

Medidas elétricas em altas frequências

A grande maioria das medidas elétricas envolve o uso de cabos de ligação entre o ponto de medição e o instrumento de medida. Quando o comprimento de onda do sinal medido aproxima-se do comprimento dos cabos de medição, cuidados especiais devem ser tomados para preservar a integridade das medidas. Em RF (frequências tipicamente superiores a 10 MHz), efeitos provocados pelas capacitâncias e indutâncias dos cabos e pontas de provas tornam-se significativos e devem ser analisados com cuidado. Comprimento dos cabos de ligação e casamento de impedâncias entre fonte de sinal e medidor devem ser levados em consideração, caso contrário efeitos como reflexão de sinais e ondas estacionárias irão introduzir erros consideráveis nas medidas.

Propagação de uma onda eletromagnética (OEM) num condutor:

A velocidade de propagação de uma OEM num cabo condutor é inferior à velocidade da luz no vácuo e é relacionada com a sua permeabilidade magnética (μ) e com a constante dielétrica (ϵ) do isolante que separa os dois condutores. Estes dois parâmetros definem o índice de refração do meio de propagação, dado por :

$$n = c\sqrt{\epsilon\mu} = \sqrt{\epsilon_r\mu_r}$$

onde: $\epsilon = \epsilon_r\epsilon_0$; $\epsilon_0 = 8,8542 \cdot 10^{-12}$ [F/m]

$$\mu = \mu_r\mu_0 ; \mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$$
 [H/m]

A velocidade de propagação da OEM por sua vez é relacionada com o índice de refração do meio pela seguinte expressão:

$$v = \frac{1}{\sqrt{\epsilon\mu}} = \frac{c}{\sqrt{\epsilon_r\mu_r}} = \frac{c}{n}$$

onde c é a velocidade da luz no vácuo ($\approx 3 \cdot 10^8$ m/s).

Em um cabo coaxial típico usado em RF, a velocidade de propagação da OEM é aproximadamente $v \approx 2 \cdot 10^8$ m/s, o que representa um tempo de propagação do sinal da ordem de 5ns para cada metro de cabo.

Quando são efetuadas medidas temporais (osciloscópio) de 2 ou mais sinais distintos de alta frequência em um mesmo circuito, deve-se tomar o cuidado de utilizar cabos de interligação de mesmo comprimento, de modo a manter-se a mesma referência de tempo. Por exemplo, um sinal de 100MHz acoplado através de 2 cabos cujos comprimentos possuam uma diferença de 50cm, será visualizado no instrumento com uma defasagem de 45° .

Baseado neste princípio e com o auxílio de um osciloscópio suficientemente rápido, pode-se determinar o comprimento de um cabo elétrico aplicando-se numa das extremidades um pulso de tensão (ou corrente) e medindo-se o tempo de propagação até o pulso atingir a outra extremidade. Para se ter precisão nessa medida, o pulso aplicado deve ter tempos de subida/descida inferiores ao tempo de propagação da OEM no cabo.

O TDR (*Time Domain Reflectometer*) é um instrumento que opera baseado neste princípio e possibilita, além da medida de comprimento de cabos, a determinação de uma série de outros parâmetros importantes de cabos metálicos e conexões. Uma boa referência sobre o TDR pode ser encontrada em: <http://cp.literature.agilent.com/litweb/pdf/5966-4855E.pdf>

Casamento de impedâncias

Uma fonte de sinal real pode ser representada por uma fonte ideal (tensão ou corrente) associada (em série ou paralelo) à uma impedância característica Z_S , que pode possuir além da parte real (puramente resistiva) uma parte imaginária (indutiva ou capacitiva). Quando uma carga de impedância Z_L é acoplada à fonte, a máxima transferência de potência ocorre quando Z_L é o complexo conjugado de Z_S :

$$R_S + jX_S = R_L - jX_L$$

Deste modo a parte reativa (X_S e X_L) se cancela e a corrente e tensão estão em fase na fonte. Em altas frequência esta é uma condição particularmente importante pois além da máxima transferência de potência, tornam-se significativos os efeitos da reflexão do sinal. Em outras palavras, a parcela do sinal que sai da fonte e não é absorvida pela carga é refletida de volta à fonte, causando sobretensões e/ou sobrecorrentes que podem danificar a fonte e degradar o sinal.

O casamento de impedâncias entre fonte e carga pode tornar-se complicado em altas frequências pois a reatância relativa às capacitâncias e indutâncias parasitas torna-se equivalente às resistências de fonte e carga, devendo portanto serem compensadas adequadamente para um correto acoplamento entre fonte e carga. Além disso, normalmente existe um cabo de ligação entre fonte e carga que apresentará também uma impedância característica, devendo também estar casado com a fonte e carga.

Impedância característica de um cabo

A conexão entre a fonte e a carga necessita normalmente de um cabo de comprimento l , que no caso de RF pode ser da mesma ordem de grandeza do comprimento de onda do sinal. Nessas condições um cabo não se comporta mais como sendo um simples elemento de conexão do circuito com impedância de curto-circuito idealmente nula e impedância de circuito-aberto idealmente infinita. À medida que a frequência aumenta, as componentes capacitiva e indutiva do cabo tornam-se significativas e o mesmo deve ser considerado como uma linha de transmissão.

Um modelo aproximado de cabo coaxial pode ser construído a partir de "infinitos" elementos discretos (indutores e capacitores) conectados como na figura :

Os valores de L e C dependem das características construtivas do cabo. Este arranjo é semelhante a um filtro passa-baixas de n estágios interligados em cascata, com frequência de corte acima da frequência de operação nominal do cabo (tipicamente dezenas de GHz). Uma rápida análise desse circuito leva à uma impedância infinita em DC (capacitores em aberto e indutores em curto). Em AC este circuito apresenta um comportamento que será analisado posteriormente.

A capacitância de um cabo coaxial por unidade de comprimento (F/m) depende do dielétrico utilizado e do diâmetro e distância dos condutores, podendo ser aproximada pela expressão:

$$C = \frac{2\pi\epsilon}{\ln\frac{b}{a}} \text{ [F/m]}$$

onde:

ϵ : constante dielétrica do isolante

a : raio do condutor interno

b : raio do condutor externo

Um valor típico para cabos de osciloscópios é de 100pF/m.

A indutância de um cabo coaxial é relativamente pequena se comparada à de um condutor único de mesmo comprimento, pois o fluxo magnético gerado pela corrente no condutor interno tende a anular o fluxo do condutor externo (correntes em sentido contrário). A sua indutância por unidade de comprimento (H/m) depende da permeabilidade magnética do meio e do diâmetro e distância dos condutores, podendo ser aproximada pela expressão:

$$L = \frac{\mu}{2\pi} \ln \frac{b}{a} \quad [\text{H/m}]$$

onde:

μ : permeabilidade magnética do meio

a : raio do condutor interno

b : raio do condutor externo

Valores típicos para os cabos utilizados em pontas de prova são da ordem de 100nH/m.

Para análise da impedância de um cabo, além das capacitância e indutância deve-se considerar suas resistência série e condutância paralelo por unidade de comprimento. Considerando estes 4 parâmetros elétricos de um cabo qualquer, sua impedância característica complexa Z_0 é definida por:

$$Z_0 = \sqrt{\frac{R + j\omega L}{G + j\omega C}}$$

onde :

R = resistência série do condutor (em Ω por unidade de comprimento (resistência DC))

G = a condutância do dielétrico (em mhos por unidade de comprimento (condutância DC))

L = indutância do cabo (em H por unidade de comprimento)

C = capacitância do cabo (em F por unidade de comprimento)

Para os dielétricos utilizados atualmente, o termo G é extremamente pequeno e pode ser desprezado. Em baixas frequências o termo $j\omega L$ é pequeno comparado ao R e pode ser desprezado.

Desta forma, para baixas frequências, a impedância característica de um cabo é dominada pela sua capacitância e resistência série, podendo ser aproximada por:

$$Z_{0LF} \cong \sqrt{\frac{R}{j\omega C}}$$

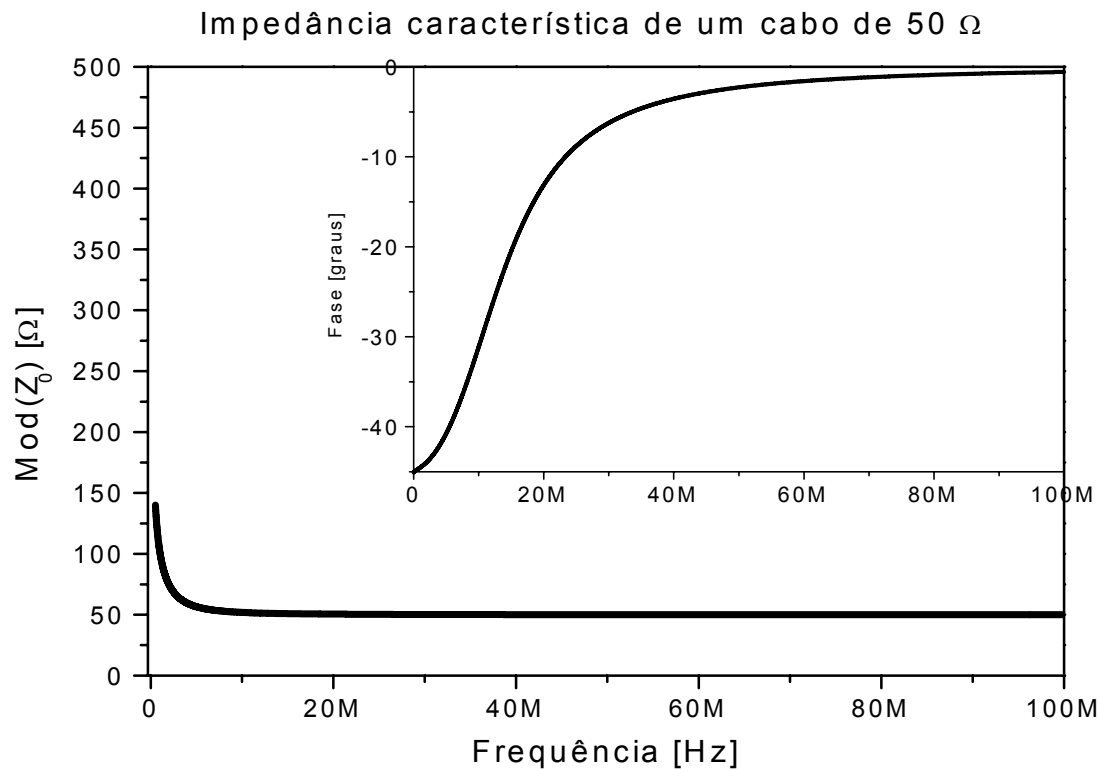
Este comportamento é semelhante ao de um filtro passa baixas: quanto maior a frequência, menor a impedância; para DC a impedância torna-se infinita (circuito aberto).

Em altas frequências, o termo $j\omega L$ passa a ser significativo e a impedância do cabo passa a ser dominada pelas suas indutância e capacitância por unidade de área, podendo ser aproximada por:

$$Z_{0HF} \cong \sqrt{\frac{j\omega L}{j\omega C}} = \sqrt{\frac{L}{C}}$$

Observa-se que nessas condições a impedância do cabo mantém-se constante independente do seu comprimento e da frequência de utilização. Isso é válido desde que o dielétrico e o condutor mantenham constantes suas características em função da frequência. Na prática existem cabos que mantêm essas características para frequências até dezenas de GHz.

A figura abaixo mostra um gráfico do módulo da impedância Z_0 e da sua fase em função da frequência para um cabo padrão de 50Ω . Observa-se que para frequências acima de 10MHz o



módulo da impedância se mantém praticamente constante a 50Ω , no entanto a fase só atinge valores próximos de zero grau para frequências superiores a 50MHz . Nestas condições a impedância do cabo é quase puramente resistiva, apesar dos principais elementos serem sua indutância e capacitância, pois existe um efeito de cancelamento mútuo da parte imaginária.

Valores típicos de impedâncias para cabos coaxiais são 50Ω (principal padrão em telecomunicações) e 75Ω (televisão à cabo). Pares trançados têm uma impedância da ordem de 100Ω enquanto que cabos de linhas paralelas (usados em antenas de TV) têm impedância típica de 300Ω . "Flat-cables" possuem impedância típica entre duas linhas da ordem de 75Ω . Os cabos coaxiais usados em osciloscópios possuem um alto valor de R, de modo que sua impedância é variável em toda a faixa de frequências de operação.