

Filtros

Parte 1: Análise

SEL 369 Micro-ondas/SEL5900 Circuitos de Alta
Frequência

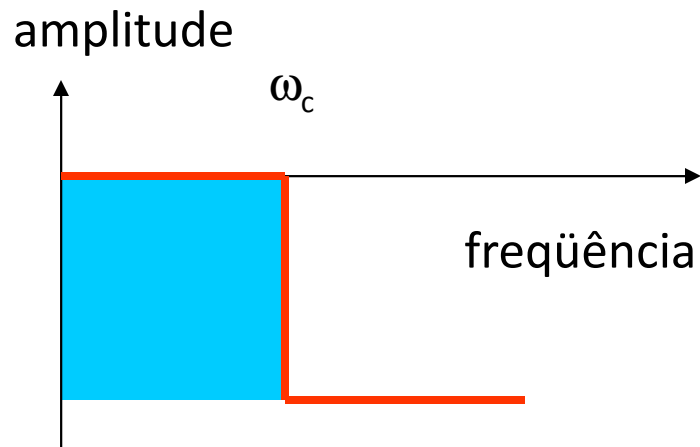
Amílcar Careli César
Departamento de Engenharia Elétrica da EESC-USP

Atenção!

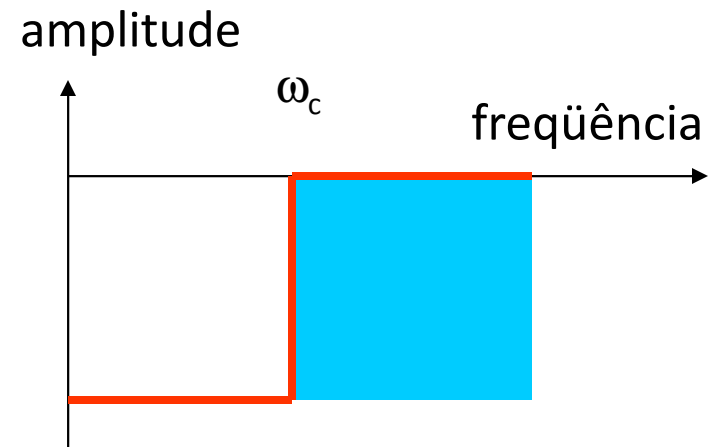


- ✓ Este material didático é planejado para servir de apoio às aulas de **SEL-369 Micro-ondas**, oferecida aos alunos regularmente matriculados no curso de engenharia elétrica/eletrônica e **SEL-5900 Circuitos de Alta Frequência**, oferecida aos alunos regularmente matriculados no curso de pós-graduação em engenharia elétrica.
- ✓ Não são permitidas a reprodução e/ou comercialização do material.
- ✓ solicitar autorização ao docente para qualquer tipo de uso distinto daquele para o qual foi planejado.

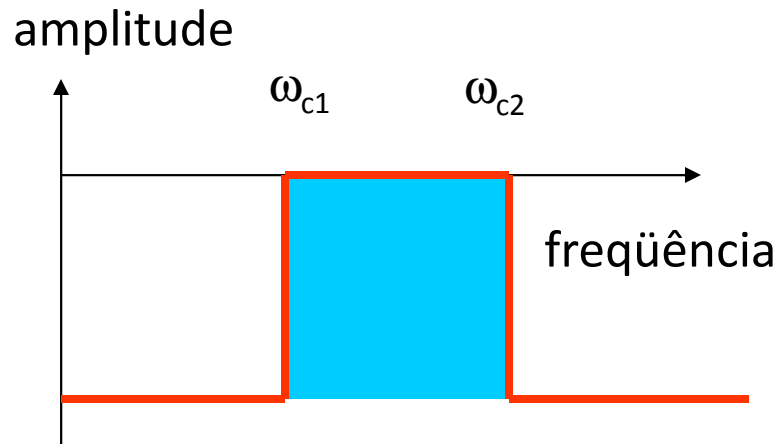
Resposta em frequências de filtros ideiais



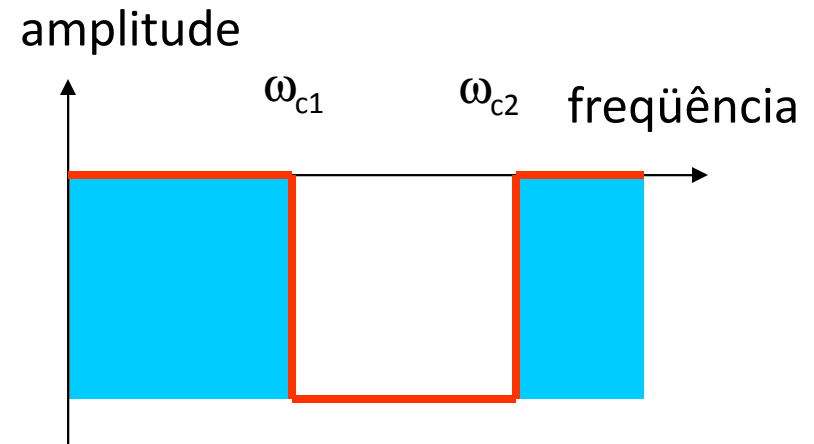
Passa-baixas



Passa-altas



Passa-faixa

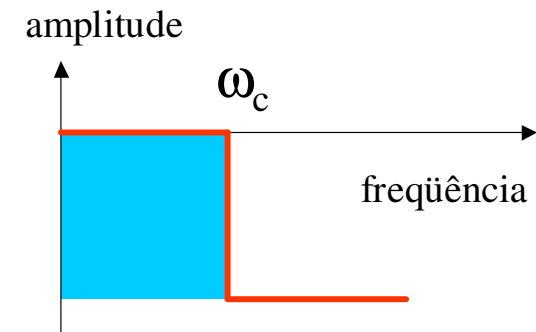


Rejeita-faixa

Aproximações para a função ideal

Como não é possível realizar a função ideal, aproximações podem ser feitas

$$\left| t(j\omega) \right|^2 = \frac{1}{1 + A_n(\omega^2)}$$



$$\text{onde } \begin{cases} A_n \ll 1 & \text{para } 0 \leq \omega/\omega_c < 1 \\ A_n \gg 1 & \text{para } \omega/\omega_c > 1 \end{cases}$$

$$\left| t(j\omega) \right|^2 \text{ deve ser uma função par de } \omega \text{ e } A_n \text{ uma função de } \omega^2$$

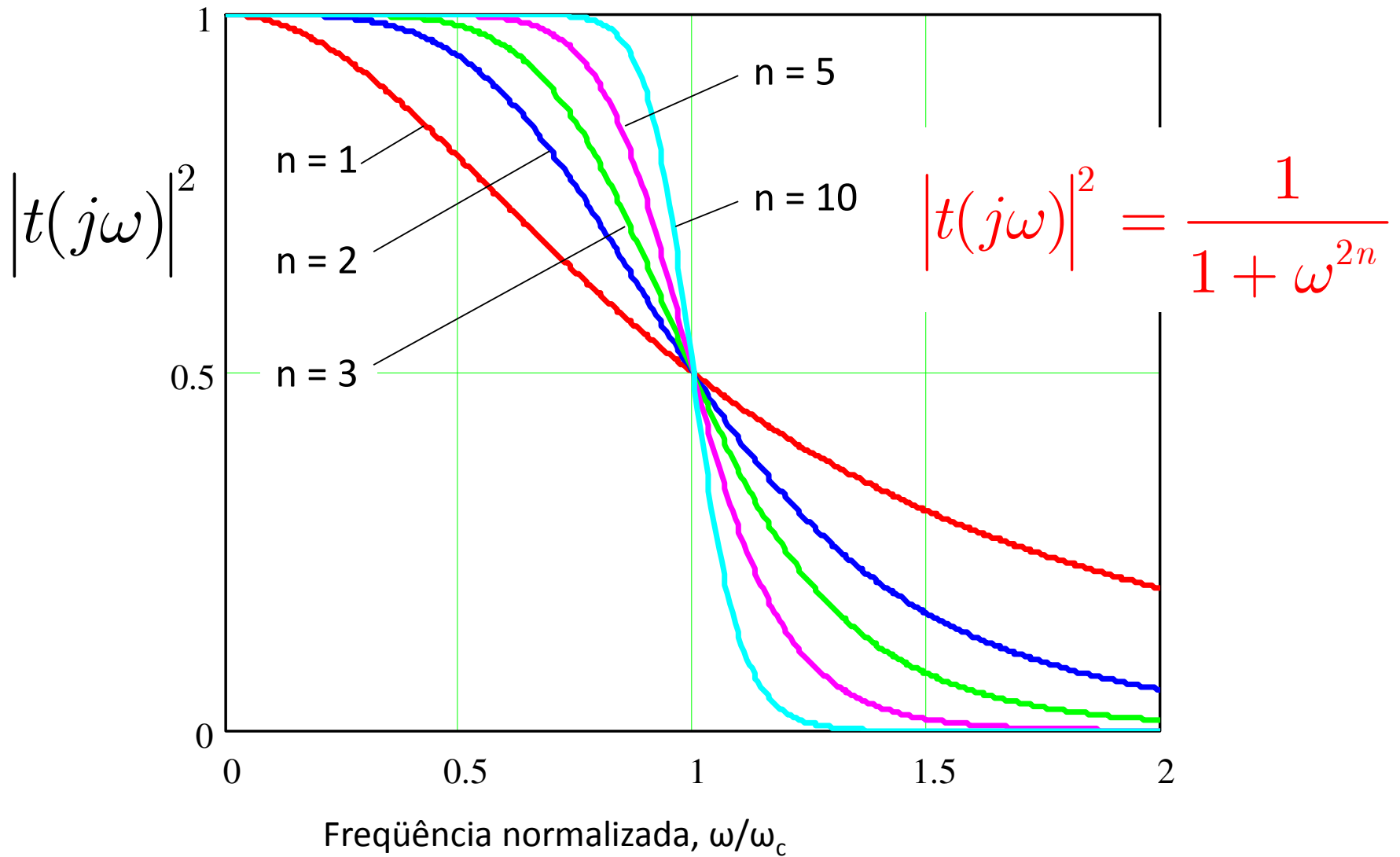
Filtro de Butterworth

Nesta realização de função ideal, $A_n = \omega^{2n}$ e

$$|t(j\omega)|^2 = \frac{1}{1 + \omega^{2n}}$$

Na faixa passante a resposta é tanto mais plana quanto maior for o valor de n .

Filtro de Butterworth



Filtro de Tschebysheff

A função ideal é realizada por meio dos polinômios de Tchebyshev

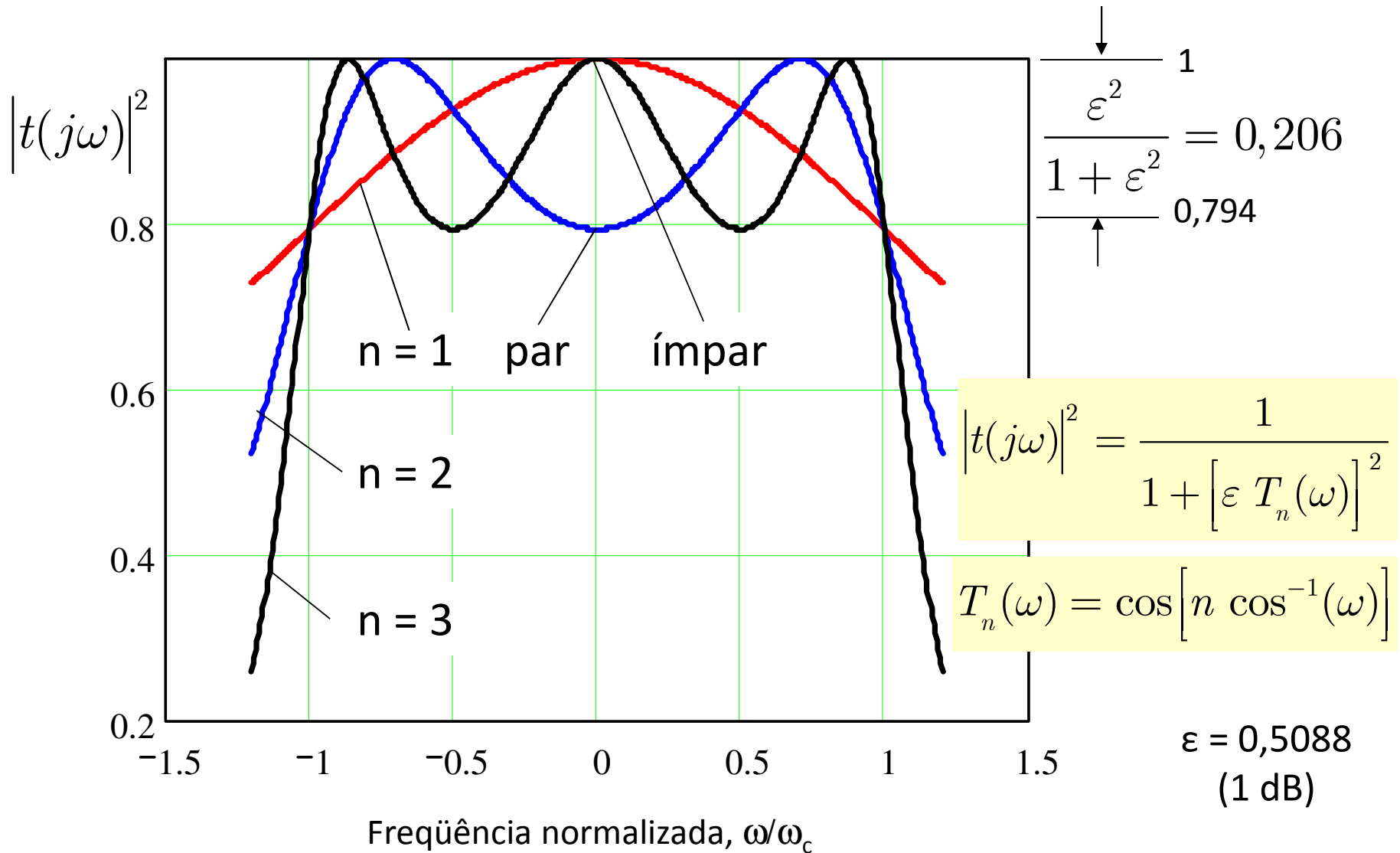
$$A_n = \left(\varepsilon T_n \right)^2$$

$$|t(j\omega)|^2 = \frac{1}{1 + \left[\varepsilon T_n(\omega) \right]^2}$$

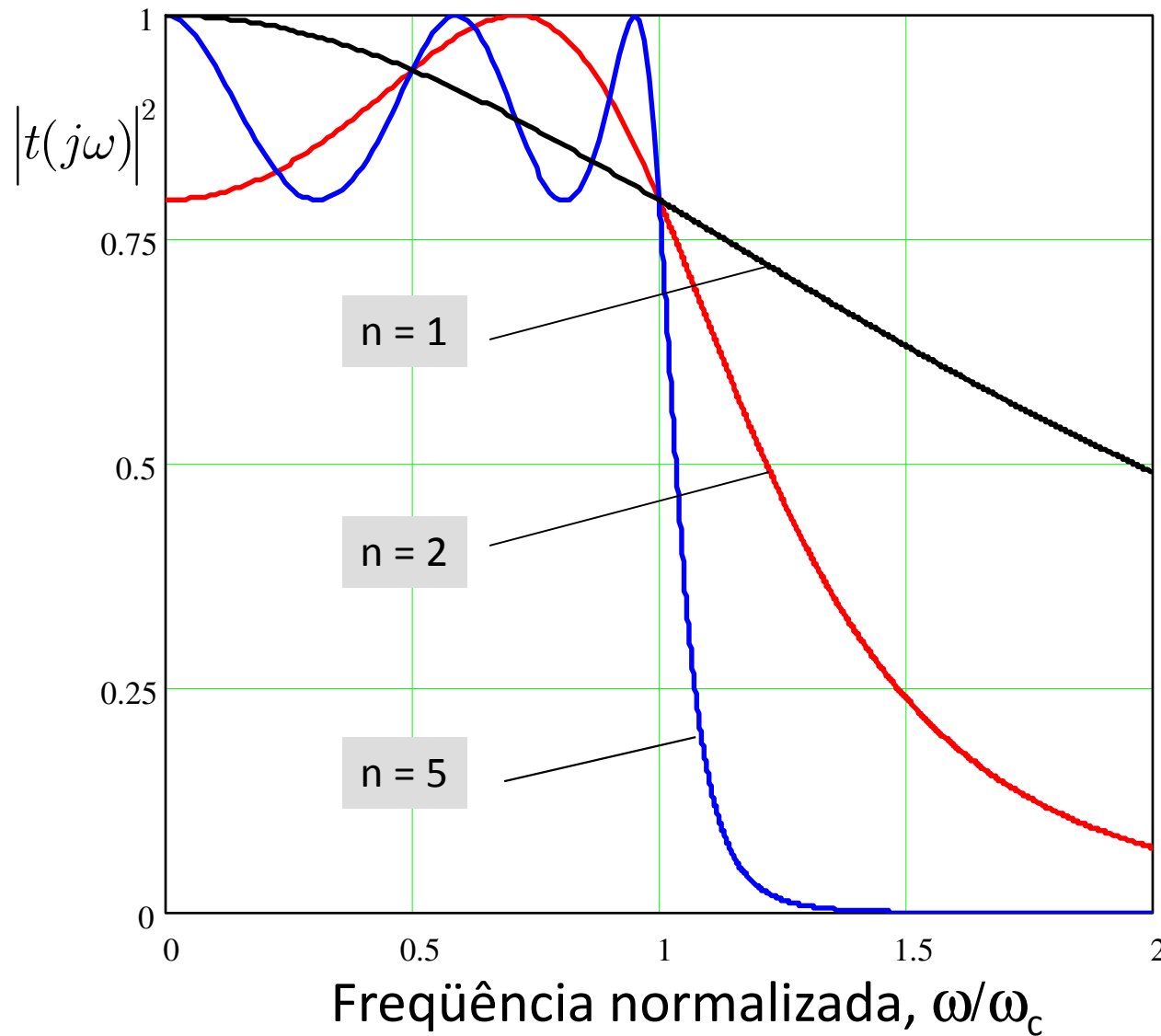
$$T_n(\omega) = \begin{cases} \cos \left[n \cos^{-1}(\omega) \right] & \text{para } 0 \leq \omega \leq 1 \\ \cosh \left[n \cosh^{-1}(\omega) \right] & \text{para } \omega > 1 \end{cases}$$

$10 \log(1 + \varepsilon^2)$ dB é a ondulação em dB

Filtro de Tschebyscheff



Filtro de Tschebyscheff



$$|t(j\omega)|^2 = \frac{1}{1 + [\varepsilon T_n(\omega)]^2}$$

$$0 \leq \omega \leq 1$$

$$T_n(\omega) = \cos[n \cos^{-1}(\omega)]$$

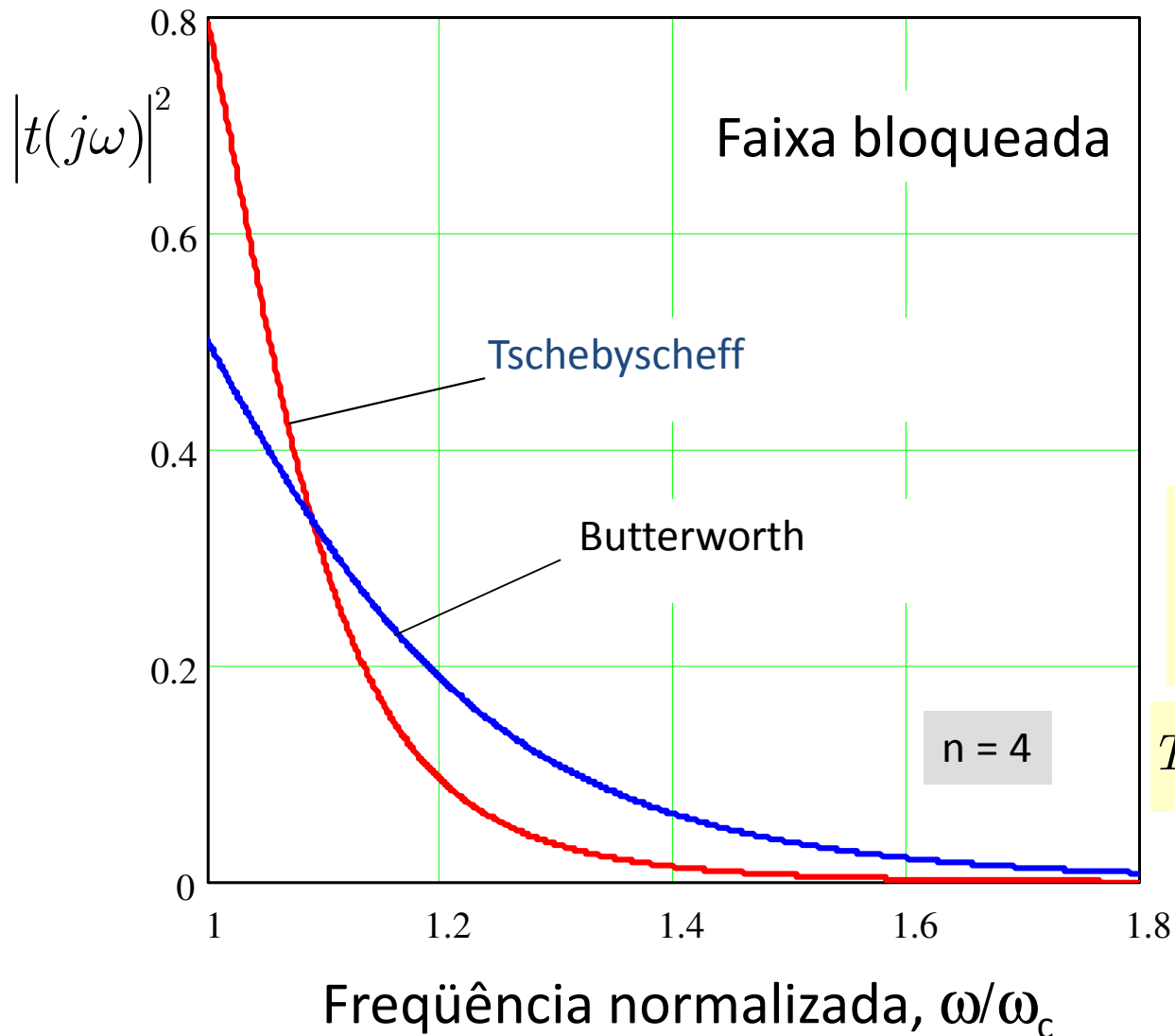
$$\omega \geq 1$$

$$T_n(\omega) = \cosh[n \cosh^{-1}(\omega)]$$

$$\varepsilon = 0,5088$$

(1 dB)

Butterworth vs. Tschebyscheff -1



Butterworth

$$|t(j\omega)|^2 = \frac{1}{1 + \omega^{2n}}$$

Tschebyscheff

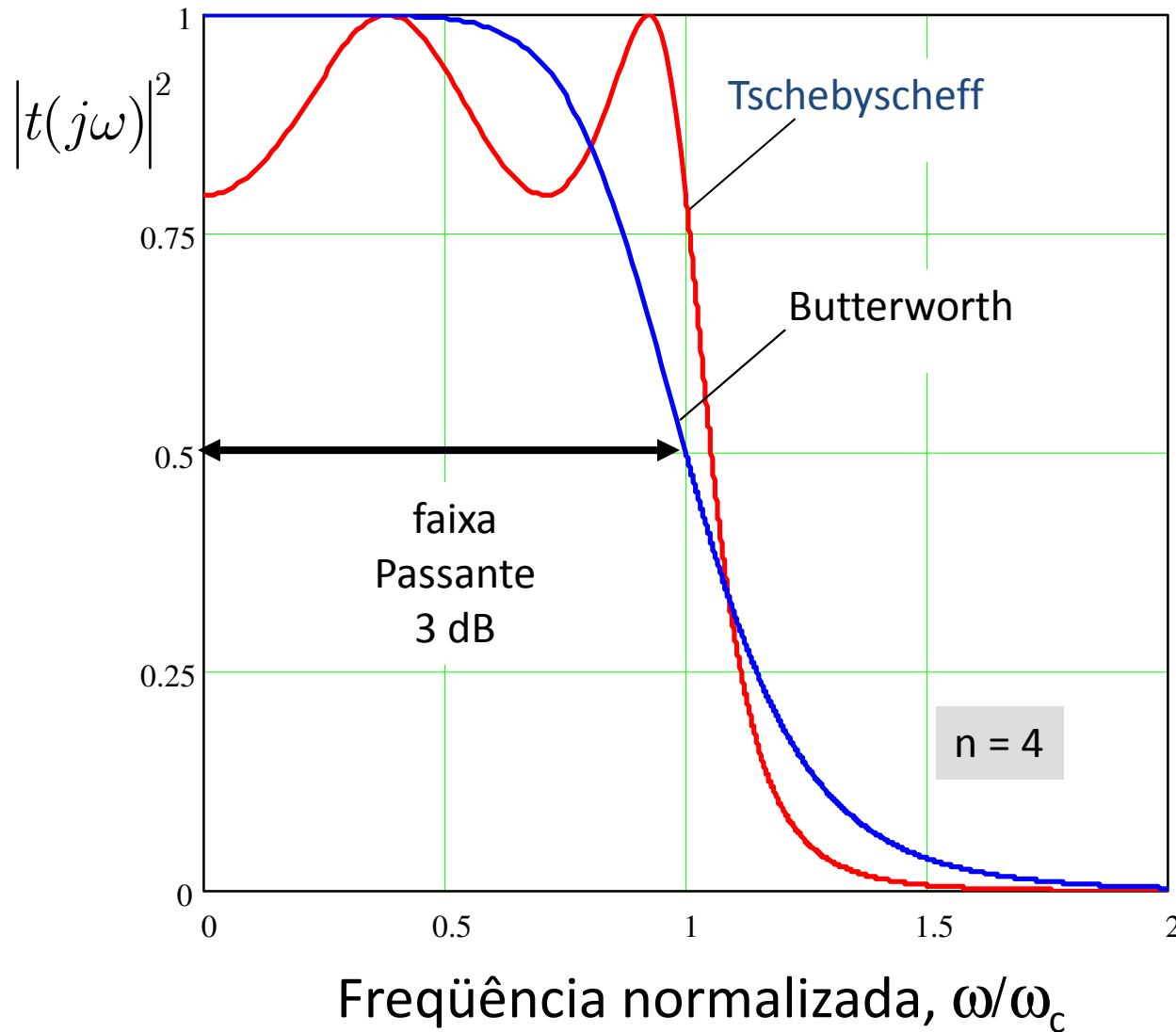
$$|t(j\omega)|^2 = \frac{1}{1 + [\varepsilon T_n(\omega)]^2}$$

$$T_n(\omega) = \cosh[n \cosh^{-1}(\omega)]$$

$$\varepsilon = 0,5088$$

(1 dB)

Butterworth vs. Tschebyscheff -2



Butterworth

$$|t(j\omega)|^2 = \frac{1}{1 + \omega^{2n}}$$

Tschebyscheff

$$|t(j\omega)|^2 = \frac{1}{1 + [\varepsilon T_n(\omega)]^2}$$

$$T_n(\omega) = \cosh \left[n \cosh^{-1}(\omega) \right]$$

$$\varepsilon = 0,5088$$

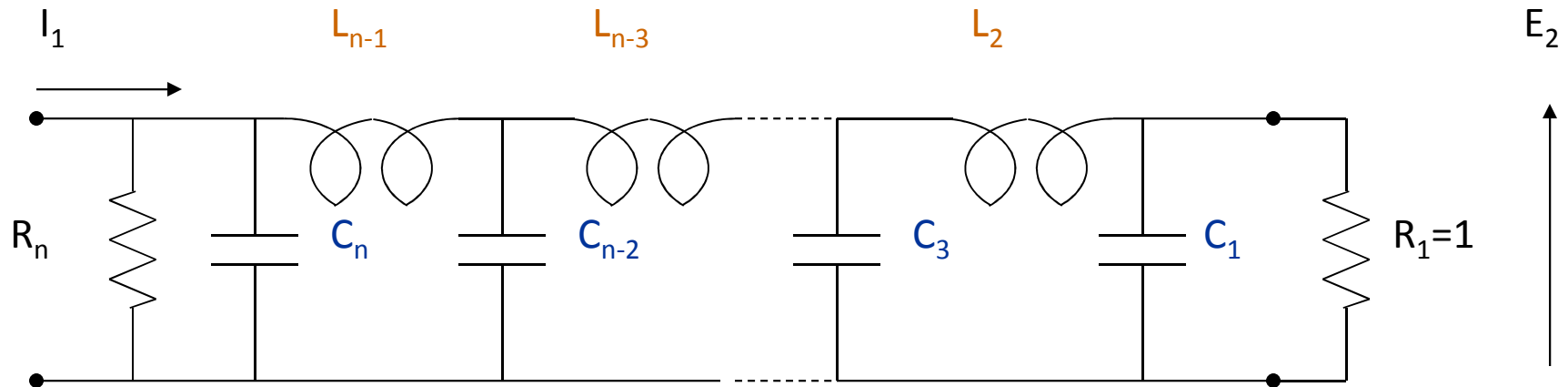
(1 dB)

Filtro protótipo

Projeto

- ✓ O filtro protótipo é projetado a partir de um conjunto de dados
 - Relação entre as impedâncias de entrada e saída
 - Atenuação desejada em uma frequência na faixa bloqueada
 - Frequência de corte do filtro
- ✓ O projeto é realizado por meio de programas de computador ou de tabelas
- ✓ O número de seções é determinado pelo conjunto de dados

Configurações de filtros passa-baixas-1

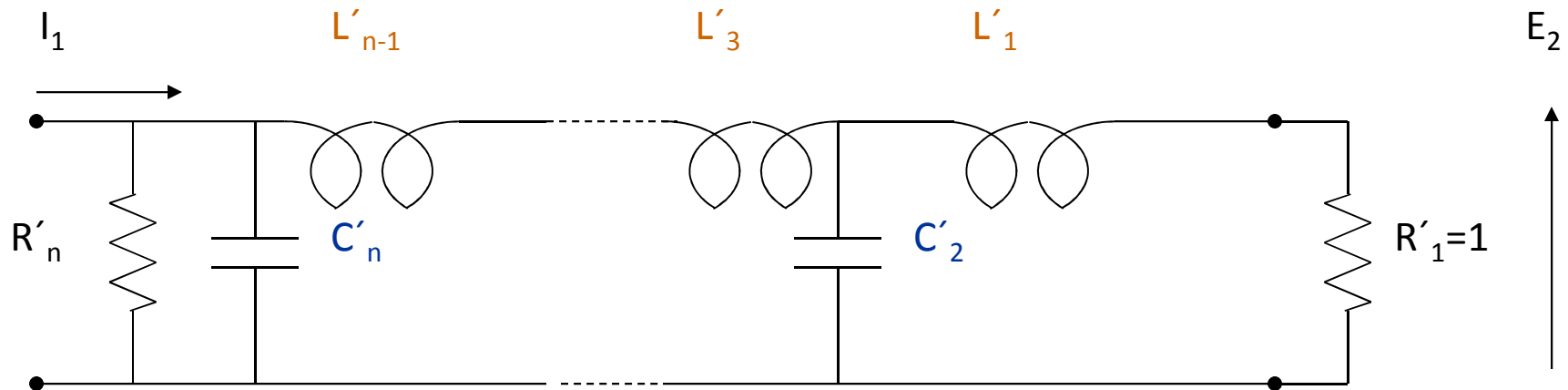


Forma geral de filtro passa-baixas com fonte de corrente na entrada e ***n*** ímpar

$$r = \frac{R_n}{R_1} \quad \text{Relação entre resistências de entrada e saída}$$

Fonte: L. Weinberg, 'Additional tables for design of optimum ladder networks', J.F.I., pp. 7-23, julho de 1957

Configurações de filtros passa-baixas-2

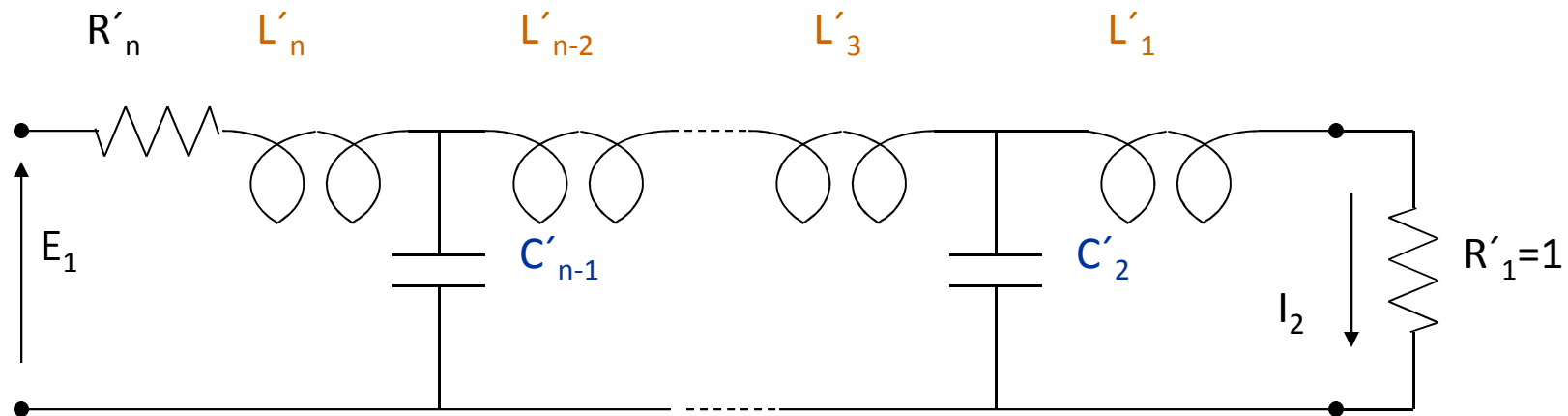


Forma geral de filtro passa-baixas com fonte de corrente na entrada e **n par**

$$r = \frac{G'_n}{G'_1} \quad \text{Relação entre condutâncias de entrada e saída}$$

Fonte: L. Weinberg, 'Additional tables for design of optimum ladder networks', J.F.I., pp. 7-23, julho de 1957

Configurações de filtros passa-baixas-3

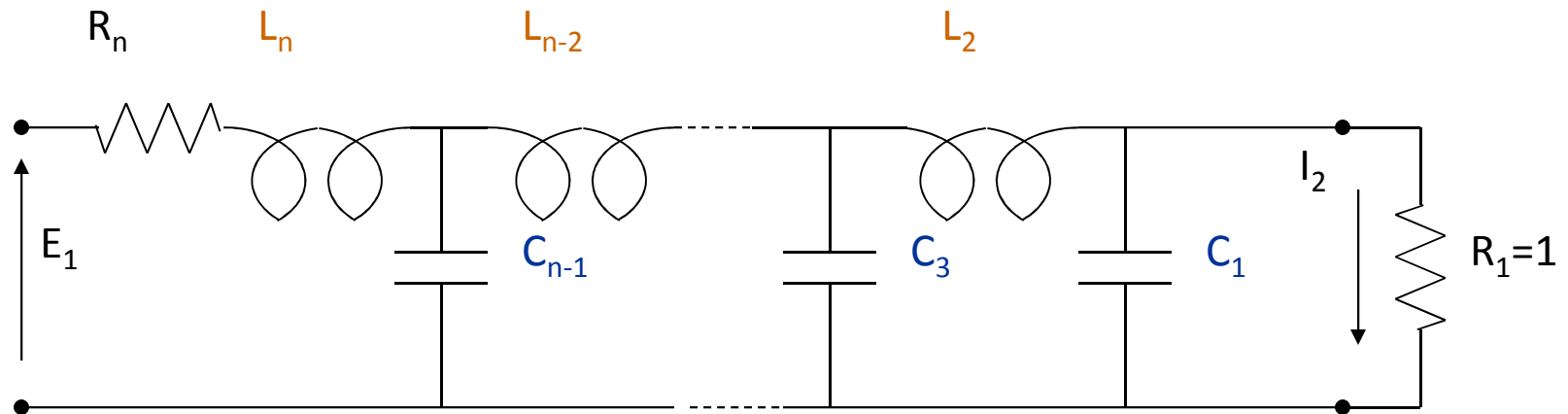


Forma geral de filtro passa-baixas com fonte de tensão na entrada e **n ímpar**

$$r = \frac{G'_n}{G'_1} \quad \text{Relação entre condutâncias de entrada e saída}$$

Fonte: L. Weinberg, 'Additional tables for design of optimum ladder networks', J.F.I., pp. 7-23, julho de 1957

Configurações de filtros passa-baixas-4



Forma geral de filtro passa-baixas com fonte de tensão na entrada e ***n*** par

$$r = \frac{R_n}{R_1} \quad \text{Relação entre resistências de entrada e saída}$$

Fonte: L. Weinberg, 'Additional tables for design of optimum ladder networks', J.F.I., pp. 7-23, julho de 1957

Normalização das quantidades

Seções resistivas (R_G ou R_L)

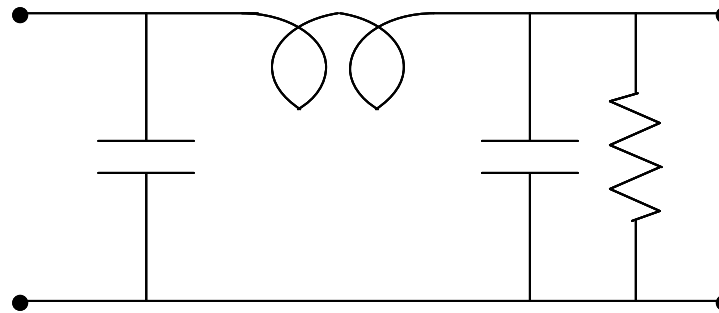
$$R_G (R_L) = RR_i$$

Seções indutivas

$$L_i = \frac{g_i R}{\omega_c}$$

Seções capacitivas

$$C_i = \frac{g_i}{R\omega_c}$$



R_i, g_i : obtidos nas tabelas

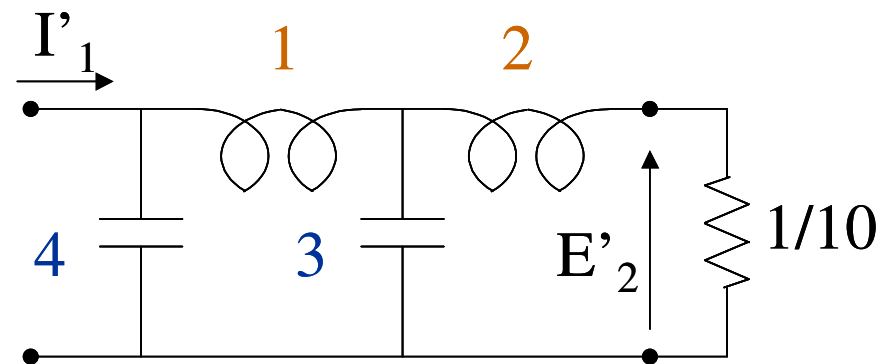
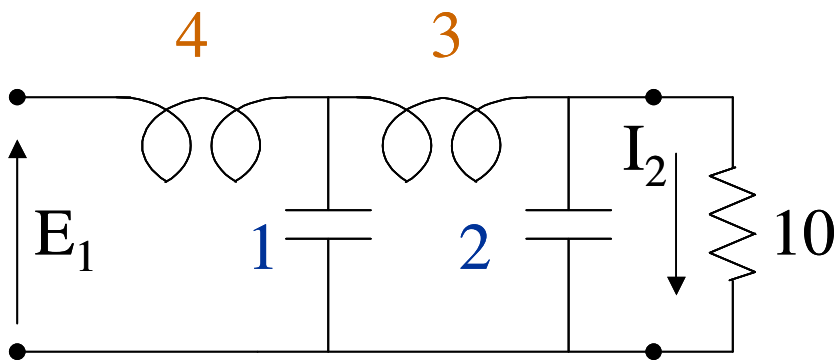
R_G, R_L, L_i, C_i : valores com a normalização removida

R : resistência de normalização

ω_c : frequência de corte, rad/s

Dualidade

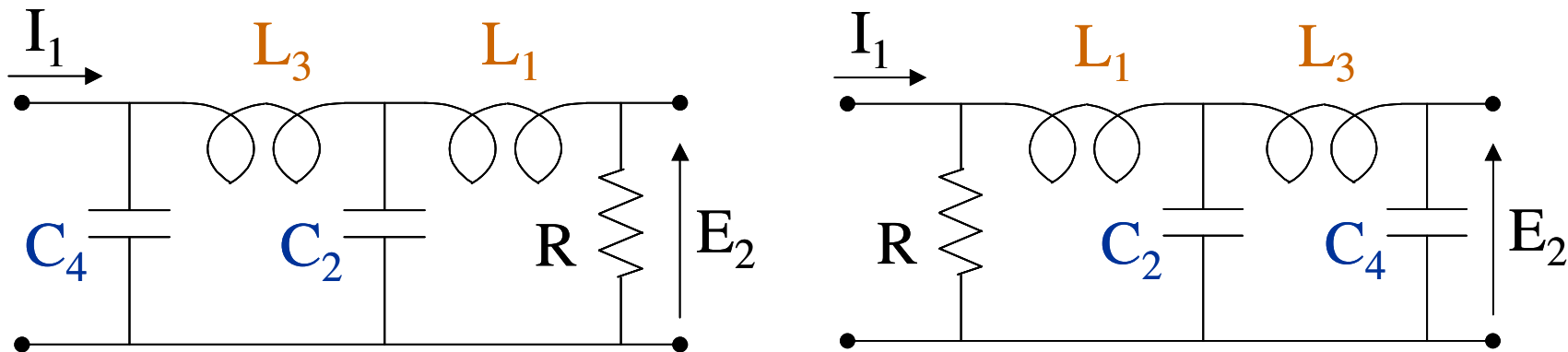
- ✓ A impedância de um ramo série pode ser substituída pela admitância de um ramo paralelo e vice-versa
 - Capacitância de C farads pode ser substituída pelo elemento dual, que é uma indutância de C henrys
 - Indutância de L henrys pode ser substituída por capacitância de L farads
 - Resistência de R ohms pode ser substituída por condutância de R siemens



Valores em ohms, farads e henrys

Reciprocidade

- ✓ A função de transferência permanece inalterada se a porta de entrada é trocada com a de saída.
 - Situação utilizada para acomodar uma configuração desejada a partir de um circuito padrão obtido.
 - Exemplo, uma capacitância em paralelo na saída e uma resistência na entrada.



Valores em ohms, farads e henrys