

LINHAS DE TRANSMISSÃO: ANÁLISE SOB UM OUTRO FOCO

Por Luiz Amaral
PYILL/AC2BR

Introdução

O assunto “Linhas de Transmissão” tem sido envolvido por uma nuvem de mistério para o mundo dos radioamadores (e até para alguns profissionais). A razão disto é que os conceitos envolvidos não são bem apresentados, permitindo algum grau de especulação e discussões do tipo “em minha opinião”, gerando polêmicas.

Nos textos sobre linhas de transmissão, um gerador é dito como ‘casado com uma linha’ quando sua impedância de saída é igual a Z_0 , a impedância característica da linha. Isto não é um casamento real quando lembramos que, nos casos bem comportados⁴, um gerador é casado com uma carga quando ele transfere o máximo de potência possível para a carga, ou seja, sua impedância de saída é o complexo conjugado⁵ da impedância ‘vista’ na carga. No caso geral, esta impedância não é igual a Z_0 e, portanto, vamos considerar que um gerador é casado com uma linha quando a impedância ‘vista’ no extremo inferior da linha (resultando da impedância de carga no seu extremo superior) é casada com a do gerador e Z_0 é meramente um parâmetro da própria linha. Para nós, aqui, ‘casado com a linha’ e ‘casado com Z_0 ’ são duas coisas completamente distintas e devem ser bem compreendidas porque vão ser usadas daqui para frente neste presente artigo.

O ‘casado com a linha’ é mais coerente com a seguinte situação: suponhamos que nós temos um gerador conectado a uma caixa preta (pode existir uma linha dentro da caixa, mas não sabemos). Pedimos a alguém que ajuste a impedância do gerador para casar com a entrada da caixa preta. Ela não pode ajustá-la para Z_0 porque ela não foi informada sobre os detalhes da caixa. Ela ajustará as coisas para transferência máxima de potência entre o gerador e a carga e isto ocorrerá quando o gerador for casado com a impedância ‘vista’ na entrada da caixa.

Não vamos apresentar aqui nenhuma dedução ou conceito já comumente apresentado em outros textos.

⁴ Circuitos lineares e independentes do tempo, como linhas normais são.

⁵ Ou iguais se não houver reatâncias envolvidas.

Como ‘perda de retorno’ e ‘perda da linha’ são coisas independentes, dividiremos nosso texto em duas partes, linhas ideais e linhas com perdas.

Linhas Ideais

Para simplificar as coisas, consideraremos por enquanto que a linha é ideal (sem perdas) e a carga no extremo superior é puramente resistiva³.

Suponhamos um gerador conectado a uma linha (Z_0) e esta a uma carga $R_i = Z_0$, como na Figura 1.

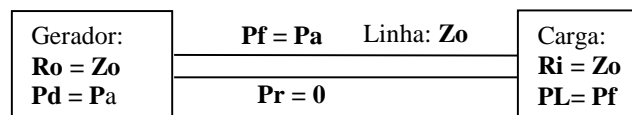


Figura 1

Como a impedância da carga é igual a Z_0 , a potência refletida é nula e a impedância ‘vista’ pelo gerador é Z_0 . Este entrega uma potência P_d igual à máxima potência disponível P_a inteiramente à linha e a potência direta P_f é igual a P_a . Então a potência P_L entregue pela linha é também P_a . Este é o simples caso de casamento total.

Agora suponhamos que são mantidas todas as condições anteriores, com exceção da impedância da carga que agora é $R_i = Z \neq Z_0$, como na Figura 2.

Nós temos agora uma potência refletida P_r (não nula) que vai na direção do gerador. Supondo que nós usemos um acoplador ideal (se necessário) para casá-lo com a linha (não com Z_0), toda a máxima potência disponível é mantida entregue à linha.

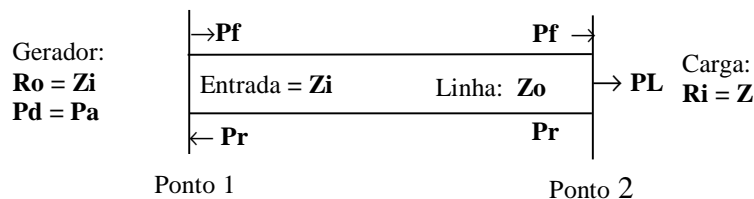


Figura 2

Lembrando que, em qualquer ponto não dissipativo de um circuito, a potência que chega nele é igual à potência que dele sai (pela lei de conservação da energia), nós podemos analisar o que acontece nos Pontos 1 e 2 da figura (eles são respectivamente os dois extremos da linha, o do gerador e o da carga).

³Isto não conduz a nenhuma perda de generalidade, mas apenas simplifica as discussões.

Sobre o Ponto 1, a potência que chega é $\mathbf{Pr} + \mathbf{Pa}$ e a potência que sai é \mathbf{Pf} , assim $\mathbf{Pf} = \mathbf{Pa} + \mathbf{Pr}$ (I). No Ponto 2, a potência que chega é \mathbf{Pf} e a que sai é $\mathbf{PL} + \mathbf{Pr}$, assim $\mathbf{Pf} = \mathbf{PL} + \mathbf{Pr}$ (II). Comparando-se (I) e (II), temos que $\mathbf{PL} + \mathbf{Pr} = \mathbf{Pa} + \mathbf{Pr}$, ou $\mathbf{PL} = \mathbf{Pa}$, independentemente do coeficiente de reflexão, pois nós não o mencionamos ainda. Isto significa que, com um gerador casado com a linha, toda potência deste é dissipada na carga, não importa quão grande seja o descasamento entre a linha e a carga. Como todas as potências envolvidas são números positivos (voltagens ao quadrado divididas por impedâncias positivas ou correntes ao quadrado multiplicadas por impedâncias positivas), de (I) podemos ver que a potência \mathbf{Pf} é maior que a potência disponível \mathbf{Pa} . Isto pode ser visto também do seguinte modo:

$$\mathbf{Pf} = \mathbf{PL} + \mathbf{Pr} \text{ e } \mathbf{Pr} = |\rho|^2 \cdot \mathbf{Pf}$$

Assim, como $\mathbf{PL} = \mathbf{Pa}$, pode-se escrever:

$$\mathbf{Pf} - |\rho|^2 \cdot \mathbf{Pf} = \mathbf{Pa} \text{ ou } \mathbf{Pf} = \mathbf{Pa} / (1 - |\rho|^2)$$

Como $|\rho|^2 \leq 1$, então $\mathbf{Pf} \geq \mathbf{Pa}$.

Com a relação de ondas estacionárias = \mathbf{Roe} e como, por definição, $|\rho|^2 = (\mathbf{Roe} - 1)/(\mathbf{Roe} + 1)$, pode-se escrever também a relação:

$$\mathbf{Pf} = \mathbf{Pa} \cdot (\mathbf{Roe} + 1)^2 / (4 \cdot \mathbf{Roe})$$

Uma questão aparece imediatamente: $\mathbf{Pf} > \mathbf{Pa}$ não é uma criação de potência do nada?

A resposta é NÃO, porque a potência direta é alimentada não só pela potência gerada, mas também pela refletida; o excesso de potência no Ponto 2 que não é entregue à carga, justamente \mathbf{Pr} , vai contribuir para \mathbf{Pf} no Ponto 1, como na Figura 2. Nós podemos dizer que existe uma potência igual a \mathbf{Pa} (a potência máxima disponível) indo linha acima na direção da carga e dissipando-se nesta, mais uma potência circulante \mathbf{Pr} . A parte direta desta potência circulante se soma à potência \mathbf{Pa} na forma de \mathbf{Pf} e a parte que retorna é a própria potência \mathbf{Pr} (é uma análise de malha), como na Figura 3.

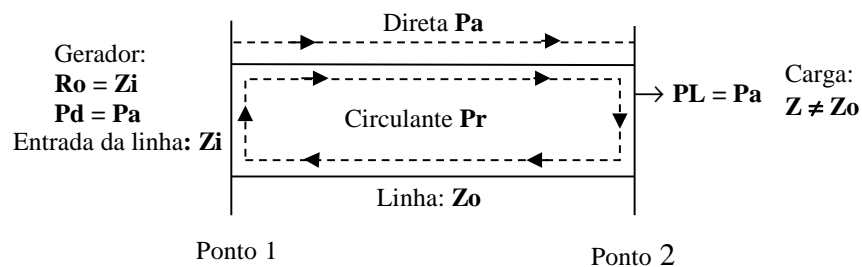


Figura 3

Mais adiante mostramos uma situação semelhante em casos de tubos com líquidos.

Isto mostra que **não é** a própria potência refletida que é a razão do decréscimo de eficiência quando existe um descasamento entre uma linha sem perdas e a carga, já que toda a potência disponível é entregue a ela. Isto está em perfeita concordância com o fato de que, se toda a potência é entregue (nada é devolvido) pelo gerador a um sistema composto por um elemento ideal (linha) e um elemento dissipativo (carga), esta potência pode somente ser dissipada na carga (por conservação da energia), nada sendo dito a respeito de reflexões.

Quando não temos uma condição de ‘casamento com a linha’ no extremo do gerador, mas, por outro lado, uma situação de ‘casamento com Z_0 ’, temos na verdade um descasamento no gerador e **isto é** a razão real da perda que, embora denominada ‘perda por reflexão’, é uma perda interna no gerador.

Linhas ideais são somente transformadores de impedância sem perdas, com a potência refletida sendo apenas usada para ajustar e casar as impedâncias envolvidas. Z_0 , embora tendo a dimensão de impedância, é somente um parâmetro da linha.

Linhas com Perdas

No mundo real, no entanto, a presença de ondas refletidas aumenta os picos da voltagem/corrente em alguns pontos da linha (ondas estacionárias, com picos e vales) e esses picos aumentam as perdas⁴. Assim é a **perda da linha** a responsável pelas perdas num sistema de linha descasada e **não** a própria reflexão, como comumente pensado por muitas pessoas.

Como um simples e bem conhecido exemplo, está o caso de uma antena de 50Ω ressonante alimentada com uma linha de 300Ω de $\frac{1}{2}$ comprimento de onda. A impedância ‘vista’ pelo gerador é também de 50Ω devido ao comprimento da linha, mas nós temos um descasamento de 6:1 no extremo da antena. Mesmo com esta grande reflexão acontecendo, nessa linha pouca perda será notada. Nós vemos que, apesar da diferença entre o gerador (50Ω) e a linha (300Ω), a potência refletida não significa perda e nenhuma ‘perda por reflexão’ ocorrerá. Isto é porque o gerador está realmente casado com a impedância de entrada da linha e não com sua impedância característica (quando nada é dito sobre transferência de potência).

A perda de uma linha de transmissão, quando o transmissor está casado com a mesma (não com Z_0) ou seja, devida apenas à perda **A** inerente da linha aumentada pela presença de **ROE = R**, é dada por:

⁴Devido ao comportamento quadrático da potência, o aumento das perdas nos picos é maior que o decréscimo nos vales, assim a perda global é maior.

$$At \text{ (dB)} = L \cdot A / 30,72 - 10 \cdot \log \{4 \cdot R / [(R + 1)^2 - (R - 1)^2 \cdot 10^{-(L \cdot A / 153,6)}]\}$$

onde **L** é o comprimento da linha em **metros**, **A** a atenuação específica da linha em **dB/100 pés** na frequência de trabalho, **log** o logaritmo decimal e **R** a ROE (o **R** da relação **R:1**). As constantes numéricas são devidas às unidades escolhidas para o comprimento e a atenuação específica do cabo.

Pode-se ver claramente que, se a atenuação específica **A = 0 dB** (atenuação nula), a atenuação total do cabo **At = 0 dB**, ou seja, não há nenhuma atenuação *independente da ROE*. Por outro lado, se a ROE **R = 1** (sem reflexão), a atenuação total é igual somente à atenuação do cabo de comprimento **L**.

‘Casamento com **Z_o**’

Se a linha é ideal e o gerador está “casado com a linha” (não com **Z_o**), nós vemos que, mesmo existindo uma potência refletida, não há nenhuma **perda de retorno**. A última é importante, no entanto, quando há um descasamento entre a linha e a carga e nós tivermos a condição de ‘casamento com **Z_o**’. A potência refletida vê a impedância **Z_o** do gerador quando ela chega no extremo inferior da linha e, portanto, é totalmente transferida para o gerador que a **dissipa**. A potência direta é a mesma do caso totalmente casado, mas a potência transferida para a carga é a potência direta menos a refletida. Assim, nós temos menos potência na carga e essa diferença é dissipada no gerador. Agora nós temos a chamada ‘perda de retorno’. Quando nós temos um acoplador ideal na saída do gerador e obtemos uma condição de ‘casamento com a linha’, o acoplador anula aquela perda de retorno, mesmo com um grande descasamento na carga. Por isso o termo ‘perda de retorno’ não seja muito conveniente e é uma das razões para o mau entendimento sobre linhas de transmissão.

Caso de tubo com líquidos

Suponhamos um tubo como na Figura 4. Se, p.ex, 10 l/s de água entram pela esquerda, independentemente da forma do tubo, 10 l/s irão sair pela direita. A parte central do tubo, mais grossa, conduz também os mesmos 10 l/s.

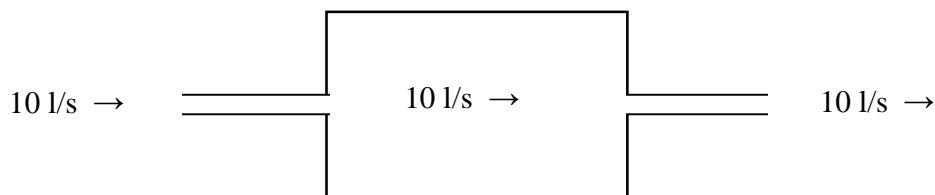


FIGURA 4

Existe alguma forma de se criar um sistema em que entrem 10 l/s apenas, saiam apenas 10 l/s, mas num ramo interno possa circular, digamos, 12 l/s, sem nenhuma outra fonte externa de água? Sim, é possível como na Figura 5.

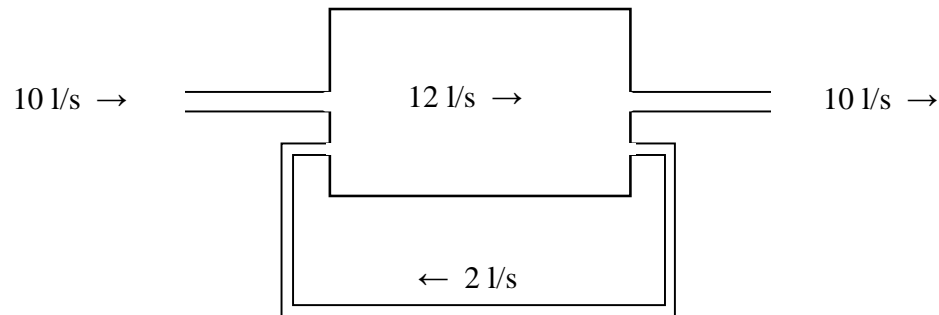


FIGURA 5

O tubo mais fino conduz 2 l/s devido à pressão feita pela água para a direita e à pressão negativa à esquerda devia à velocidade da água. Desta forma, no tubo de grande diâmetro passam 10 l/s vindos da fonte externa à esquerda mais 2 l/s que vêm da direita. Na esquerda, dos 12 l/s, 10 l/s saem para a direita e 2 l/s retornam para formar os próprios 12 l/s. Desta forma, apesar de entrarem e saírem 10 l/s, é possível haver um fluxo interno maior sem necessariamente se criar líquido em nenhum lugar. O mesmo acontece com a potência nas linhas de transmissão: uma potência direta pode ser maior que a do gerador sem se criar potência do nada. A única diferença que, sendo líquida e com atrito, a água que retorna tem de fazê-lo em outro tubo. A potência refletida no cabo pode voltar pela mesma linha por não interagir com a direta.

Mecanismo do casamento de impedâncias pelo cabo

Num transformador de impedâncias com primário e secundário, a relação de transformação de impedâncias é n^2 , onde n é a relação de espiras. No caso da linha de transmissão, o processo é diferente. Suponhamos uma carga resistiva R (somente por simplicidade, pois em nada altera as considerações). Pela Lei de Ohm, a razão entre a tensão e a corrente nesta carga é $V/I = R$, algo que tem de ser satisfeito. Mas a relação entre a tensão Vd e a corrente Id , das ondas diretas que viajam no cabo, é Z_0 . Como o extremo superior do cabo está conectado à R , algo tem de acontecer para que se resolva a situação.

Suponhamos que Z_0 seja maior que R .

Temos assim:

$$\mathbf{Vd/Id = Zo}$$

$$\mathbf{V/I = R}$$

Para que a primeira relação, que é maior que a segunda, tenha o valor desta, é necessário que se diminua seu numerador e se aumente seu denominador assim:

$$\mathbf{(Vd - Vr)/(Id +Ir) = Zo}$$

com \mathbf{Vr} sendo uma tensão de sinal contrário a \mathbf{Vd} e \mathbf{Ir} uma corrente de mesmo sentido que \mathbf{Id} . Da teoria das ondas eletromagnéticas, se mudarmos o sinal de apenas uma das variáveis que compõe a potência, o sentido da onda se inverte. Assim, são criadas novas ondas, de sentido de propagação oposto à direta (por isto chamada de refletida), tal que a tensão e a corrente resultantes na saída do cabo sejam respectivamente $\mathbf{Vd - Vr = V}$ e $\mathbf{Id + Ir = I}$. Dessa forma faz-se com que a relação entre a tensão e a corrente resultantes no extremo do cabo satisfaça a lei de Ohm sobre o \mathbf{R} . O cabo reflete no seu extremo inferior (do gerador) uma impedância dependente de seus parâmetros como comprimento, velocidade de propagação, frequência e do próprio \mathbf{Zo} .

Para o caso onde \mathbf{Zo} for menor que \mathbf{R} , a coisa é semelhante com a soma ocorrendo no numerador e a diferença no denominador.

O processo, assim, de transformação de impedância de uma linha é baseado na existência de ondas refletidas, ou de ondas estacionária sobre ela.

Conclusões

Quando nós temos um transmissor com impedância fixa de saída, sem nenhum acoplador e conectado a uma linha ideal, é aconselhável casar a linha com a antena devido à perda de retorno. Com um acoplador, ou um transmissor com impedância de saída variável, a ROE é irrelevante para aquelas linhas. Na verdade a linha se ajusta à antena através da reflexão e deixa para o transmissor o problema de diminuir as perdas.

No mundo real, quando as linhas têm perdas que aumentam com a ROE, devemos manter a última a menor possível em qualquer situação, mas acopladores são ainda úteis para cancelar a perda de retorno⁵.

⁵ Vemos que a expressão “perda de retorno” não é muito conveniente porque o acoplador, no extremo do gerador da linha, é capaz de cancelar a perda de retorno sem afetar a potência de retorno (refletida) na linha que depende somente da condição de descasamento no extremo da antena.

Este artigo não tem a intenção de mudar o uso da expressão “perda de retorno” na literatura já que é um termo bem aceito, mas chamar a atenção do leitor sobre seu conceito.

Outra razão para se manter a ROE em seu menor valor é a diminuição da potência máxima sobre um cabo com estacionárias⁶.

A linha, na verdade, é simplesmente um transformador de impedâncias, refletindo para o gerador, a impedância da carga transformada pela linha. Se a linha for ideal, ela é simplesmente um transformador de impedâncias sem perdas.

Um transformador comum com primário e secundário utiliza as propriedades magnéticas envolvidas na relação de espiras para executar tal transformação. A linha de transmissão utiliza a reflexão para executar a transformação, nada tendo esta a ver diretamente com as perdas.

Acredito que este enfoque do problema (envolvendo o fato de que a potência direta é maior que a gerada no caso geral sem perdas e o mecanismo de transformação de impedâncias pela linha) é novo, pelo menos nunca o vi explicitamente na literatura.

⁶ A potência máxima especificada pelos fabricantes de cabos se refere à condição de ROE = 1:1; para uma ROE de n:1, a potência máxima é a especificada dividida por n.