

I

Introdução às Linhas de Transmissão

Carlos Alberto Barreiro Mendes

Henrique José da Silva

2005

1 LINHAS DE TRANSMISSÃO

Numa linha de transmissão existem sempre dois condutores. Estes dois condutores surgem por vezes com nomes próprios como por exemplo, ‘condutor de sinal’ e ‘condutor de retorno’ ou ‘condutor’ e ‘massa’ ou ‘condutor central’ e ‘malha’. Depende na verdade da estrutura física da linha.

Independentemente destes termos a existência dos dois condutores é necessária para que as linhas de força originadas nas cargas dum condutor se fechem sobre as cargas do outro condutor garantindo-se assim que a energia fique confinada em torno dos condutores, transmitindo-se ao longo dos mesmos. Da existência dum só condutor ou de dois condutores muito afastados resulta muito mais um efeito de radiação do que de transmissão.

Da forma como os dois condutores estão posicionados um relativamente ao outro surgem estruturas com nomes diferentes.

Cabo Coaxial

A estrutura talvez mais conhecida e utilizada no dia a dia é o designado Cabo Coaxial. Para esta estrutura um dos condutores forma como que um tubo metálico estando o outro condutor disposto de forma concêntrica no seu interior. A posição relativa dos dois condutores é mantida constante e inalterável pela existência dum material dieléctrico entre eles. O condutor tubular é muitas vezes substituído por uma malha metálica resultando daí a designação de ‘malha’.

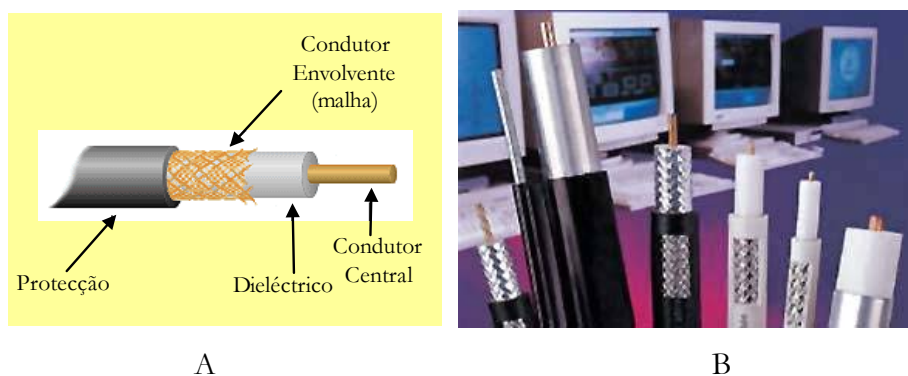


Figura 5 – A-Estrutura do Cabo Coaxial; B-Exemplos de Cabos Coaxiais

Linha Bifilar

A estrutura designada por linha bifilar é em termos históricos anterior ao cabo coaxial. Esta estrutura é formada por dois condutores paralelos separados por um material dieléctrico, como se mostra na figura 6.

Existem alguns problemas fundamentais que tornam a sua utilização menos vantajosa. Um desses problemas é a existência de possíveis acoplamentos entre duas linhas bifilares. Ao contrário da estrutura

coaxial onde os campos estão concentrados dentro da estrutura, evitando-se com isso que possam surgir interferências entre os sinais nas duas linhas, nas linhas bifilares os campos existem também no ‘exterior’ da linha, ou seja, no espaço envolvente e por esta razão se verificam muitas vezes os chamados efeitos de *crossstalk* – figura 7. Pela mesma razão as linhas bifilares são também menos imunes a ruído. As linhas bifilares apresentam também perdas maiores e uma menor largura de banda

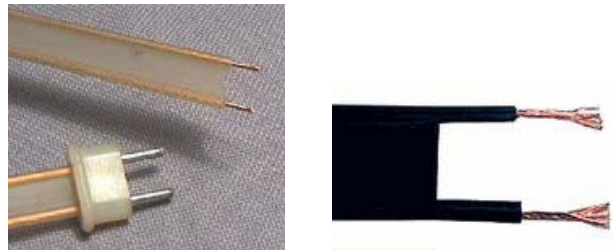


Figura 6 – Exemplos de linhas bifilares

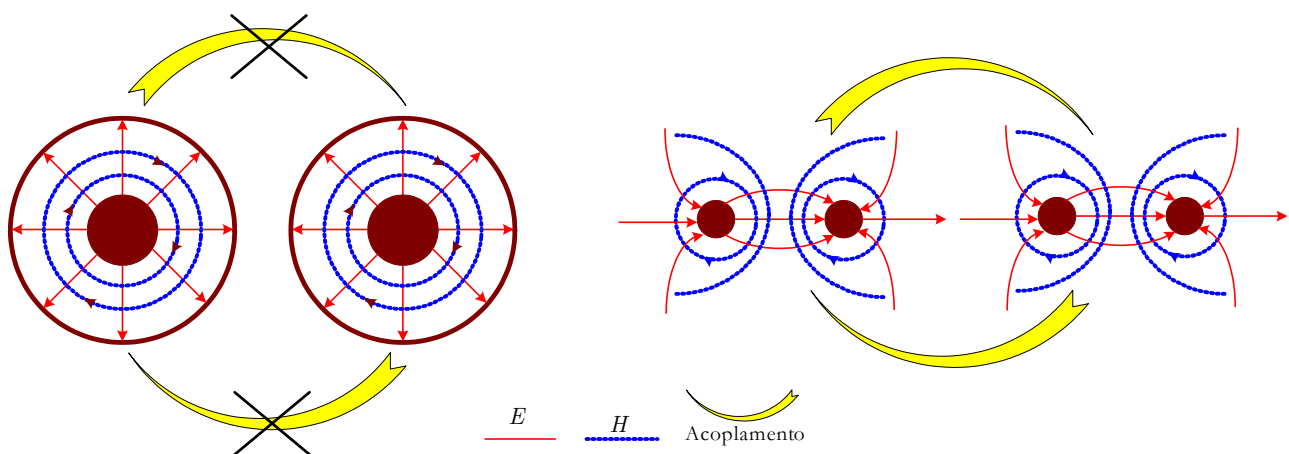
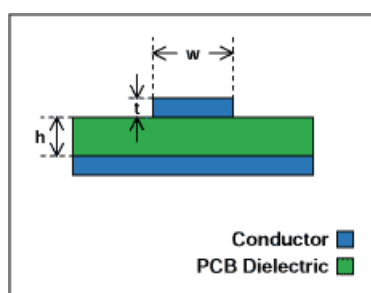


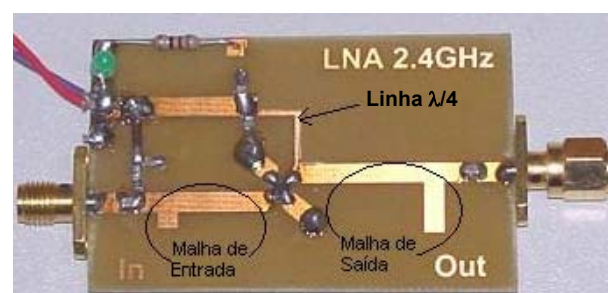
Figura 7 – Linhas de campo Eléctrico e Magnético nos cabos coaxiais e linhas bifilares e acoplamento

Linhas Impressa

A estrutura de linha impressa mais conhecida tem a designação de linha *microstrip* e é a que se mostra na figura 8-A. A placa de circuito impresso é de dupla face metálica. Uma das faces fica totalmente preenchida com a camada metálica e recebe o nome de plano de massa. Na outra face são desenhadas pistas metálicas que em conjunto com o plano de massa formam a linha de transmissão. É uma estrutura de alguma forma idêntica à da linha bifilar.



A



B

Figura 8 – A-Estrutura impressa do tipo microstrip; B-Circuito amplificador onde são usadas linhas impressas

Propagação de Ondas I

As linhas impressas são um caso particular das linhas de transmissão na medida em que correspondem a linhas de comprimento físico muito pequeno, ao contrário das linhas anteriores que podem ter algumas dezenas de metros.

Surgem muito associadas ao desenho de circuitos para frequências tipicamente superiores a 300 MHz, sendo mais comum encontrar referências da sua utilização nas bandas das microondas e ondas milimétricas. Isto acontece por razões de ordem prática. Na verdade só nestas bandas o comprimento de onda se torna suficientemente pequeno para que a construção de linhas baseada em tecnologia de circuito impresso se torne possível.

Definição de Linha de Transmissão

A primeira questão que se pode colocar a seguinte: O que é uma linha de transmissão? Se um cabo coaxial é uma linha de transmissão, porque razão o estudo que agora se apresenta não é, numa grande parte das utilizações das linhas referido? São exemplo as ligações realizadas entre equipamentos num laboratório de electrónica.

O entendimento do que é uma linha de transmissão ficará perfeitamente claro ao longo do capítulo. Por agora diremos que:

-Uma linha de transmissão é toda a linha cujo comprimento físico seja da ordem de grandeza do comprimento de onda.

Vamos ver alguns exemplos considerando várias frequências. Recorda-se que o comprimento de onda é dado por (0.1)

$$\lambda = \frac{v_p}{f} \quad (0.1)$$

onde

$$v_p = \frac{1}{\sqrt{\mu_d \varepsilon_d}} \quad (0.2)$$

sendo μ_d e ε_d respectivamente a permeabilidade magnética e a constante dielétrica do substrato associado à linha. Como na maior parte dos casos μ_d tem o valor da permeabilidade do vácuo e a constante dielétrica é referida em termos relativos à constante do vácuo temos que

$$v_p = \frac{1}{\sqrt{\mu_o \varepsilon_o \varepsilon_r}} = \frac{1}{\sqrt{\mu_o \varepsilon_o} \sqrt{\varepsilon_r}} = \frac{c}{\sqrt{\varepsilon_r}} \quad (0.3)$$

com

$$\varepsilon_r = \frac{\varepsilon_d}{\varepsilon_o} \quad (0.4)$$

onde ε_r é então a constante dielétrica relativa do substrato.

Consideremos por exemplo uma frequência de trabalho igual a 1 KHz. Vamos ainda considerar quatro possíveis materiais para o substrato:

$$\begin{aligned} \text{Vácuo} &\Rightarrow \varepsilon_r = 1 & \text{Poliestileno} &\Rightarrow \varepsilon_r = 2.2 \\ \text{Epoxy} &\Rightarrow \varepsilon_r = 4.5 & \text{GaAs (Arsenieto de Gálio)} &\Rightarrow \varepsilon_r = 13 \end{aligned}$$

Temos então

$$\begin{aligned} v_{p_{vacuo}} &= \frac{3 \times 10^8}{\sqrt{1}} = 3 \times 10^8 \text{ ms}^{-1} \\ v_{p_{poliestileno}} &= \frac{3 \times 10^8}{\sqrt{2.2}} = 2.023 \times 10^8 \text{ ms}^{-1} \\ v_{p_{epoxy}} &= \frac{3 \times 10^8}{\sqrt{4.5}} = 1.414 \times 10^8 \text{ ms}^{-1} \\ v_{p_{GaAs}} &= \frac{3 \times 10^8}{\sqrt{13}} = 0.832 \times 10^8 \text{ ms}^{-1} \end{aligned} \quad (0.5)$$

Consequentemente

$$\begin{aligned} \lambda_{vacuo} &= \frac{3 \times 10^8}{1 \times 10^3} = 3000 \text{ Km} \\ \lambda_{poliestileno} &= \frac{2.023 \times 10^8}{1 \times 10^3} = 2023 \text{ Km} \\ \lambda_{epoxy} &= \frac{1.414 \times 10^8}{1 \times 10^3} = 1414 \text{ Km} \\ \lambda_{GaAs} &= \frac{0.832 \times 10^8}{1 \times 10^3} = 832 \text{ Km} \end{aligned} \quad (0.6)$$

Em primeiro lugar repare-se como o comprimento de onda é dependente do dieléctrico utilizado. E segundo lugar repare-se também que em qualquer dos casos o comprimento de onda tem um valor elevado quando comparado com os possíveis comprimentos numa linha. Analisemos no entanto os resultados da tabela seguinte para outras frequências.

$$\begin{array}{l|lllll} f = 1 \text{ MHz} & \lambda_{vacuo} = 300 \text{ m} & \lambda_{poliestileno} \simeq 202 \text{ m} & \lambda_{epoxy} \simeq 141 \text{ m} & \lambda_{GaAs} \simeq 83 \text{ m} \\ f = 100 \text{ MHz} & \lambda_{vacuo} = 3 \text{ m} & \lambda_{poliestileno} \simeq 2.02 \text{ m} & \lambda_{epoxy} \simeq 1.41 \text{ m} & \lambda_{GaAs} \simeq 83 \text{ cm} \\ f = 1 \text{ GHz} & \lambda_{vacuo} = 30 \text{ cm} & \lambda_{poliestileno} \simeq 20.2 \text{ cm} & \lambda_{epoxy} \simeq 14.1 \text{ cm} & \lambda_{GaAs} \simeq 8.3 \text{ cm} \\ f = 10 \text{ GHz} & \lambda_{vacuo} = 3 \text{ cm} & \lambda_{poliestileno} \simeq 2.02 \text{ cm} & \lambda_{epoxy} \simeq 1.41 \text{ cm} & \lambda_{GaAs} \simeq 8.3 \text{ mm} \end{array} \quad (0.7)$$

Como se pode observar o comprimento de onda para cada um dos substratos torna-se cada vez mais pequeno com o aumento da frequência e facilmente o comprimento físico da linha se aproxima do comprimento de onda.

É portanto muito importante que se dê atenção à relação entre o comprimento físico e o comprimento de onda. Para a frequência de 1 KHz poder-se-ia concluir que para frequências baixas nunca seria possível, por definição, que uma linha fosse linha de transmissão. Mas por exemplo as linhas de

Propagação de Ondas I

transporte de energia da rede eléctrica que percorrem centenas de quilómetros poderão ser ter que ser classificadas como linhas de transmissão.

Existe Uma segunda definição para linha de transmissão:

- Uma linha de transmissão é toda a linha na qual se verifique um desfasamento claro entre o sinal na entrada da linha e o sinal na saída da linha.

Em rigor, não se deve dizer que uma linha de transmissão o é, pelas razões anteriores. O que se pretende dar a entender é que, verificadas as definições a linha deve ser analisada à luz da teoria das linhas de transmissão. Esta teoria mostra a existência de fenómenos transmissão na linha que não são considerados em muitas aplicações de mais baixa frequência. A partir daí mostra igualmente a forma como se podem contornar esses fenómenos ou como se pode fazer aproveitamento dos mesmos.

Fenomenologia associada às Linhas de Transmissão

O que é que acontece efectivamente para que a linha deva ser analisada à luz da teoria das linhas de transmissão ?

Sabemos pelas leis gerais da física que quando uma onda se propaga num meio 1 (onda incidente), com determinadas características de propagação, e encontra uma superfície de transição para um meio 2 que é diferente, essa onda se divide numa onda reflectida, que continua em propagação no meio 1 e numa onda transmitida que se vai propagar no meio 2.

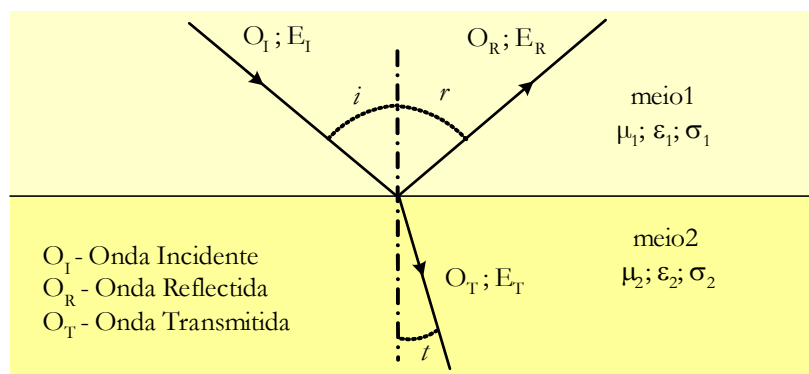


Figura 9 – Incidência, reflexão e transmissão na descontinuidade entre 2 meios de propagação.

Por analogia podemos vamos dizer que uma onda (onda incidente) se propaga numa linha, que na figura 10 está representada por um cabo coaxial. A linha onde a onda se está a propagar constitui o meio de propagação 1. Ao chegar ao fim da linha, a onda encontra uma transição para um meio 2. O meio 2 poderá ser um outro cabo, ou pode ser uma antena ou ainda um qualquer equipamento. Será na verdade um sistema para o qual se pretende transferir a energia fornecida pelo gerador.

Ao contrário da figura 9, onde os meios são caracterizados pelos parâmetros constitutivos dos meios (permeabilidade magnética, constante dielétrica e condutividade), na figura 10 o meio 1 e o meio 2

estão caracterizados por uma impedância. O meio 1 apresenta uma impedância à propagação da onda que designamos por impedância característica da linha Z_O . A impedância, Z_L , do meio 2, é referida como sendo a impedância duma carga na qual a linha termina.

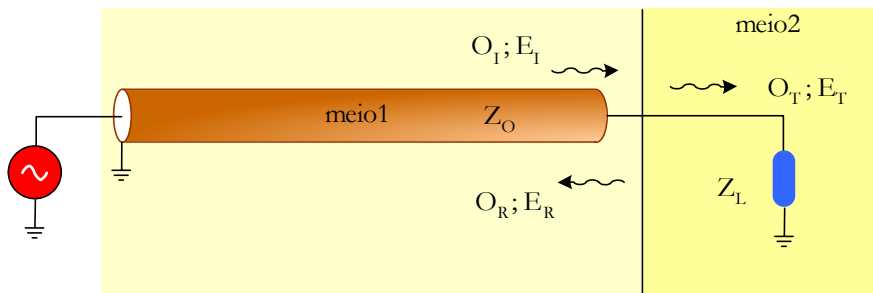


Figura 10 – Onda incidente, reflectida e transmitida numa linha de transmissão.

Se Z_L tiver um valor diferente de Z_O significa que o meio 1 é diferente do meio 2 e portanto a onda incidente dará origem a uma onda reflectida e a uma onda transmitida. Existindo reflexão diz-se que o sistema constituído pela linha e pela carga está desadaptado.

Problemas da existência de reflexão em linhas

Qual o problema que resulta da existência do fenómeno de reflexão anterior ?

Podemos identificar dois tipos de problemas:

- 1º Se existir onda reflectida isso traduz-se em termos práticos numa não transferência da totalidade da energia do gerador para a carga. Estamos portanto perante um problema de perdas de energia.
- 2º A onda reflectida propaga-se na linha no sentido do gerador que irá funcionar para esta onda como carga. Nestas circunstâncias o gerador acaba por ficar com as suas características de funcionamento alteradas. De que forma ?
 - Pode por exemplo passar a debitar menos potência que a inicialmente prevista. Se tal acontecer temos um duplo efeito de perdas. Perda de potência gerada e perda de potência transferida para a carga.
 - Pode passar a debitar uma potência superior à inicialmente prevista, podendo ser ultrapassado o valor da máxima potência de dissipação do gerador. Isto pode conduzir à sua destruição.
 - Pode entrar em regime de funcionamento não linear. Em termos de transmissão rádio isto traduz-se numa emissão simultânea em múltiplos da frequência fundamental, causando interferência noutros sistemas.

Propagação de Ondas I

Os problemas anteriormente referidos estão mais associados à transmissão analógica, onde se considera que a onda que se propaga é uma onda contínua.

Em comunicação digital onde a onda que se propaga é pulsada, existem igualmente problemas resultantes do fenómeno de desadaptação. Os impulsos transmitidos pelo gerador serão reflectidos pela carga. Como se propagam na mesma linha poderão ocorrer duas situações:

- 1º Os impulsos reflectidos interferem com os incidentes distorcendo por isso a informação transmitida. Na figura 11 representa-se uma sequência de impulsos incidentes e uma sequência de impulsos reflectidos resultante da desadaptação. Se num determinado instante se medisse o sinal ao longo da linha, o que se iria medir era a soma das duas sequências percebendo-se dessa forma a distorção da informação.

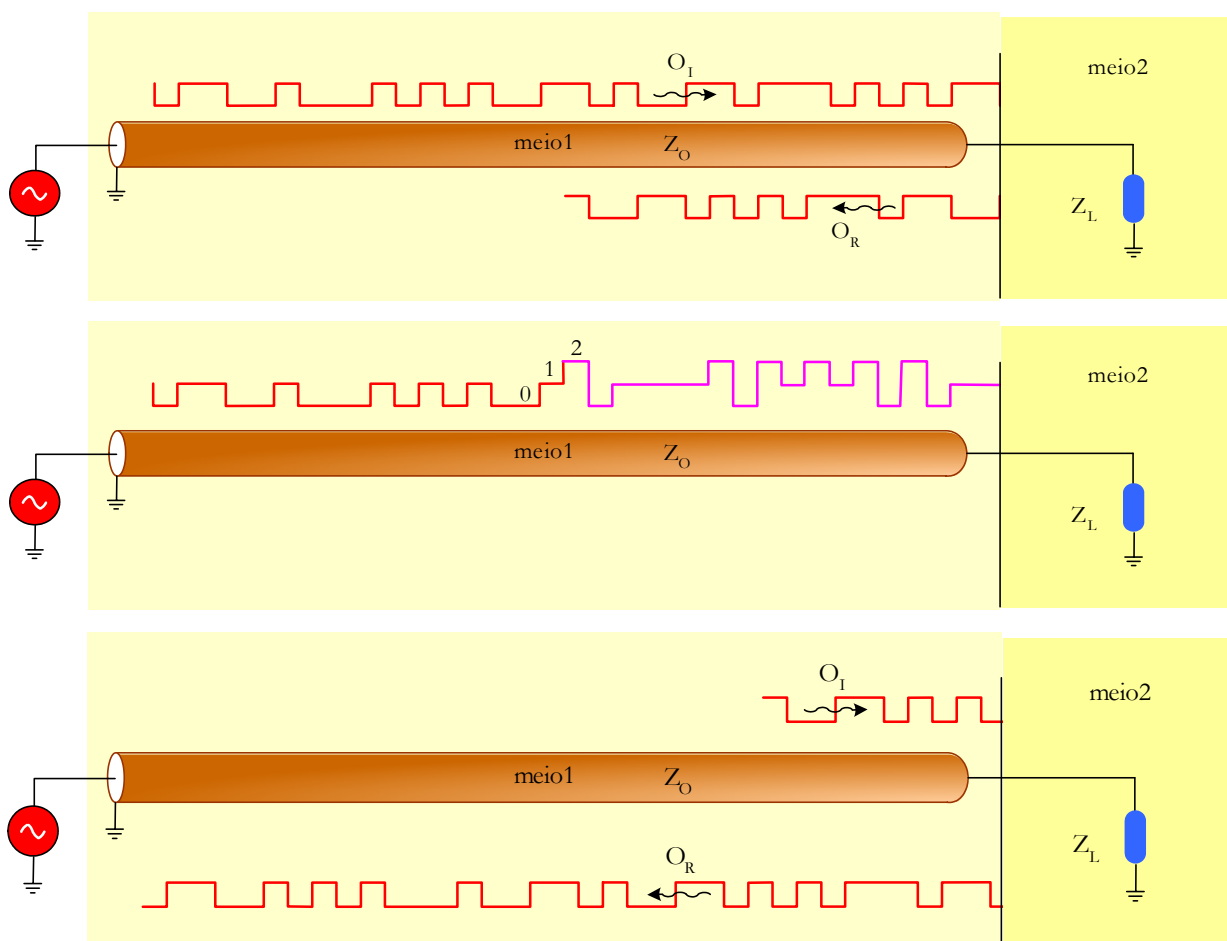


Figura 11 – Corrupção da informação digital numa linha de transmissão

- 2º Considerando que na linha já só existem impulsos reflectidos, estes poderão ser entendidos como novas sequências de impulsos associadas a uma nova informação. Na figura mostram-se alguns impulsos incidentes que, tendo sido transmitidos pelo gerador estão a chegar à carga. Os impulsos que anteriormente já tinham chegado e que foram reflectidos encontram-se também na linha.

Resolução dos problemas anteriores

Como é que se podem resolver os problemas resultantes da desadaptação, seja a transmissão analógica ou digital ?

A resposta é simples: - obrigando a que a carga se torne, em valor de impedância, igual à impedância da linha. Em termos práticos iremos ver que se adicionam à carga efectiva alguns elementos indutivos, capacitivos ou mesmo resistivos¹ de tal forma que, no seu conjunto, carga efectiva e elementos adicionais, resultem num valor de carga igual a Z_0 .

Tópicos importantes

A matéria que se segue resulta assim num estudo mais detalhado dos 3 pontos anteriores:

- O que é que acontece efectivamente para que a linha deva ser analisada à luz da teoria das linhas de transmissão?
- Quais os problemas que resultam do fenómeno da desadaptação?
- Como se elimina a desadaptação e quais as técnicas mais utilizadas

Iremos ainda abordar a questão da desadaptação numa perspectiva diferente, já que, em muitas circunstâncias, a desadaptação é encarada como um factor benéfico. São exemplo os processos de reflectometria, TDR² e FDR³, baseados na existência de desadaptações. Alguns sistemas muito conhecidos, como sejam o RADAR e o SONAR, baseiam-se no TDR. O TDR e o FDR são muito utilizados em medidas directas sobre linhas de transmissão.

Veremos igualmente que em muitas circunstâncias, principalmente no domínio das linhas impressas, se a desadaptação é forçada, para que a partir daí se possa criar um novo conjunto de circuitos, muito utilizados em alta frequência e microondas.

Teremos assim um quarto ponto de discussão

- Aproveitamento da existência de reflexão em linhas

¹ Na prática evitam-se os elementos resistivos por serem elementos dissipativos. Tem no entanto uma vantagem é que o seu valor é independente da frequência, aspecto importante em sistemas de banda larga.

² Reflectometria no Domínio do Tempo

³ Reflectometria no Domínio da Frequência