

LINHAS DE TRANSMISSÃO: ANÁLISE SOBRE OUTRO FOCO

Por Luiz Amaral
PY1LL/PY4LC

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.

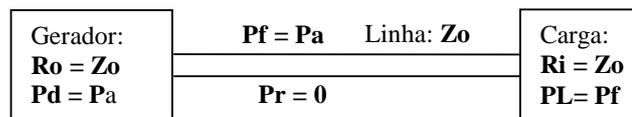


Figura 1

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. Suponhamos que nós usemos um acoplador ideal (se necessário) para casá-lo com a linha (não com Z_0), isto é, toda a máxima potência disponível é mantida entregue à linha.

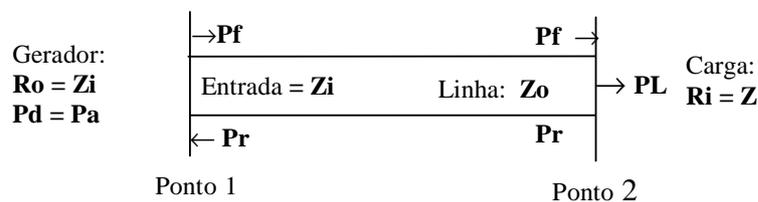


Figura 2

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

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).

Sobre o Ponto 1, a potência que chega é $P_r + P_a$ e a potência que sai é P_f , assim $P_f = P_a + P_r$ (I). No Ponto 2, a potência que chega é P_f e a que sai é $P_L + P_r$, assim $P_f = P_L + P_r$ (II). Comparando-se (I) e (II), temos que $P_L + P_r = P_a + P_r$, ou $P_L = P_a$, 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 P_f é maior que a potência disponível P_a .

Uma questão aparece imediatamente: 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 P_r , vai contribuir para P_f no Ponto 1, como na Figura 2. Nós podemos dizer que existe uma potência igual a P_a (a potência máxima disponível) indo linha acima na direção da carga e dissipando-se nesta, mais uma potência circulante P_r . A parte direta desta potência circulante se soma à potência P_a na forma de P_f e a parte que retorna é a própria potência P_r (é uma análise de malha), como na Figura 3.

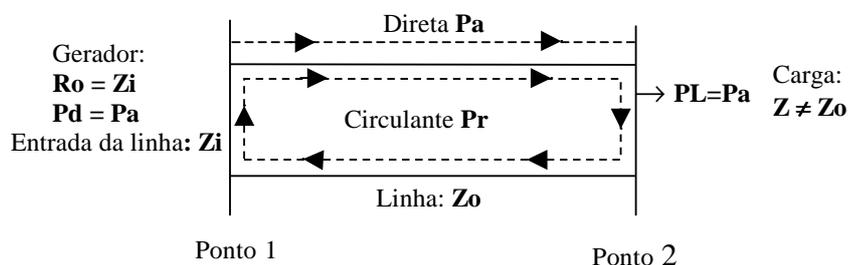


Figura 3

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_o**”, 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_o**, embora tendo a dimensão de impedância,

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 ou nenhuma 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).

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.

“Casamento com Z_0 ”

Se a linha é ideal e o gerador está “casado com a linha” (não com Z_0), 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_0 ”. A potência refletida vê a impedância Z_0 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.

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.

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

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

⁵Vemos 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.

⁶A 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.