UFPR-DELT
Programa de Pós Graduação em
Engenharia Elétrica

Integridade de Sinais Elétricos

Prof. Dr. Marlio Bonfim

1º semestre 2014

- Composição do curso (60 horas aula) :
- Aulas expositivas
- Exercícios em sala
- Aulas de simulação
- Aulas práticas
- Avaliação escrita
- Trabalho prático (estudo de caso)

Tópicos abordados:

- Modelos de parâmetros concentrados
- Modelos de parâmetros distribuídos
- Problemas associados à alimentação de circuitos
- Problemas associados às perdas em altas frequência
- Reflexão de sinais e casamento de impedâncias
- Problemas associados à interferência eletromagnética

1. Introdução

- Integridade de Sinais em Engenharia Elétrica (SI) trata dos problemas associados à geração, transmissão e distribuição de sinais de alta frequência através de meios físicos
- Em altas frequências condutores, isolantes e dispositivos eletrônicos possuem comportamento distinto do esperado em baixas frequências
- Os modelos tradicionais dos dispositivos não funcionam adequadamente
- Elementos parasitas ateram significativamente o comportamento do circuito

1. Introdução

3 formas de abordar a Integridade de Sinais em Engenharia Elétrica:

- "Regras de ouro": aproximações comumente utilizadas que possibilitam uma compreensão rápida e intuitiva do problema
- Aproximações analíticas: possibilitam uma análise relativamente simples e rápida porém pouco precisa
- Simulações numéricas: possibilitam uma grande precisão porém exigem recursos computacionais adequados aos problemas analisados.

1. Introdução

2 formas de abordar problemas de circuitos elétricos:

Parâmetros concentrados:

- Componentes são considerados pontuais
- Modelagem simplificada com elementos discretos de circuito (R, L, C)

Parâmetros distribuídos:

- Dimensões dos componentes e interconexões são consideradas
- Efeitos de propagação e reflexão das ondas eletromagnéticas
- Modelos relativamente complexos adequados para altas frequências (linhas de transmissão)

1. Introdução

Definição de Alta frequência:

Parâmetros concentrados:

•Impedância dos elementos parasitas em série é > 1/10 do elemento principal

•Impedância dos elementos parasitas em paralelo é < 10x do elemento principal

•Parâmetros distribuídos:

•Comprimento das estruturas > 1/10 do comprimento de onda no meio em questão

1. Introdução

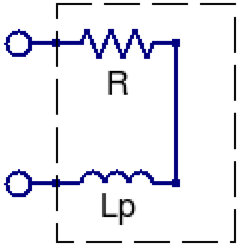
Parâmetros concentrados (máxima frequência do sinal)

•Impedância dos elementos parasitas > 1/10 do elemento principal

$$|X_C| = (2\pi f C)^{-1}$$

$$|X_L| = (2\pi f L)$$

Exemplo: indutância parasita série de um resistor



•R= 1 kΩ; Lp=10 nH; f=100 MHz; $|X_L|$=6,28 Ω → baixa frequência

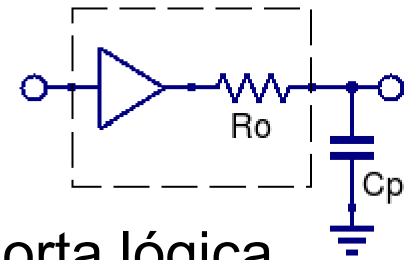
•R= 50 Ω; Lp=10 nH; f=100 MHz; $|X_L|$=6,28 Ω → alta frequência

1. Introdução

Parâmetros concentrados (tempos de subida/descida)

•Tempos de subida/descida dos sinais < $\tau/10$

$$\tau = RC \qquad \tau = \frac{L}{R}$$



Exemplo: circuito RC equivalente de uma porta lógica

•Ro=10 Ω; Cp=10 pF; $\tau=10^{-10}$ s; tr=10^{-8} s → baixa frequência

•Ro=1 kΩ; Cp=10 pF; $\tau=10^{-8}$ s; tr=10^{-8} s → alta frequência

1. Introdução

Parâmetros distribuídos (máxima frequência do sinal)

•Comprimento das estruturas > 1/10 do comprimento de onda no meio em questão

$$\lambda = \frac{v}{f} \qquad v = \frac{c}{n} \qquad c = 3.10^{8} \ m/s$$

Exemplo considerando a máxima frequência do sinal:

•ℓ=10 cm; f=1 MHz; n=1,5; λ=200 m => baixa frequência

•ℓ=10 cm, f=1 GHz; n=1,5; λ=0,2 m => alta frequência

1. Introdução

•**Parâmetros distribuídos (tempos de subida/descida)**

$$t_r \approx \frac{0{,}35}{f} \qquad \lambda \approx \nu \frac{t_r}{0{,}35}$$

Exemplo considerando os tempos de subida (t_r) e descida (t_f) do sinal:

•ℓ=10 cm; t_r=1 µs; n=1,5; λ=571 m => baixa frequência

•ℓ=10 cm; t_r=1 ns; n=1,5; λ=0,571 m => alta frequência

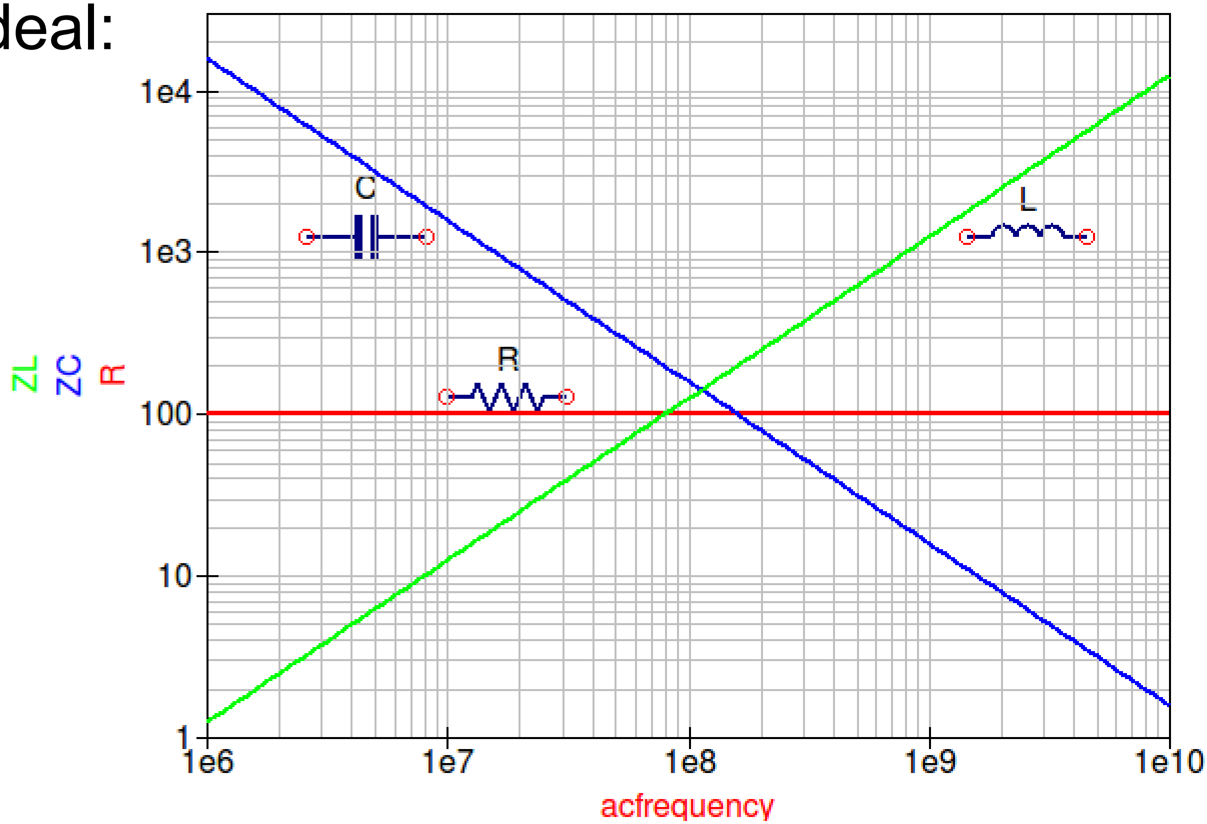
Resistores, Capacitores e indutores :

Comportamento ideal:

$$Z_R = R$$

$$Z_L = \omega L$$

$$Z_C = \frac{1}{\omega C}$$



2. Modelos de Parâmetros Concentrados

Modelos de componentes passivos :

- Os modelos simplificados de componentes passivos (resistores, capacitores, indutores) são redes de circuitos elétricos usadas para incluir os efeitos dos elementos "parasitas" na análise de circuito tradicional
- O comportamento em baixas frequências define a natureza do componente
- O comportamento em altas frequências é fortemente influenciado pelos elementos parasitas e construtivos do componente

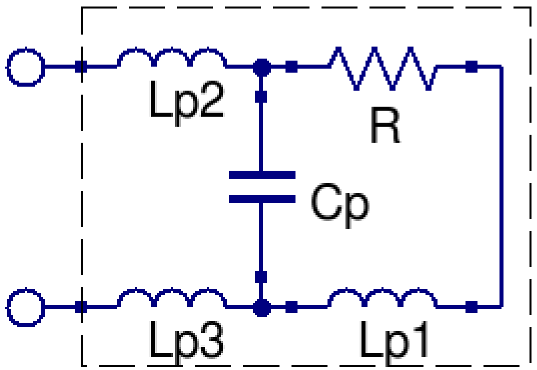
2. Modelos de Parâmetros Concentrados

Resistores:

•Indutância parasita Lp1 em série: formada pelo próprio elemento resistivo

•Indutâncias parasitas Lp2 e Lp3: formadas pelos terminais do componente

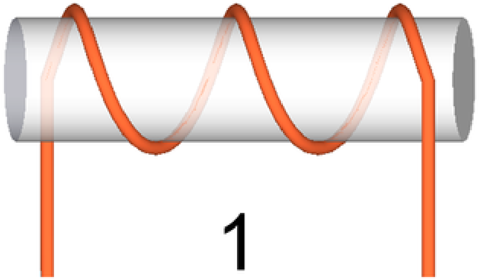
•Capacitância parasita Cp em paralelo: formada pelos eletrodos de conexão e o isolante do corpo do resistor

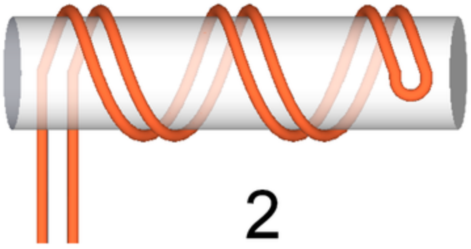


Resistores : características contrutivas

Filme fino :

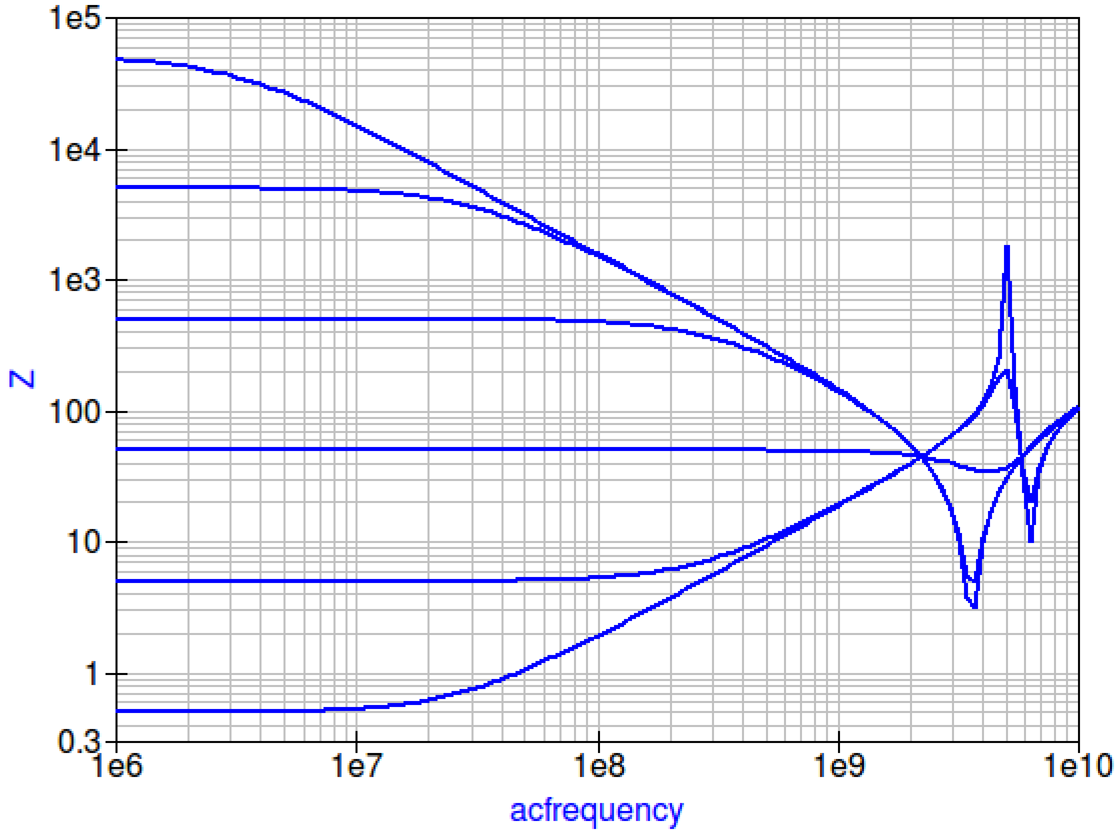
Fio :





Resistor THT (Through-hole technology):

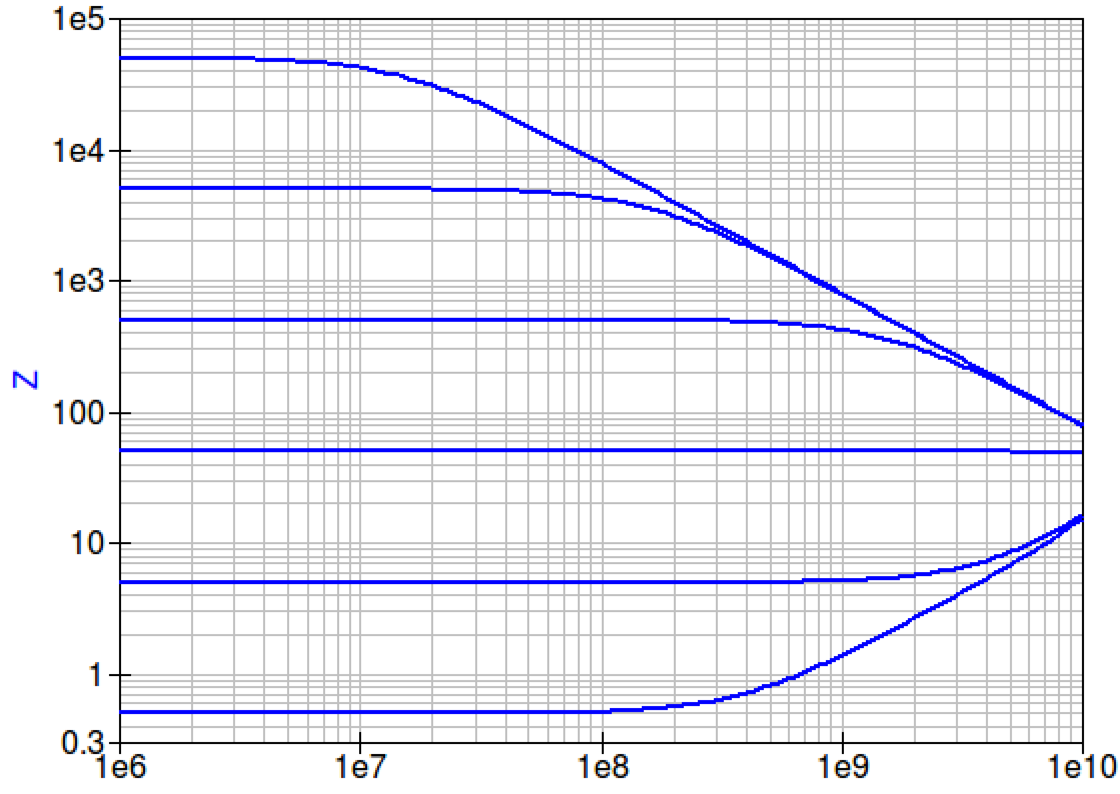
- Valores típicos:
- Lp1: 5 nH
- Lp2 e Lp3: 4 nH
- Cp: 2 pF



2. Modelos de Parâmetros Concentrados

Resistor SMT (Surface-mount technology):

- Valores típicos:
- Lp1: 200 pH
- Lp2 e Lp3: 5 pH
- Cp: 0.2 pF



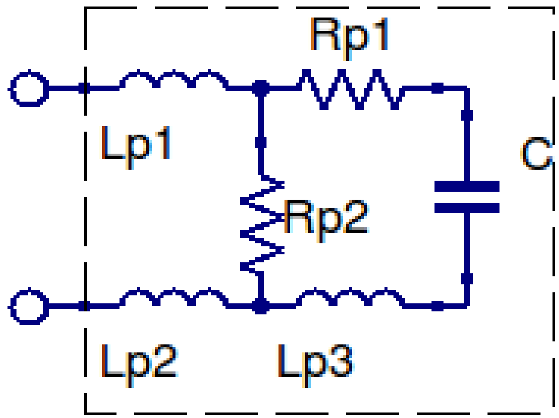
2. Modelos de Parâmetros Concentrados

Capacitores:

•Indutância parasita Lp1 em série: indutância do condutor que forma o capacitor

•Indutâncias parasitas Lp2 e Lp3: formada pelos terminais do componente

•Resistência parasita em série Rp1: representa as resistências do condutor que forma o capacitor e seus terminais



•Resistência parasita em paralelo Rp2: representa as perdas do dielétrico

Capacitores : características construtivas

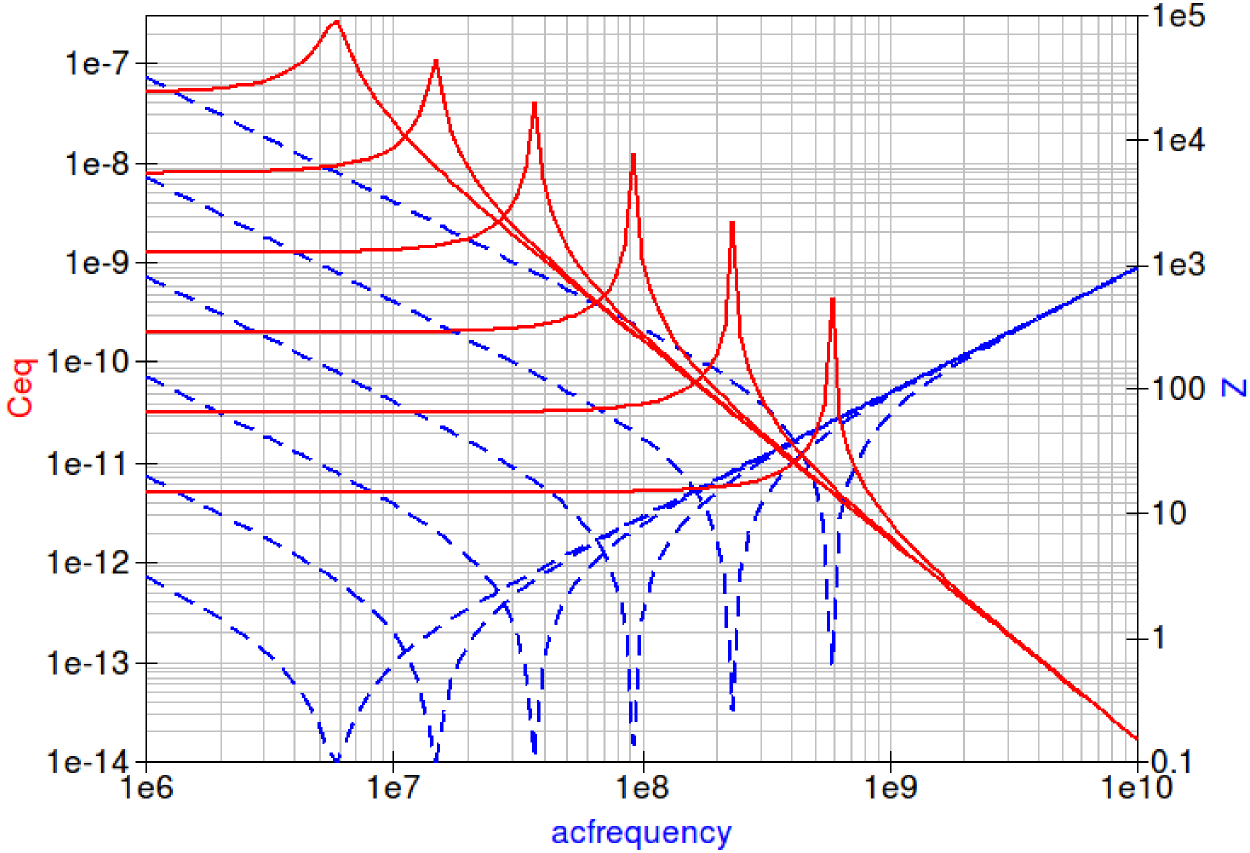
Cerâmico:

Eletrolitico:

Poliéster:

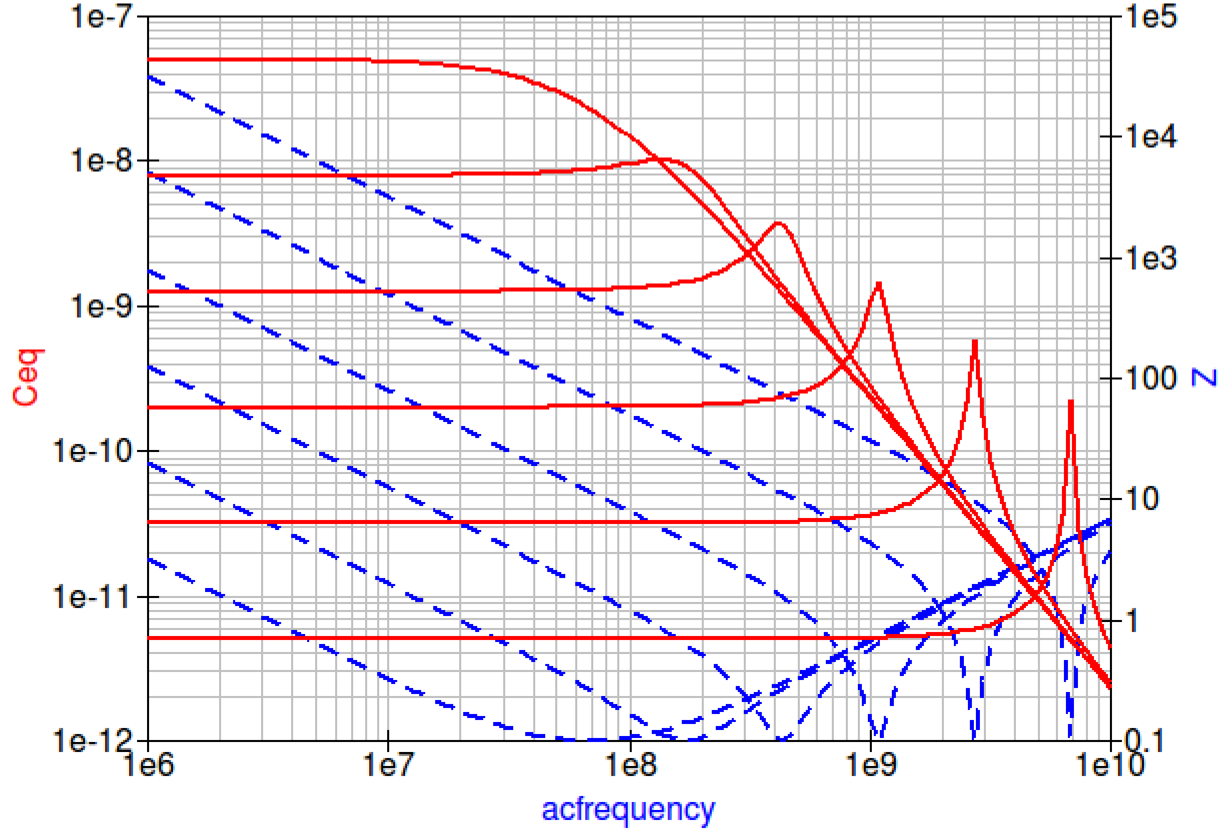
Capacitores THT:

- Valores típicos:
- Lp1 : 5 nH
- Lp2 e Lp3: 5 nH
- Rp1: 100 mΩ
- Rp2 : 10 GΩ



Capacitores SMT:

- Valores típicos:
- Lp1: 200 pH
- Lp2 e Lp3: 5 pH
- Rp1: 10 mΩ
- Rp1: 10 GΩ



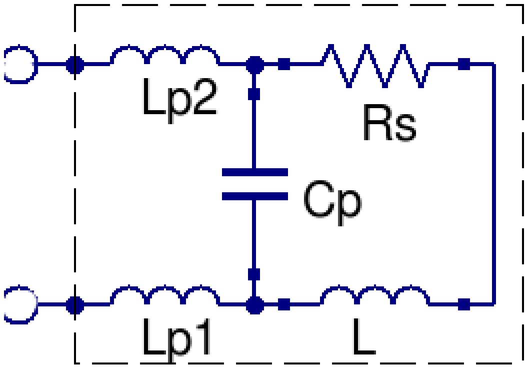
2. Modelos de Parâmetros Concentrados

Indutores:

•Resistência parasita Rs em série: formada pela resistência do condutor

•Indutâncias parasitas Lp1 e Lp2: formadas pelos terminais do componente

•Capacitância parasita Cp em paralelo: formada pela sobreposição das diversas camadas de espiras e o dielétrico de isolação



Indutores:

Toroidal:

Carretel:

Ferrite:

2. Modelos de Parâmetros Concentrados

Indutores THT:

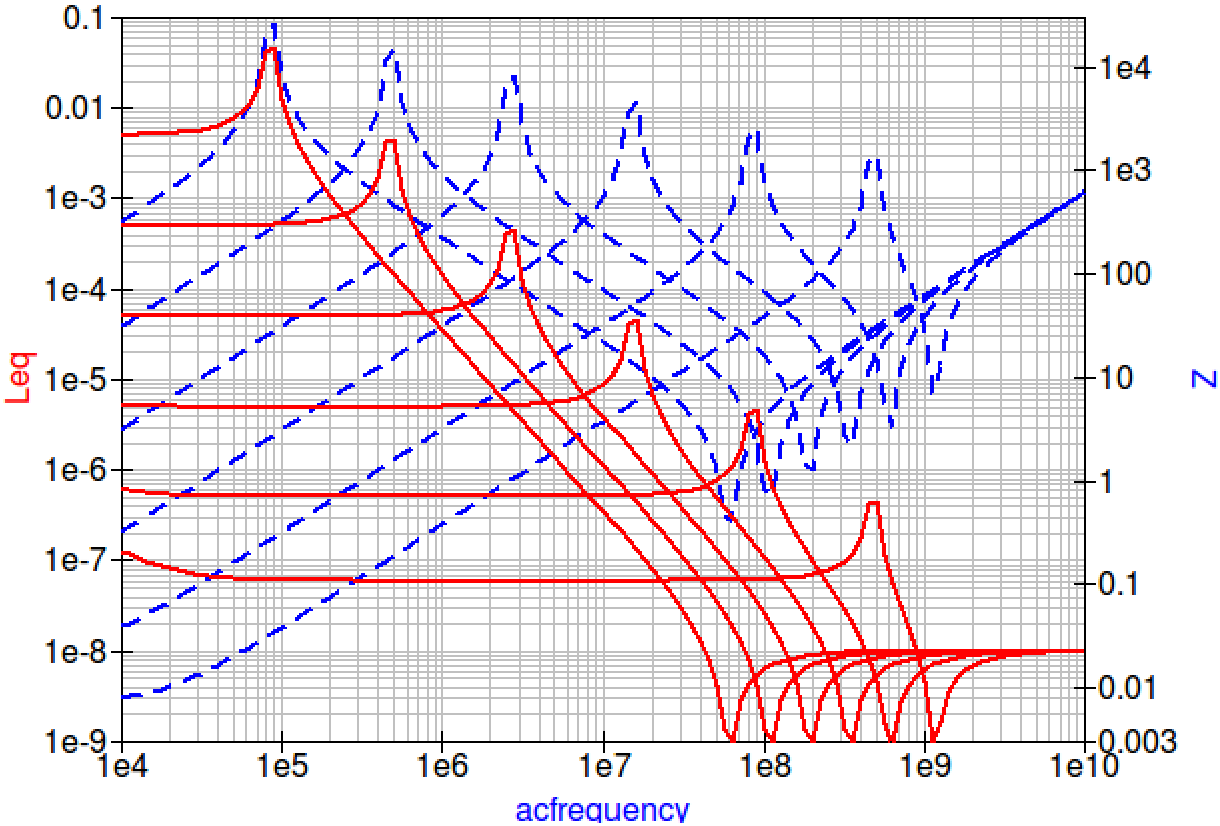
•Valores típicos :

•Lp1 : 5 nH

•Lp2 : 5 nH

$$Cp = 10^{-8}\sqrt{L}$$

$$Rp = \sqrt{10^3 L}$$

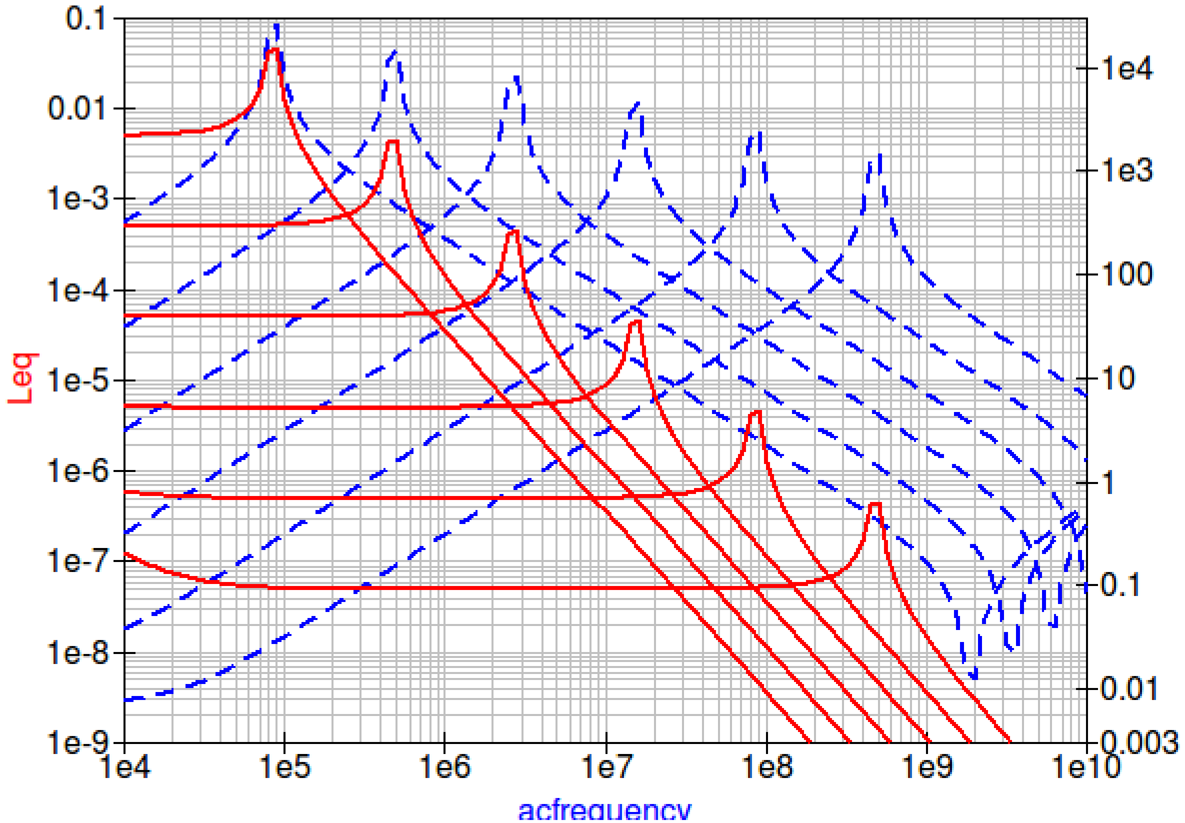


Indutores SMT:

- Valores típicos :
- Lp1 : 5 pH
- Lp2 : 5 pH

$$Cp = 10^{-8}\sqrt{L}$$

$$Rp = \sqrt{10^3 L}$$



Apêndice

- Resposta de um sistema Gaussiano

A system is said to have a Gaussian response if it is characterized by the following frequency response

$$H(\omega) = e^{-\frac{\omega^2}{\sigma^2}}$$

where $\sigma > 0$ is a constant, related to the high frequency cutoff by the following relation:

$$f_H = \frac{\sigma}{2\pi}\sqrt{\frac{3}{20\log e}} \cong 0.0935\sigma$$

The corresponding impulse response can be calculated using the inverse Fourier transform of the shown frequency response

$$\mathcal{F}^{-1}\{H\}(t) = h(t) = \frac{1}{2\pi}\int_{-\infty}^{+\infty} e^{-\frac{\omega^2}{\sigma^2}} e^{i\omega t} d\omega = \frac{\sigma}{2\sqrt{\pi}} e^{-\frac{1}{4}\sigma^2 t^2}$$

Applying directly the definition of step response

$$V(t) = V_0 H * h(t) = \frac{V_0}{\sqrt{\pi}}\int_{-\infty}^{\frac{\sigma t}{2}} e^{-\tau^2} d\tau = \frac{V_0}{2}\left[1 + \operatorname{erf}\left(\frac{\sigma t}{2}\right)\right] \Leftrightarrow \frac{V(t)}{V_0} = \frac{1}{2}\left[1 + \operatorname{erf}\left(\frac{\sigma t}{2}\right)\right]$$

Apêndice

• Resposta de um sistema Gaussiano

Solving for t's the two following equations by using known properties of the error function

$$0.1 = \frac{1}{2}\left[1 + \operatorname{erf}\left(\frac{\sigma t_1}{2}\right)\right] \qquad 0.9 = \frac{1}{2}\left[1 + \operatorname{erf}\left(\frac{\sigma t_2}{2}\right)\right]$$

the value $t = -t_1 = t_2$ is then known and since $t_r = t_2 - t_1 = 2t$

$$t_r = \frac{4}{\sigma}\operatorname{erf}^{-1}(0.8) \cong \frac{0.3394}{f_H}$$

and then

$$t_r \cong \frac{0.34}{BW} \quad \Longleftrightarrow \quad BW \cdot t_r \cong 0.34$$

Apêndice

For a simple one stage low pass RC network, rise time is proportional to the network time constant $\tau = RC$:

$$t_r \cong 2.197\tau$$

The proportionality constant can be derived by using the output response of the network to a step function input Signal (electrical engineering) of V_0 amplitude, aka its step response:

$$V(t) = V_0(1 - e^{-\frac{t}{\tau}}) \quad \Longleftrightarrow \quad \frac{V(t)}{V_0} = (1 - e^{-\frac{t}{\tau}})$$

Solving for t's the two equations

$$0.1 = (1 - e^{-\frac{t_1}{\tau}}) \qquad 0.9 = (1 - e^{-\frac{t_2}{\tau}})$$

the times t_1 and t_2 to 10% and 90% of steady-state value thus known

$$t_1 = \tau(\ln 10 - \ln 9) \qquad t_2 = \tau \ln 10$$

Subtracting t_1 from t_2

$$t_2 - t_1 = \tau \cdot \ln 9$$

which is the rise time. Therefore rise time is proportional to the time constant:

$$t_r = \tau \cdot \ln 9 \cong \tau \cdot 2.197$$

Apêndice

- Resposta de um sistema Gaussiano

Now, noting that

$$\tau = RC = \frac{1}{2\pi f_H}$$

then

$$t_r \cong \frac{2.197}{2\pi f_H} \cong \frac{0.349}{f_H}$$

and since the high frequency cutoff is equal to the bandwidth

$$t_r \cong \frac{0.35}{BW} \quad \Longleftrightarrow \quad BW \cdot t_r \cong 0.35$$

This formula implies that if the bandwidth of an oscilloscope is 350 MHz, its 10% to 90% risetime is 1 nanosecond.