

# 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!

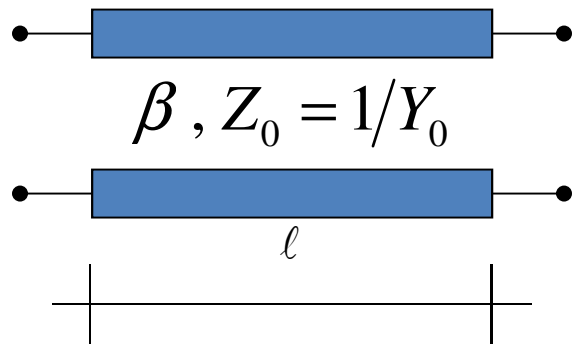
---



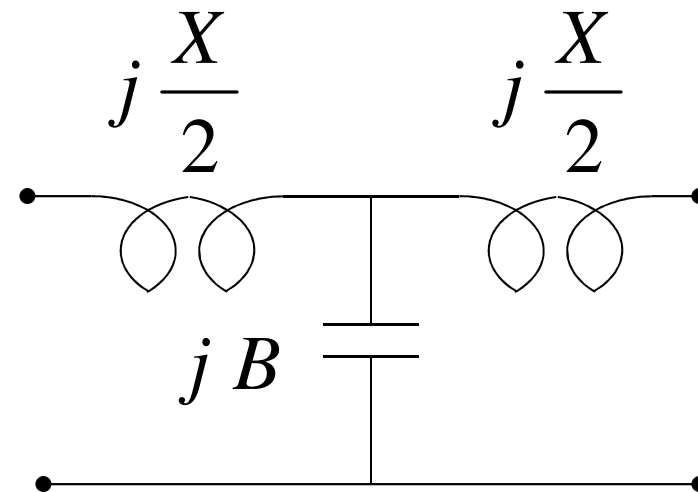
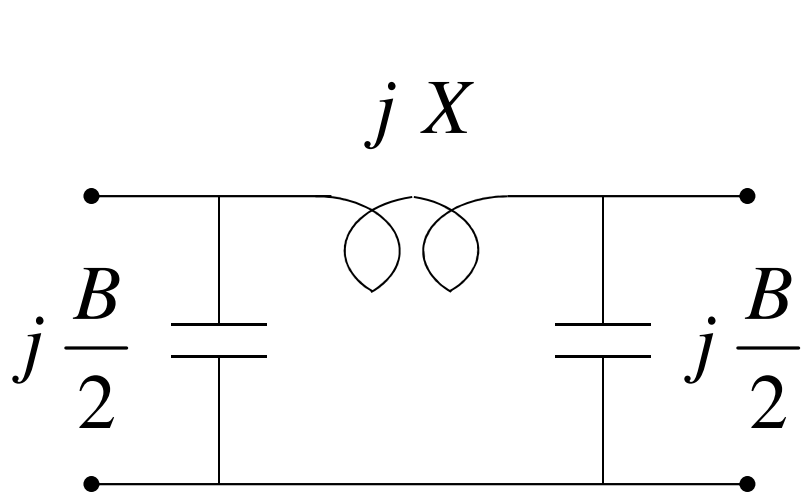
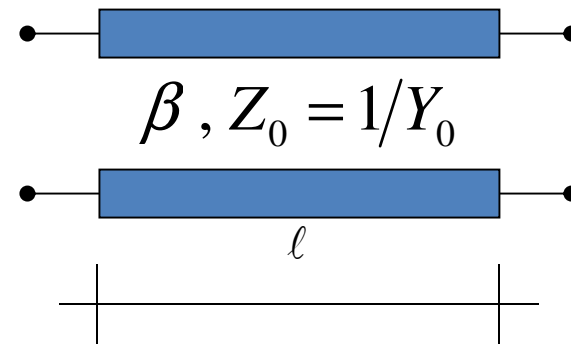
- ✓ Este material didático é planejado para servir de apoio às aulas de **SEL-369 Micro-ondas**, oferecida aos alunos regularmente matriculados no curso de engenharia elétrica/eletrônica e **SEL-5900 Circuitos de Alta Frequência**, oferecida aos alunos regularmente matriculados no curso de pós-graduação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



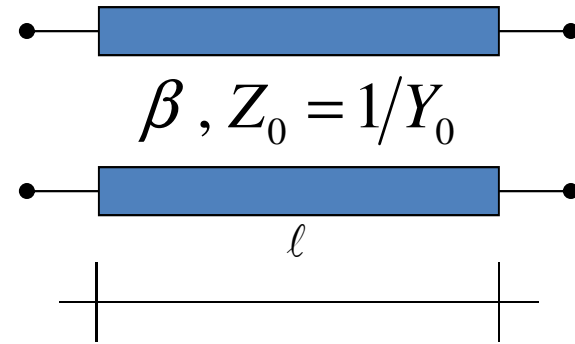
Modelo T



# Modelo $\pi$

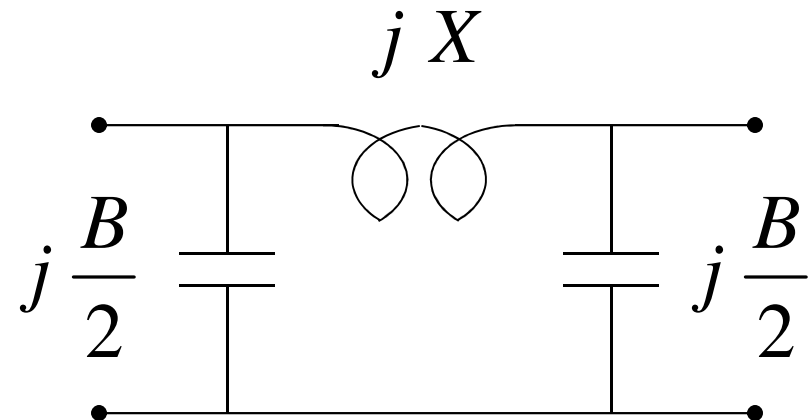
$$X = Z_0 \operatorname{sen}(\beta \ell) = Z_0 \operatorname{sen}\left(\frac{\omega \ell}{v_p}\right)$$

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



$\beta$ : constante de fase  
 $v_p$ : velocidade de fase na microfita

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



# Modelo T

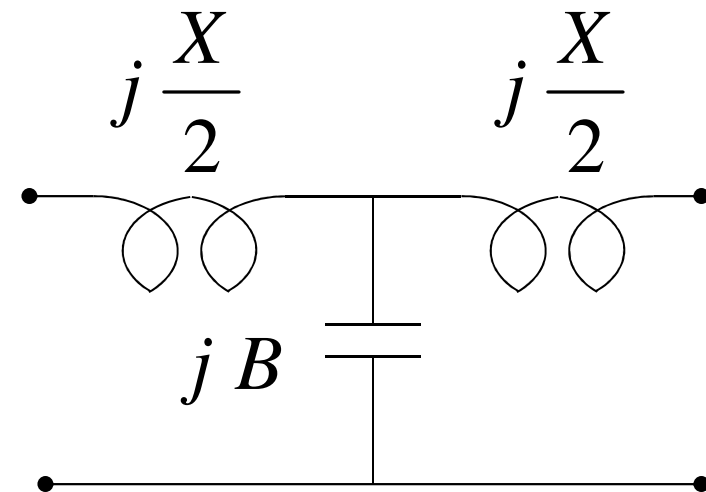
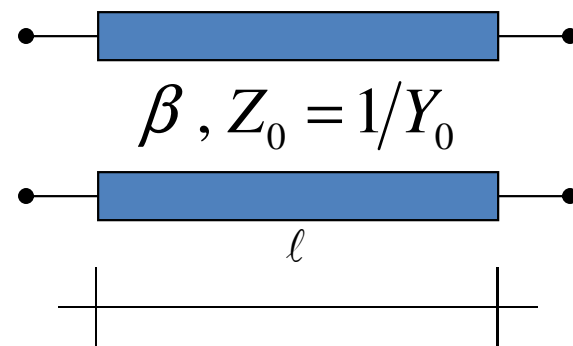
$$\frac{X}{2} = Z_0 \operatorname{tg} \left( \frac{\beta \ell}{2} \right) = Z_0 \operatorname{tg} \left( \frac{\omega \ell}{2v_p} \right)$$

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

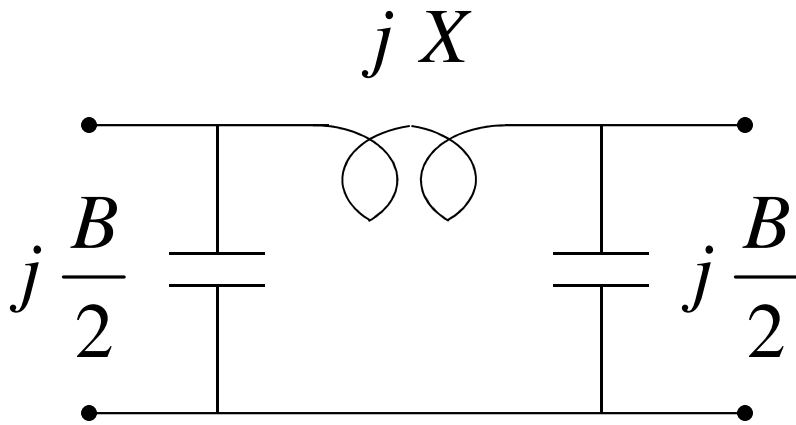
$\beta$ : constante de fase

$v_p$ : velocidade de fase na microfita

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

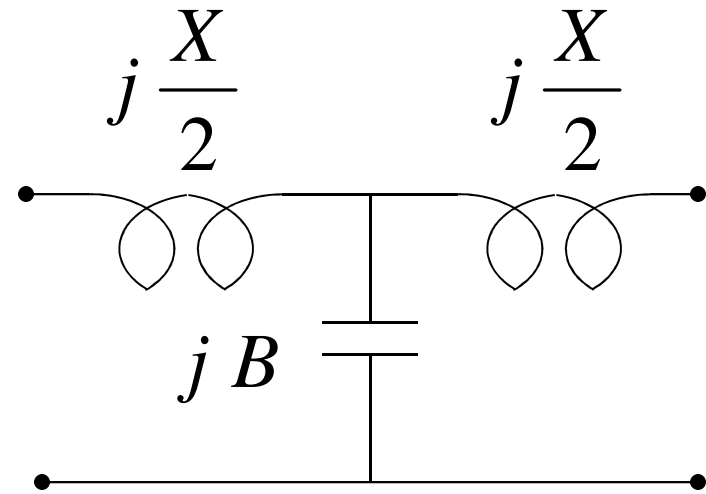


# Modelos $\pi$ e T (1)



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

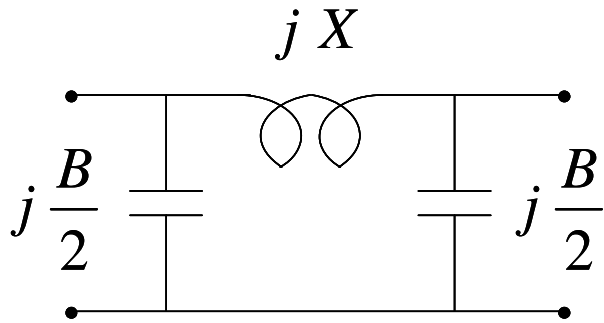
$$\frac{B}{2} = \frac{1}{Z_0} \operatorname{tg}\left(\frac{\beta l}{2}\right) = \frac{1}{Z_0} \operatorname{tg}\left(\frac{\omega l}{2v_p}\right)$$



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

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

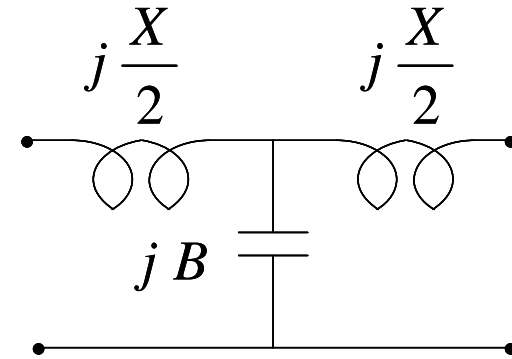
# Modelos $\pi$ e T (2)



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

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

devemos anular  $B/2$  no modelo  $\pi$



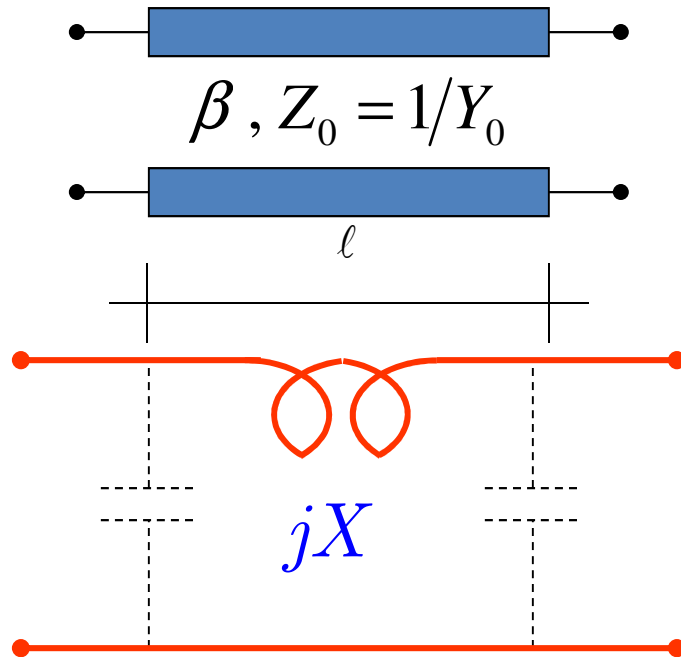
$$B = \frac{1}{Z_0} \operatorname{sen}(\beta l) = \frac{1}{Z_0} \operatorname{sen}\left(\frac{\omega l}{v_p}\right)$$

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

devemos anular  $X/2$  no modelo T

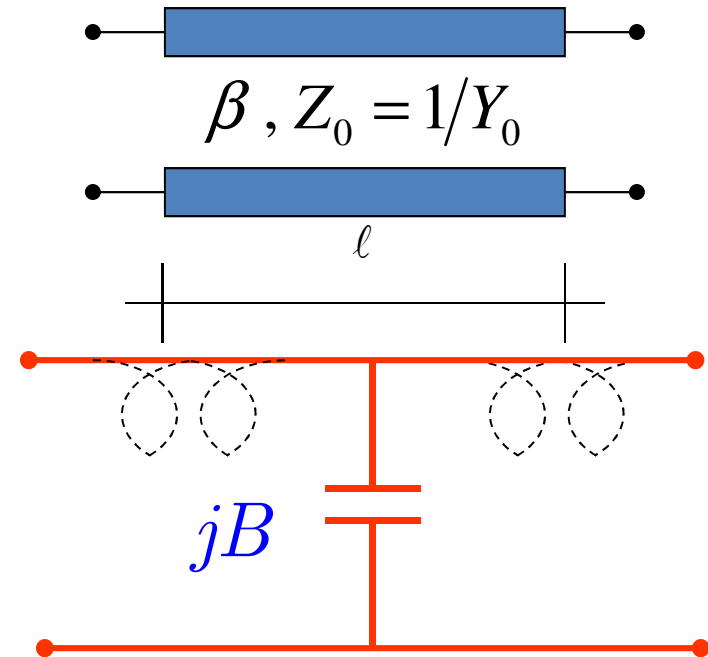
# Efeito desejado

Modelo  $\pi$



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



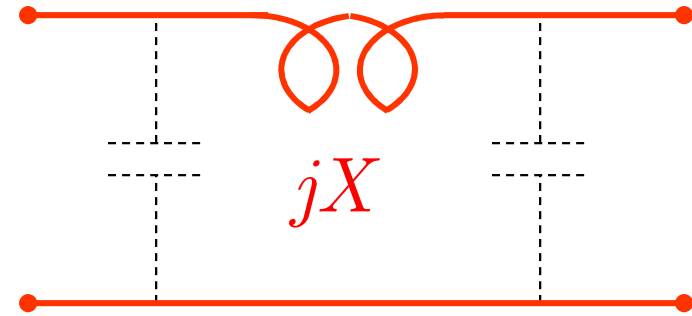
# Comprimentos das linhas-1

Do modelo  $\pi$  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  $\ell_L = \frac{v_p}{\omega} \operatorname{sen}^{-1}\left(\frac{X}{Z_0}\right)$



$\beta$ : constante de fase

$v_p$ : velocidade de fase  
na microfita

$\omega$ : freqüência angular

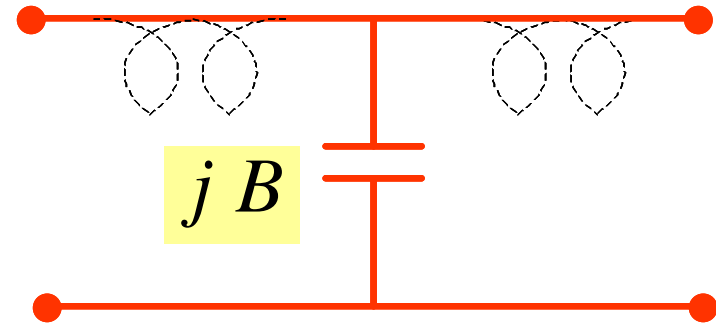
$X$ : reatância exigida pelo  
projeto do filtro protótipo

# Comprimentos das linhas-2

Do modelo T temos:

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

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



$\beta$ : constante de fase  
 $v_p$ : velocidade de fase na microfita  
 $\omega$ : frequência angular  
 $B$ : susceptância exigida pelo projeto do filtro protótipo

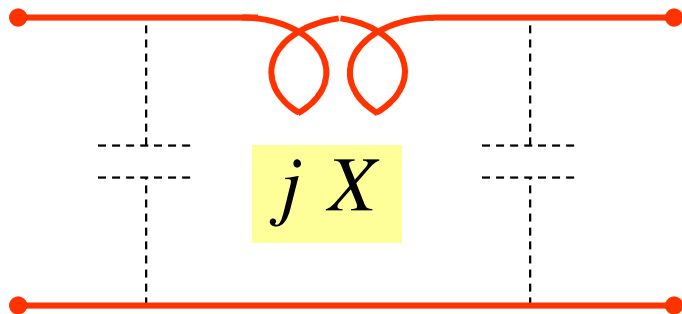
Assim, o comprimento da seção capacitiva é  $\ell_c = \frac{v_p}{\omega} \operatorname{sen}^{-1}(BZ_0)$

# Resultados a partir da normalização

Modelo  $\pi$

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

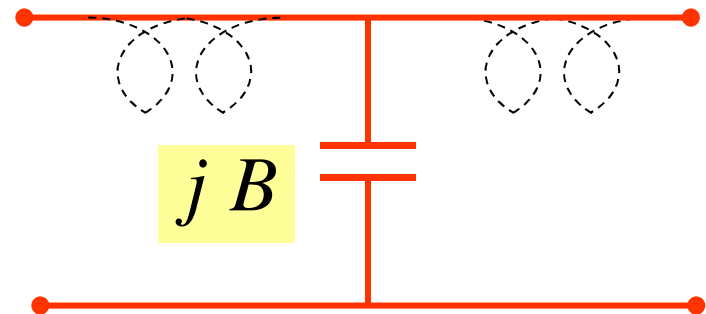
$$\frac{B}{2} = \frac{1}{Z_0} \text{tg} \left( \frac{\omega_c \ell_L}{2v_p} \right)$$



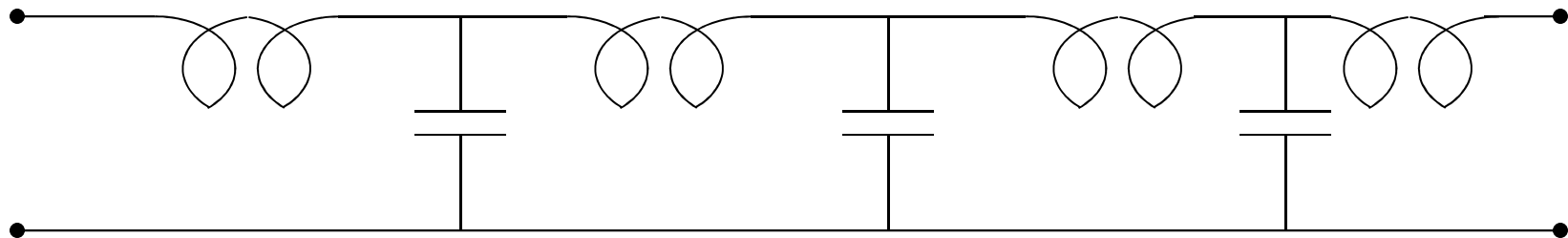
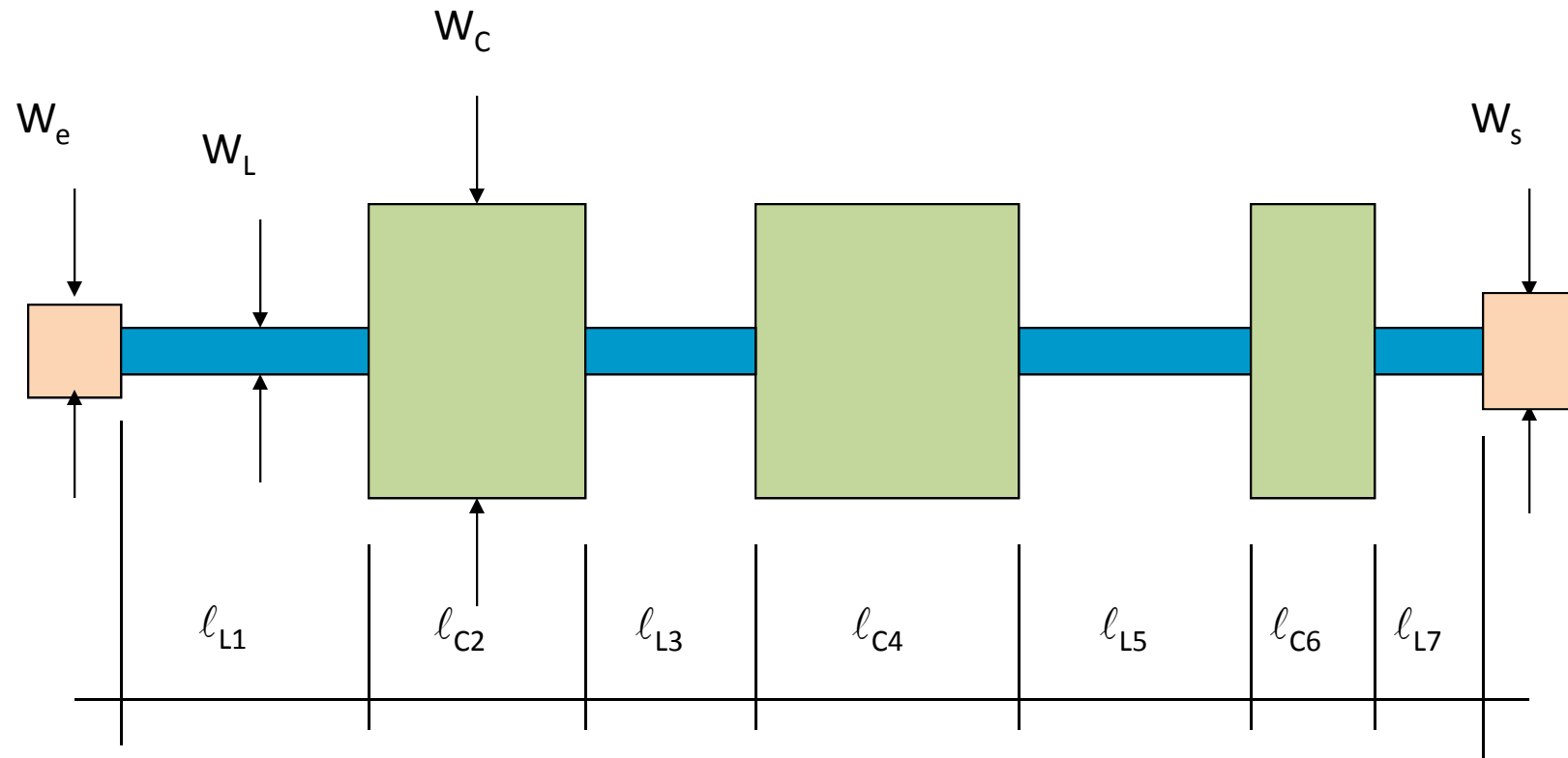
Modelo T

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

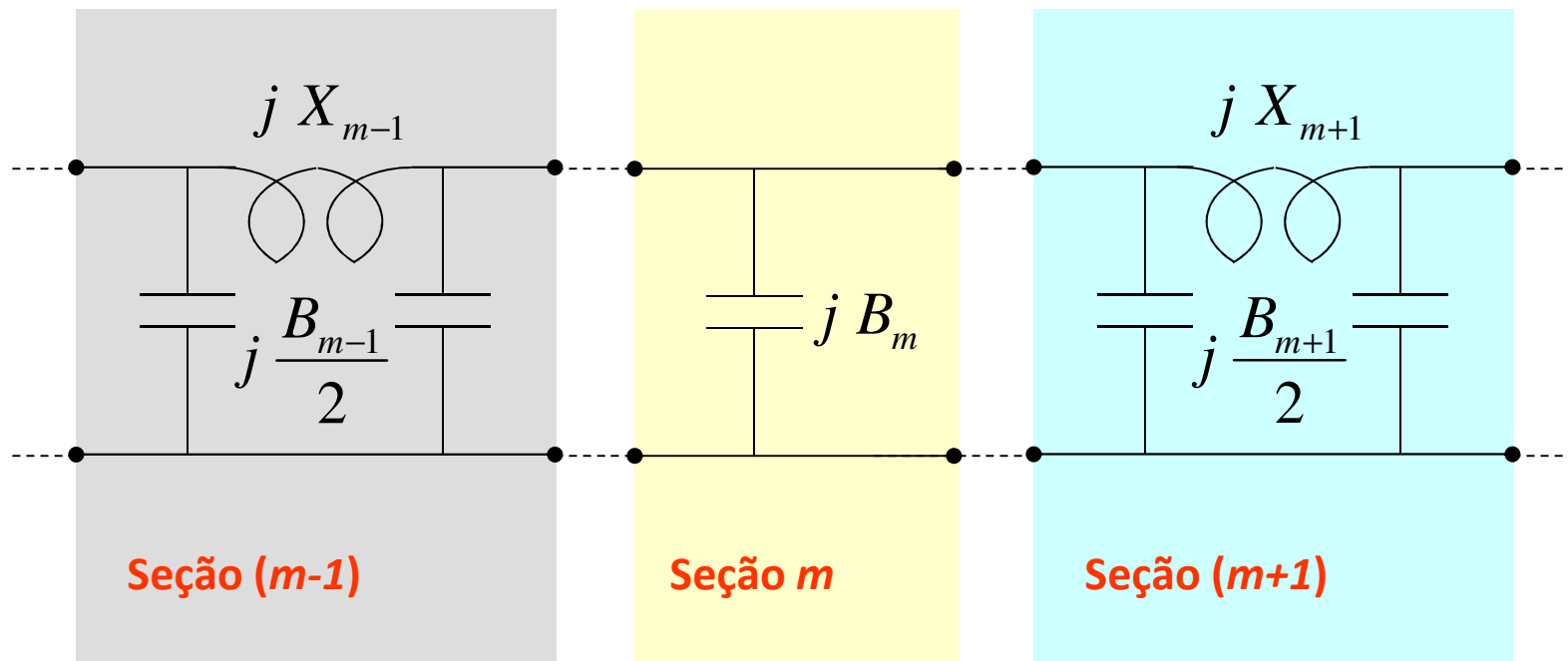
$$\frac{X}{2} = Z_0 \text{tg} \left( \frac{\omega_c \ell_C}{2v_p} \right)$$



# 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  $m$ :

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

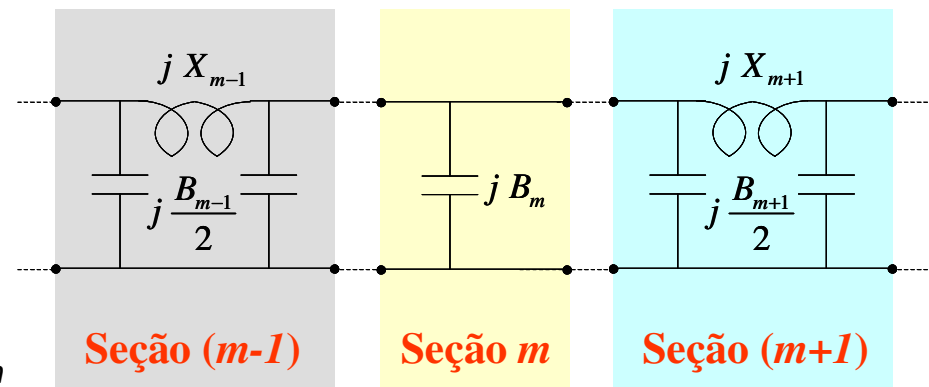
$B_{req}$  : susceptância capacitiva associada ao capacitor da seção  $m$ , determinada no projeto do filtro protótipo.

A susceptância a ser sintetizada é:

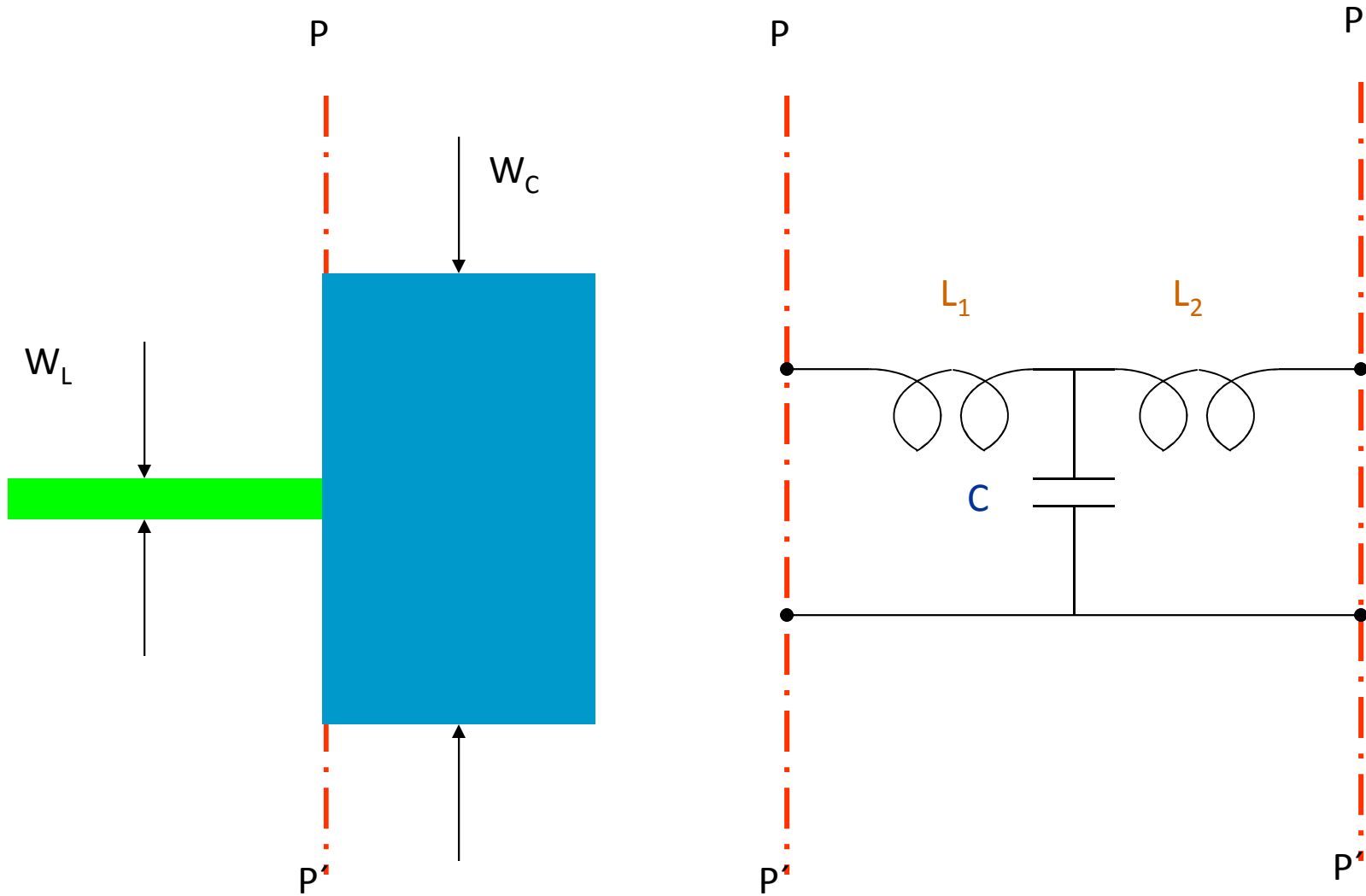
$$B_m = B_{req} - \left( \frac{B_{m-1}}{2} + \frac{B_{m+1}}{2} \right)$$

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.

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

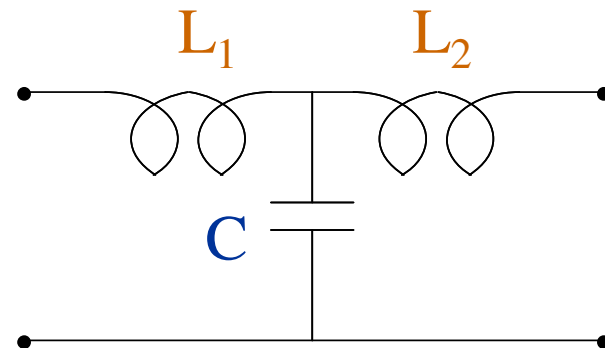
para  $2 \leq f \leq 20 \text{ GHz}$  (Hammerstad e Bekkadal)

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

## 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.