

Filtros

Parte 2: Projeto em Microfita

SEL 369 Micro-ondas/SEL5900 Circuitos de Alta
Frequência

Amílcar Careli César
Departamento de Engenharia Elétrica da EESC-USP

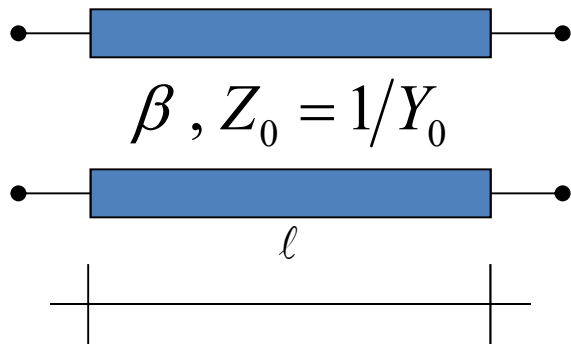
Atenção!



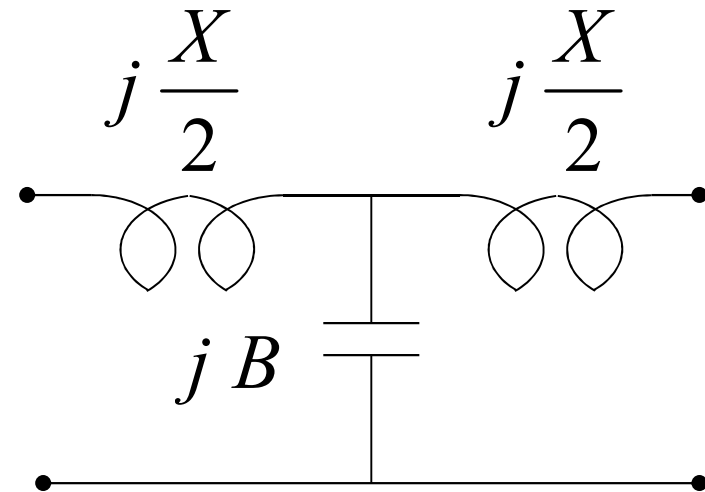
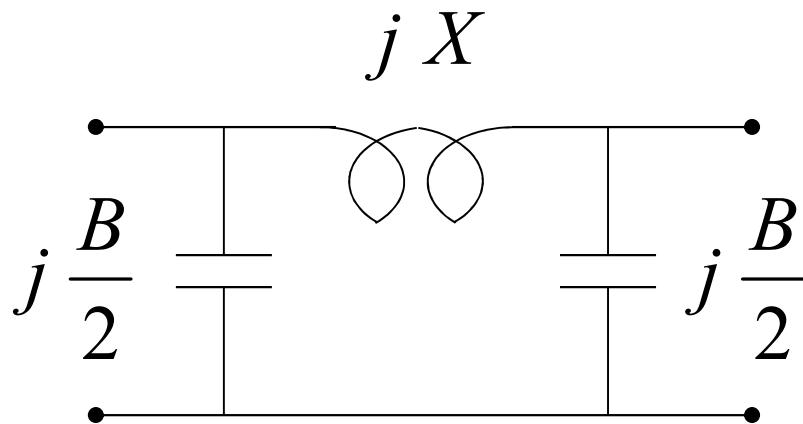
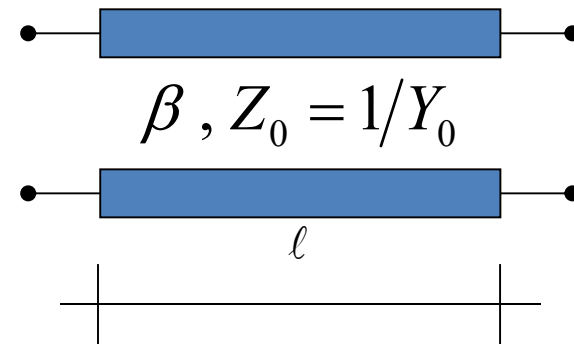
- ✓ Este material didático é planejado para servir de apoio às aulas de **SEL-369 Micro-ondas**, oferecida aos alunos regularmente matriculados no curso de engenharia elétrica/eletrônica e **SEL-5900 Circuitos de Alta Frequência**, oferecida aos alunos regularmente matriculados no curso de pós-graduação 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.

Modelos de linhas de transmissão

Modelo π



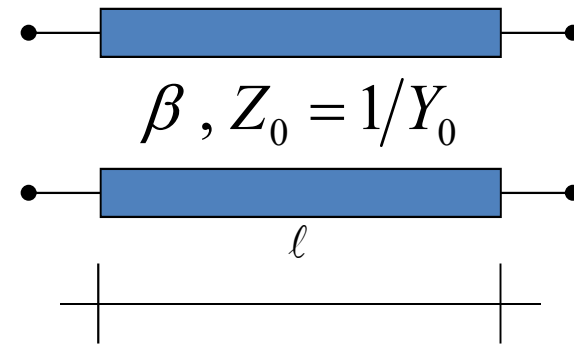
Modelo T



Modelo π

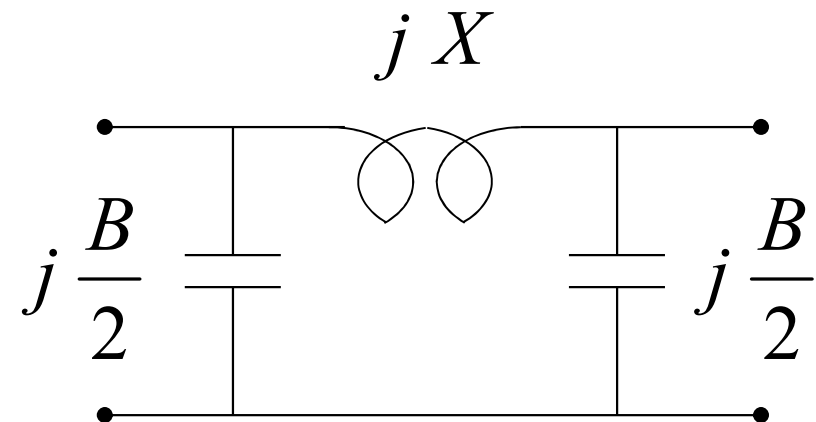
$$X = Z_0 \operatorname{sen}(\beta \ell) = Z_0 \operatorname{sen}\left(\frac{\omega \ell}{v_p}\right)$$

$$\frac{B}{2} = \frac{1}{Z_0} \operatorname{tg}\left(\frac{\beta \ell}{2}\right) = \frac{1}{Z_0} \operatorname{tg}\left(\frac{\omega \ell}{2v_p}\right)$$



β : constante de fase
 v_p : velocidade de fase na microfita

X é diretamente proporcional a Z_0 e $B/2$, inversamente



Modelo T

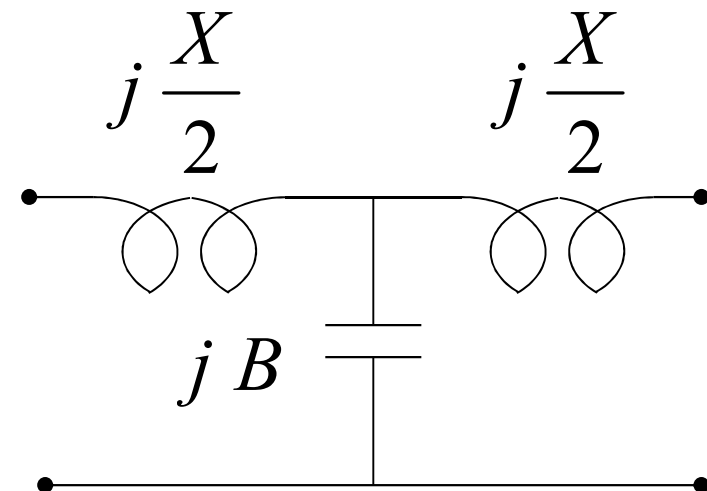
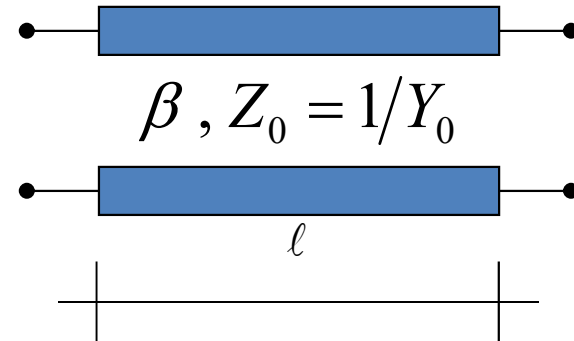
$$\frac{X}{2} = Z_0 \operatorname{tg} \left(\frac{\beta \ell}{2} \right) = Z_0 \operatorname{tg} \left(\frac{\omega \ell}{2v_p} \right)$$

$$B = \frac{1}{Z_0} \operatorname{sen} (\beta \ell) = \frac{1}{Z_0} \operatorname{sen} \left(\frac{\omega \ell}{v_p} \right)$$

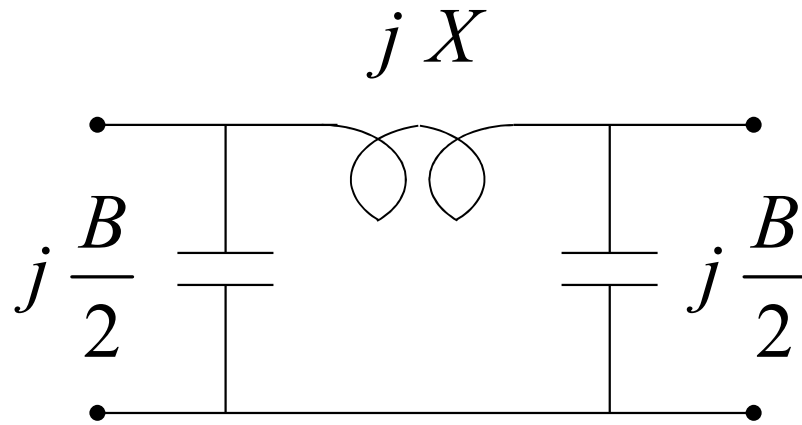
β : constante de fase

v_p : velocidade de fase na microfita

$X/2$ é diretamente proporcional a Z_0 e B , inversamente

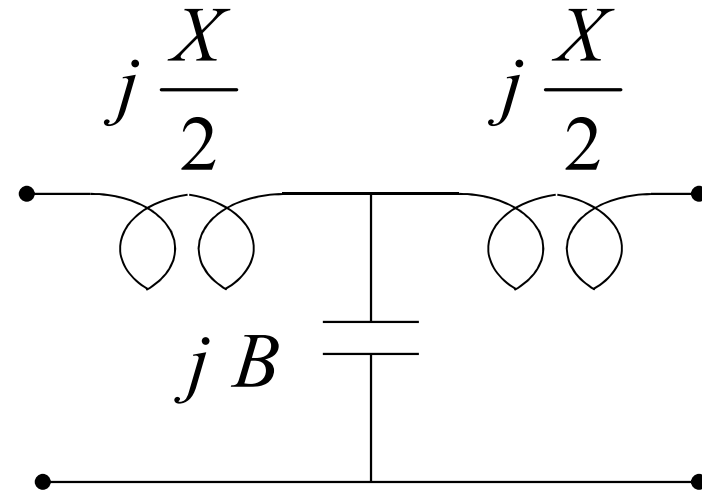


Modelos π e T (1)



$$X = Z_0 \operatorname{sen}(\beta l) = Z_0 \operatorname{sen}\left(\frac{\omega l}{v_p}\right)$$

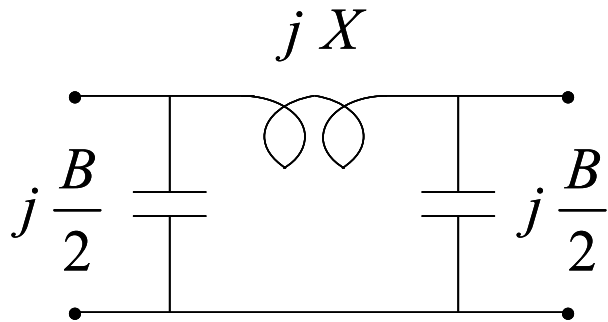
$$\frac{B}{2} = \frac{1}{Z_0} \operatorname{tg}\left(\frac{\beta l}{2}\right) = \frac{1}{Z_0} \operatorname{tg}\left(\frac{\omega l}{2v_p}\right)$$



$$B = \frac{1}{Z_0} \operatorname{sen}(\beta l) = \frac{1}{Z_0} \operatorname{sen}\left(\frac{\omega l}{v_p}\right)$$

$$\frac{X}{2} = Z_0 \operatorname{tg}\left(\frac{\beta l}{2}\right) = Z_0 \operatorname{tg}\left(\frac{\omega l}{2v_p}\right)$$

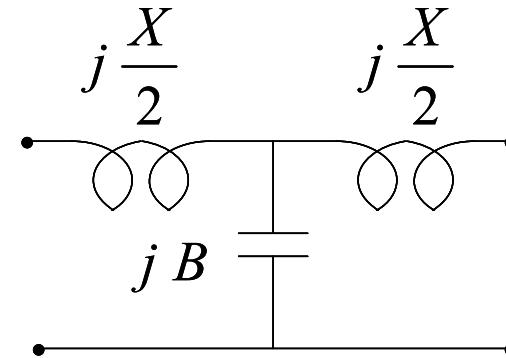
Modelos π e T (2)



$$X = Z_0 \operatorname{sen}(\beta \ell) = Z_0 \operatorname{sen}\left(\frac{\omega \ell}{v_p}\right)$$

$$\frac{B}{2} = \frac{1}{Z_0} \operatorname{tg}\left(\frac{\beta \ell}{2}\right) = \frac{1}{Z_0} \operatorname{tg}\left(\frac{\omega \ell}{2v_p}\right)$$

devemos anular $B/2$ no modelo π



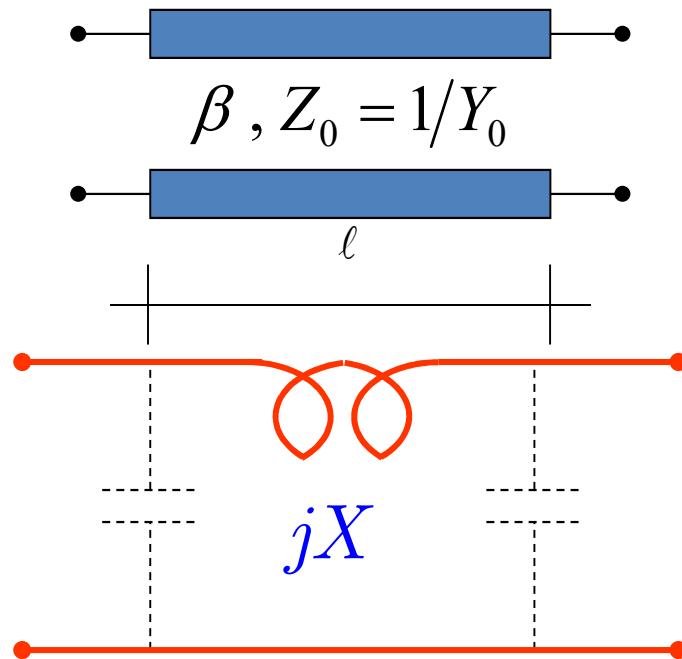
$$B = \frac{1}{Z_0} \operatorname{sen}(\beta \ell) = \frac{1}{Z_0} \operatorname{sen}\left(\frac{\omega \ell}{v_p}\right)$$

$$\frac{X}{2} = Z_0 \operatorname{tg}\left(\frac{\beta \ell}{2}\right) = Z_0 \operatorname{tg}\left(\frac{\omega \ell}{2v_p}\right)$$

devemos anular $X/2$ no modelo T

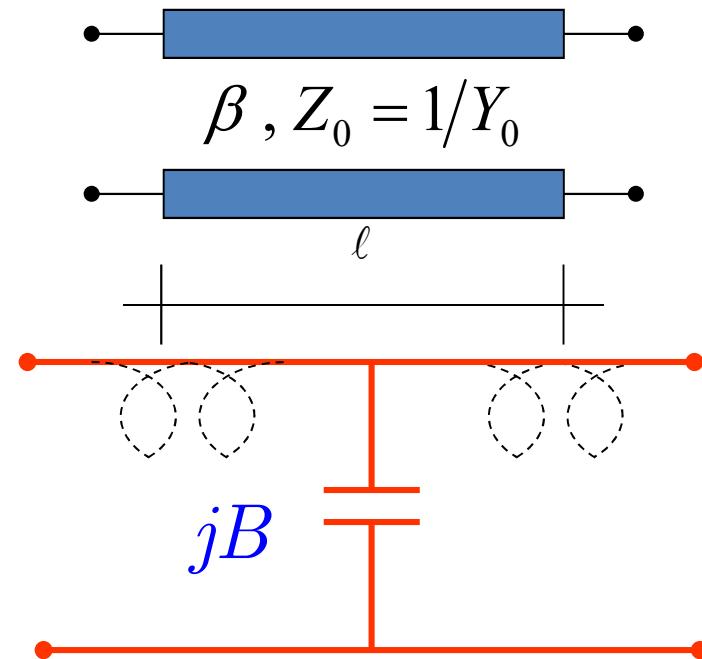
Efeito desejado

Modelo π



Escolhendo Z_0 **alto**
(100 a 120 ohms) o circuito
Equivalente é um indutor em série

Modelo T



Escolhendo Z_0 **baixo**
(5 a 10 ohms) o circuito
equivalente é um capacitor
em paralelo

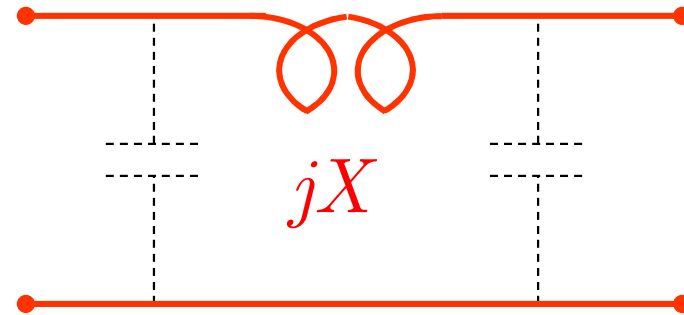
Comprimentos das linhas-1

Do modelo π temos:

$$X = Z_0 \operatorname{sen}(\beta \ell) = Z_0 \operatorname{sen}\left(\frac{\omega \ell}{v_p}\right)$$

$$\text{e } \frac{\omega \ell}{v_p} = \operatorname{sen}^{-1}\left(\frac{X}{Z_0}\right)$$

Assim, o comprimento da seção indutiva é $\ell_L = \frac{v_p}{\omega} \operatorname{sen}^{-1}\left(\frac{X}{Z_0}\right)$



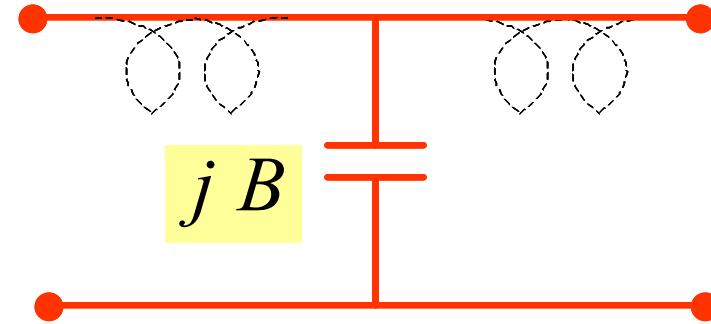
β : constante de fase
 v_p : velocidade de fase na microfita
 ω : freqüência angular
 X : reatância exigida pelo projeto do filtro protótipo

Comprimentos das linhas-2

Do modelo T temos:

$$B = \frac{1}{Z_0} \operatorname{sen}(\beta \ell) = \frac{1}{Z_0} \operatorname{sen}\left(\frac{\omega \ell}{v_p}\right)$$

$$\text{e } \frac{\omega \ell}{v_p} = \operatorname{sen}(BZ_0)$$



β : constante de fase
 v_p : velocidade de fase na microfita
 ω : frequência angular
 B : susceptância exigida pelo projeto do filtro protótipo

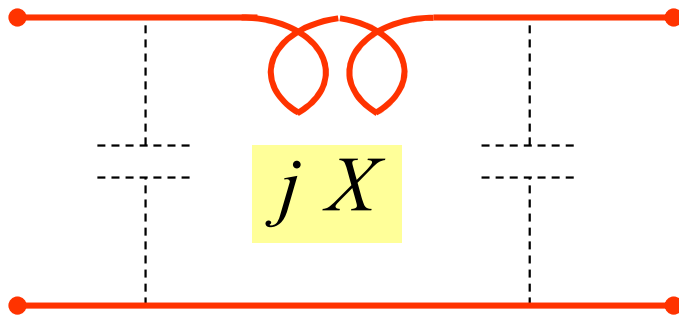
Assim, o comprimento da seção capacitiva é $\ell_c = \frac{v_p}{\omega} \operatorname{sen}^{-1}(BZ_0)$

Resultados a partir da normalização

Modelo π

$$\ell_L = \frac{v_p}{\omega_c} \operatorname{sen}^{-1} \left(\frac{g_i R}{Z_0} \right)$$

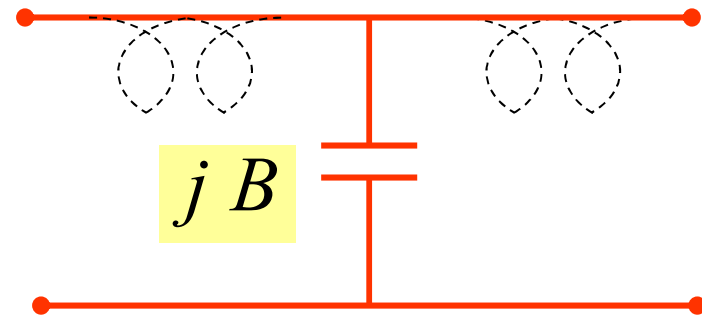
$$\frac{B}{2} = \frac{1}{Z_0} \operatorname{tg} \left(\frac{\omega_c \ell_L}{2v_p} \right)$$



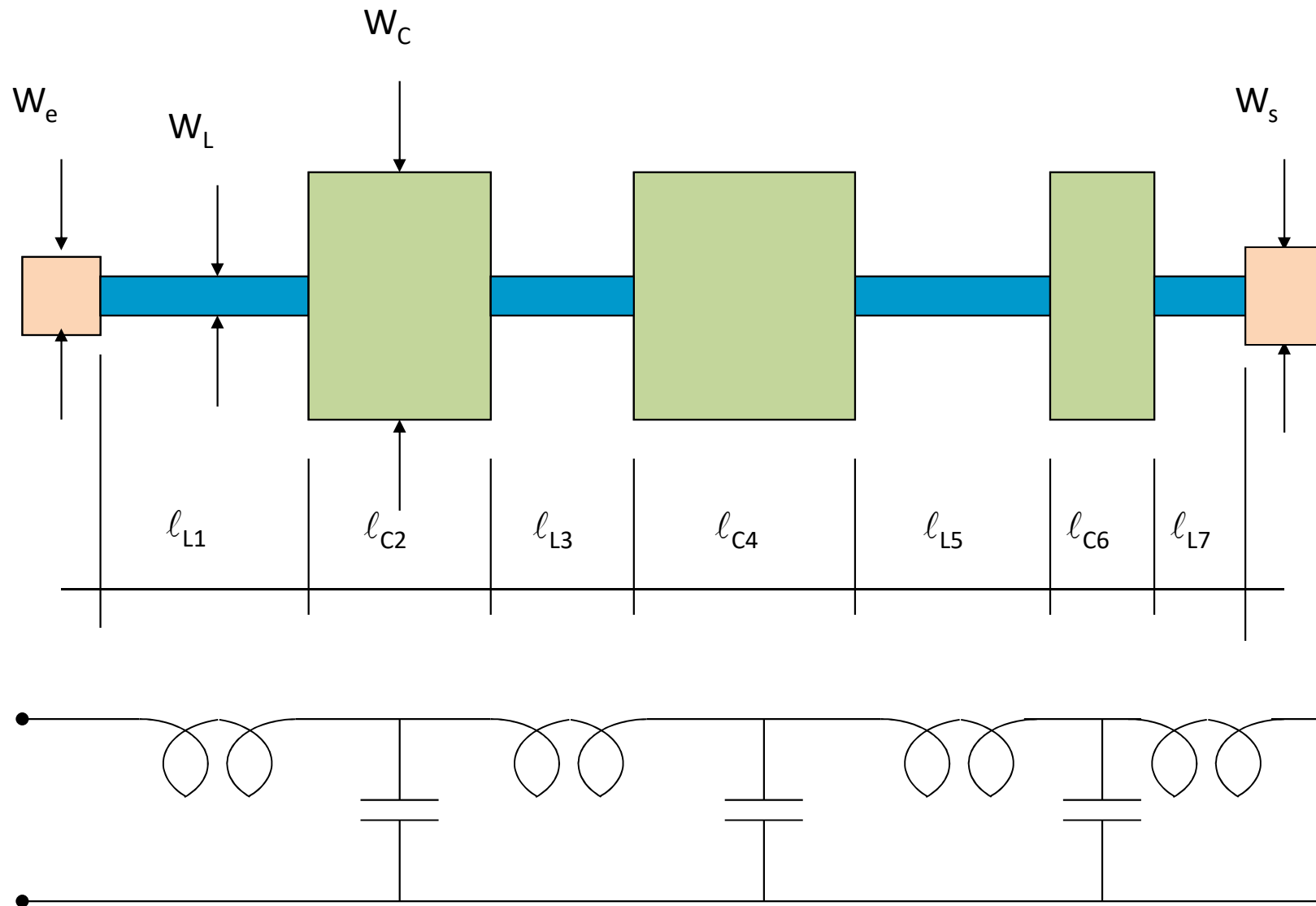
Modelo T

$$\ell_C = \frac{v_p}{\omega_c} \operatorname{sen}^{-1} \left(\frac{g_i Z_0}{R} \right)$$

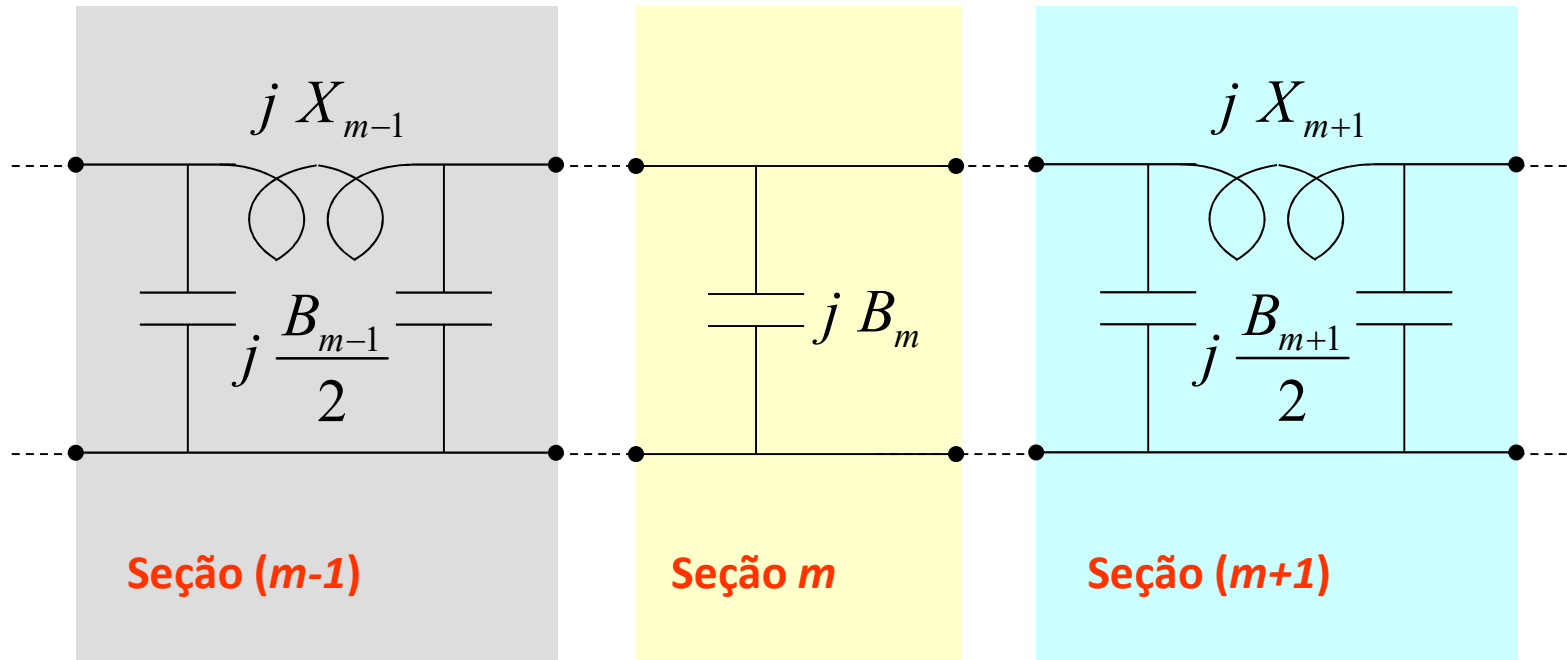
$$\frac{X}{2} = Z_0 \operatorname{tg} \left(\frac{\omega_c \ell_C}{2v_p} \right)$$



Layout do filtro em microfita



Efeitos parasitários-1



A capacitância da seção m é afetada pelas capacitâncias parasitárias das seções adjacentes.

Efeitos parasitários-2

Há 3 capacitâncias em paralelo que formam a seção m :

$$B_{req} = \frac{B_{m-1}}{2} + B_m + \frac{B_{m+1}}{2}$$

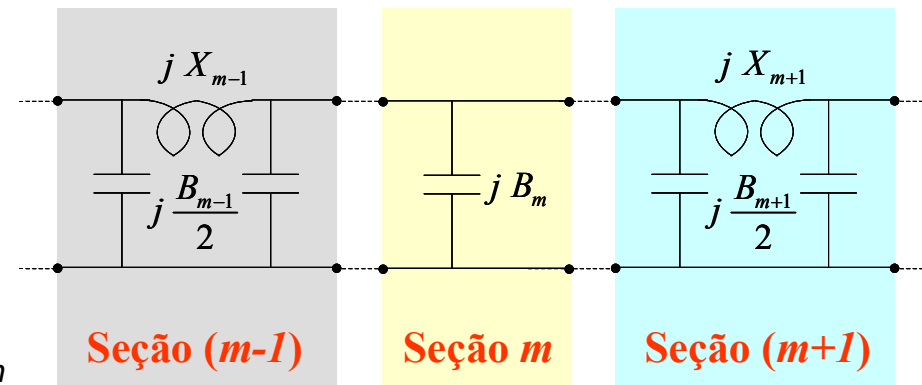
B_{req} : susceptância capacitiva associada ao capacitor da seção m , determinada no projeto do filtro protótipo.

A susceptância a ser sintetizada é:

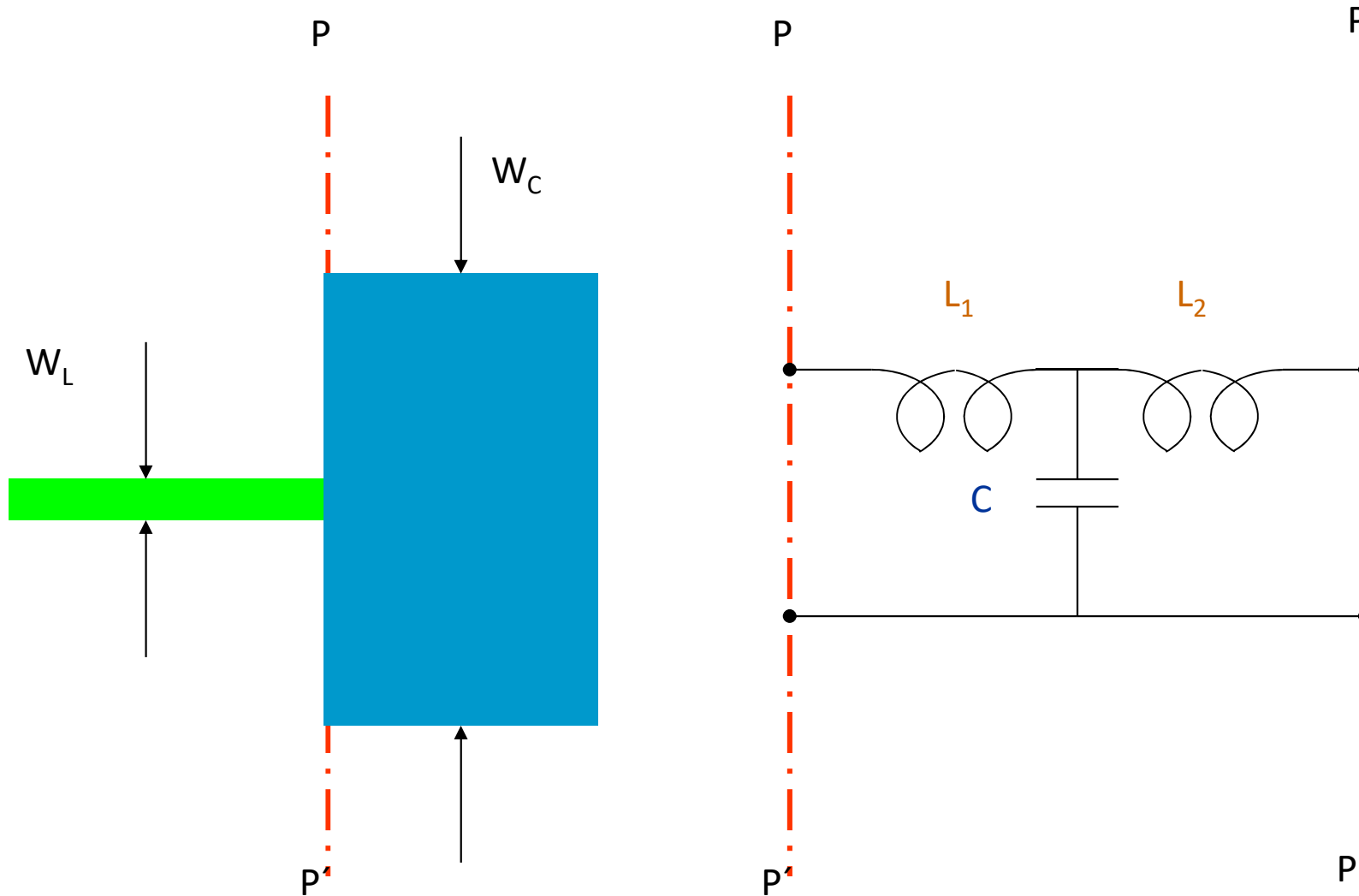
$$B_m = B_{req} - \left(\frac{B_{m-1}}{2} + \frac{B_{m+1}}{2} \right)$$

Projetam-se as seções $(m-1)$ e $(m+1)$ e depois calculam-se as susceptâncias associadas.

Determina-se o comprimento da seção capacitiva correspondente a B_m



Correção da capacitância-1



Correção da capacitância-2

Para $\varepsilon_r \leq 10$ e $1,5 \leq W_C/W_L \leq 3,5$

$$\frac{C}{\sqrt{W_L W_C}} = (10,1 \log \varepsilon_r + 2,33) \frac{W_C}{W_L} - 12,6 \log \varepsilon_r - 3,17 \text{ pF} / m$$

Para $W_C/W_L \leq 5,0$ e $W_L/h = 1,0$

$$\frac{L}{h} = 40,5 \left(\frac{W_C}{W_L} - 1,0 \right) - 75 \frac{W_C}{W_L} + 0,2 \left(\frac{W_C}{W_L} - 1,0 \right)^2 \text{ nH} / m$$

Correção da capacitância-3

Se a relação W_C/W_L cair fora da faixa $1,5 \leq W_C/W_L \leq 3,5$

pode-se considerar a linha de largura W_C como aberta (despreza-se a linha de largura W_L). Calcula-se a capacitância equivalente ao circuito aberto.

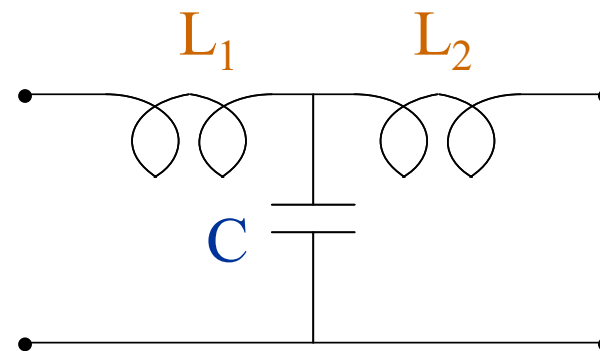
$$C_f \approx \frac{\sqrt{\epsilon_{eff}}}{c} \frac{\ell_{eo}}{Z_0} \quad \text{farad}$$

para $2 \leq f \leq 20 \text{ GHz}$ (Hammerstad e Bekkadal)

$$\frac{\ell_{eo}}{h} = 0,412 \left(\frac{\epsilon_{eff} + 0,3}{\epsilon_{eff} - 0,258} \right) \left(\frac{W/h + 0,262}{W/h + 0,813} \right)$$

Correção da capacitância-4

- ✓ Pode-se calcular pelas 2 formas (capacitância de descontinuidade e circuito aberto) e tomar um valor os 2 para a capacitância equivalente.
- ✓ Notar que a seção capacitiva está entre 2 seções indutivas
 - A capacitância final deverá estar `descontada` de uma quantidade igual a $2C_{desc}$



Correção da capacitância-5

- ✓ Os valores de L_1 e L_2 são dados por

$$L_1 = \frac{L_{m1}}{L_{m1} + L_{m2}} L \quad \text{henrys}$$

$$L_2 = \frac{L_{m2}}{L_{m1} + L_{m2}} L \quad \text{henrys}$$

- ✓ Onde L_{m1} e L_{m2} são as indutâncias por unidade de comprimento das linhas de largura W_L e W_C , e L a indutância por unidade de comprimento determinada pela fórmula de Garg e Bahl.