

Experiência

1

PTC-2440

LABORATÓRIO DE ANTENAS E MICROONDAS

Linhas de Transmissão

LABORATÓRIO DE ANTENAS E MICROONDAS

Linhas de Transmissão

© 2007 Luiz Cezar Trintinalia, Denise Consoni, Max Gerken, José Roberto de A. Amazonas
Depto. de Engenharia de Telecomunicações e Controle
Escola Politécnica da Universidade de São Paulo

Índice

Objetivos.....	1
Resumo Teórico.....	1
A linha fendida.....	1
O diodo detector.....	3
O medidor de COE.....	4
A linha de transmissão.....	5
Métodos de medida.....	6
Medidas de COE.....	6
Método direto.....	6
Método com correção da lei do diodo detector.....	6
Método dos 3 dB.....	8
Método dos atenuadores.....	9
Medidas de Impedância.....	10
Características de cabos.....	11
Impedância característica.....	11
Constante de atenuação.....	11
Constante de fase.....	11
Parte Experimental	12
Material Utilizado.....	12
Medidas de COE.....	12
Medidas de impedância.....	14
Caracterização de cabos coaxiais.....	14
Referências Bibliográficas.....	14

Linhas de Transmissão

Conceitos e métodos de medida

Nesta experiência os alunos deverão tomar contato com métodos de medida direta do coeficiente de onda estacionária utilizando uma linha de transmissão fendida. Com esse instrumento os alunos poderão melhor entender o fenômeno de onda estacionária e sua relação com a impedância de carga.

Objetivos

Esta experiência tem os seguintes objetivos:

- Consolidar os conceitos relacionados à teoria de linhas de transmissão através de medidas diretas;
- Efetuar medidas de COE (coeficiente de onda estacionária) e impedância utilizando a linha fendida.

Resumo Teórico

A linha fendida

A linha fendida é um instrumento coaxial básico para medidas de comprimento de onda, impedância, coeficiente de onda estacionária e coeficiente de reflexão de dispositivos em frequências de UHF e microondas. Por exemplo, para a linha disponível no laboratório (modelo 874-LBB GR) a faixa de utilização é de 300 MHz a 8,5 GHz. Atualmente, a linha fendida é raramente utilizada como instrumento de medida em grandes empresas de telecomunicações, tendo sido substituída pelo analisador de rede (Network Analyzer), que é, porém, um equipamento de custo bastante elevado. Porém, do ponto de vista acadêmico, a linha fendida ainda é um instrumento imprescindível para a familiarização dos estudantes de telecomunicações com os princípios de reflexão de ondas e medidas de impedância em altas frequências.

Em síntese, a linha fendida é um trecho de cabo coaxial de impedância característica conhecida (50Ω no caso da linha disponível), cortado por uma fenda longitudinal estreita e de extensão da ordem de meio comprimento de onda na frequência mais baixa de operação. A fenda é percorrida por um carrinho onde está montada uma ponta de prova de comprimento variável que penetra na fenda, conforme ilustrado na Figura 1.

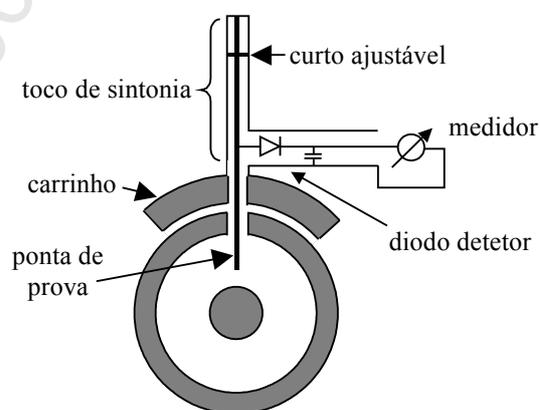


Figura 1- Vista transversal, em corte, da linha fendida.

A ponta de prova acoplada à linha pode ser ajustada em uma larga faixa de frequência por meio de um toco de sintonia, conforme ilustrado na Figura 1. Ainda na Figura 1 pode-se observar que a tensão na entrada do detector é proporcional à tensão existente entre os condutores interno e externo da linha fendida, devido ao divisor capacitivo formado pelas capacitâncias C_1 (entre a ponta de prova e o condutor interno) e C_2 (entre a ponta de prova e o condutor externo). Portanto, ao se percorrer a fenda com o carrinho, a tensão de RF na entrada do diodo detector varia proporcionalmente à tensão existente na linha, podendo-se, então, medir o COE, como será apresentado adiante.

O circuito equivalente do sistema detector (ponta de prova, diodo detector e toco de sintonia) é mostrado na Figura 2.

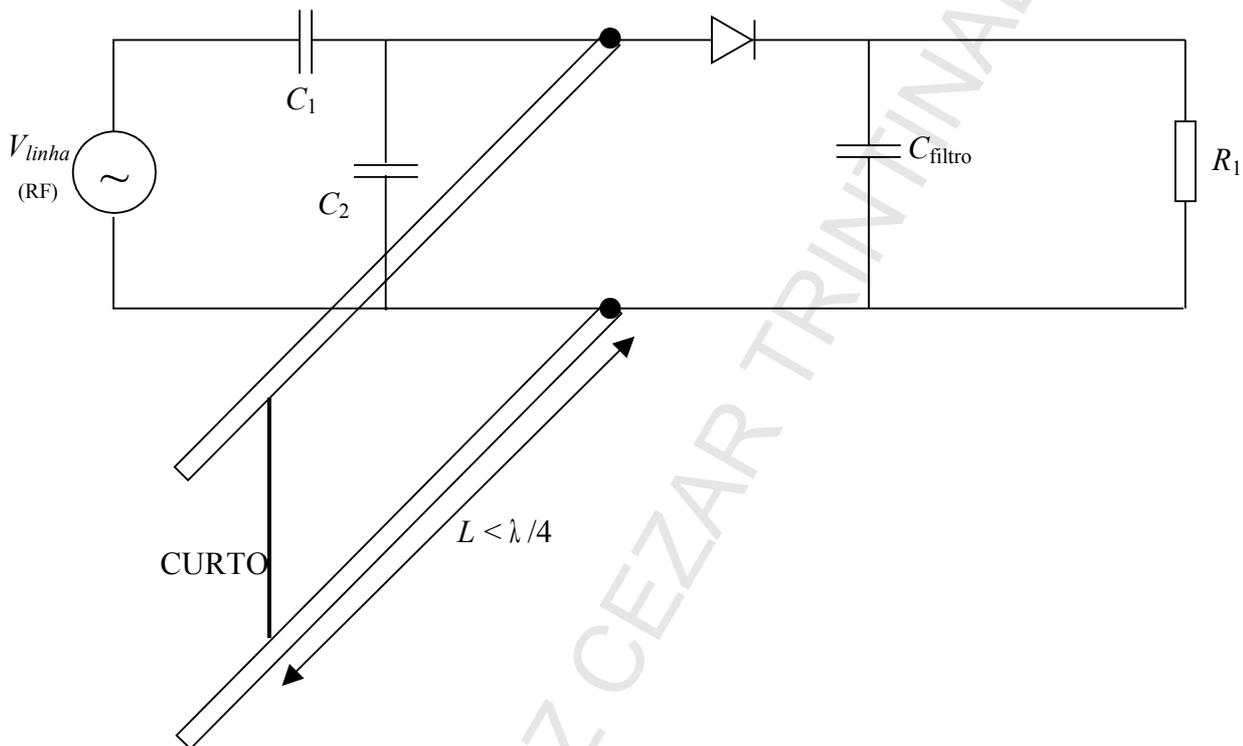


Figura 2 – Circuito equivalente do sistema detector mostrando o toco de sintonia.

A capacitância C_{filtro} é constituída por um dielétrico de teflon montado dentro do carrinho, entre o catodo do diodo e a massa e R_1 representa a impedância de entrada do medidor. Na Figura 3 substituímos o toco de sintonia pela impedância jX_L , que é a impedância proporcionada pelo toco em curto (ela é indutiva pois $L < \lambda/4$) e R'_1 representa a resistência equivalente do circuito detector.

Assim, para se obter a máxima tensão na entrada do detector o toco de sintonia deve ser ajustado de maneira que o circuito ressonante constituído por $C = C_1 + C_2$ em paralelo com a indutância equivalente do toco e com a resistência R'_1 seja ressonante na frequência de operação (em RF).

A linha fendida, evidentemente, não se comportará como uma linha uniforme. No entanto, as perturbações introduzidas pela presença da fenda são compensadas no projeto da linha. As duas perturbações mais significativas causadas pela fenda são:

- Alterações da impedância característica;
- Reflexões indesejáveis nos extremos da fenda.

A primeira é compensada alterando-se a relação entre os diâmetros dos condutores interno e externo que compõem a linha enquanto que a segunda é eliminada fazendo-se a fenda terminar gradualmente, ao invés de abruptamente. Convém ressaltar, contudo, que não é conveniente utilizar-se a linha fendida próximo aos seus pontos extremos.

A presença da ponta de prova no interior da linha gera, também, reflexões adicionais que, no entanto, nunca podem ser totalmente eliminadas e, em medidas de alta precisão, devem ser levadas em conta.

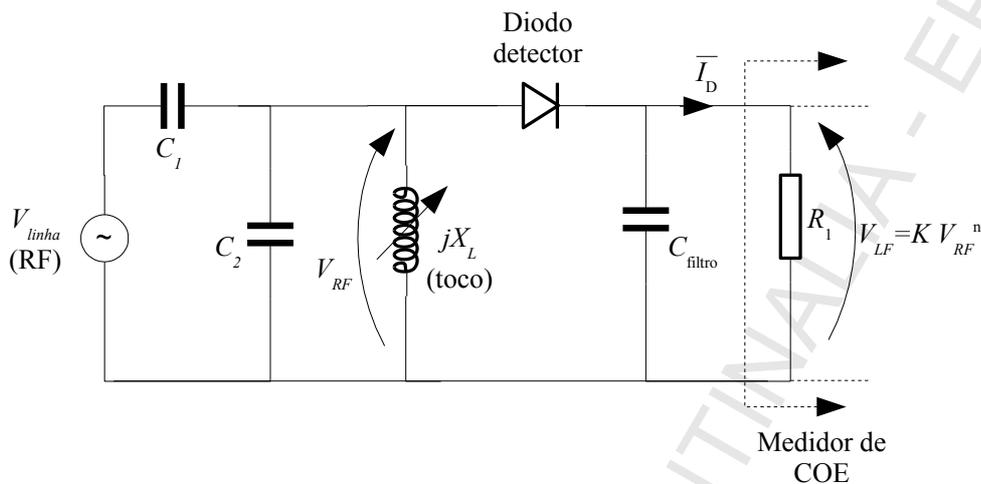


Figura 3 – Circuito equivalente do sistema detector substituindo-se o toco de sintonia pela sua indutância equivalente.

O diodo detector

O sinal induzido na ponta de prova, como visto na Figura 2, passa por um elemento retificador, geralmente um diodo de ponta (“point contact diode”). O diodo, a capacitância C_{filtro} e a impedância de entrada do medidor (R_1) funcionam como um detector não linear de envoltória, como explicado a seguir.

A curva característica de diodos de ponta apresenta o aspecto ilustrado na Figura 4.

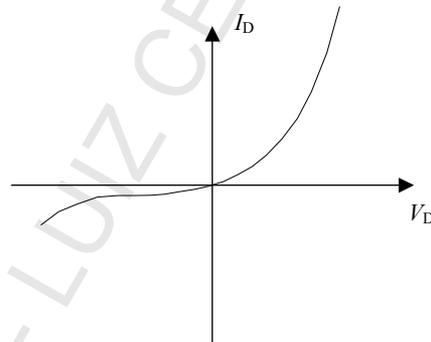


Figura 4 – curva característica do diodo detector.

Como se observa, a curva característica não é linear de modo que a corrente detectada não é diretamente proporcional à tensão de RF na entrada do detector. Uma boa aproximação para a lei de resposta do diodo é dada pela seguinte expressão:

$$\bar{I}_D = K V_{RF}^n \quad (1)$$

onde \bar{I}_D é o valor médio da corrente no diodo (efetivamente é a corrente medida pelo medidor devido ao filtro passa-baixas), V_{RF} é a amplitude da tensão de RF induzida na ponta de prova (que é proporcional à tensão na linha fendida) e n é conhecido como índice do detector. Para níveis baixos de sinal de RF observa-se que $n \cong 2$ e, por esta razão, esses detectores são conhecidos como detectores quadráticos. Nessas condições a corrente detectada é diretamente proporcional à potência de RF absorvida pelo diodo.

Para níveis altos de sinal, por outro lado, o valor de n pode desviar-se bastante de 2. Conseqüentemente, para se efetuar medidas com a linha fendida é necessário um procedimento de calibração para se determinar o valor de

n correspondente aos diferentes valores de potência a serem medidos. Um procedimento simplificado de calibração será apresentado posteriormente.

Finalmente, resta salientar que a expressão (1) é válida tanto para sinais RF sem modulação quanto para sinais modulados. O segundo caso é o mais empregado na prática pois, por meio de um amplificador sintonizado pode-se melhorar muito a sensibilidade de detecção.

O medidor de COE

O medidor de COE, como esquematizado na Figura 5, é um aparelho constituído basicamente de um filtro sintonizado em 1 kHz, um amplificador de baixo ruído, uma série de atenuadores variáveis, um detector e um instrumento de bobina móvel provido de escalas apropriadas. As principais escalas são assim distribuídas: duas escalas de COE (1 a 4 e 3,2 a 10), uma escala em dB (0 a 10 dB) e uma escala linear. Além destas, existem outras escala expandidas que são de uso menos freqüente.

Devido ao filtro, é evidente que esse medidor requer um sinal RF modulado para sua operação. Nestas condições, pode-se mostrar que a corrente que aciona o instrumento é proporcional à amplitude V_{RF} da tensão de RF na entrada do diodo detector elevada à potência n (índice do detector) e à amplitude A_1 da componente fundamental do sinal modulador, ou seja,

$$I = K V_{RF}^n A_1 \quad (2)$$

Como a tensão na entrada do detector é diretamente proporcional à tensão existente na linha e a amplitude do sinal modulador é constante, então, conclui-se que a deflexão do ponteiro do medidor é proporcional à n -ésima potência da amplitude da tensão RF na linha. Isto traz um problema prático de calibração do aparelho já que o expoente n é uma característica do diodo e que depende do nível do sinal de RF na linha fendida.

Como, pelo menos para sinais de RF de baixa intensidade, o diodo apresenta lei quadrática, o medidor de COE é calibrado pressupondo-se $n = 2$, ou seja, a sua indicação é proporcional à raiz quadrada da corrente que atravessa o instrumento. Caso o diodo não siga a lei quadrática, as leituras estarão incorretas e deverão ser corrigidas, como será estudado posteriormente.

A linha fendida pode ser usada, também, com sinal de RF sem modulação. Neste caso, basta um simples galvanômetro para medir a componente contínua da corrente retificada.

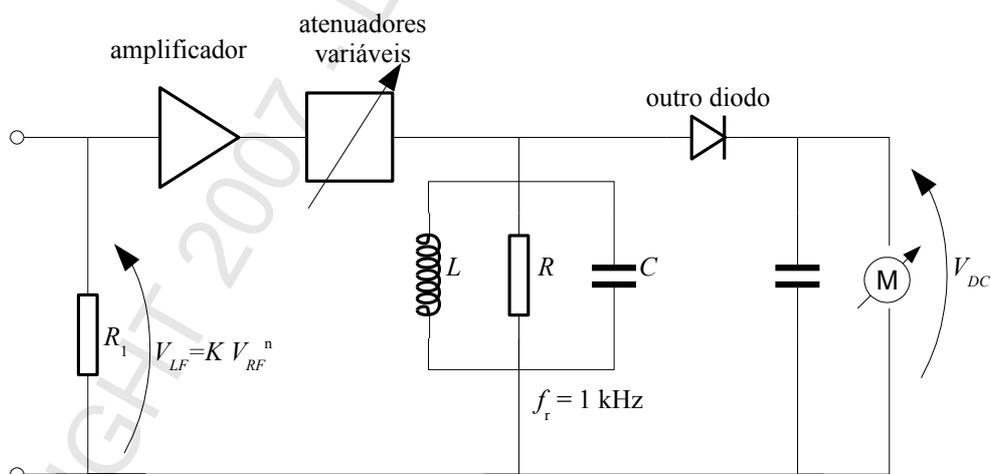


Figura 5 – Diagrama de blocos do medidor de COE.

A linha de transmissão

São apresentadas, a seguir, as fórmulas relacionadas a linhas de transmissão aplicáveis à experiência. As deduções podem ser encontradas em [1]. Todas as grandezas de tensão e corrente a seguir são fasoriais, de forma que, por exemplo, o módulo de $\hat{V}(z)$, representa a amplitude da tensão (senoidal no tempo) e sua fase representa a fase do cosseno em $t=0$.

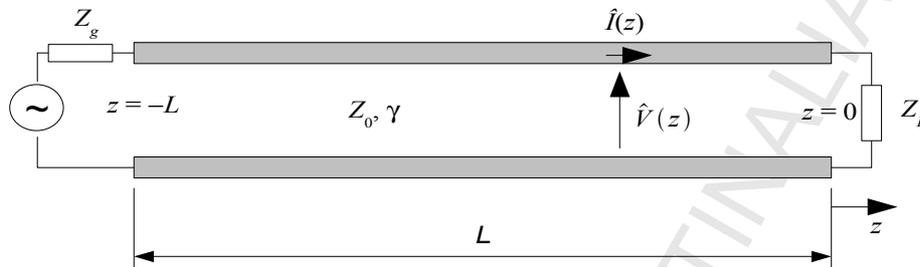


Figura 6 – Diagrama esquemático de uma linha de transmissão.

$$\hat{V}(z) = \hat{V}_+(z) + \hat{V}_-(z) = \hat{V}_+(0)e^{-\gamma z} + \hat{V}_-(0)e^{+\gamma z} \quad (3)$$

$$\gamma = \alpha + j\beta = \text{constante de propagação} \quad (4)$$

α = constante de atenuação

$$\beta = \frac{2\pi}{\lambda} = \text{constante de defasagem}$$

λ = comprimento de onda

$$\hat{V}_+(0) = \text{tensão incidente na carga} \quad \hat{V}_-(0) = \text{tensão refletida na carga}$$

$$\Gamma_L = \frac{\hat{V}_-(0)}{\hat{V}_+(0)} = \frac{Z_L - Z_0}{Z_L + Z_0} = \text{coeficiente de reflexão na carga} \quad (5)$$

$$\Gamma(z) = \frac{\hat{V}_-(z)}{\hat{V}_+(z)} = \Gamma_L e^{2\gamma z} = \text{coeficiente de reflexão num ponto genérico da linha} \quad (6)$$

$$Z(z) = Z_0 \frac{Z_L - Z_0 \tanh(\gamma z)}{Z_0 - Z_L \tanh(\gamma z)} = \text{impedância em um ponto genérico da linha} \quad (7)$$

$$Z(z) = Z_0 \frac{1 + \Gamma(z)}{1 - \Gamma(z)} \quad (8a)$$

$$\Gamma(z) = \frac{Z(z) - Z_0}{Z(z) + Z_0} \quad (8b)$$

$$COE = \frac{\max|\hat{V}(z)|}{\min|\hat{V}(z)|} = \frac{V_{\max}}{V_{\min}} = \frac{1 + |\Gamma|}{1 - |\Gamma|} \quad (9a)$$

$$|\Gamma| = \frac{COE - 1}{COE + 1} \quad (9b)$$

$$\hat{I}(z) = \frac{\hat{V}_+(z) - \hat{V}_-(z)}{Z_0} = \text{corrente em um ponto genérico da linha} \quad (10)$$

Métodos de medida

Medidas de COE

Método direto

Este método emprega a própria definição do COE e admite que a lei do detector seja, efetivamente, quadrática. Para isso, deve-se movimentar o carrinho com a ponta de prova sobre a linha fendida até encontrar uma posição de máxima indicação (máxima tensão). Deve-se, então, ajustar o medidor para o fundo de escala (COE=1) e, em seguida, mover o carrinho para uma posição de mínima indicação. Essa indicação será o valor do COE na linha fendida pois,

$$COE = \frac{V_{max}}{V_{min}} \quad , \quad (11)$$

e o aparelho registra em sua escala a raiz quadrada da corrente (normalizada pelo valor da posição de máximo).

Método com correção da lei do diodo detector

Neste método segue-se o mesmo procedimento anterior, porém, precedido de uma calibração para se estimar o valor médio do índice (n) do detector que será usado para corrigir a leitura pelo método direto, baseado na seguinte dedução. Essa calibração deve ser feita terminando-se a linha fendida com um curto-circuito.

Terminando-se uma linha de transmissão sem perdas com um curto-circuito, sabe-se [1] que o módulo da tensão ao longo da linha é dada por

$$V(z) = V_{max} \left| \text{sen} \left(\frac{2\pi z}{\lambda} \right) \right| \quad . \quad (12)$$

Fazendo-se uma mudança de coordenada, com referência no ponto de máximo, tem-se

$$V(z) = V_{max} \left| \cos \left(\frac{2\pi x}{\lambda} \right) \right| \quad (13)$$

Supondo-se que o índice do detector, n , seja constante (note que ele, na verdade, depende da amplitude do sinal, fazendo com que a calibração não seja perfeita) ao se percorrer a linha com a ponta de prova, a corrente detectada seguirá a expressão

$$I_D(x) = K V_{max}^n \left[\cos \left(\frac{2\pi x}{\lambda} \right) \right]^n = I_{D-max} \left[\cos \left(\frac{2\pi x}{\lambda} \right) \right]^n \quad (14)$$

Referindo-se à Figura 7, tem-se:

$$x=0 \Rightarrow I_D(0) = I_{D-max} \quad x=x_0 \Rightarrow I_D(x_0) = I_{D-max}/2 \quad .$$

Então,

$$\frac{I_D(0)}{I_D(x_0)} = \frac{I_{D-max}}{I_{D-max}/2} = 2 = \frac{I_{D-max}}{I_{D-max} \left[\cos \left(\frac{2\pi x_0}{\lambda} \right) \right]^n} = \frac{1}{\left[\cos \left(\frac{2\pi x_0}{\lambda} \right) \right]^n} \quad . \quad (15)$$

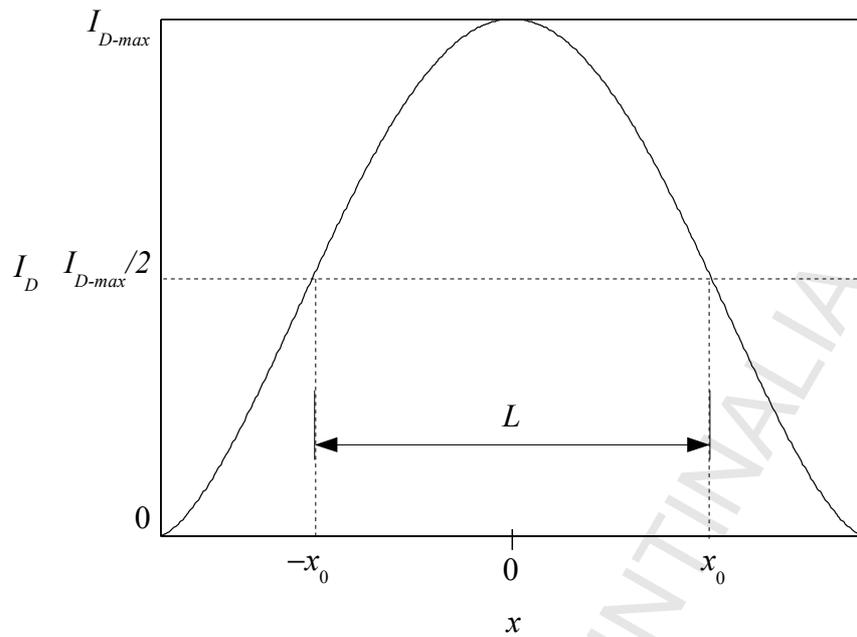


Figura 7 – Corrente detectada ao longo da linha próximo do ponto de máximo.

De (15), tem-se que

$$n = \frac{\log 0,5}{\log \left[\cos \left(\frac{\pi L}{\lambda} \right) \right]}, \quad L = 2 x_0 \quad (16)$$

Na Figura 8 temos o gráfico de n em função de L/λ obtido pela expressão (16) e que pode ser usado para obter uma rápida estimativa do índice do detector.

Uma vez determinado o valor de n , basta corrigir a leitura obtida no medidor de COE (método direto) que, como visto é expressa por

$$COE_{\text{lido}} = \sqrt{\frac{I_{D-\text{max}}}{I_{D-\text{min}}}} = \sqrt{\left(\frac{V_{\text{max}}}{V_{\text{min}}} \right)^n} = (COE_{\text{real}})^{\frac{n}{2}} \quad (17)$$

Logo,

$$COE_{\text{real}} = (COE_{\text{lido}})^{\frac{2}{n}} \quad (18)$$

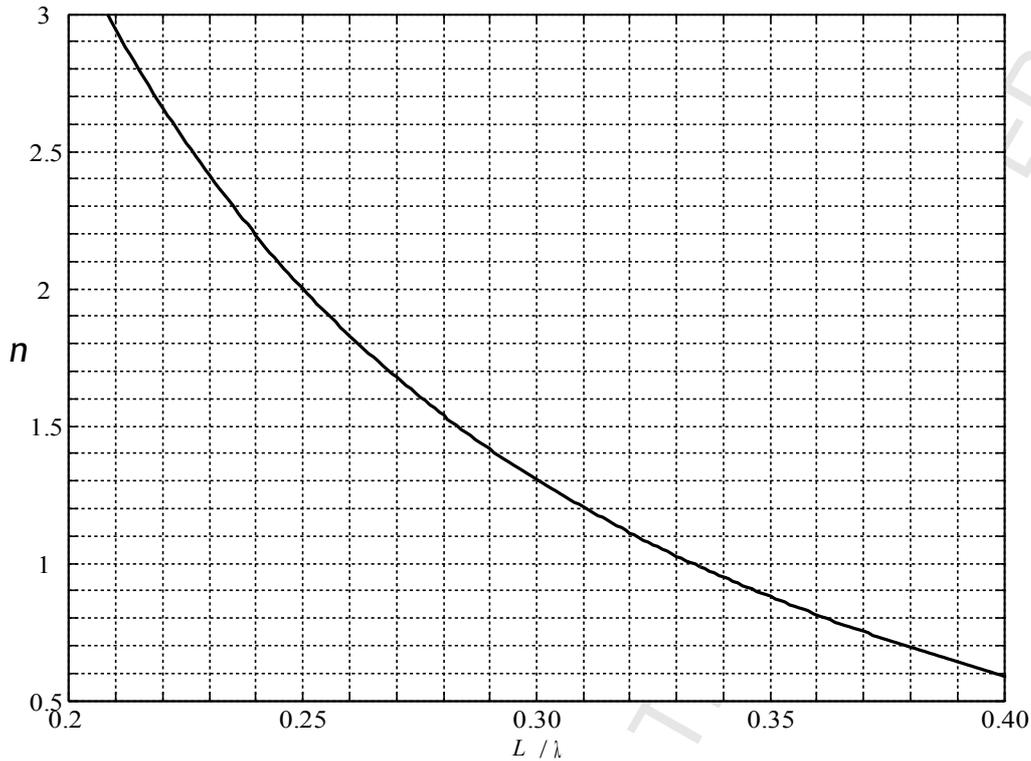


Figura 8 – Relação entre o índice, n , do detector e a distância normalizada entre os pontos de metade da corrente máxima, L/λ .

Método dos 3 dB

Neste método, que também admite lei quadrática do detector, para se determinar o COE na linha fendida é feita a medida da distância entre as duas posições mais próximas ao ponto de mínima tensão para as quais a corrente detectada é o dobro da corrente no ponto de mínimo, como demonstrado a seguir.

Substituindo-se (5) em (3) temos que a tensão num ponto genérico de uma linha sem perdas pode ser escrita como

$$\hat{V}(z) = \hat{V}_+(0) e^{-j\beta z} [1 + \Gamma_L e^{2j\beta z}] = \hat{V}_+(0) e^{-j\beta z} [1 + |\Gamma_L| e^{2j(\beta z + \phi_L)}], \quad (19)$$

onde deixamos explícita a fase do coeficiente de reflexão na carga. Fazendo uma mudança de coordenada, adotando-se $x=0$ como o ponto de mínima tensão, obtemos

$$\hat{V}(x) = \hat{V}_+(0) e^{-j(\beta x + \phi_L + \frac{\pi}{2})} [1 + |\Gamma_L| e^{j(2\beta x - \pi)}]. \quad (20)$$

Normalizando-se em relação à tensão do ponto de mínimo, obtemos

$$\begin{aligned} \frac{|\hat{V}(x)|}{|\hat{V}(x=0)|} &= \frac{|e^{-j\beta x} [1 + |\Gamma_L| e^{j(2\beta x - \pi)}]|}{|1 + |\Gamma_L| e^{j(-\pi)}|} = \frac{|[1 - |\Gamma_L| e^{j(2\beta x)}]|}{(1 - |\Gamma_L|)} \\ &= \frac{\sqrt{(1 + |\Gamma_L|^2) - 2|\Gamma_L| \cos(2\beta x)}}{(1 - |\Gamma_L|)} \end{aligned} \quad (21).$$

Elevando-se essa expressão ao quadrado, substituindo-se (9b), e igualando-a a 2, obtemos como solução para o COE a seguinte expressão:

$$COE = \sqrt{1 + \frac{1}{\text{sen}^2\left(\frac{2\pi x}{\lambda}\right)}} \quad (22)$$

Referindo-se à Figura 9, sendo, então, d a distância entre dois pontos ao redor do ponto de mínimo (com coordenadas $\pm x$) onde a tensão está 3dB acima da tensão no ponto de mínimo, o valor do COE pode ser calculado pela expressão

$$COE = \sqrt{1 + \frac{1}{\text{sen}^2\left(\frac{\pi d}{\lambda}\right)}} \quad (23)$$

Observações:

1. Esse método só pode ser utilizado para medir valores de COE maiores que $\sqrt{2}$ (por quê?);
2. Essa expressão só é exata para a lei quadrática do detector;
3. Para valores de COE elevados, teremos níveis de tensão bastante baixos no ponto de mínimo, fazendo com que a lei do detector seja aproximadamente quadrática nessa região.

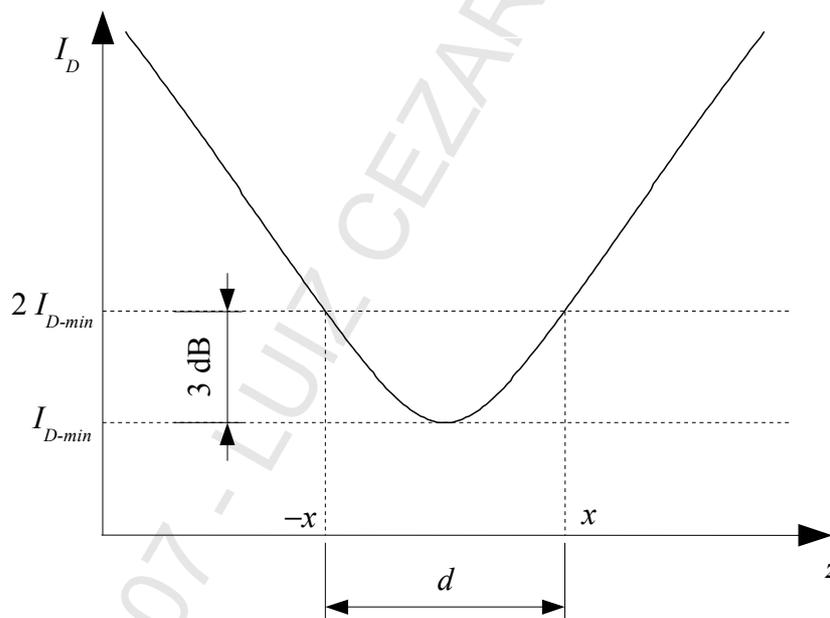


Figura 9 – Corrente detectada ao longo da linha próximo do ponto de mínimo.

Método dos atenuadores

Neste método, a corrente detectada quando a ponta de prova se encontra em uma posição de máximo é feita igual à corrente detectada na posição de mínimo por meio do ajuste de atenuadores de RF colocados entre o gerador e a linha fendida. A diferença de atenuação $\Delta\alpha$ (ou de potência de RF fornecida pelo gerador) entre as leituras em dB dos atenuadores em cada situação já nos fornece diretamente o COE, em dB, na linha fendida, ou seja,

$$\Delta\alpha = 20 \log COE \quad (24)$$

Note que, como estamos igualando os valores das correntes detectadas nas duas situações, isso implica na igualdade das tensões de RF independentemente do índice n do detector.

Medidas de Impedância

Como a impedância em uma linha de transmissão varia de ponto a ponto (expressão (7)), inicialmente é necessário definir-se uma posição de referência arbitrária na qual a impedância será medida. Uma vez obtida a impedância nessa posição, pode-se determinar, através de (7) ou do ábaco de Smith, a impedância em qualquer outro ponto da linha.

Para se definir um plano de referência pode-se, por exemplo, colocar um curto-circuito no fim da linha fendida e anotar-se a posição de um ponto de mínimo ao longo da linha fendida. Um curto-circuito ideal reflete completamente a onda incidente com fase igual a 180 graus, ou seja, temos um ponto de mínimo exatamente na posição do curto-circuito. Assim, ao se localizar um outro ponto de mínimo na linha fendida, estamos localizando um outro ponto que tem a mesma impedância que o ponto onde se encontra o curto-circuito (já que a linha fendida tem perdas desprezíveis).

Posteriormente, substitui-se o curto-circuito pela carga desconhecida, cuja impedância se deseja determinar, mede-se o valor do COE na linha fendida e anota-se a nova posição do mínimo de tensão mais próximo daquele obtido com o curto. A Figura 10 ilustra esse processo.

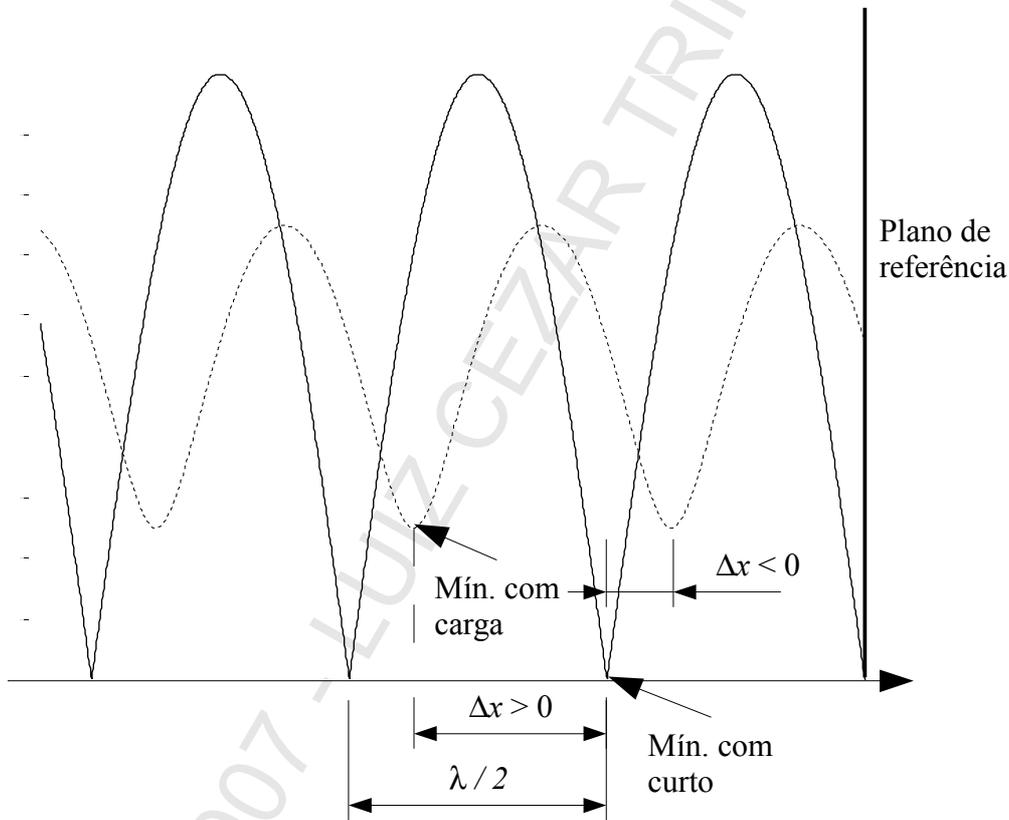


Figura 10 – Tensão ao longo da linha terminada em curto-circuito e com a carga a ser medida.

Para a determinação da impedância desconhecida que foi colocada no mesmo plano de referência que o curto circuito, determina-se o módulo do coeficiente de reflexão utilizando a expressão (9b). Sabe-se que no ponto de mínimo com a carga a fase do coeficiente de reflexão é 180°. Assim, a fase do coeficiente de reflexão no ponto onde havia o mínimo com curto (que é igual à fase no plano de referência) pode ser calculada por

$$\phi_{\text{graus}} = \pm 180^\circ + 720^\circ \times \frac{\Delta x}{\lambda}$$

ou

$$\phi_{\text{rad}} = \pm \pi + 4 \times \pi \times \frac{\Delta x}{\lambda}$$
(25)

e assim, a impedância pode ser, finalmente, calculada pela expressão (8a).

Esse cálculo pode ser também realizada através do ábaco de Smith ou, diretamente, pela expressão

$$z_L = \frac{Z_L}{Z_0} = \frac{2 \times COE - j(COE^2 - 1) \operatorname{sen} \theta}{(COE^2 + 1) + (COE^2 - 1) \cos \theta} \quad \theta = 720^\circ \times \frac{\Delta x}{\lambda} \quad (26)$$

Nessas expressões, Δx é positivo ou negativo como indicado na Figura 12.

Características de cabos

Impedância característica

A partir da expressão (7), obtém-se que a impedância de uma linha de transmissão de comprimento L , terminada em curto-circuito é dada por

$$Z_c = Z_0 \tanh(\gamma L) \quad , \quad (27)$$

e a impedância de entrada da mesma linha, terminada em um circuito aberto, é dada por

$$Z_a = \frac{Z_0}{\tanh(\gamma L)} \quad (28)$$

Logo, a impedância característica de uma linha de transmissão pode ser determinada experimentalmente medindo-se suas impedâncias de entrada em curto e em aberto e calculando-se suas médias geométricas:

$$Z_0 = \sqrt{Z_c \cdot Z_a} \quad (29)$$

Note que esse método exige que a linha tenha exatamente o mesmo comprimento nas duas medidas, ou seja, os planos onde o curto e o aberto se situam devem ser exatamente os mesmos. Por maior que seja o cabo utilizado, se as perdas não forem excessivas, diferenças da ordem de frações de comprimento de onda afetam de forma drástica o resultado.

Constante de atenuação

O coeficiente de reflexão na entrada de uma linha de transmissão de comprimento L terminada em curto circuito é dado por

$$\Gamma_c = e^{j\pi} e^{-2\gamma L} = e^{j\pi} e^{-2(\alpha + j\beta)L} \quad (30)$$

Portanto,

$$|\Gamma_c| = e^{-2\alpha L} \Rightarrow \alpha = \frac{-\ln|\Gamma_c|}{2L} \quad [\text{Np/m}] \quad \text{ou} \quad \alpha_{dB} = \frac{-10 \log|\Gamma_c|}{L} \quad [\text{dB/m}] \quad (31)$$

Note que esse é o coeficiente de reflexão na entrada do cabo a ser caracterizado e não na linha fendida. Ele deve ser determinado a partir da medida de sua impedância de entrada em curto e de sua impedância característica, utilizando a expressão (8b).

Constante de fase

O valor da constante de fase, β , pode ser determinado a partir da fase do coeficiente de reflexão na entrada do cabo em curto-circuito, expressão (30), ou seja,

$$\phi_{\Gamma_c} = \pi - 2\beta L \quad \text{para } \beta \text{ em rad/m} \quad (32)$$

Note, porém, que para L maior que meio comprimento de onda ocorre uma ambigüidade, já que a fase medida varia entre π e $-\pi$. Deve-se, então, utilizar cabos curtos para esse procedimento ou corrigir o valor da fase (subtraindo-se múltiplos de 2π) adequadamente, quando possível.

Parte Experimental

Material Utilizado

- Gerador de RF com atenuadores calibrados;
- Gerador de áudio;
- Linha fendida com toco para sintonia;
- Medidor de COE;
- 1 osciloscópio de 150 MHz de banda;
- Terminações tipo General Radio: curto circuito, circuito aberto, 50 Ω , 100 Ω , 200 Ω ;
- 1 cabo de 50 Ω curto com conectores tipo N macho;
- 3 cabos com conectores BNC/BNC macho;
- 1 adaptador General Radio/Tipo N fêmea;
- 1 adaptador General Radio/BNC fêmea;
- 1 cabo coaxial longo com conectores GR (ou tipo N+adaptadores para GR);
- 1 trecho de cabo coaxial curto com conectores GR (ou tipo N+adaptadores para GR).
- 1 trena.

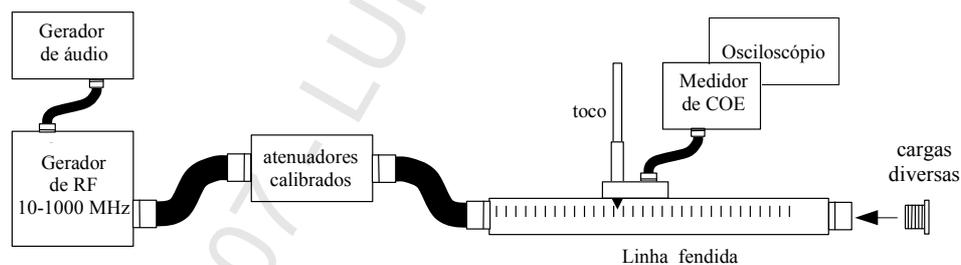


Figura 11: Diagrama da montagem.

Medidas de COE

1. Ajuste o gerador de RF na frequência de 500 MHz, com nível de saída de 0 dBm e modulação AM interna em 1 kHz com índice de modulação de 90 %. Se necessário, um gerador de áudio externo poderá ser usado para modular o gerador.
2. Com o gerador de RF desativado, ajuste a impedância de entrada do medidor de COE para a menor indicação de ruído possível.
3. Desconecte a saída do detector da linha fendida do medidor de COE e ligue-a ao osciloscópio.

4. Com a carga de 50Ω conectada à linha fendida, ative o gerador de RF e sintonize o toco da linha fendida para maximizar o sinal no osciloscópio. Anote a indicação do toco. Qual a frequência do sinal no osciloscópio? Explique.
5. Ajuste o medidor de COE para mínima sensibilidade (máxima atenuação) e conecte-o ao detector da linha fendida.
6. Aumente a sensibilidade do medidor de COE até observar alguma indicação. Reajuste a frequência do gerador de áudio ou a sintonia do medidor de COE para maximizar a indicação.
7. Explique de que forma os ajustes dos itens 4 e 6 afetam a sensibilidade da medida.
8. Meça o COE da carga de 50Ω pelo método direto. Para isto, procure na linha fendida um ponto de máxima indicação e, por meio dos atenuadores do medidor de COE, leve o ponteiro até o fundo de escala. Em seguida, desloque o carrinho para um ponto de mínimo e leia o valor do COE diretamente na escala de 1-4. Anote, também, as posições do mínimo e do máximo.
9. Repita o item anterior para uma das escalas expandidas. Compare o valor obtido com o esperado teoricamente e comente o resultado, explicando as possíveis causas de discrepâncias.
10. Meça o COE para as cargas de 100Ω e 200Ω pelo método direto, de acordo com as instruções do item 8. Compare com os valores teóricos e justifique eventuais discrepâncias. Anote as posições dos mínimos e máximos para facilitar a execução dos próximos itens.
11. Diminua a potência do gerador para -30 dBm. Verifique se no ponto de mínimo o sinal observado está acima do nível de ruído (explique como você fez isso). Repita, então, o item 10, e explique o que se pode concluir desses resultados.
12. Retorne a potência do gerador para 0 dBm e faça a calibração do diodo detector de acordo com o procedimento descrito na teoria. Para os instrumentos que não possuem escala linear, observe que o ponto de 3 dB indica exatamente a metade do ponto de 0 dB (fundo de escala), pois esses instrumentos operam sob lei quadrática, por construção.
13. Determine o COE das cargas de 50Ω , 100Ω e 200Ω pelo método com correção da lei do detector. Comente os resultados e compare-os com os valores teóricos, justificando eventuais discrepâncias.
14. Ajuste, novamente, a potência do gerador de RF para -30 dBm (ou para o valor utilizado no item 11) e meça o COE da carga de 200Ω pelo método dos 3 dB. Justifique a necessidade de se usar uma potência menor para esta medida. Qual a principal vantagem deste método para medições de COE de valor elevado? Quais fatores limitam a precisão deste método?
15. Retorne a potência do gerador para 0 dBm e meça o COE das cargas de 50Ω , 100Ω e 200Ω pelo método dos atenuadores. Para isso, procure um ponto de mínimo na linha fendida, ajuste o medidor de COE para o fundo de escala (0 dB), mova o carrinho para um ponto de máximo, diminuindo a potência do sinal de RF para manter o ponteiro na escala, e ajuste a potência para colocar o ponteiro exatamente no fundo de escala. A diferença entre a potência no mínimo e no máximo será o valor do COE em dB.
16. Repita o item anterior para uma potência inicial de -20 dBm e compare os resultados. O que se pode dizer deste método em relação à lei do detector? Quais fatores limitam sua precisão?
17. Substitua a carga por um curto-circuito e meça o COE pelo método dos atenuadores, para os dois níveis de potência (0 dBm e -20 dBm). Compare os resultados com os esperados teoricamente e comente as dificuldades encontradas e as eventuais fontes de discrepâncias.
18. Construa uma tabela dos resultados obtidos pelos diversos métodos, nas diversas situações ensaiadas. Dentre todos os métodos, qual você julga ser o mais confiável? Por quê?

Medidas de impedância

1. Escolha um nível de potência de RF conveniente. Justifique sua escolha.
2. Com o curto circuito no final da linha fendida, meça o comprimento de onda e determine a frequência do sinal de RF. Descreva o procedimento empregado e justifique-o. Comente eventuais discrepâncias. Anote uma posição de referência para a medida de impedância. Por que isso é necessário?
3. Meça a impedância de uma carga de 200Ω no plano de referência escolhido no item anterior. Discuta o resultado observando que o plano de referência escolhido não coincide com a posição da carga resistiva pura (o ábaco de Smith pode ajudar a visualizar esse fato). Determine, a partir do resultado experimental, a distância entre o plano de referência selecionado e a posição da carga puramente resistiva de 200Ω . Verifique se o resultado obtido é coerente com a montagem da carga utilizada. – O cálculo do valor da carga pode ser feito usando-se o ábaco de Smith ou a fórmula (26) da apostila. Recomenda-se fazer dos dois modos e comparar os resultados para avaliar a precisão da Carta de Smith.

Caracterização de cabos coaxiais

1. Meça, com a trena, o comprimento do cabo coaxial longo disponível.
2. Meça as impedâncias de entrada do cabo sob teste quando terminado em curto e em aberto, usando o conjunto curto/aberto disponível, e utilize esses resultados para determinar a impedância característica do cabo. Observe que este conjunto impõe um curto circuito e um aberto no mesmo plano. Portanto, para a aplicação do método descrito na introdução teórica, basta medir as impedância de entrada em aberto e em curto no mesmo plano de referência. Procure justificar tal procedimento no relatório.
3. A partir dos resultados obtidos no item anterior determine a constante de atenuação do cabo em dB/100 m e compare com os valores de catálogo, se disponíveis.
4. Utilizando-se do trecho de cabo coaxial curto, meça a constante de fase da amostra e calcule a constante dielétrica relativa e a velocidade de fase do cabo sob teste. Procure explicar porque se deve empregar um trecho de cabo curto de cabo nesta medida. Estime a incerteza nos resultados em função da incerteza causada pelo conector.

Referências Bibliográficas

1. MARIOTTO, P. A. *Introdução a Ondas e Linhas*. EPUSP, 2003.