diviene:

$$P_{dL} = P_{di} \cdot t = 104 \cdot 0.4 = 41.7 \quad \text{W}$$

The equation is annotated with red arrows: "Load" points to  $P_{dL}$ , "line in" points to  $P_{di}$ , and "W" is at the end of the result.

La potenza riflessa  $P_r$  misurata all'ingresso è stata attenuata A dB nel ripercorrere la linea dal carico all'ingresso. Se misurata al carico sarà più grande di A dB (fattore  $\alpha = 1/t$ ).

$$\begin{array}{c}
 \text{Load} \quad \text{line in} \\
 \downarrow \quad \downarrow \\
 P_{rL} = \frac{P_{ri}}{t} = \frac{4.2}{0.4} = 10.4 \quad \text{W}
 \end{array}$$

Potenza trasferita al carico (antenna):

$$P_L = P_{dL} - P_{rL} = 41.7 - 10.4 = 31.3 \quad \text{W}$$

Il  $VSWR_L$  al carico diviene:

$$VSWR_L = \frac{1 + \sqrt{\frac{P_r}{P_d}}}{1 - \sqrt{\frac{P_r}{P_d}}} = \frac{1 + \sqrt{\frac{10.4}{41.7}}}{1 - \sqrt{\frac{10.4}{41.7}}} \approx 3$$

La stessa informazione può essere ottenuta dal grafico della pagina seguente, seguendo la:

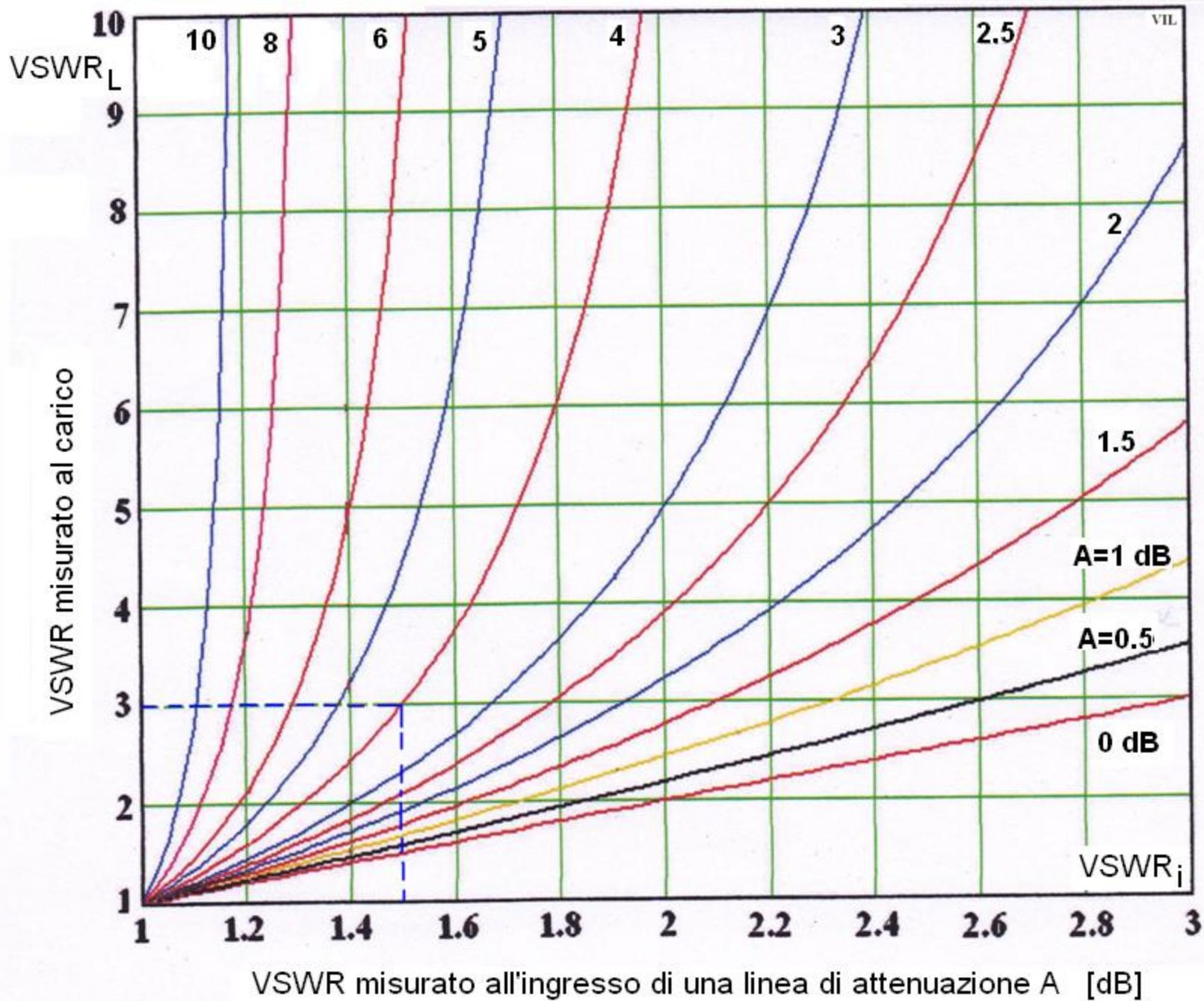
$$VSWR_L := \coth \left( \frac{1}{2} \ln \left( \frac{VSWR_i + 1}{VSWR_i - 1} \right) - \ln \left( 10^{\frac{A}{20}} \right) \right)$$

con:

$VSWR_i$  è il rapporto onde stazionarie misurato all'ingresso della linea

$VSWR_L$  è il rapporto onde stazionarie misurato al carico

$A$  è l'attenuazione della linea (in dB), in assenza di stazionarie.



L'attenuazione totale del sistema, nell'approssimazione di A costante nonostante il  $VSWR_L = 3$ , diviene:

$$A_{\text{tot}} = 10 \log \frac{P_{\text{TX}}}{P_L} = 10 \log \frac{100}{31.3} = 5.05$$

Da confrontarsi con la attenuazione nominale  $A = 4$  dB della stessa linea, in assenza di onde stazionarie.

$P_{\text{di}}$  è la potenza immessa dal generatore che arriverebbe al carico adattato se la linea fosse senza attenuazione.

In altro modo, l'attenuazione totale del sistema in questo esempio, aumenta di circa 1 dB.

## NOTA IMPORTANTE:

L'attenuazione nominale di linea (dai data sheets) è quella data in assenza di onde stazionarie:

L'attenuazione standard di una linea è dovuta a due motivi: perdite per effetto Joule ( $RI^2$ ) nei conduttori e perdite nel dielettrico .

I due contributi non sono equivalenti. Le perdite nei conduttori sono, in genere, largamente predominanti, eccetto il caso, per esempio, di uso del cavo coassiale a frequenze molto elevate.

In presenza di stazionarie sulla linea, a parità di potenza trasferita, le tensioni e correnti presenti lungo la linea variano da punto a punto e raggiungono valori superiori a quelli che si riscontrano in assenza di stazionarie e anche inferiori, ma dato che le perdite dipendono dal quadrato della corrente (e dal quadrato della tensione), in presenza di stazionarie in media le perdite totali aumentano.

L'attenuazione effettiva in presenza di onde stazionarie (così calcolata come in questo esempio) è attendibile, però, solo se la linea è abbastanza lunga (almeno qualche lunghezza d'onda elettrica).

Infatti, i valori e le posizioni dei nodi di corrente e dei ventri di tensione cambiano di posizione lungo la linea a seconda del valore del VSWR al carico e dalla distanza dal carico stesso.

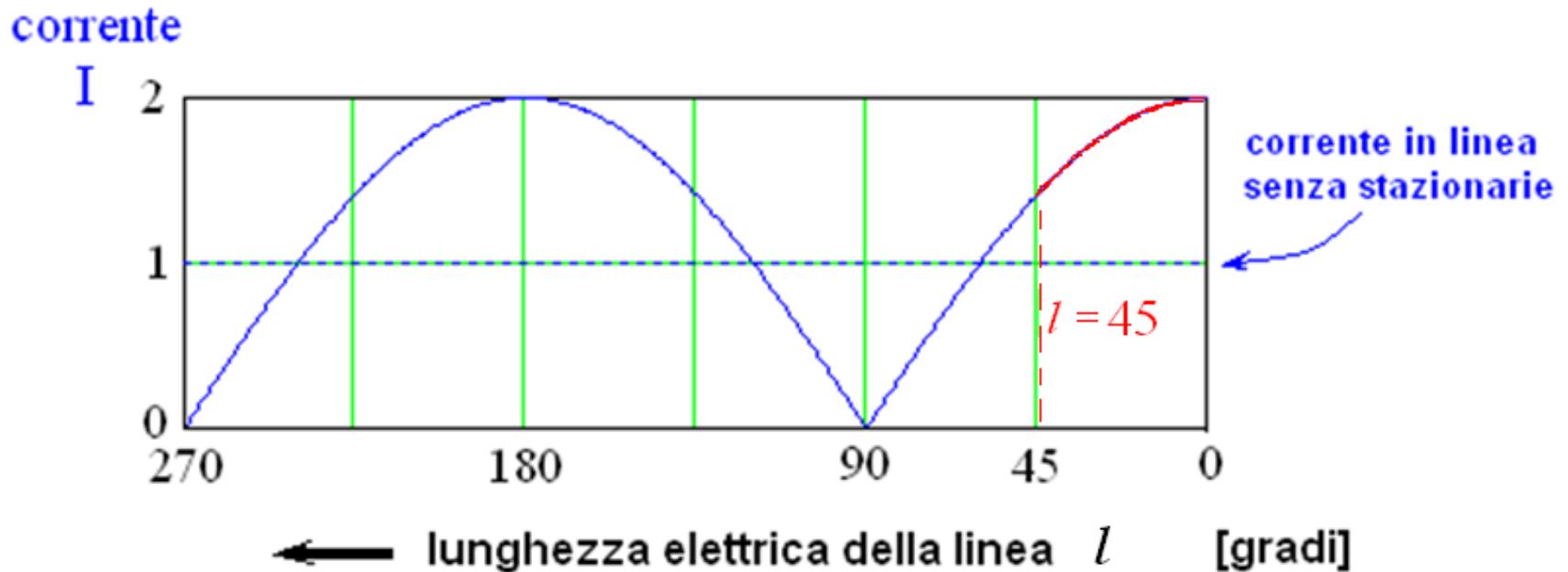
Se questa distanza è abbastanza grande da risentire di tutti i valori di massima e minima tensione lungo la linea, se ne può calcolare una opportuna media abbastanza attendibile.

Se, invece, la linea è più corta di  $\lambda/4$  (elettrici), sarà presente sulla linea un pattern di tensioni e correnti molto limitato, in dipendenza dal valore del coefficiente di riflessione.

Per esempio, se la linea è in corto circuito (o, comunque,  $Z_L < Z_0$ ) saranno presenti nella breve lunghezza della linea correnti molto elevate che porteranno a perdite maggiori di quelle calcolate in media.

Viceversa, se la linea è aperta al carico (o, comunque  $Z_L > Z_0$ ), esprimerà solo valori di corrente molto ridotti e le perdite (che dipendono sostanzialmente da  $R^2$ ) sono ridotte (al limite anche minori di quelle previste in assenza di stazionarie).

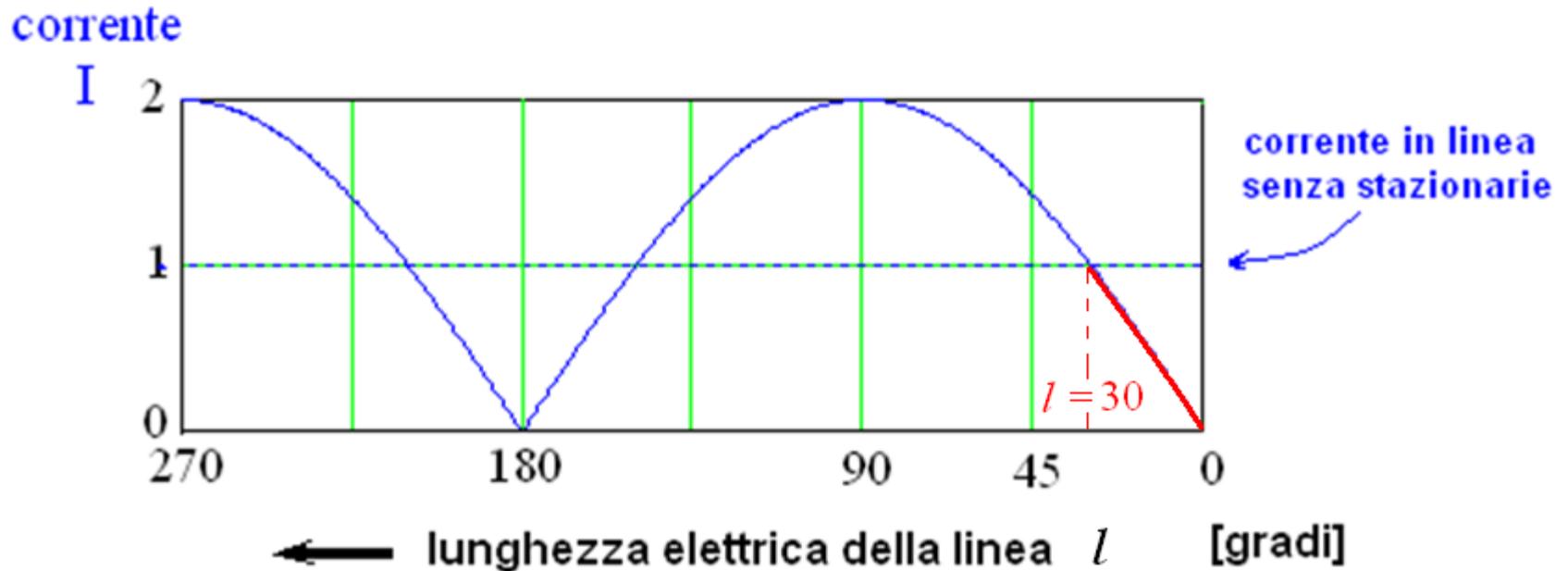
## LINEA IN CORTO CIRCUITO AD UN ESTREMO



Se la linea è in corto circuito ad un estremo, lì la corrente è molto grande. Lungo la linea le onde stazionarie producono ventri di corrente (si presentano ogni 180 gradi elettrici dalla terminazione) dove le perdite per effetto Joule sono massime.

Si nota anche che, se la linea è molto corta (per esempio,  $l = 45$  gradi elettrici), la corrente (e, quindi, le perdite) in questo caso è molto maggiore della corrente che si avrebbe se la linea fosse adattata e senza stazionarie.

## LINEA APERTA AD UN ESTREMO



Se la linea è aperta ad un estremo, lì la corrente è nulla.

Lungo la linea le onde stazionarie producono ventri di corrente (il primo a 90 gradi elettrici dalla terminazione) dove le perdite per effetto Joule sono massime .

Si nota anche che ,se la linea è molto corta (per esempio,  $l = 30$  gradi elettrici), la corrente, in questo caso, è minore della corrente che si avrebbe se la linea fosse adattata e senza stazionarie . E così anche le perdite ,

## PRIME CONCLUSIONI:

### ASSENZA DI STAZIONARIE

	CIRCOLATORE ALL' INGRESSO LINEA	ATU ALL' INGRESSO LINEA	ATU A TERMINE LINEA
Nessuna attenuazione della linea $A = 0$	Tutta la potenza $P_{TX}$ giunge al carico	Tutta la potenza $P_{TX}$ giunge al carico	Tutta la potenza $P_{TX}$ giunge al carico
Attenuazione della linea = $A$ [dB]	Al carico giunge la potenza $P_{TX}$ attenuata $A$ dB.	Al carico giunge la potenza $P_{TX}$ attenuata $A$ dB.	Al carico giunge la potenza $P_{TX}$ attenuata $A$ dB.

Come è ovvio, in assenza di stazionarie, tutti i dispositivi introdotti per migliorare il matching ed il massimo trasferimento al carico non servono.

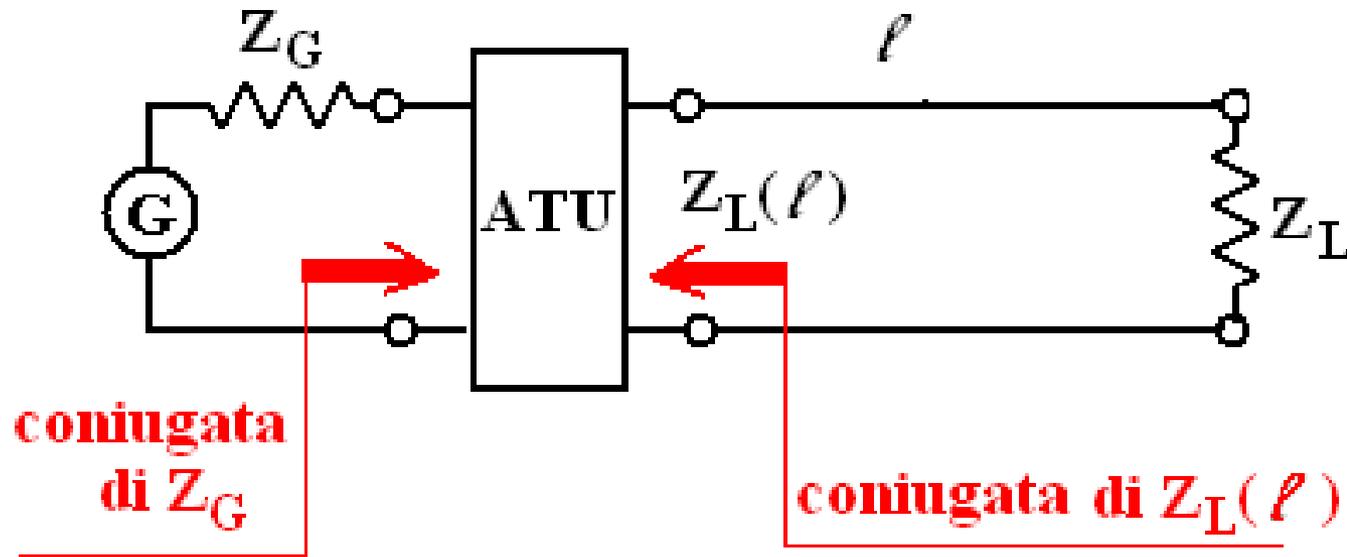
Tutta la potenza giunge al carico, eventualmente attenuata dall'attenuazione nominale della linea  $A$ .

## PRIME CONCLUSIONI:

### CARICO NON MATCHED - (PRESENZA DI STAZIONARIE)

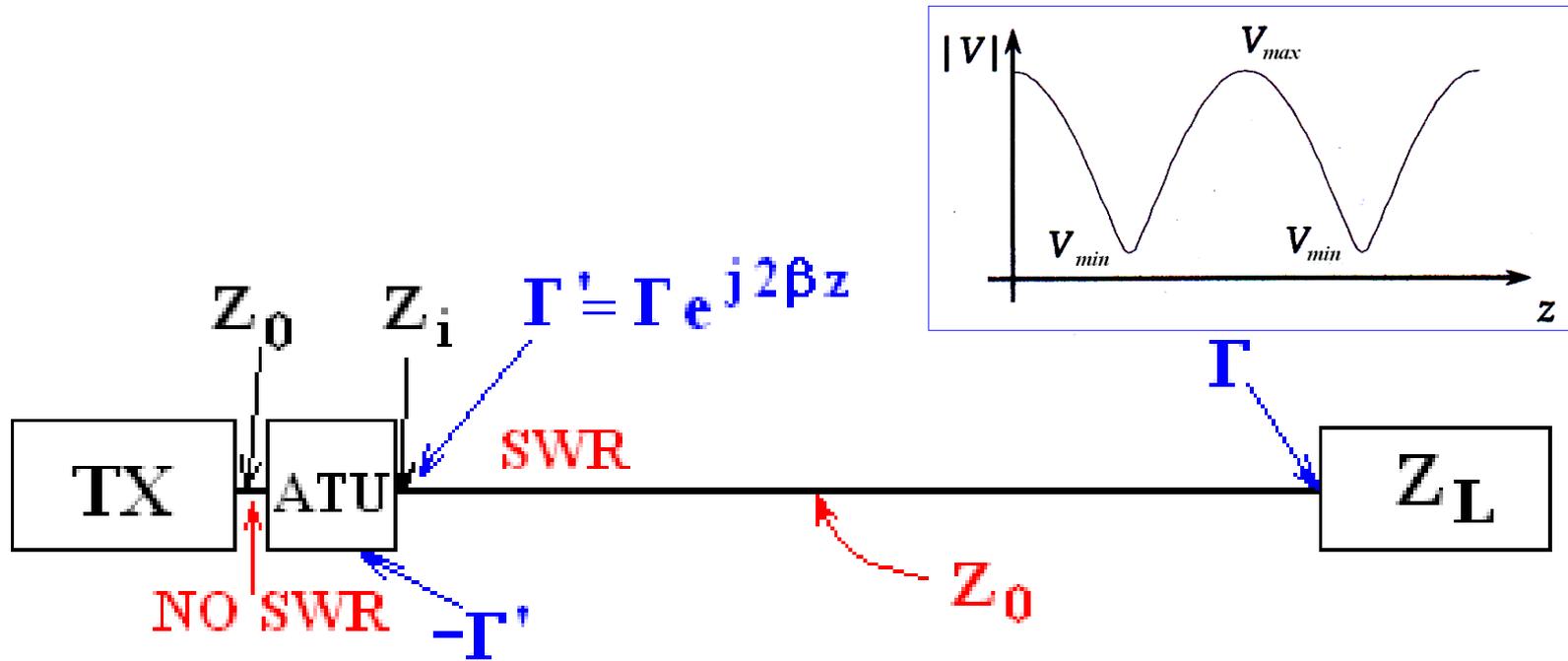
	CIRCOLATORE ALL'INGRESSO LINEA	ATU ALL'INGRESSO LINEA	ATU A TERMINE LINEA
Nessuna attenuazione della linea $A = 0$	Al carico giunge la potenza $P_d - P_r$ con $P_d = P_{TX}$	Tutta la potenza $P_{TX}$ giunge al carico dopo molte riflessioni.	Tutta la potenza $P_{TX}$ giunge al carico, senza riflessioni.  No stazionarie in linea
Attenuazione della linea $A$ dB (nominali) e basso valore di VSWR	Al carico giunge la potenza $P_d - P_r$ con $P_d = P_{TX}$ , ma attenuata $A$ dB	Al carico: $P_L = P_d - P_r$ con $P_d = P_{TX}$ attenuata $A$ dB (1ª riflessione) + $n$ riflessioni attenuate $2A$ con $n: 2... \infty$	Al carico giunge la potenza $P_{TX}$ attenuata $A$ dB, senza riflessioni  No stazionarie in linea
Attenuazione della linea $A$ dB (nominali) e alto valore di VSWR	Al carico giunge la potenza $P_{TX}$ attenuata $A + A_{add}$ dB. dove $A_{add}$ è l'attenuazione ulteriore dovuta a presenza di correnti e tensioni in linea superiori al normale	Al carico giunge la potenza $P_{TX}$ attenuata $A + A_{add}$ dB (1ª rifless.) + $n$ riflessioni attenuate $2(A + A_{add})$ in dB con $n: 2... \infty$	Al carico giunge la potenza $P_{TX}$ attenuata $A$ dB, senza riflessioni  No stazionarie in linea

## DUE DISCONTINUITA' LUNGO LA LINEA



Il massimo trasferimento di potenza si ha quando l'impedenza del carico e l'impedenza del generatore sono uguali (se sono reali) o, più generalmente, se sono "coniugate" una dell'altra .

## DUE DISCONTINUITA' LUNGO LA LINEA

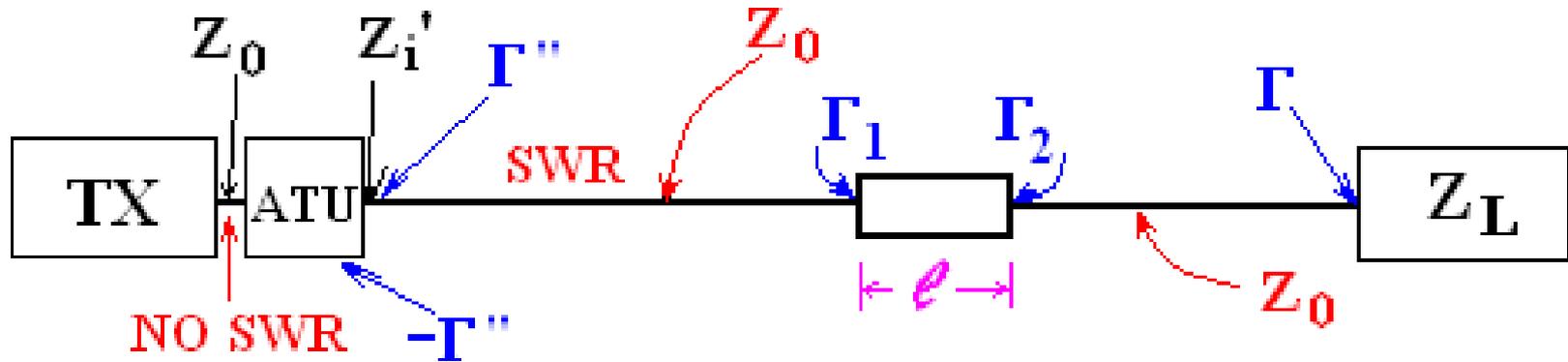


Il coefficiente di riflessione si “evolve” lungo la linea (il segno dell’esponenziale dipende dall’origine dell’asse  $z$ ). Qui è indicato con  $\Gamma'$  se all’inizio della linea.

L’ATU, quando accordato, equivale ad un’altra discontinuità che produce un coefficiente di riflessione uguale e contrario a  $\Gamma'$ . L’effetto è quello di cancellare ogni riflessione in modo che il trasmettitore veda la corretta impedenza  $Z_0$ .

Non viene cancellato, invece il SWR lungo la linea.

# INSERIMENTO DI MISURATORE LUNGO LA LINEA (wattmetro direzionale, “rosmetro”, ecc...)

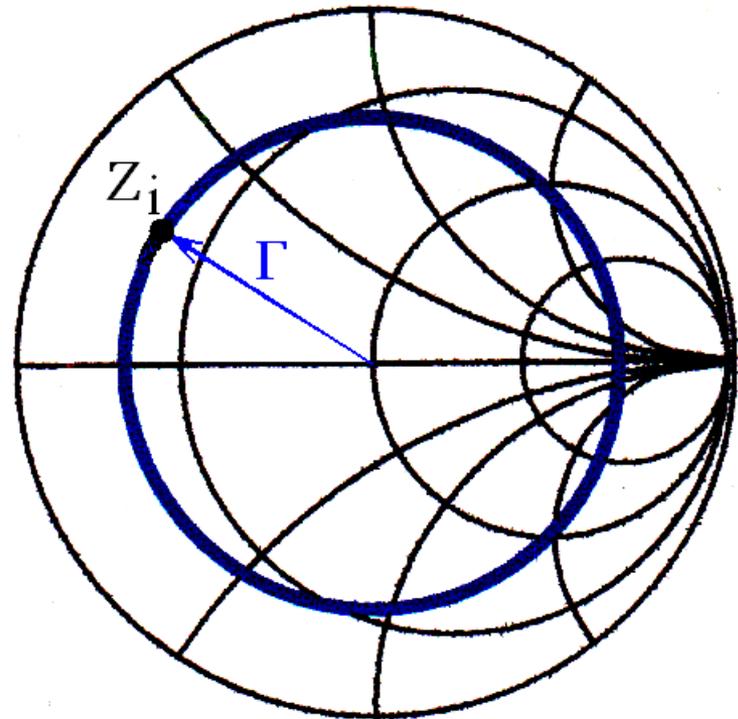


L'inserimento di un qualunque strumento di misura lungo la linea, ne determina il suo "allungamento elettrico". L'impedenza all'ingresso della linea  $Z_i$  cambia, il trasmettitore vede un'impedenza diversa e l'ATU deve intervenire per mantenere il migliore trasferimento di potenza.(nuovo "accordo").

Se lo strumento inserito in linea presenta impedenza uguale al valore dell'impedenza caratteristica  $Z_0$  della linea, la sua presenza non altera il ROS in linea, ma solo il suo allungamento elettrico (cambia il coefficiente di riflessione riportato all'ingresso e cambia il valore della impedenza di ingresso  $Z_i$ , che diventa  $Z_i'$  )

Ovviamente si suppone che lo strumento non presenti perdite apprezzabili.

Il punto  $Z_i$  si sposta sulla carta di Smith lungo una circonferenza, sempre distante  $\Gamma$  dal centro.



La misura del wattmetro direzionale o simili, se di impedenza adatta alla impedenza caratteristica della linea  $Z_0$ , è valida anche se viene inserito in punti della linea con impedenza locale diversa da  $Z_0$ .

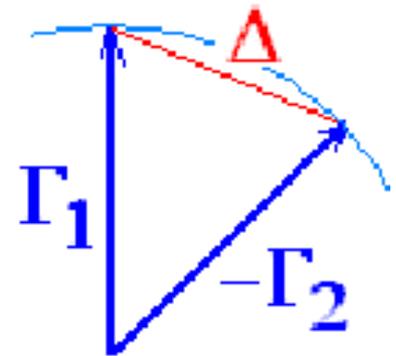
**Esempio:** un “rosmetro” di lunghezza  $\ell = 12 \text{ cm}$  è utilizzato su linea alla frequenza di 144 MHz ( $\lambda = 200 \text{ cm}$ ). Espresso in lambda diviene:  $\ell \cong 0.06 \lambda$

In queste condizioni i due coefficienti di riflessione non sono più opposti uno dell'altro, ma differiscono in fase di un fattore:

$$\Delta = e^{i2k\ell} = e^{i2\frac{2\pi}{\lambda}\ell} \cong e^{i\frac{\pi}{4}}$$

cioè di circa 45 gradi.

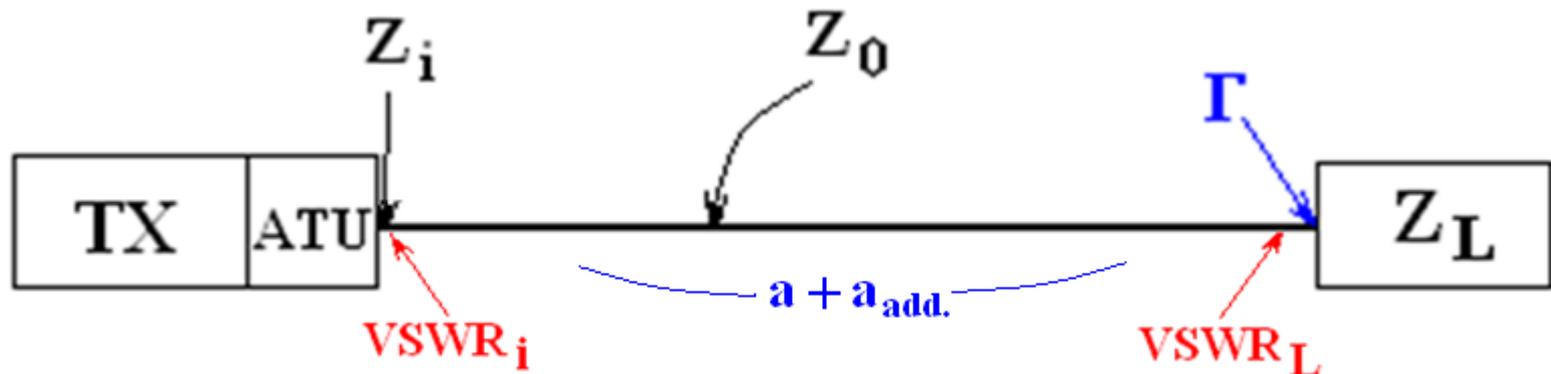
La loro differenza  $\Delta$ , quindi, è già ben lontana da poter essere considerata nulla.



Se lo strumento inserito in linea presenta impedenza **diversa** dal valore dell'impedenza caratteristica  $Z_0$  della linea, la sua presenza non solo altera l'allungamento elettrico (cambia il coefficiente di riflessione riportato all'ingresso e cambia il valore della impedenza di ingresso  $Z_i$ , che diventa  $Z_i'$ ), ma cambia anche il ROS, così come misurato all'ingresso della linea (lato TX).

Il punto  $Z_i$  si sposta sulla carta di Smith non più lungo una circonferenza, ma su una spirale cambiando la sua distanza dal centro.

Solo quando la lunghezza dello strumento  $l$  (lunghezza elettrica tra ingresso e uscita dello strumento stesso) è molto piccola rispetto alla lunghezza d'onda, in entrambi i casi, tutti questi effetti diventano trascurabili.

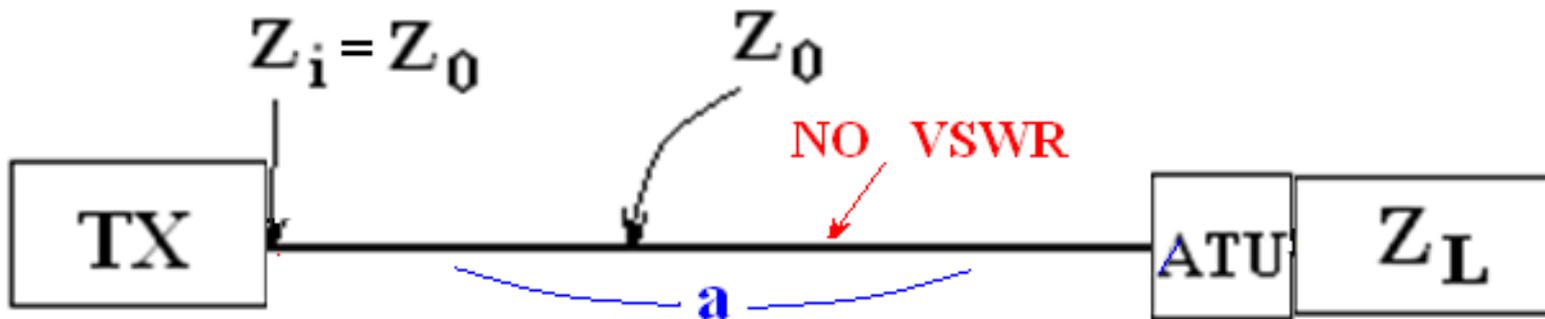


Il carico non adattato alla linea introduce una discontinuità; parte del segnale viene riflesso che è descritto dal coefficiente di riflessione  $\Gamma$ .

La presenza dell'accordatore tra TX ed inizio linea introduce un'altra discontinuità che è descrivibile con un altro coefficiente di riflessione,  $\Gamma_2$ .

Ad accordo raggiunto, il coefficiente  $\Gamma_2$  ha valore opposto a  $\Gamma$ , col risultato che le due riflessioni introdotte si annullano a vicenda ed il TX vede un matching perfetto.

Sulla linea rimangono le onde stazionarie.



**Se fosse possibile inserire l'accordatore vicino al carico (antenna), non sarebbero più presenti onde stazionarie lungo la linea.**

Le tensioni e correnti in linea sarebbero minori con minori sollecitazioni del cavo e non ci sarebbe l'ulteriore attenuazione dovuta alla presenza di stazionarie.

Perché non lo si fa ?

Sicuramente è più comodo avere l'ATU in stazione.

Molto spesso, poi, l' ATU è già contenuto nel trasmettitore che compriamo.

Tranne casi particolari, l'eliminazione delle stazionarie, poi, comporta sì una diminuzione della attenuazione, ma il "grosso" dell'attenuazione, dovuto proprio alla qualità della linea, rimane.

**E' bene pertanto preoccuparsi più della bontà della linea che deve essere di poca attenuazione, piuttosto che dell'eventuale ROS (vedi esempio precedente).**

Ricordiamoci anche degli errori di misura....

**Esempio.** Una linea di 20 m di cavo coassiale di qualità mediocre (RG58) utilizzata a 144 MHz presenta un'attenuazione stimata di 4 dB. Se, all'uscita del trasmettitore misuriamo un  $ROS = 2.0$ , quale valore di ROS misureremo ai morsetti dell'antenna?

Il calcolo esatto dà:  $VSWR_L = 11.3$ .

Se consideriamo, però, la precisione limitata dello strumento ( $\pm 5\%$  del fondo scala, tipico), gli errori di misura, ecc., è facile arrivare alla conclusione che verosimilmente l'antenna è inutilizzabile perché in corto circuito o "aperta".

Infatti, se il ROS all'ingresso, tenendo conto degli errori, invece di  $VSWR_i = 2$  fosse  $VSWR_i = 2.2$  e se l'attenuazione della linea, invece di  $A = 4$  dB fosse  $A = 4.25$  dB, il calcolo indica che il ROS misurato all'antenna diviene esattamente:  $VSWR_L = \infty$ .