

# RESSOADORES ELETROMAGNÉTICOS

---

PSI3483 – Ondas Eletromagnéticas em  
meios guiados

# RESSOADORES ELETROMAGNÉTICOS

## Conteúdo

- Ressonadores LC
- Ressonadores em linha de transmissão
- Cavidades ressonantes

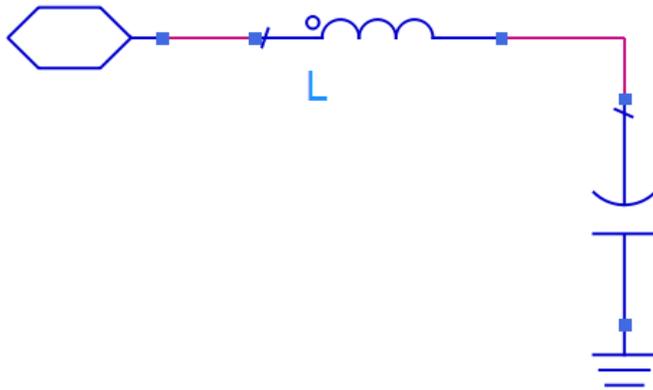
## Introdução

- Aplicações de ressoadores
  - Filtros passa-faixa, rejeita faixa
  - Osciladores
  - Fornos de micro-ondas
  - Amplificadores sintonizados

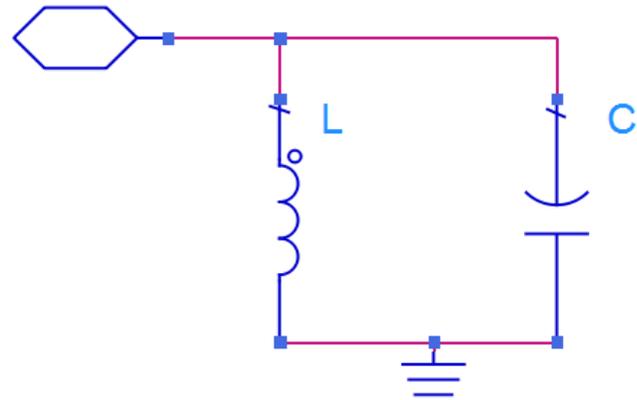
# Ressoadores LC

- Ressoadores reais
- Associação série ou paralela de um indutor  $L$  e um capacitor  $C$

Ressoador LC série ideal



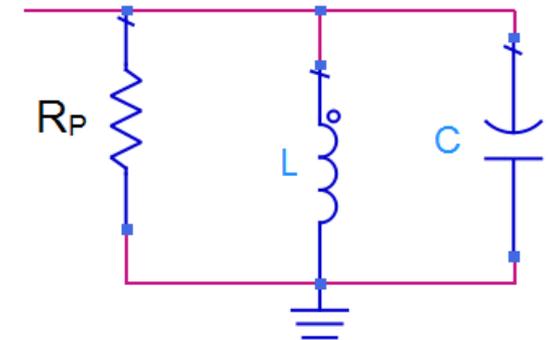
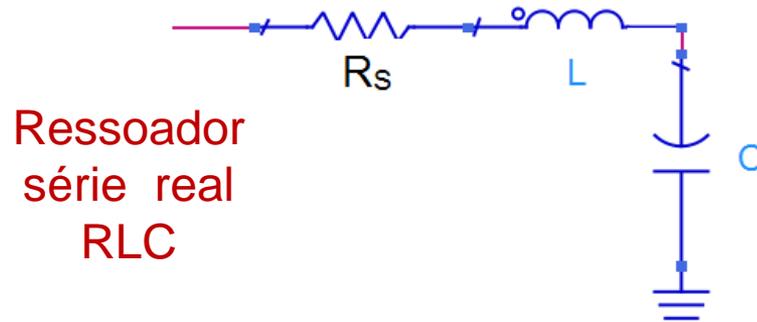
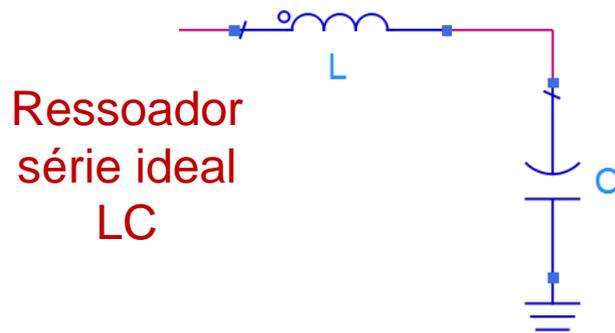
Ressoador LC paralelo ideal



- Circuito ressoante ideal não considera perdas dos seus componentes

# Ressoadores LC

- Circuito LC real
- Indutor apresenta perdas condutivas
- Capacitor perdas dielétricas



# Ressoadores LC

## Frequência de ressonância $\omega_0$

- Em  $\omega_0$  a impedância do circuito RLC se reduz a R, real
- Energia armazenada nos campos magnético e elétrico se igualam
- Reatâncias capacitiva e indutiva iguais em módulo

$$j \cdot X_L - j \cdot X_C = 0 \rightarrow \omega_0 L = \frac{1}{\omega_0 C}$$

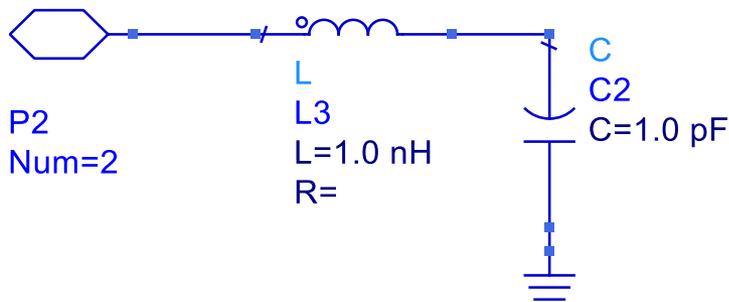
- Obtém-se

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{L \cdot C}} \quad \text{ou} \quad f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{L \cdot C}}$$

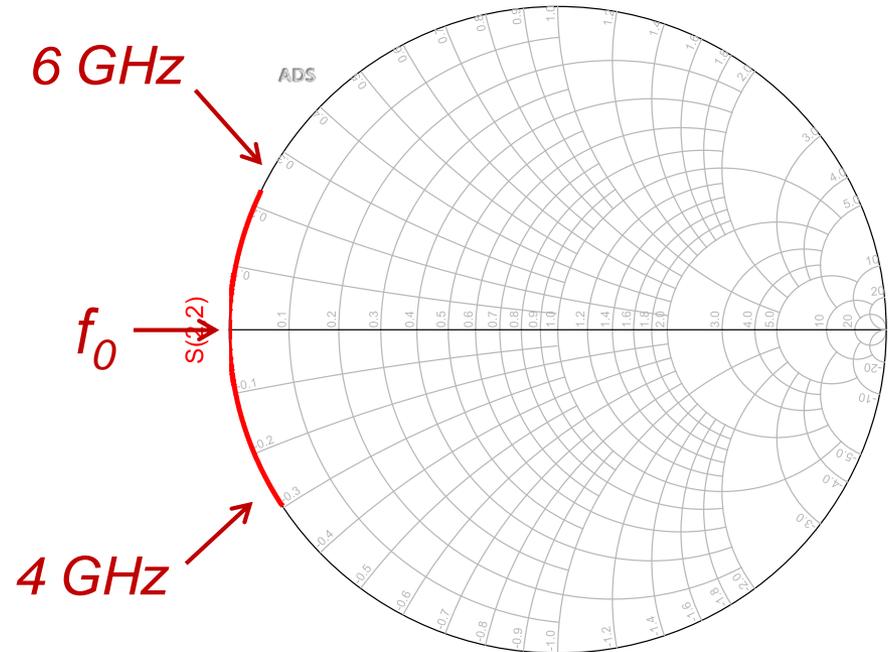
# Ressoadores LC

Na frequência de ressonância  $\omega_0$

- Ressoador série ideal LC  $\rightarrow$  curto circuito



$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{L \cdot C}} = 5,03 \text{ GHz}$$

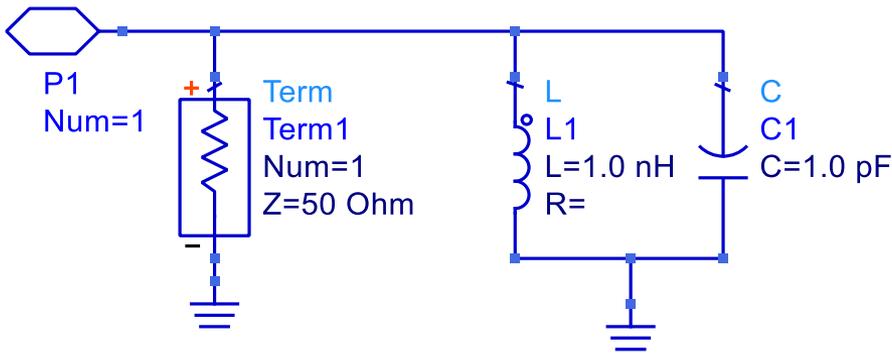


freq (4.000GHz to 6.000GHz)

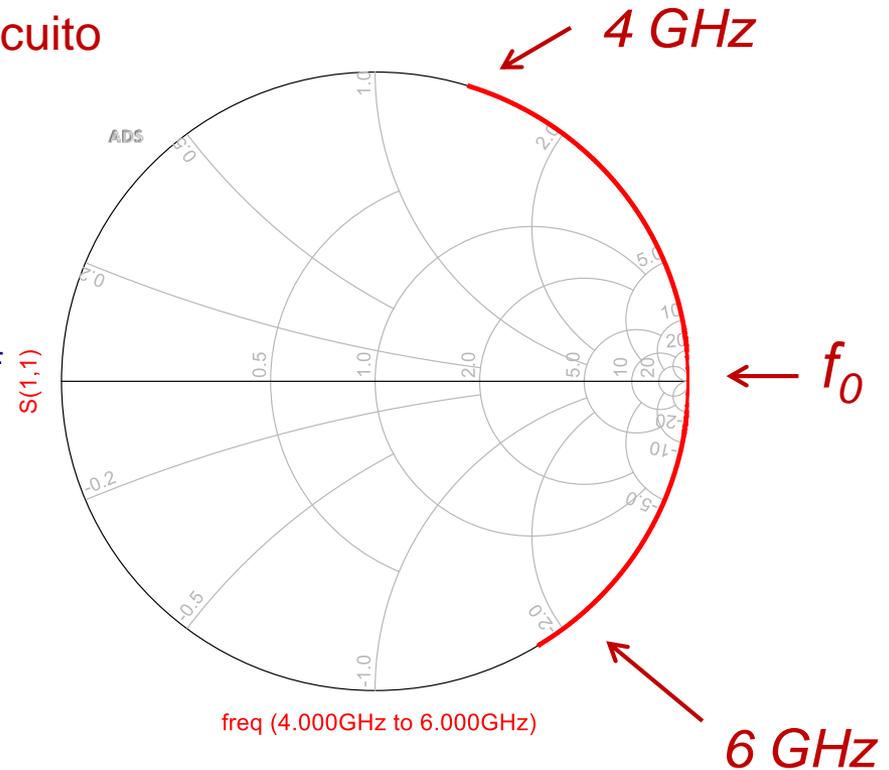
# Ressoadores LC

Na frequência de ressonância  $\omega_0$

- Ressorador série ideal LC  $\rightarrow$  curto circuito

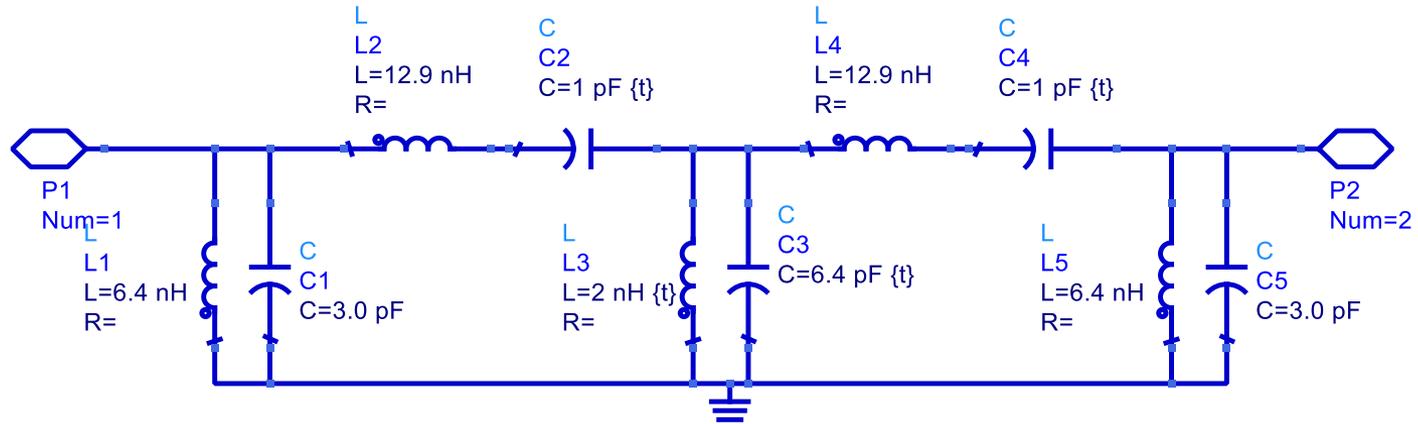


$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{L \cdot C}} = 5,03 \text{ GHz}$$



# Ressonadores LC

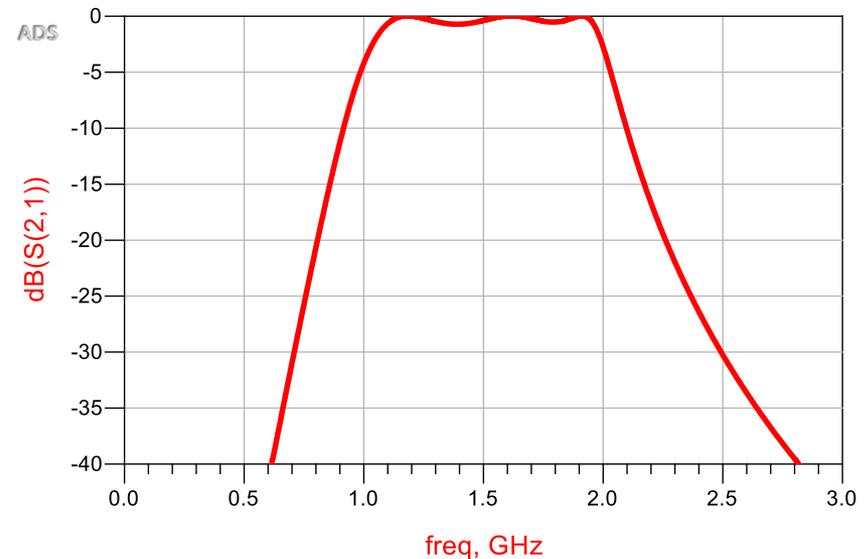
- Exemplo e aplicação - filtros



$$f_{01} = \frac{1}{2\pi\sqrt{L1 \cdot C1}} = 1,15 \text{ GHz}$$

$$f_{02} = \frac{1}{2\pi\sqrt{L2 \cdot C2}} = 1,40 \text{ GHz}$$

$$f_{03} = \frac{1}{2\pi\sqrt{L3 \cdot C3}} = 1,40 \text{ GHz}$$



# Ressonadores LC

## Índice de mérito do ressonador LC - $Q$

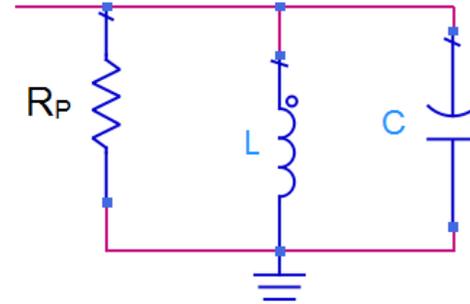
- Parâmetro importante
- Define a seletividade do ressonador
- Quanto maior o índice de mérito, mais seletivo em frequência é o circuito ressonante

$$Q = \omega \frac{\text{Energia média armazenada no sistema}}{\text{Energia perdida por segundo no sistema}}$$

$$Q = \omega \frac{W}{\text{Potência dissipada}}$$

# Ressoadores LC

Índice de mérito do ressoador LC paralelo



- Na frequência de ressonância  $\omega_0$

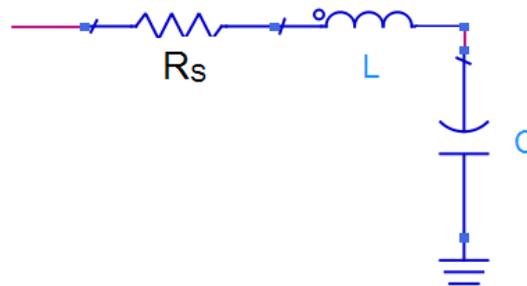
$$W_e = W_m \rightarrow W = W_e + W_m = 2W_e = \frac{1}{2} CVV^*$$

$$\text{Potência dissipada} = \frac{1}{2} \frac{VV^*}{R}$$

$$Q = \omega_0 R_p C$$

$Q$  elevado  $\rightarrow R_p$  elevado

Índice de mérito do ressoador LC série

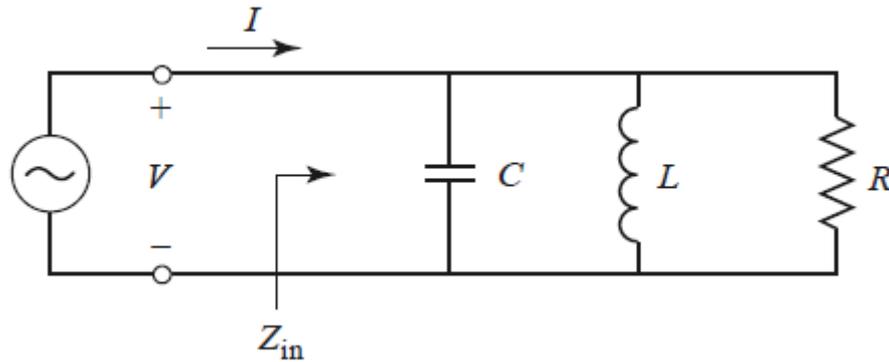


$$Q = \frac{\omega_0 L}{R_s}$$

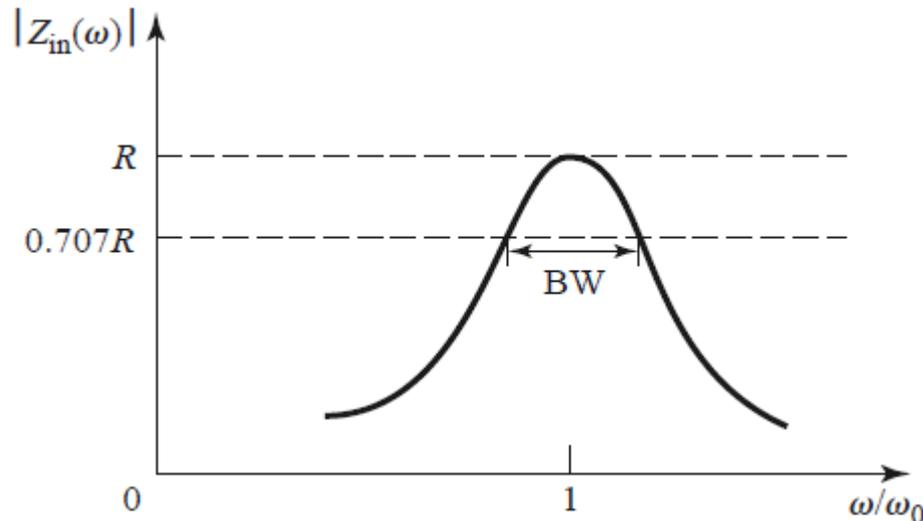
$Q$  elevado  $\rightarrow R_s$  reduzido

# Ressoadores LC

Medida do índice de mérito do ressonador LC paralelo



$$Z_{in} = \left( \frac{1}{R} + \frac{1}{j\omega L} + j\omega C \right)^{-1}$$



$$Q_0 = \frac{1}{BW}$$

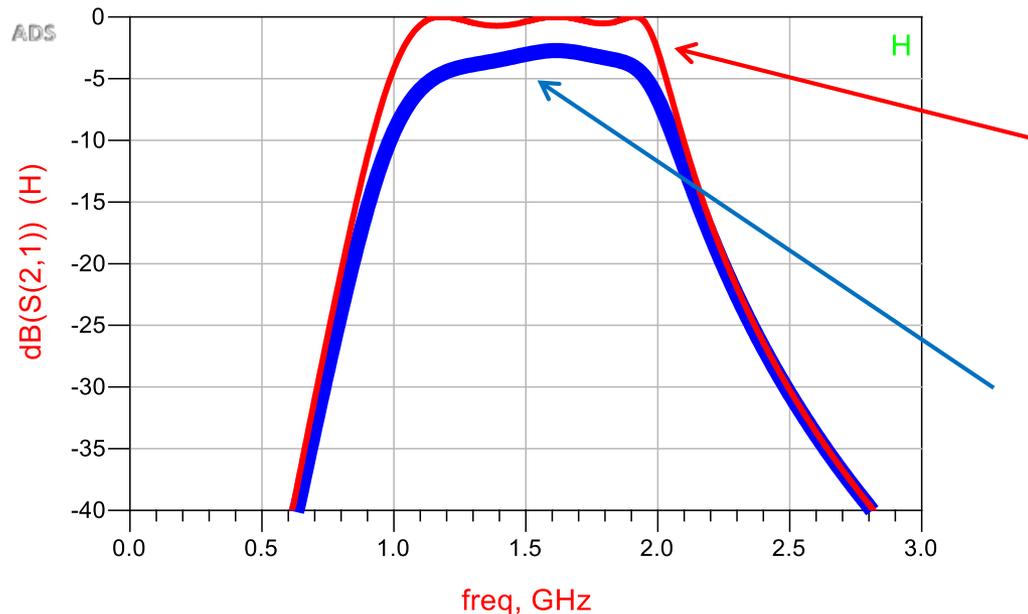
*BW* banda fracionária

$$BW = \frac{\Delta\omega}{\omega_0}$$

# Ressoadores LC

## Filtro com componentes LC reais

- Perdas dos indutores e capacitores
- Degradação da resposta em frequência
  - Maior perda na faixa de passagem
  - Diminuição da seletividade
- Exemplo



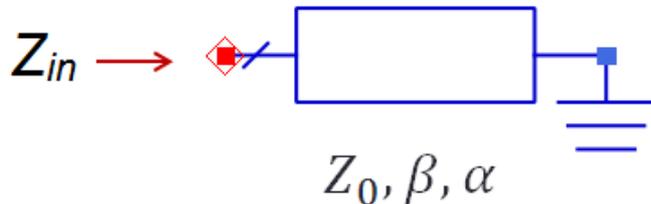
*Resposta com  
Le C ideais*

*Resposta  
considerando L e C  
com perdas*

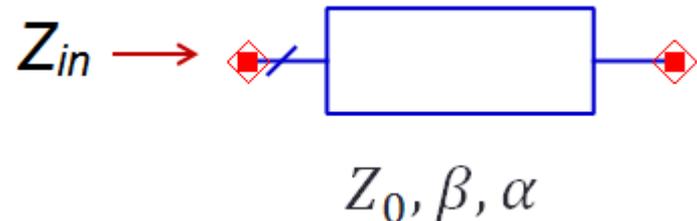
# Circuitos Ressonantes de Linhas de Transmissão

## Tipos de ressoadores

Trecho de LT terminado em curto-circuito



Trecho de LT terminado em circuito aberto



- Comprimento da linha de transmissão

$$l = \lambda_g/2$$

“Linha de transmissão ressonante”

$$l = \lambda_g/4$$

“Linha de transmissão anti-ressonante”

# Circuitos Ressonantes de Linhas de Transmissão

- Trecho de LT terminado em curto-circuito

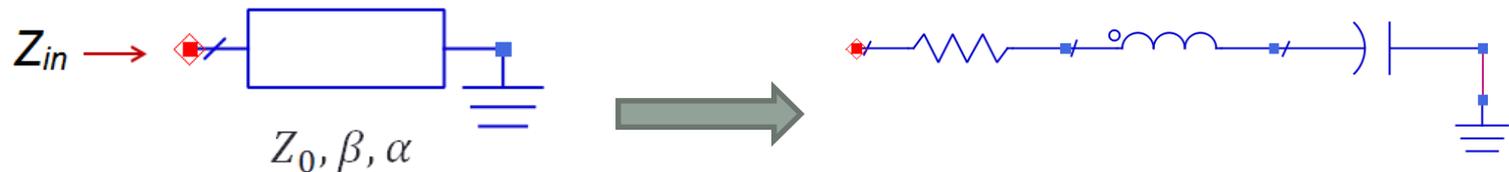
- Assumindo perdas nulas ( $\alpha=0$ )

$$Z_{in} = j \cdot Z_C \cdot \operatorname{tg}(\beta l) \quad \text{sendo } \beta = 2\pi/\lambda_g$$

- Modo ressonante

$$l = \frac{\lambda_g}{2} \rightarrow \beta \cdot l = \frac{2\pi}{\lambda_g} \cdot \frac{\lambda_g}{2} = \pi \quad \text{logo } Z_{in} \rightarrow \text{curto - circuito}$$

- Modelo equivalente na frequência de ressonância: RLC série



- Índice de mérito  $Q = \frac{\beta}{2\alpha}$

# Circuitos Ressonantes de Linhas de Transmissão

- Trecho de LT terminado em curto-circuito

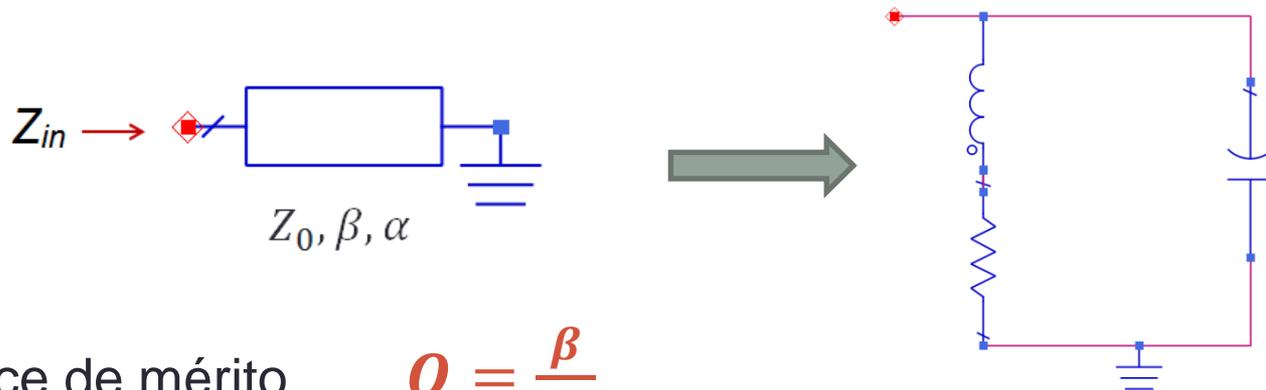
- Assumindo perdas nulas ( $\alpha=0$ )

$$Z_{in} = j \cdot Z_C \cdot tg(\beta l) \quad \text{sendo } \beta = 2\pi/\lambda_g$$

- Modo anti-ressonante

$$l = \frac{\lambda_g}{4} \rightarrow \beta \cdot l = \frac{2\pi}{\lambda_g} \cdot \frac{\lambda_g}{4} = \frac{\pi}{2} \quad \text{logo } Z_{in} \rightarrow \textit{circuito aberto}$$

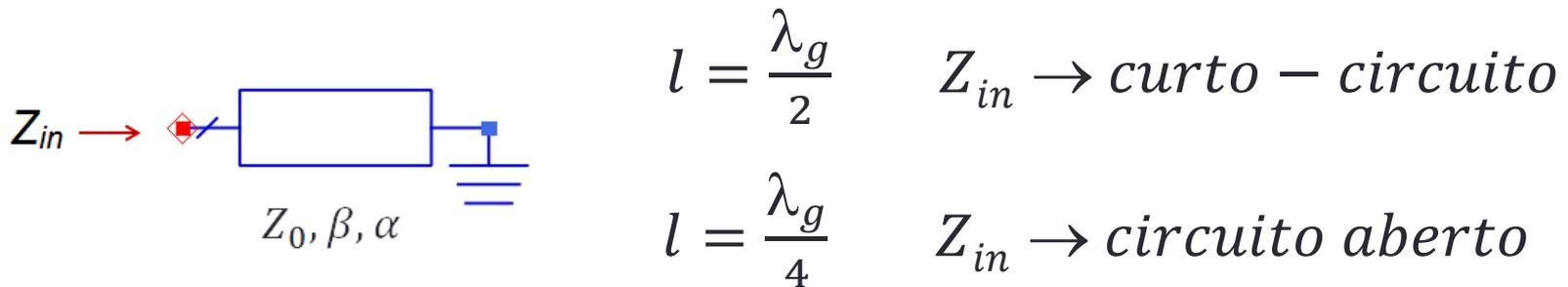
- Modelo equivalente na frequência de ressonância: RLC paralelo



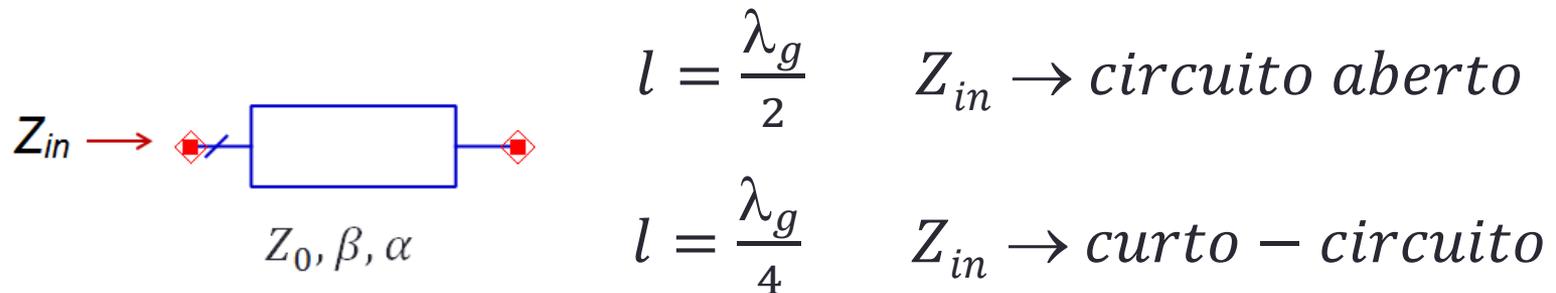
- Índice de mérito  $Q = \frac{\beta}{2\alpha}$

# Circuitos Ressonantes de Linhas de Transmissão

- Linha de transmissão em curto-circuito

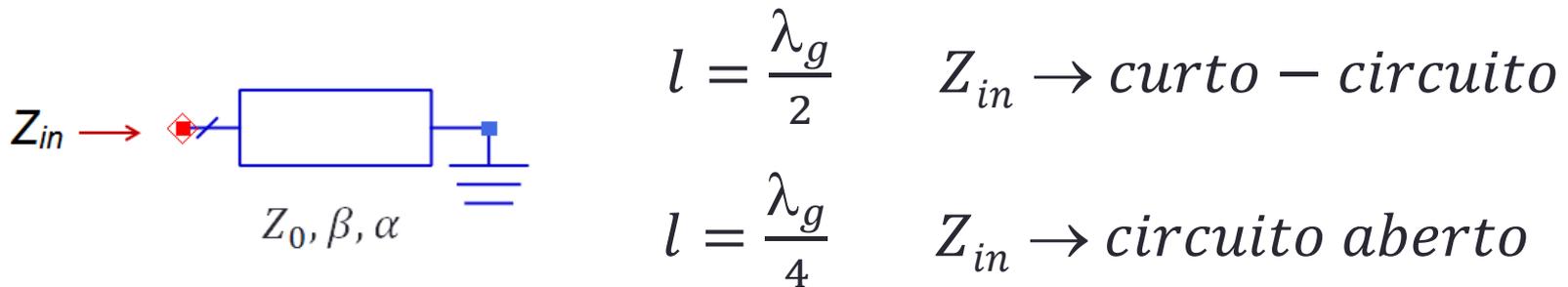


- Linha de transmissão em circuito aberto

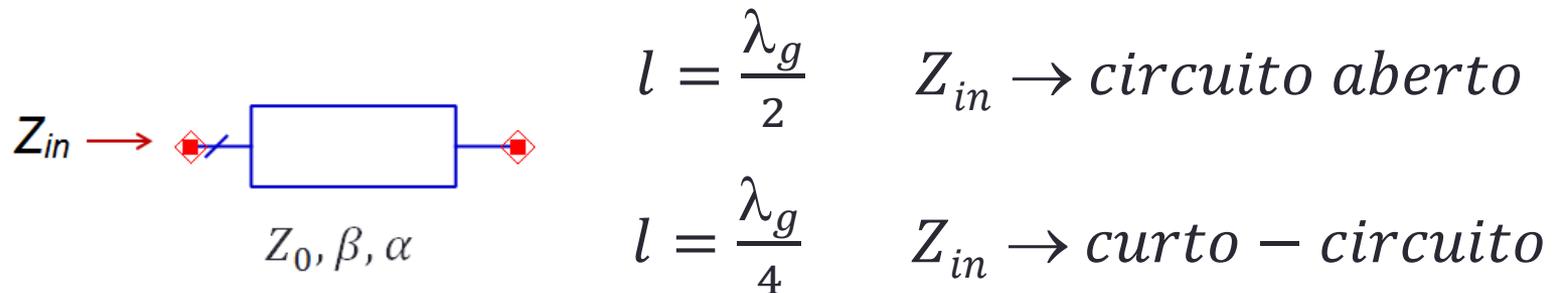


# Circuitos Ressonantes de Linhas de Transmissão

- Linha de transmissão em curto-circuito

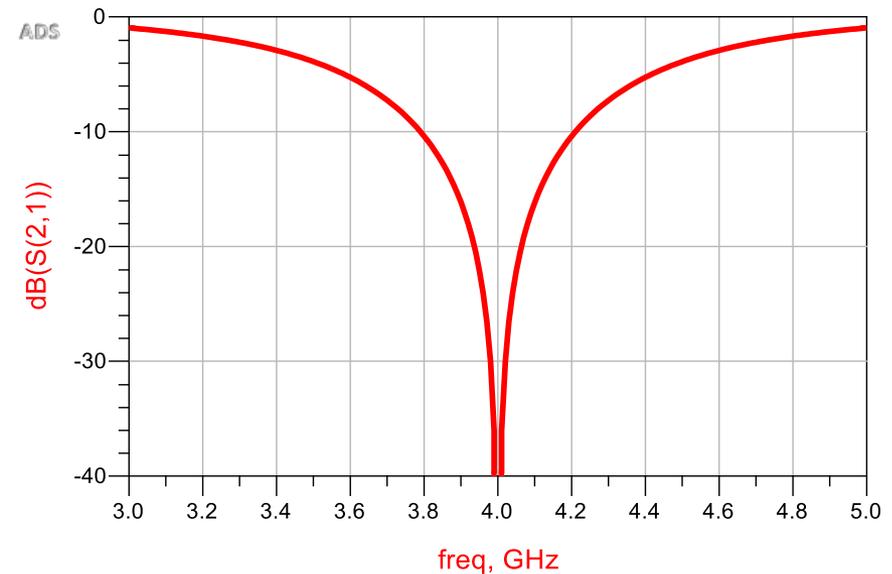
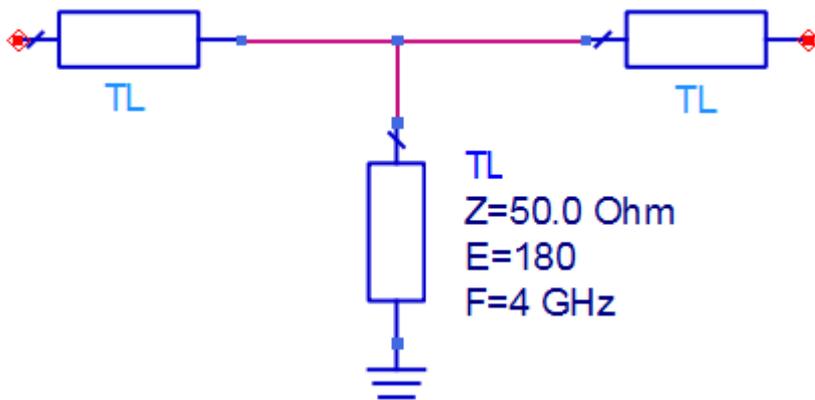


- Linha de transmissão em circuito aberto



# Circuitos Ressonantes de Linhas de Transmissão

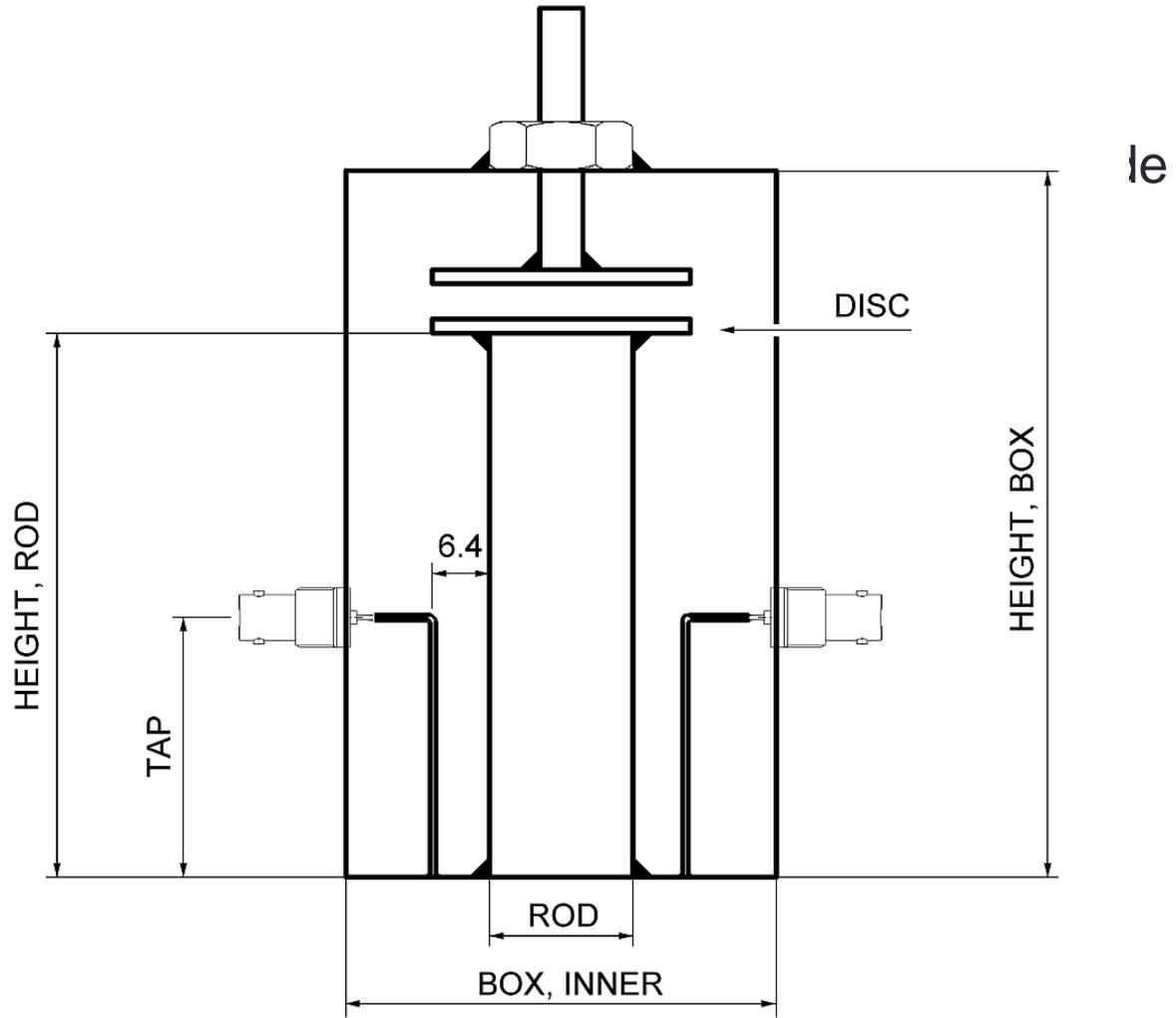
- Exemplo de aplicação – filtro rejeita-faixa
- Filtro com toco (stub) em paralelo, em curto, com  $l = \frac{\lambda_g}{2}$



# Circuitos Ressonantes de Linhas de Transmissão

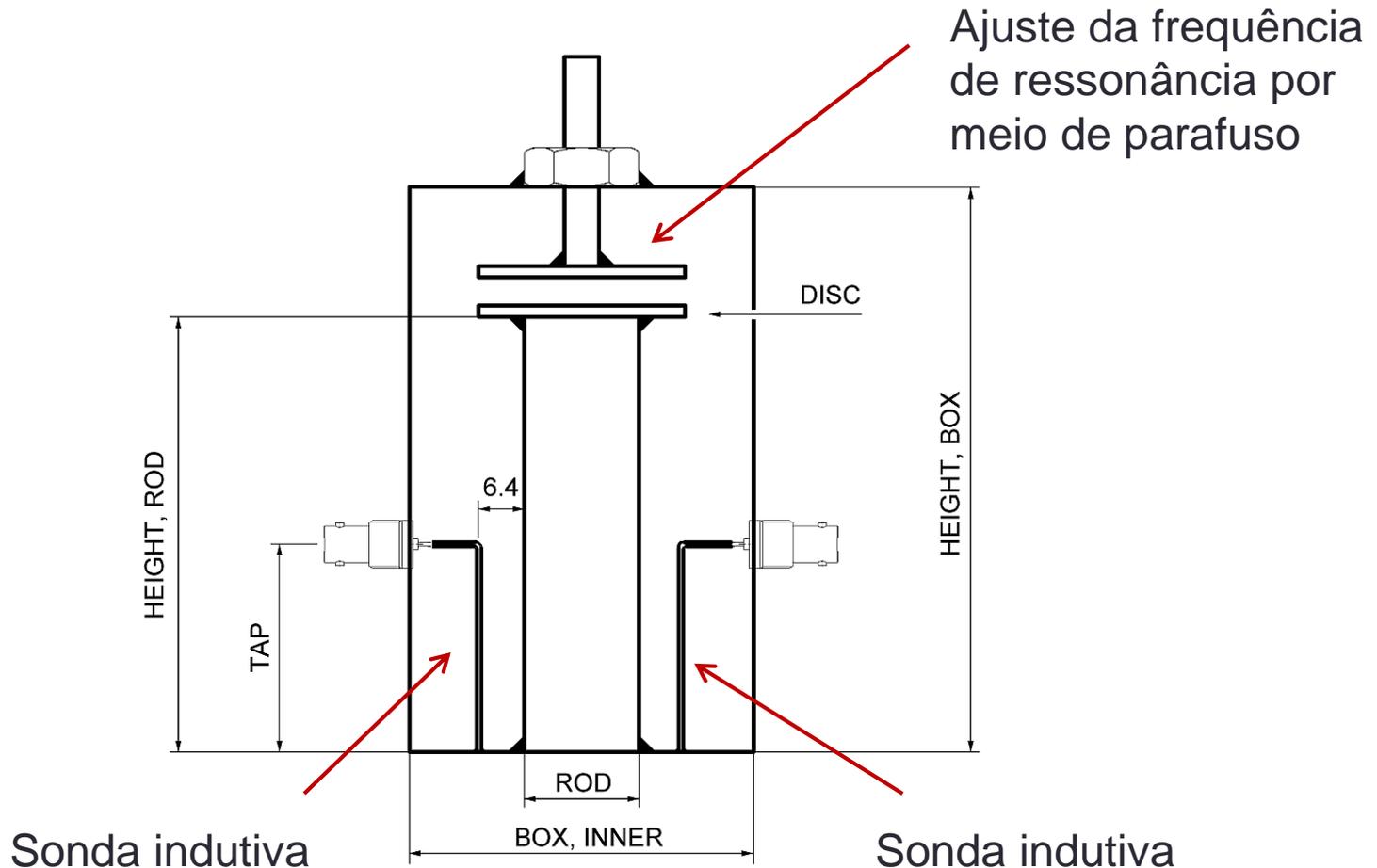
- Faixa d
  - Limit trans
- Depenc
  - E

Exemplos de cavidades ressonantes coaxiais



# Circuitos Ressonantes de Linhas de Transmissão

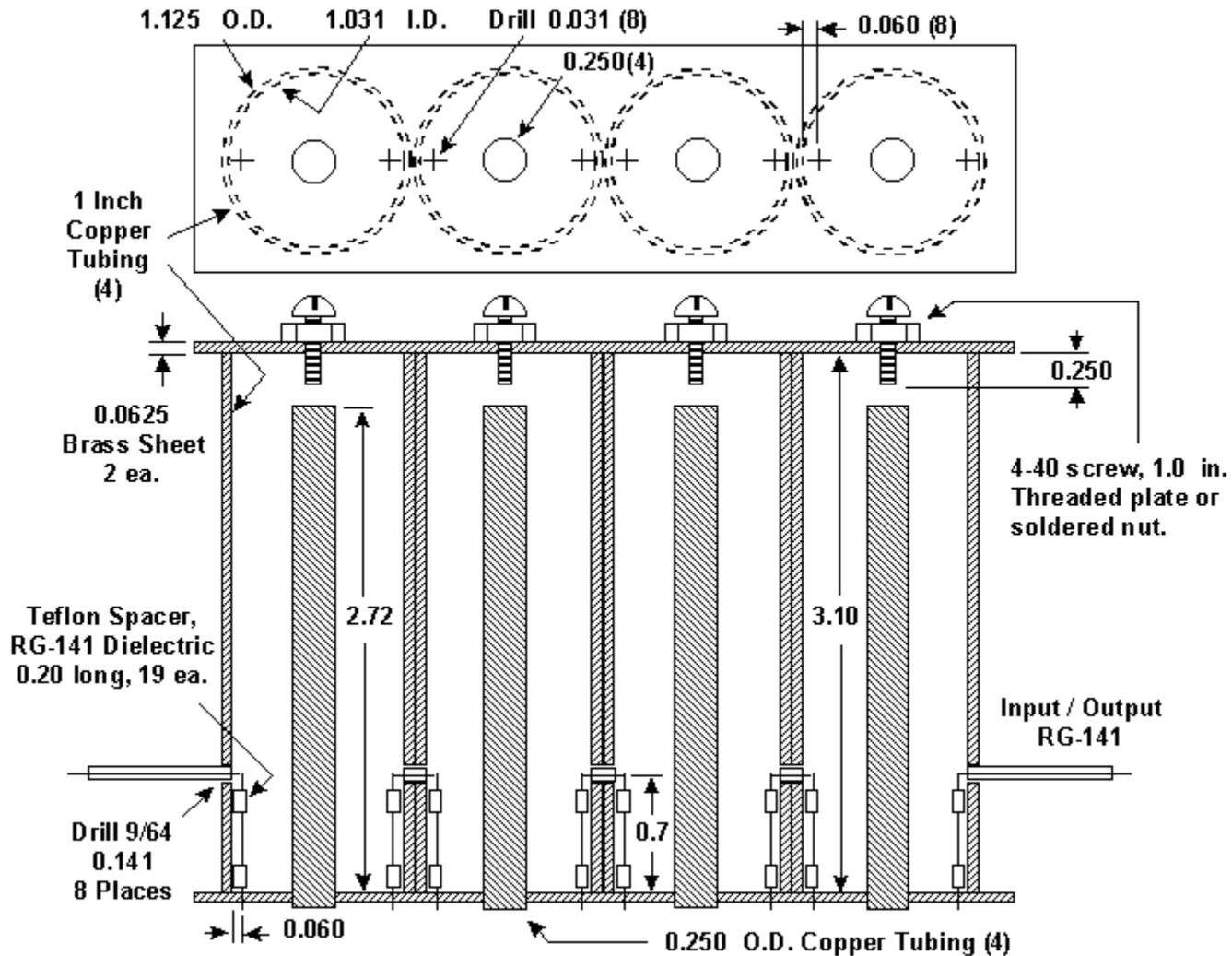
Cavidade ressonante coaxial sintonizável



# Circuitos Ressonantes de Linhas de Transmissão

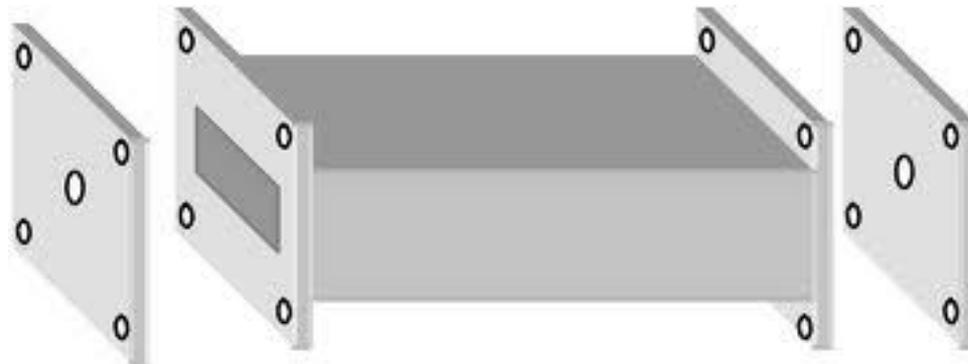
Filtro usando  
cavidades  
coaxiais

$f_0 = 1013$  MHz  
Banda 2 MHz

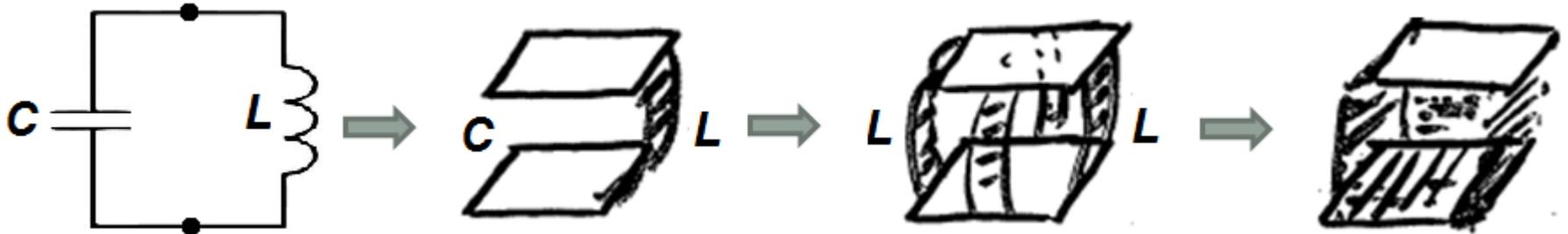


# Cavidades Ressonantes em Guia de Ondas

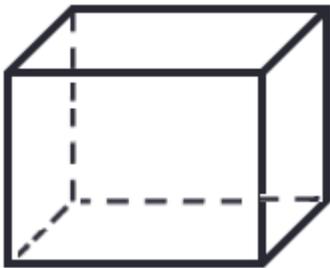
- Possuem elevado índice de mérito
- Trecho de guia de ondas terminado em curto-circuito nas duas extremidades
- Cavidades usuais: retangulares e cilíndricas



# CIRCUITOS RESSONANTES



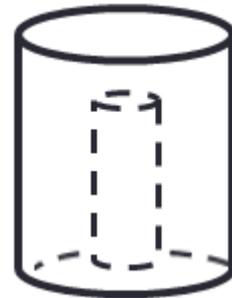
*Frequência de ressonância*  $f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{L \cdot C}}$



Cavidade retangular



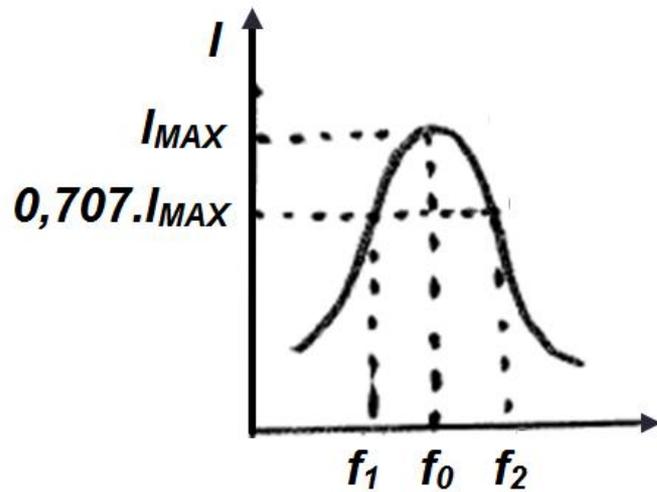
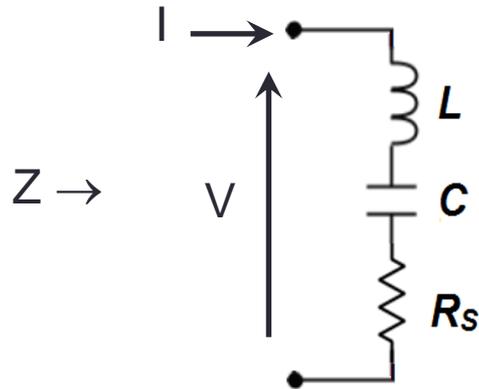
Cavidade cilíndrica



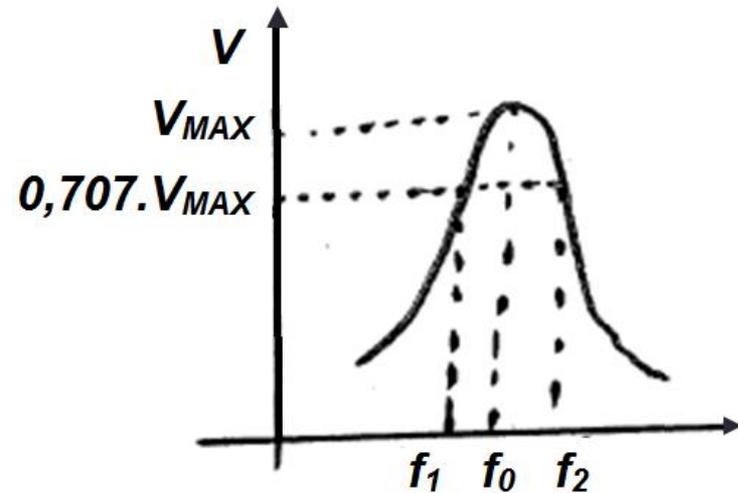
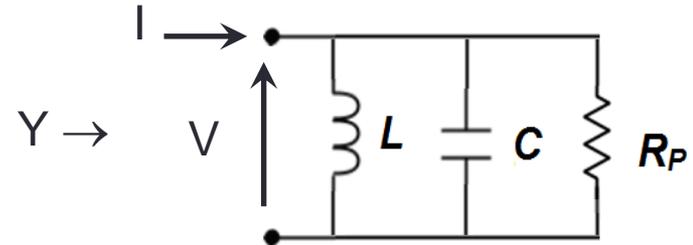
Cavidade coaxial

# CIRCUITOS RESSONANTES

Ressonância série



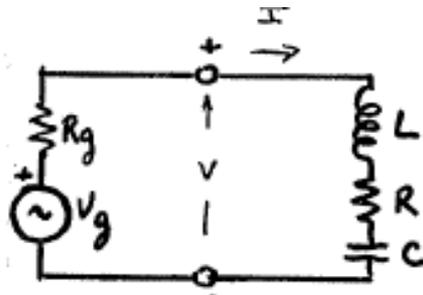
Ressonância paralela



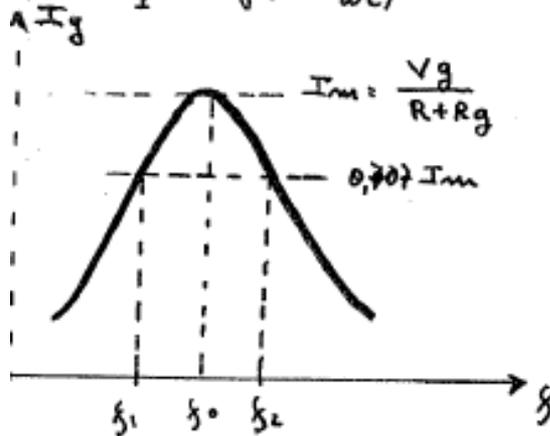
## II - CIRCUITOS RESSONANTES – Noções

- Cavidades ressonantes podem ser representadas por dois tipos de circuitos ressonantes – série e paralelo

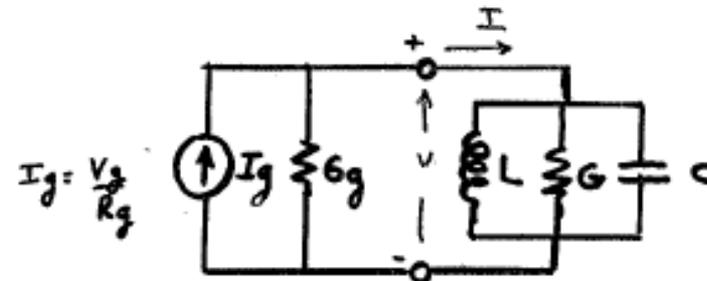
Circuito série



$$Z = \frac{V}{I} = R + j(\omega L - \frac{1}{\omega C})$$

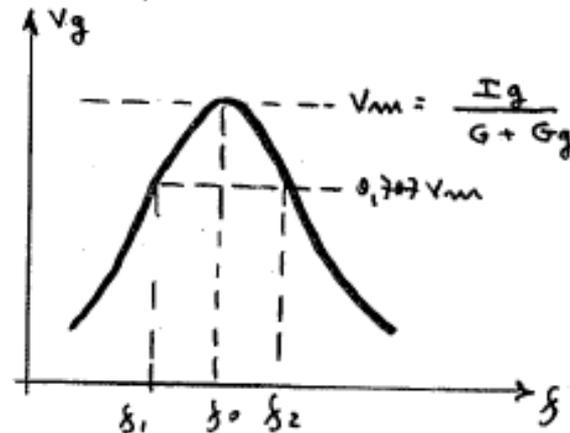


Circuito paralelo



$$I_g = \frac{V_g}{R_g}$$

$$Y = \frac{I}{V} = G + j(\omega C - \frac{1}{\omega L})$$



$$\text{Frequência de ressonância } f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{L \cdot C}}$$

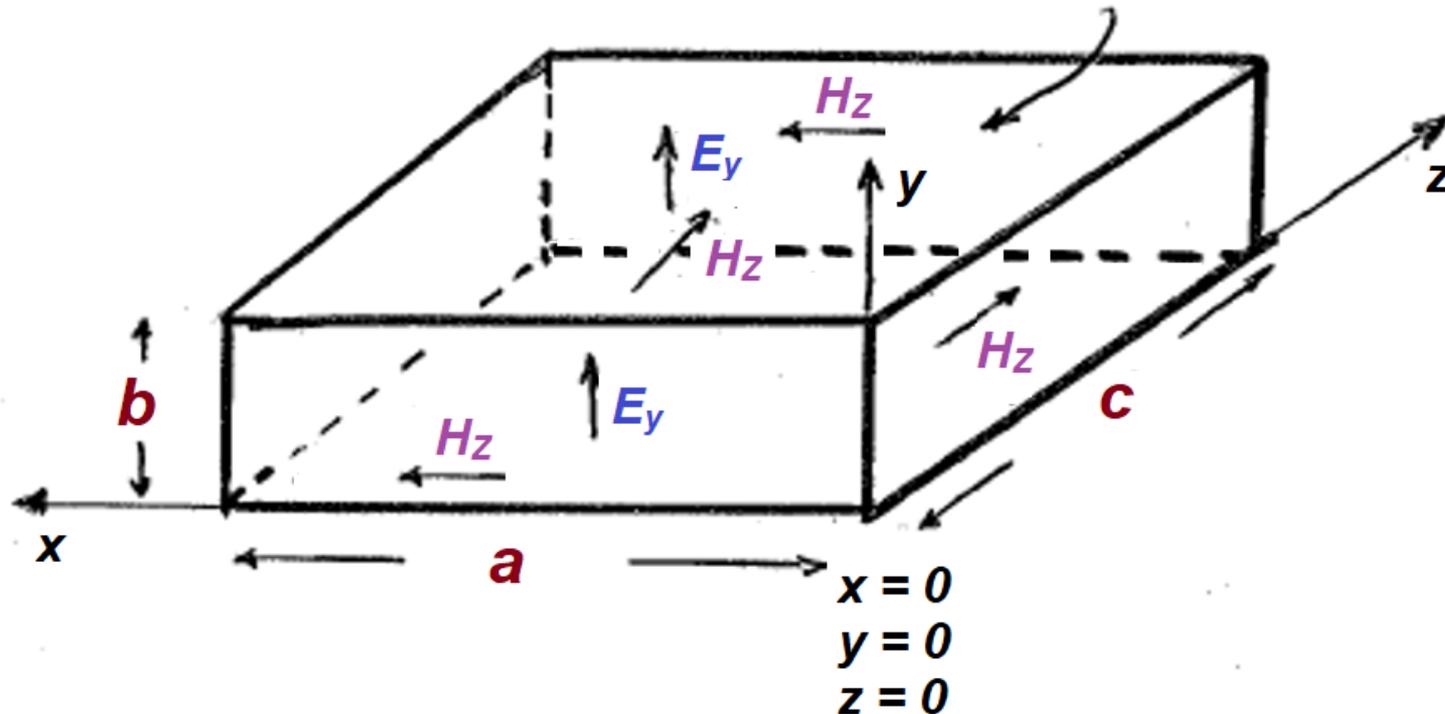
# III – CAVIDADES RETANGULARES

- INTRODUÇÃO

CAVIDADES RETANGULARES → guias retangulares com extremidades terminadas em curto-circuito

Cavidade retangular – dimensões **a** x **b** x **c**

$\epsilon_r$  e  $\mu_r$  – interior da cavidade



### III - CAVIDADES RETANGULARES

- Modo fundamental **TE<sub>10</sub>** que se propaga no guia de ondas retangular
- Componente  **$E_y(x,y,z)$**

$$E_y = E_{y0+} \cdot \text{sen} \left( \frac{\pi}{a} \cdot x \right) \cdot e^{-\gamma z} + E_{y0-} \cdot \text{sen} \left( \frac{\pi}{a} \cdot x \right) \cdot e^{+\gamma z}$$

- Considerando-se condutor e dielétrico perfeitos

$$E_y = E_{y0+} \cdot \text{sen} \left( \frac{\pi}{a} \cdot x \right) \cdot e^{-j\beta z} + E_{y0-} \cdot \text{sen} \left( \frac{\pi}{a} \cdot x \right) \cdot e^{+j\beta z}$$

$$\text{ou} \quad E_y = \text{sen} \left( \frac{\pi}{a} \cdot x \right) (E_{y0+} \cdot e^{-j\beta z} + E_{y0-} \cdot e^{+j\beta z})$$

- Condições de contorno de  $E_y$ 
  - $E_y$  é tangencial às paredes da frente e de trás da cavidade ( $z=0$  e  $z=c$ )
  - Logo  **$E_y(x, y, \underline{0}) = 0$**  e  **$z = 0$**  e  **$E_y(x, y, \underline{c}) = 0$**

### III - CAVIDADES RETANGULARES

- Considerando que  $E_y = 0$  em  $z = 0$

$$E_y(x, y, 0) = \text{sen}\left(\frac{\pi}{a} \cdot x\right) (E_{y0+} + E_{y0-}) = 0 \rightarrow E_{y0+} = -E_{y0-}$$

resultando  $E_y(x, y, z) = E_{y0+} \cdot \text{sen}\left(\frac{\pi}{a} \cdot x\right) (e^{-j\beta z} - e^{+j\beta z})$

$$E_y(x, y, z) = E_{y0+} \cdot \text{sen}\left(\frac{\pi}{a} \cdot x\right) \cdot \text{sen}(\beta z)$$

- Considerando que  $E_y = 0$  em  $z = c$

$$E_y(x, y, c) = E_{y0+} \cdot \text{sen}\left(\frac{\pi}{a} \cdot x\right) \cdot \text{sen}(\beta c) = 0, \quad \forall x$$

- Logo  $\text{sen}(\beta c) = 0 \rightarrow \beta c = p \cdot \pi, \quad \text{com } p = 1, 2, 3, \dots (p \neq 0)$

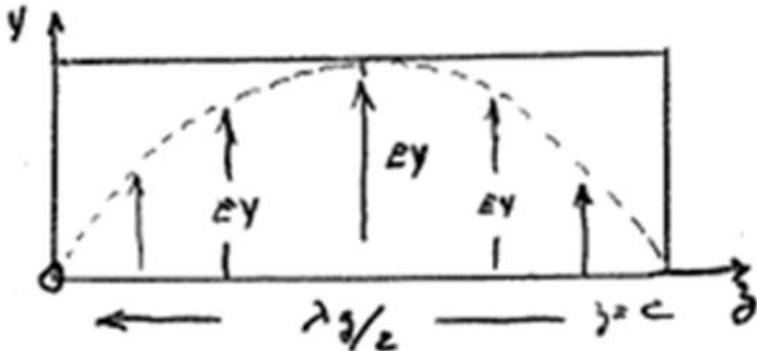
$$\beta = \frac{p\pi}{c}, \quad \text{com } p = 1, 2, 3, \dots (p \neq 0)$$

### III - CAVIDADES RETANGULARES

- Expressão geral para cavidade ressoando no modo  $T_{10p}$

$$E_y(x, y, z) = E_{y0+} \cdot \text{sen} \left( \frac{\pi}{a} \cdot x \right) \cdot \text{sen} \left( \frac{p\pi}{a} \cdot z \right), \quad \text{com } p = 1, 2, 3, \dots \quad (p \neq 0)$$

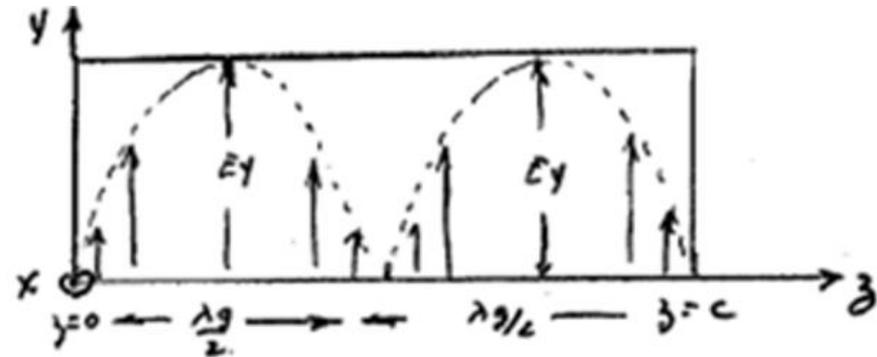
- Modos ressonantes  $TE_{101}$  e  $TE_{102}$  – corte longitudinal na direção  $z$



*Primeira ressonância -  $TE_{101}$*

O comprimento da cavidade comporta meio comprimento de onda guiado

$$c = \frac{\lambda_g}{2}$$



*Segunda ressonância -  $TE_{102}$*

O comprimento da cavidade comporta um comprimento de onda guiado

$$c = \lambda_g$$

### III - CAVIDADES RETANGULARES

- Em guias retangulares

$$\lambda_g = \frac{\lambda}{\left[1 - \left(f_c/f\right)^2\right]^{1/2}}$$

- Sendo  $f_r$  a frequência de ressonância da cavidade, tem-se

$$f_c/f_r = \lambda_r/\lambda_c$$

- E o comprimento de onda da frequência de ressonância da cavidade é

$$\lambda_g = \frac{\lambda_r}{\left[1 - \left(\lambda_r/\lambda_c\right)^2\right]^{1/2}}$$

### III - CAVIDADES RETANGULARES

- Trabalhando-se a expressão do comprimento de onda guiado tem-se

$$\lambda_g = \frac{\lambda_r}{\left[1 - \left(\lambda_r/\lambda_c\right)^2\right]^{1/2}} \quad \rightarrow \quad \lambda_g = \frac{1}{\left[\left(\frac{1}{\lambda_r}\right)^2 - \left(\frac{1}{\lambda_c}\right)^2\right]^{1/2}}$$

- No modo  $TE_{101}$ ,  $c = \lambda_g/2$  ou  $\lambda_g = 2c$

$$\lambda_g = \frac{1}{\left[\left(\frac{1}{\lambda_r}\right)^2 - \left(\frac{1}{\lambda_c}\right)^2\right]^{1/2}} = 2c \quad \rightarrow \quad \left(\frac{1}{\lambda_r}\right)^2 = \left(\frac{1}{2c}\right)^2 + \left(\frac{1}{\lambda_c}\right)^2$$

- No modo  $TE_{101}$ ,  $\lambda_c = 2a$   $\rightarrow \left(\frac{1}{\lambda_r}\right)^2 = \left(\frac{1}{2c}\right)^2 + \left(\frac{1}{2a}\right)^2$

- Frequência de ressonância  $f_r = v/\lambda_r$

Modo ressonante

$TE_{101}$

$$f_r = \frac{v}{2} \cdot \sqrt{\left(\frac{1}{a}\right)^2 + \left(\frac{1}{c}\right)^2}$$

Modo ressoanante

$TE_{mnp}$

$$f_r = \frac{v}{2} \cdot \sqrt{\left(\frac{m}{a}\right)^2 + \left(\frac{n}{b}\right)^2 + \left(\frac{p}{c}\right)^2}$$

### III - CAVIDADES RETANGULARES

- A seguir, vamos deduzir para o caso geral
  - Modos  $TE_{m,n,p}$  e  $TM_{m,n,p}$
- Equações de onda

$$\nabla^2 \bar{E} + k^2 \bar{E} = \vec{0}$$

$$\nabla^2 \bar{H} + k^2 \bar{H} = \vec{0}$$

$$k^2 = \omega^2 \mu \epsilon$$

$\omega$  : frequência angular

$\mu$  : permeabilidade magnética do meio

$\epsilon$  : permissividade elétrica do meio

### III - CAVIDADES RETANGULARES

Expressões gerais dos modos TE e TM

- A partir das Equações de Onda obtemos, em coordenadas retangulares

$$\frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial z^2} + k^2 \vec{E} = 0$$

$$\frac{\partial^2 \vec{H}}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \vec{H}}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \vec{H}}{\partial z^2} + k^2 \vec{H} = 0$$

- Modos TE<sub>m,n,p</sub> por definição: E<sub>z</sub> = 0 e H<sub>z</sub> ≠ 0
- Usamos a equação para calcular H<sub>z</sub> ≠ 0

$$\frac{\partial^2 H_z}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 H_z}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 H_z}{\partial z^2} + k^2 H_z = 0$$

- Com o auxílio da técnica de separação de variáveis

$$H_z(x, y, z) = X(x) \cdot Y(y) \cdot Z(z) \neq 0$$

- Obtemos da equação de onda em  $E_z$

$$\frac{X''(x)}{X(x)} + \frac{Y''(y)}{Y(y)} + \frac{Z''(z)}{Z(z)} + k^2 = 0$$

$$\downarrow \quad \downarrow \quad \downarrow$$

$$-k_x^2 - k_y^2 - k_z^2 + k^2 = 0$$

Sendo

$$-k_x^2 = \frac{X''}{X} \quad -k_y^2 = \frac{Y''}{Y} \quad -k_z^2 = \frac{Z''}{Z}$$

- Solução geral dos modos ressonantes  $TE_{mnl}$

$$H_z = \left[ A \cdot \cos(k_x \cdot x) + B \cdot \text{sen}(k_x \cdot x) \right] \cdot \left[ C \cdot \cos(k_y \cdot y) + D \cdot \text{sen}(k_y \cdot y) \right] \cdot \left[ F \cdot \cos(k_z \cdot z) + G \cdot \text{sen}(k_z \cdot z) \right]$$

sendo  $A, B, C, D, F$  e  $G$  constantes

- Impondo-se a condição de contorno nas seis paredes da cavidade
  - Em  $x = 0$  e  $x = a \rightarrow E_y \propto \frac{\partial H_z}{\partial x} = 0 \rightarrow B = 0$  e  $k_x = \frac{m\pi}{a}$
  - Em  $y = 0$  e  $y = b \rightarrow E_x \propto \frac{\partial H_z}{\partial y} = 0 \rightarrow D = 0$  e  $k_y = \frac{n\pi}{b}$
  - Em  $z = 0$  e  $z = c \rightarrow H_z = 0 \rightarrow F = 0$  e  $k_z = \frac{p\pi}{c}$

- Obtém-se a solução geral dos modos ressonantes  $TE_{mnl}$

$$H_z(x, y, z) = H_0 \cdot \cos\left(\frac{m\pi}{a} \cdot x\right) \cos\left(\frac{n\pi}{b} \cdot y\right) \cdot \text{sen}\left(\frac{p\pi}{c} \cdot z\right)$$

$$\left. \begin{array}{l} \text{sendo } m = 0, 1, 2, 3, \dots \\ n = 0, 1, 2, 3, \dots \\ p = 0, 1, 2, 3, \dots \end{array} \right\} m + n \neq 0$$

- A frequência de ressonância,  $f_r$  ou  $\omega_r$ , é obtida da expressão

$$-k_x^2 - k_y^2 - k_z^2 + k^2 = 0$$

$$-\left(\frac{m\pi}{a}\right)^2 - \left(\frac{n\pi}{b}\right)^2 - \left(\frac{p\pi}{c}\right)^2 + \omega_r^2 \cdot \mu \cdot \varepsilon$$

$$-\left(\frac{m\pi}{a}\right)^2 - \left(\frac{n\pi}{b}\right)^2 - \left(\frac{p\pi}{c}\right)^2 + (2\pi f_r)^2 \cdot \mu \cdot \varepsilon$$

- Frequência de ressonância dos modos ressonantes  $TE_{mnl}$

$$f_r = \frac{1}{2\sqrt{\mu \cdot \varepsilon}} \sqrt{\left(\frac{m}{a}\right)^2 + \left(\frac{n}{b}\right)^2 + \left(\frac{p}{c}\right)^2}$$

com

$$\left. \begin{array}{l} m = 0, 1, 2, 3, \dots \\ n = 0, 1, 2, 3, \dots \end{array} \right\} m + n \neq 0$$

$$p = 1, 2, 3, \dots$$

$$f_r = \frac{v}{2} \sqrt{\left(\frac{m}{a}\right)^2 + \left(\frac{n}{b}\right)^2 + \left(\frac{p}{c}\right)^2}$$

- Frequência de ressonância dos modos ressonantes  $TM_{mnl}$

com

$$\left. \begin{array}{l} m = 1, 2, 3, \dots \\ n = 1, 2, 3, \dots \end{array} \right\} m \cdot n \neq 0$$

$$p = 1, 2, 3, \dots$$

$$f_r = \frac{v}{2} \sqrt{\left(\frac{m}{a}\right)^2 + \left(\frac{n}{b}\right)^2 + \left(\frac{p}{c}\right)^2}$$

- Demais componentes dos campos elétrico e magnético do modo  $TE_{mnl}$

$$E_x = \frac{-j}{k_c^2} \omega \mu \frac{\partial H_z}{\partial y} \quad H_x = \frac{-j}{k_c^2} \gamma \frac{\partial H_z}{\partial x} \quad k_c^2 = k^2 - \gamma^2$$

$$E_y = \frac{j}{k_c^2} \omega \mu \frac{\partial H_z}{\partial x} \quad H_y = \frac{-j}{k_c^2} \gamma \frac{\partial H_z}{\partial y} \quad k^2 = \omega^2 \cdot \mu \cdot \epsilon$$

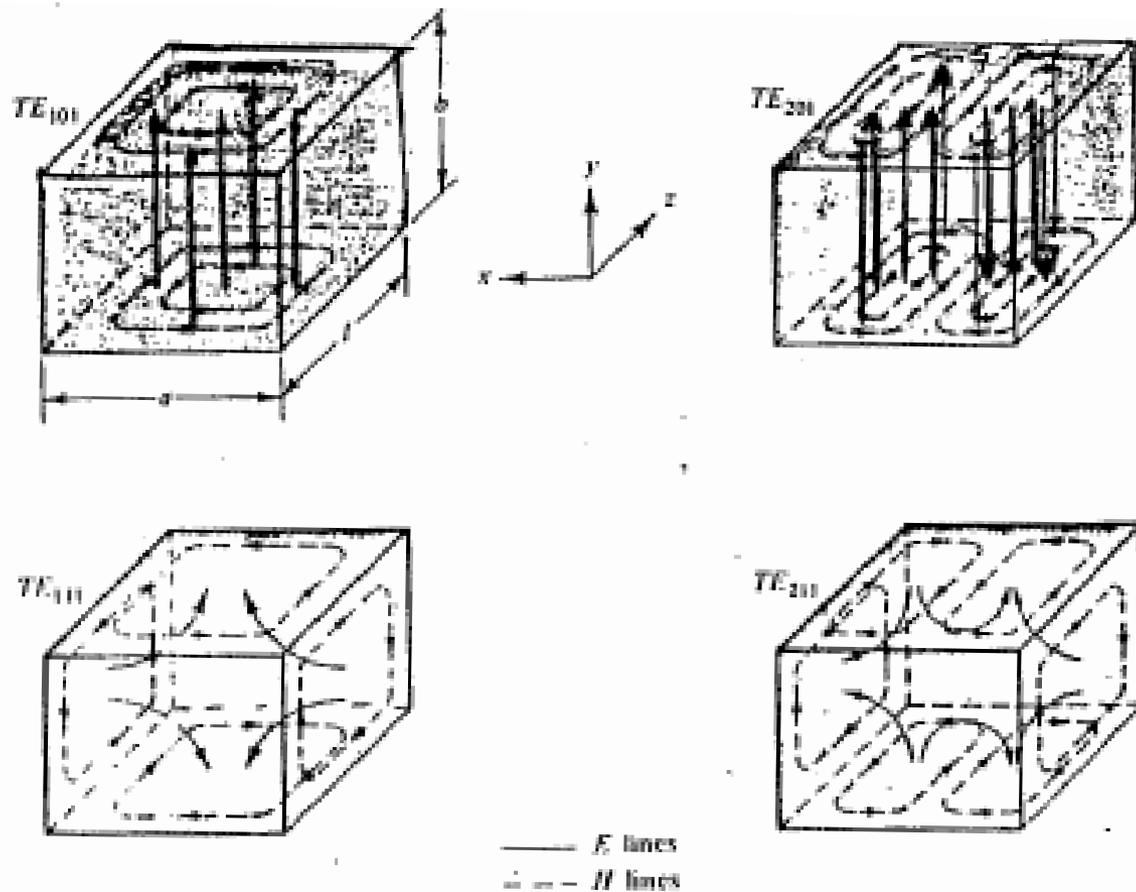
$$H_z = H_0 \cdot \cos\left(\frac{m\pi}{a} x\right) \cdot \cos\left(\frac{n\pi}{b} y\right) \cdot \text{sen}\left(\frac{p\pi}{c} z\right)$$

$$E_x = j \frac{\omega \mu \cdot k_x}{k_c^2} \cdot H_0 \cdot \cos\left(\frac{m\pi}{a} x\right) \cdot \text{sen}\left(\frac{n\pi}{b} y\right) \cdot \text{sen}\left(\frac{p\pi}{c} z\right)$$

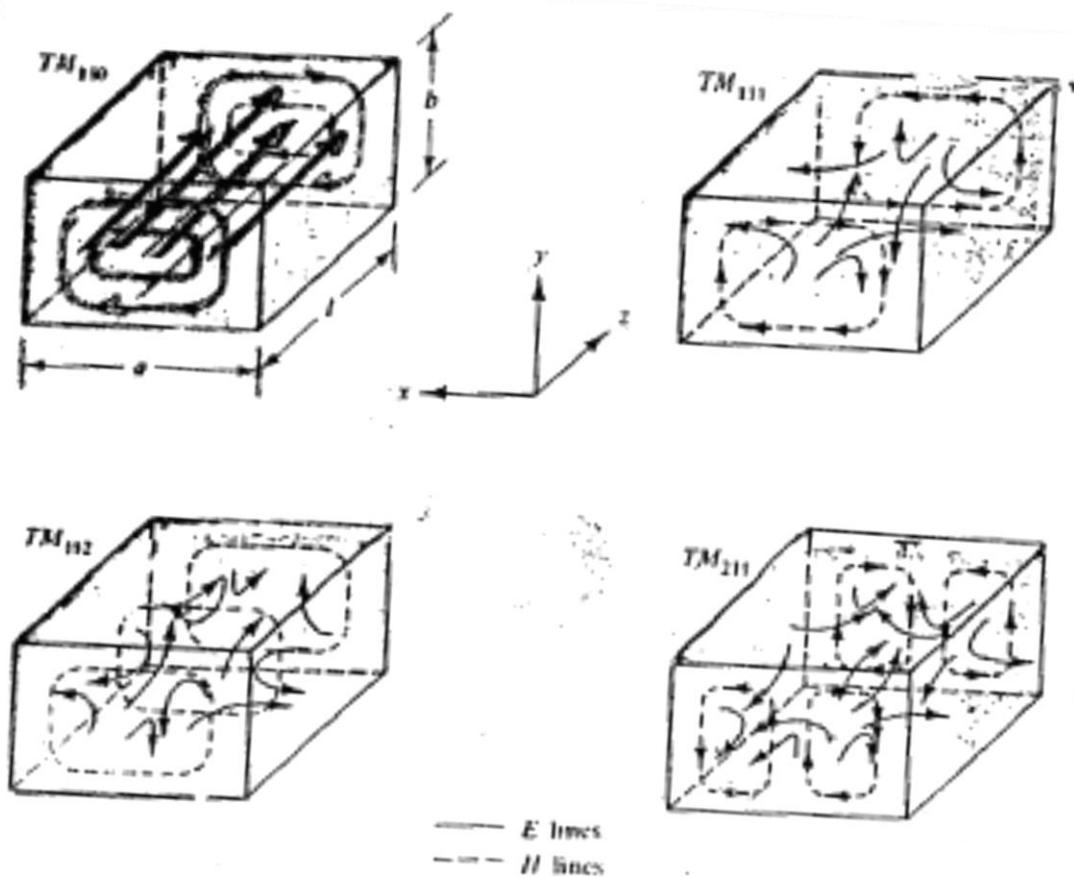
$$E_y = j \frac{\omega \mu \cdot k_y}{k_c^2} \cdot H_0 \cdot \text{sen}\left(\frac{m\pi}{a} x\right) \cdot \cos\left(\frac{n\pi}{b} y\right) \cdot \text{sen}\left(\frac{p\pi}{c} z\right)$$

$$H_x = -\frac{k_z \cdot k_x}{k_c^2} \cdot H_0 \cdot \text{sen}\left(\frac{m\pi}{a} x\right) \cdot \cos\left(\frac{n\pi}{b} y\right) \cdot \cos\left(\frac{p\pi}{c} z\right)$$

$$H_y = -\frac{k_z \cdot k_y}{b \cdot 2} \cdot H_0 \cdot \cos\left(\frac{m\pi}{a} x\right) \cdot \text{sen}\left(\frac{n\pi}{b} y\right) \cdot \cos\left(\frac{p\pi}{c} z\right)$$



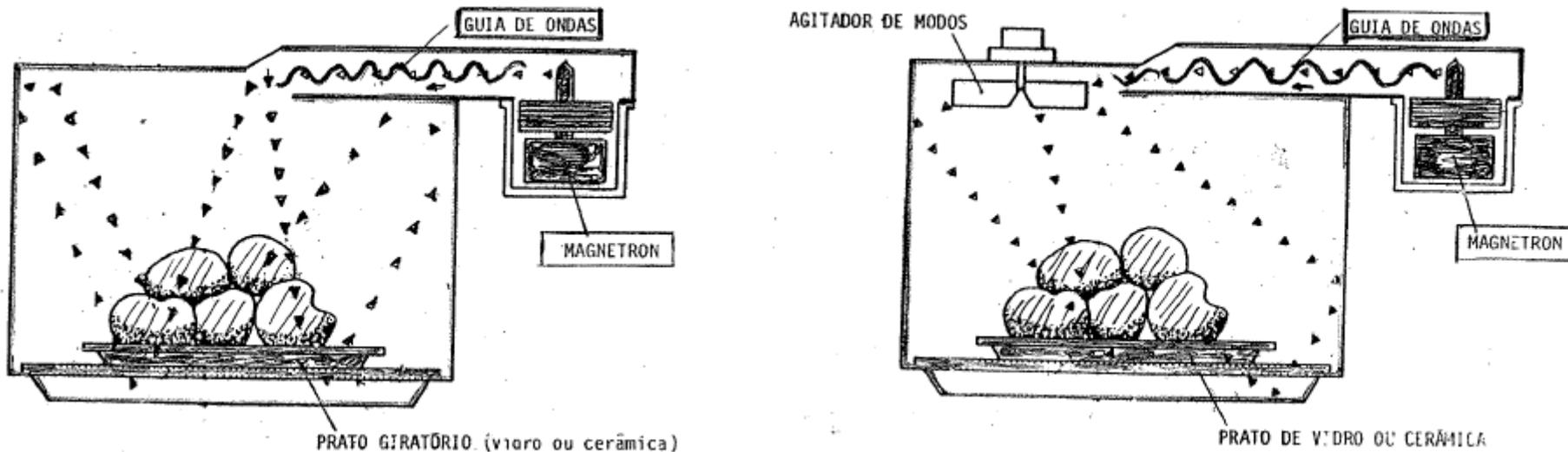
Field patterns for some  $TE_{mnp}$  modes in a rectangular cavity.  
 (Note: The  $E$  and  $H$  fields are  $90^\circ$  out-of-phase.)



Field patterns for some  $TM_{mnp}$  modes in a rectangular cavity.  
 (Note: The  $E$  and  $H$  fields are  $90^\circ$  out-of-phase.)

Exemplo de aplicação de cavidade ressonante retangular

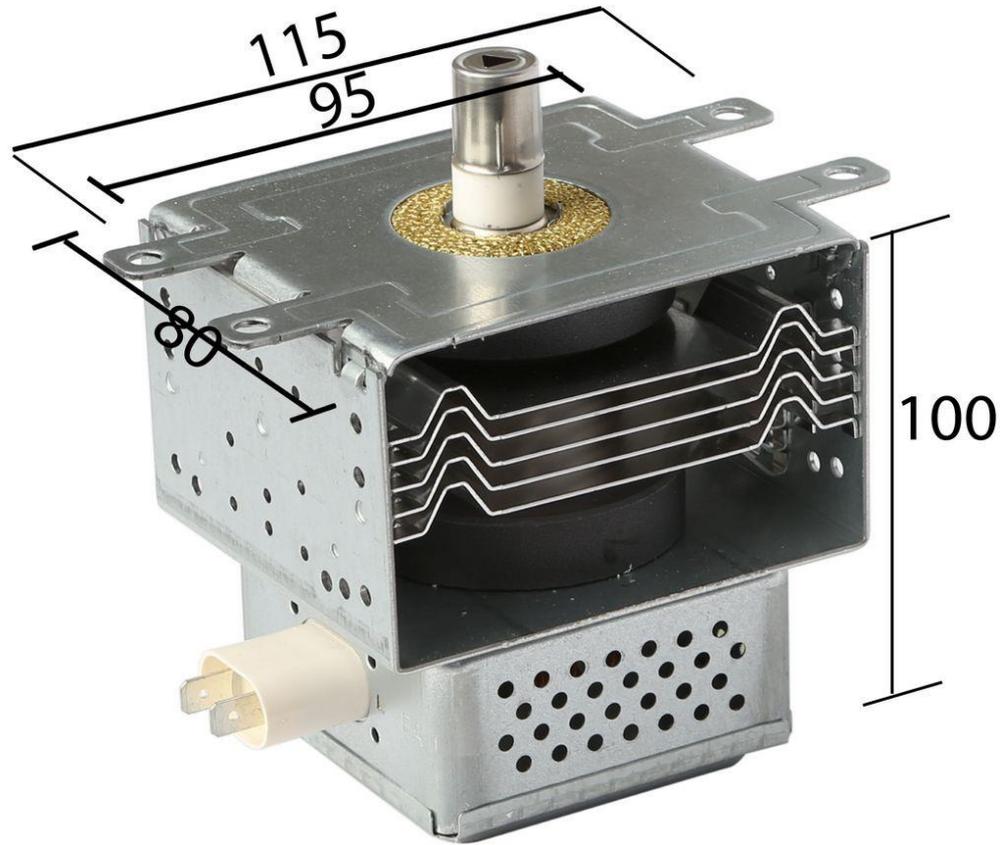
## FORNOS DE MICRO-ONDAS – Visão geral



- Opera na Banda ISM de 2,45 GHz
- Geração do sinal de micro-ondas – válvula Magnetron
- Cavidade ressonante operando com modos de ordem elevada

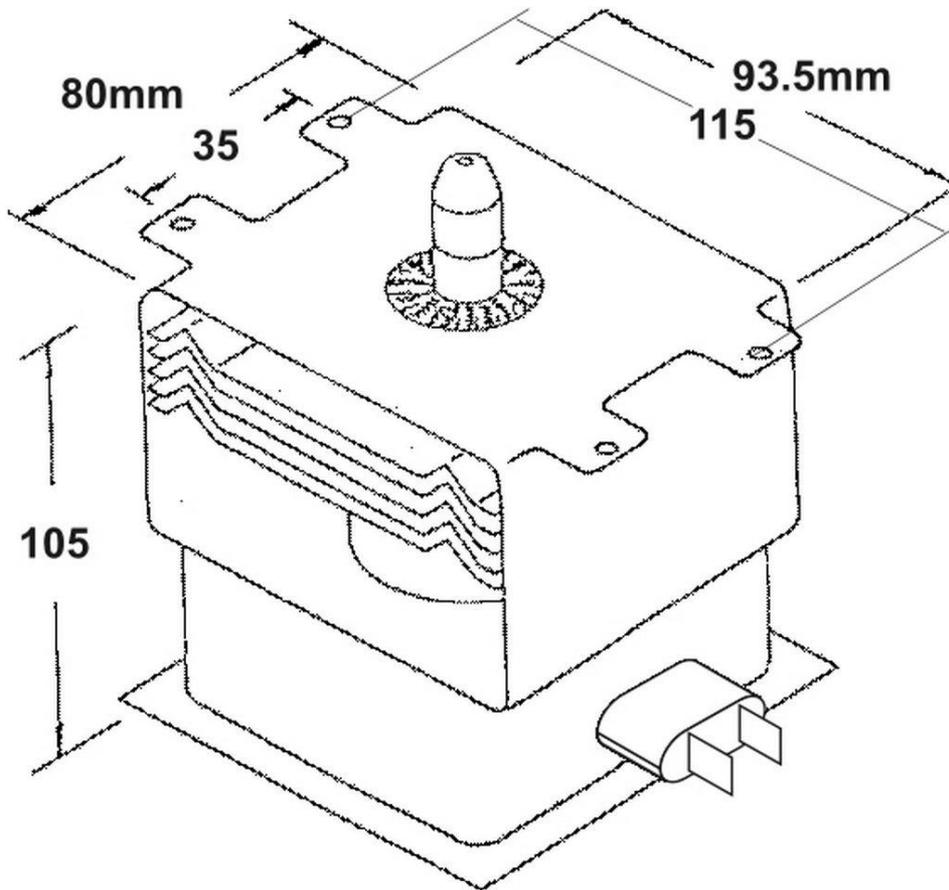
# Cavidades Retangulares – Válvula do forno de micro-ondas

EXEMPLO: PANASONIC INVERTER TYPE **MAGNETRON**



# Cavidades Retangulares – Válvula do forno de micro-ondas

EXEMPLO: PANASONIC INVERTER TYPE **MAGNETRON**



Watts	850
Freq.	2458MHz
FV	3.15V
PAV	4000V
PAI	300mA
Equiv.	Dae-Woo & Sanyo.
Code	AM741

# Cavidades Retangulares – Válvula do forno de micro-ondas

## MICROWAVE OVEN MAGNETRONS

These quality magnetrons will serve as replacements in a majority of ovens from many different manufacturers. The important points to observe are:

- (a) Will it physically fit in, i.e. is the size and mounting manner similar
- (b) Air flow in relation to the power socket and the tags.
- (c) Do the tags have bolts or not. The bolts can be removed if necessary.
- (c) After determining the physically same unit, you may find more than one similar to your magnetron. Then check the P/No listed with each magnetron. If missing or not listed, just use the most physically similar magnetron.
- (d) Wattage output is determined by the internal circuitry of the oven, such as the transformer voltages, capacitor values, etc, not necessarily just the magnetron. Again check the part numbers and dimensions.

A Higher Wattage Magnetron Can Be Used

In A Lower Wattage Oven Safely.

*All measurements are outer dimensions or centre hole/stud dimensions measured in millimeters.*



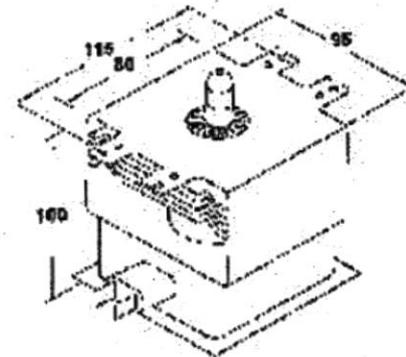
**Inverter Type  
Magnetrons  
OEM From  
Panasonic**

**NEW!**

**SEE PAGE 5...**

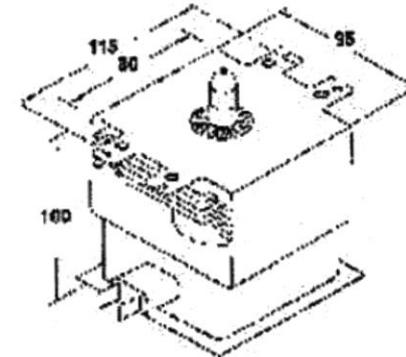
## AWI ALL-IN-LINE

Watts 850  
 Freq. 2458MHz  
 FV 3.15V  
 PAV 4000V  
 PAI 300mA  
 Equiv. A670-IH  
 2M224(62)  
 2M172AH/DW/P/HB  
 RVMZA047WREO  
 2M219HB  
 2M107A-33/94,  
 OM75-020,S107HB,  
 Code AM707



## AWI ALL-IN-LINE

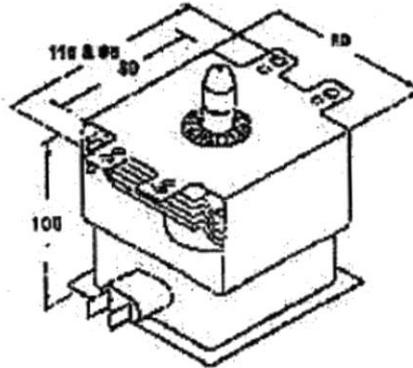
Watts 1000  
 Freq. 2458MHz  
 FV 3.3V  
 PAV 4000V  
 PAI 300mA  
 Equiv. A670-IH  
 2M107A(94)  
 2M247H(B)  
 OM75(020)  
 S107HB  
 Code AM724



# Cavidades Retangulares – Válvula do forno de micro-ondas

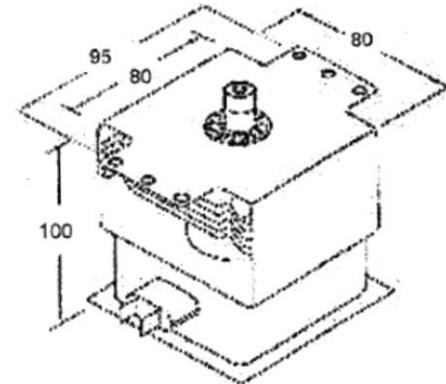
## AWI ALL-INLINE

Watts 850  
Freq. 2458MHz  
FV 3.3V  
PAV 4000V  
PAI 300mA  
Equiv. A650-IH  
2M207-03  
2M218(H)  
Code AM718



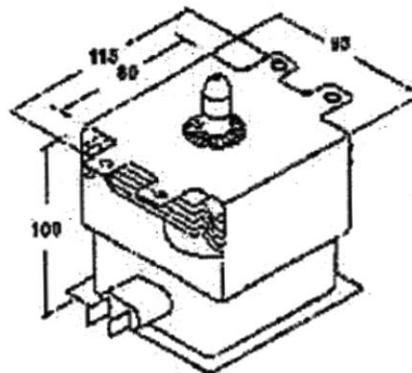
## AWI ALL-INLINE

Watts 850  
Freq. 2458MHz  
FV 3.3V  
PAV 4000V  
PAI 300mA  
P/No. 2M218/H  
2M238  
4150021502  
Equiv. Daewoo &  
Sanyo, etc.  
Code AM742



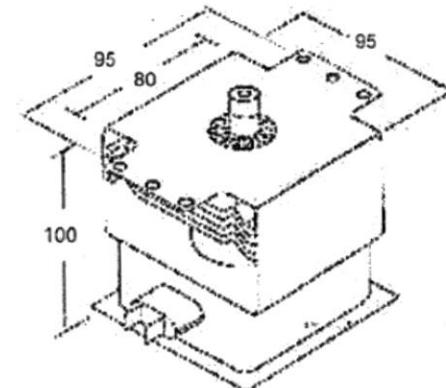
## DAI-1CHI ALL-INLINE

Watts 850  
General  
Replacement for  
OM75S-21 and  
many others  
Code MAG703



## AWI ALL-INLINE

Watts 850  
Freq. 2458MHz  
FV 3.15V  
PAV 4000V  
PAI 300mA  
Equiv. Dae-Woo &  
Sanyo.  
Code AM741



## FORNOS DE MICRO-ONDAS – Exemplo

Cavidade do forno: cubo com  $a = b = c = 43,2$  cm

$$f_0 = 15 \sqrt{\left(\frac{m}{a}\right)^2 + \left(\frac{n}{b}\right)^2 + \left(\frac{p}{c}\right)^2} = \frac{15}{a} \sqrt{(m)^2 + (n)^2 + (p)^2}$$

para o intervalo  $2,4 \text{ GHz} < f_0 < 2,5$

$$\left(\frac{2,4 \cdot 43,2}{15}\right)^2 \leq m^2 + n^2 + p^2 \leq \left(\frac{2,5 \cdot 43,2}{15}\right)^2$$

$$47,7 \leq m^2 + n^2 + p^2 \leq 51,84$$

# FORNOS DE MICRO-ONDAS – Exemplo

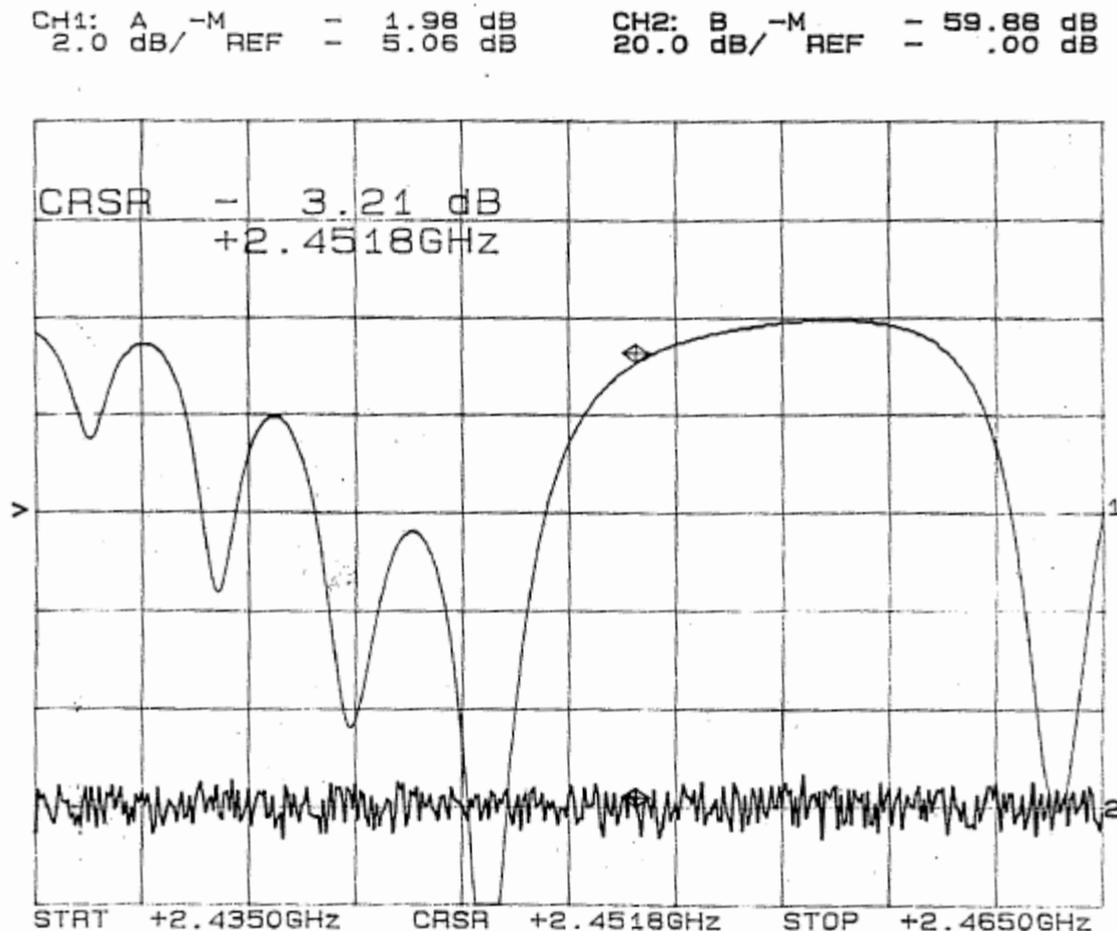
$$47,7 \leq m^2 + n^2 + p^2 \leq 51,84$$

$m =$	2	1	2	1	3	5	1	1	5	9
$n =$	4	3	3	1	4	0	0	1	1	6
$p =$	5	6	6	4	5	5	7	7	5	0
$m^2 + n^2 + p^2 =$	45	46	49	48	50	50	50	51	51	52

$m =$	3	3	6	6	2	3	4	3	5	5	5
$n =$	2	6	3	2	6	4	3	5	4	3	0
$p =$	6	2	2	3	3	5	5	4	3	4	5
$m^2 + n^2 + p^2 =$	49	49	49	49	49	50	50	50	50	50	50

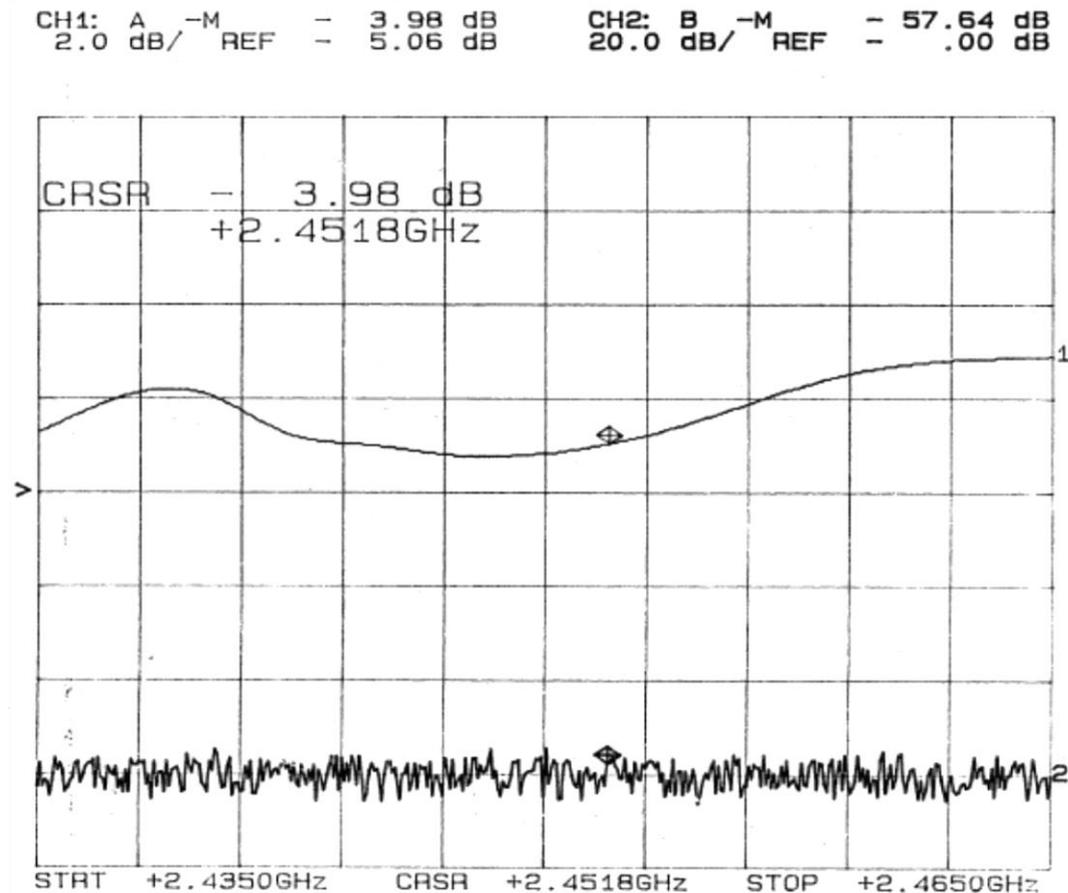
# Cavidades Retangulares - Índice de Mérito – modos $TE_{101}$

- $S_{11}$  x frequência – forno de micro-ondas com frasco de pirex vazio
- Vales na curva de  $S_{11}$  → frequências de ressonância entre 2,435 a 2,465 GHz

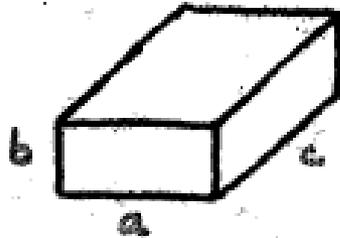


# Cavidades Retangulares - Índice de Mérito – modos $TE_{101}$

- $S_{11}$  x frequência – forno de micro-ondas com frasco de pirex com ¼ de litro de água no centro do forno



# Cavidades Retangulares – frequências de ressonância



$$b \leq a \leq c$$

1º caso -

$$a = b = c \quad \text{cubo}$$

$$TE_{101} \quad (f_r)_{101} = \frac{v}{2} \left[ \left(\frac{1}{a}\right)^2 + \left(\frac{1}{c}\right)^2 \right]^{\frac{1}{2}} = \frac{v}{2} \left[ 2 \cdot \left(\frac{1}{a}\right)^2 \right]^{\frac{1}{2}} = \frac{v}{\sqrt{2}} \cdot \sqrt{2}$$

$$TE_{011} \quad (f_r)_{011} = \frac{v}{2} \left[ \left(\frac{1}{b}\right)^2 + \left(\frac{1}{c}\right)^2 \right]^{\frac{1}{2}} = \frac{v}{2} \left[ \left(\frac{1}{a}\right)^2 + \left(\frac{1}{a}\right)^2 \right]^{\frac{1}{2}} = \frac{v}{\sqrt{2}} \cdot \sqrt{2}$$

$$\left. \begin{array}{l} \text{TE}_{110} \\ \text{TM}_{110} \end{array} \right\} (f_r)_{110} = \frac{v}{2} \left[ \left(\frac{1}{a}\right)^2 + \left(\frac{1}{b}\right)^2 \right]^{\frac{1}{2}} = \frac{v}{2} \left[ \left(\frac{1}{a}\right)^2 + \left(\frac{1}{a}\right)^2 \right]^{\frac{1}{2}} = \frac{v}{\sqrt{2}} \cdot \sqrt{2}$$

— 0 —

# Cavidades Retangulares – frequências de ressonância

- Relação entre frequências de ressonância para  $a = b = c$

TE<sub>111</sub>    TM<sub>111</sub>

$$(f_2)_{111} = \frac{v}{2} \left[ \left(\frac{1}{a}\right)^2 + \left(\frac{1}{b}\right)^2 + \left(\frac{1}{c}\right)^2 \right]^{1/2} = \frac{v}{2a} \sqrt{3} = 1.22(f_1)_{100} = 1.22(f_1)_{001}$$

	TE <sub>101</sub>	TE <sub>011</sub>	TM <sub>110</sub>	TM <sub>111</sub> TE <sub>111</sub>	TE <sub>102</sub>
$\frac{(f_2)_{111}}{(f_1)_{100}}$	1	1	1	1.22	1.58

# Cavidades Retangulares – frequências de ressonância

- Relação entre frequências de ressonância

FREQUÊNCIA →

	$f_r$	$f_r$	$f_r$
CUBO $c = c$ 	TE <sub>101</sub> TE <sub>011</sub> TM <sub>110</sub> $f_r = \frac{v}{2a} \sqrt{2}$	TE <sub>111</sub> TM <sub>111</sub> $f_r = \frac{v}{2a} \sqrt{3}$	
O $c = 2a$ 	TE <sub>101</sub> -TE <sub>011</sub> $f_r = \frac{v}{2a} \sqrt{\frac{5}{4}}$	TM <sub>110</sub> $f_r = \frac{v}{2a} \sqrt{\frac{7}{4}}$	TE <sub>111</sub> TM <sub>111</sub> $f_r = 1.34 f_{r101}$
$\lambda = 2b$ $c = 2a$ 	TE <sub>101</sub> $f_r = \frac{v}{2a} \sqrt{2}$	TE <sub>011</sub> $f_r = \frac{v}{2a} \sqrt{5}$	TM <sub>110</sub> $f_r = \frac{v}{2a} \sqrt{6}$

MODOS DE EXCITAÇÃO DAS CAVIDADES

# Cavidades Retangulares – frequências de ressonância

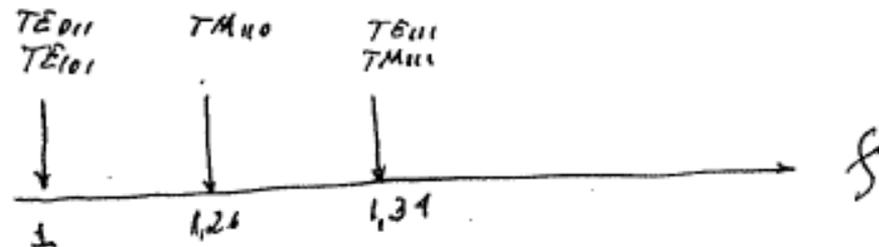
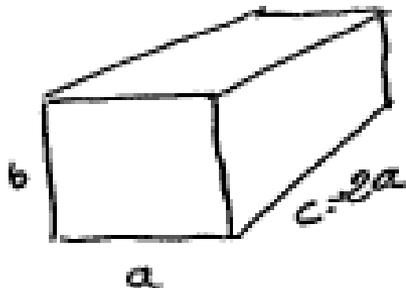
- Relação entre frequências de ressonância para  $a = b$  e  $c = 2a$

$$(f_r)_{TE_{101}} = \frac{v}{2} \left[ \left(\frac{1}{a}\right)^2 + \left(\frac{0}{b}\right)^2 + \left(\frac{1}{c}\right)^2 \right]^{1/2} = \frac{v}{2} \left[ \left(\frac{1}{a}\right)^2 + \left(\frac{1}{2a}\right)^2 \right]$$

$$(f_r)_{TE_{101}} = \frac{v}{2a} \sqrt{\frac{5}{4}} = (f_r)_{TE_{011}} = \frac{v}{2a} \cdot 1,118$$

$$(f_r)_{TM_{110}} = \frac{v}{2a} \left[ \left(\frac{1}{a}\right)^2 + \left(\frac{1}{b}\right)^2 + 0 \right]^{1/2} = \frac{v}{2a} \sqrt{2} = \frac{v}{2a} \cdot 1,414$$

$$(f_r)_{TE_{111}} = (f_r)_{TM_{111}} = \frac{v}{2} \left[ \left(\frac{1}{a}\right)^2 + \left(\frac{1}{a}\right)^2 + \left(\frac{1}{2a}\right)^2 \right]^{1/2} = \frac{v}{2a} \cdot \sqrt{\frac{9}{4}} = \frac{v}{2a} \cdot 1,5$$



# Cavidades Retangulares – frequências de ressonância

- Relação entre frequências de ressonância para  $a = 2b$  e  $c = a$

$$TE_{101} = (f_r)_{101} = \frac{v}{2} \left[ \left(\frac{1}{a}\right)^2 + \left(\frac{1}{c}\right)^2 \right]^{1/2} = \frac{v}{2} \left[ \left(\frac{1}{a}\right)^2 + \left(\frac{1}{a}\right)^2 \right]^{1/2} = \frac{v}{2a} \sqrt{2}$$

$$TE_{011} \Rightarrow (f_r)_{011} = \frac{v}{2} \left[ \left(\frac{1}{b}\right)^2 + \left(\frac{1}{c}\right)^2 \right]^{1/2} = \frac{v}{2} \left[ \left(\frac{2}{a}\right)^2 + \left(\frac{1}{a}\right)^2 \right]^{1/2} = \frac{v}{2a} [5]^{1/2}$$

$= \frac{v}{2a} \cdot 2,24$

$$TM_{110} (f_r)_{110} = \frac{v}{2} \left[ \left(\frac{1}{a}\right)^2 + \left(\frac{1}{b}\right)^2 \right]^{1/2} = \frac{v}{2a} [2]^{1/2} = \frac{v}{2a} \cdot 1,41$$

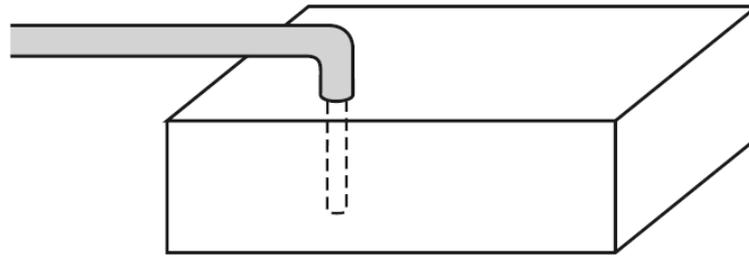
$$\left. \begin{matrix} TM_{111} \\ TE_{111} \end{matrix} \right\} (f_r)_{111} = \frac{v}{2} \left[ \left(\frac{1}{a}\right)^2 + \left(\frac{1}{b}\right)^2 + \left(\frac{1}{c}\right)^2 \right]^{1/2} = \frac{v}{2a} \left[ \left(\frac{1}{a}\right)^2 + \left(\frac{2}{a}\right)^2 + \left(\frac{1}{a}\right)^2 \right]^{1/2} = \frac{v}{2a} \sqrt{6}$$

	$TE_{101}$	$TE_{011}$	$TM_{110}$	$\left. \begin{matrix} TE_{111} \\ TM_{111} \end{matrix} \right\}$	$TE_{102}$
$\frac{(f_r)_{101}}{(f_r)_{101}}$	1	1,58	1,41	1,73	1,58

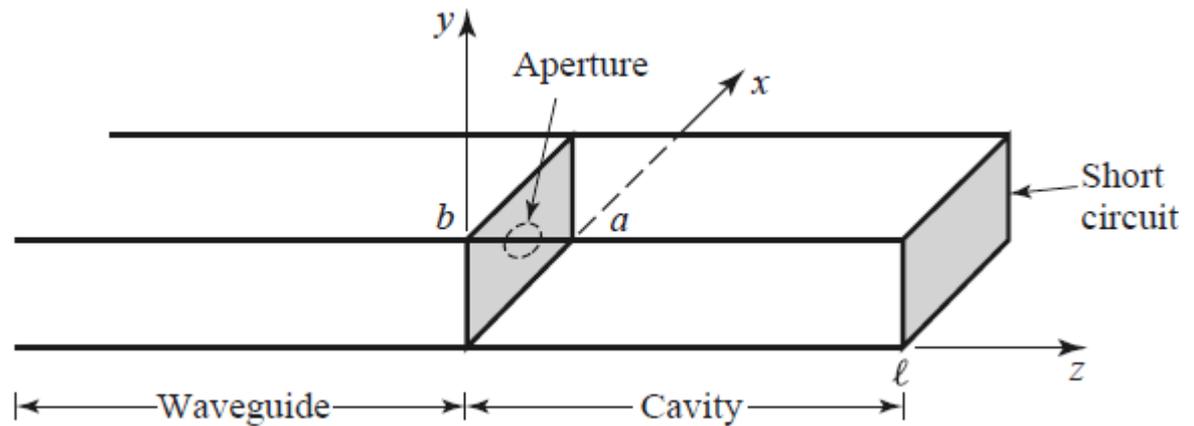
# Cavidades Retangulares

- Formas de excitação da cavidade

Sonda coaxial



Iris de acoplamento



## Cavidades Retangulares

- Modo  $TE_{101}$  - componentes dos campos E e H

$$\frac{E_{y_0}}{H_{x_0}} = -Z_{TE} \quad * \quad \frac{E_{y_-}}{H_{x_-}} = Z_{TE}$$

$$H_x = H_{x_0} + H_{x_-}$$

$$Z_{TE} = j \frac{\omega \mu a}{\beta} = \frac{\omega \mu}{\beta}$$

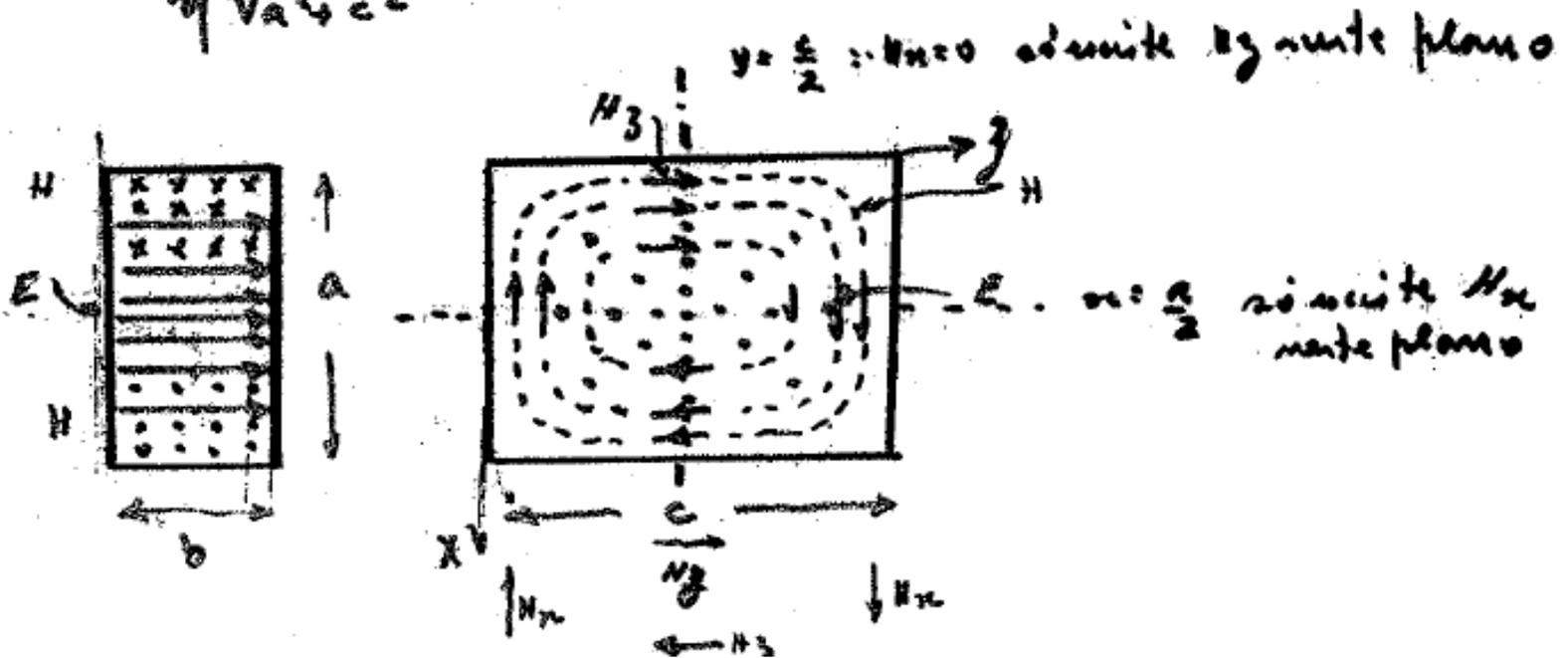
$$H_x = -\frac{E_{y_0}}{Z_{TE}} + \frac{E_{y_-}}{Z_{TE}} = -\frac{1}{Z_{TE}} [E_{y_0} - E_{y_-}]$$

$$H_x = -\frac{1}{Z_{TE}} [E_{y_0} \cdot e^{-j\beta z} - E_{y_0} \cdot e^{j\beta z}] \cos\left(\frac{\beta}{a} a\right)$$

# Cavidades Retangulares

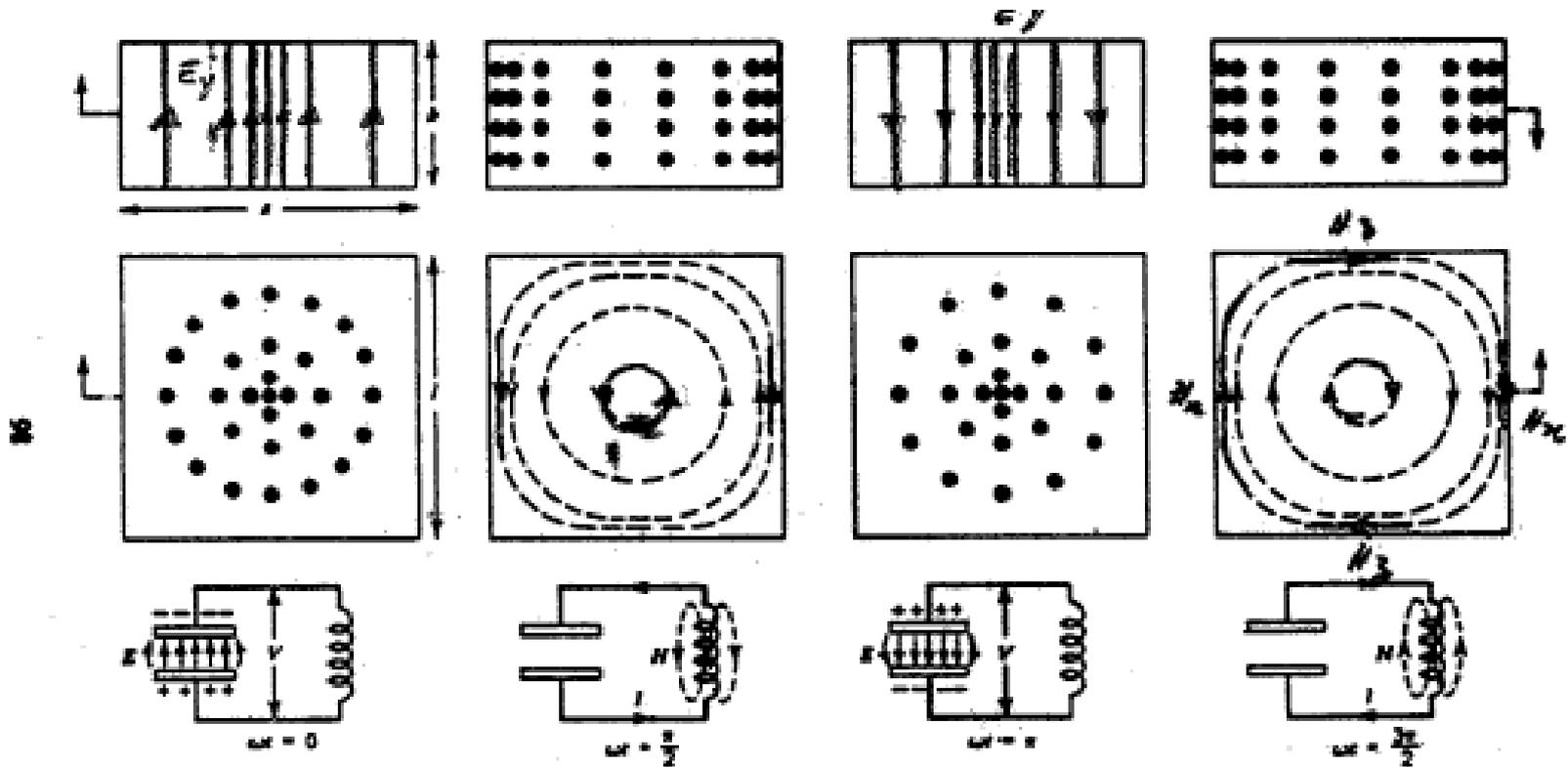
- Modo  $TE_{101}$  - componentes dos campos E e H

$$H_x = -\frac{2E_0 \cdot a}{\eta \sqrt{a^2 + c^2}} \cdot \sin\left(\frac{\pi}{2}x\right) \cdot \cos\left(\frac{\pi}{2}z\right)$$



# Cavidades Retangulares

- Analogia entre campos E e H da cavidade em guia retangular e tensões e correntes de ressoador LC



## Cavidades Retangulares - Índice de Mérito (Fator de Qualidade)

- Definições de Índice de Mérito  $\rightarrow$  em  $\omega = \omega_r$

- $Q_U$  - índice de mérito não-carregado

$$Q_U = \omega_r \frac{\text{Energia armazenada no circuito ressonante}}{\text{Potência média dissipada no circuito ressonante}}$$

- Modelo RLC série

$$Q_U = \frac{\omega_r \cdot L}{R}$$

- Modelo RLC paralelo

$$Q_U = \frac{\omega_r \cdot C}{G}$$

- $Q_E$  - índice de mérito externo

$$Q_E = \omega_r \frac{\text{Energia armazenada no circuito ressonante}}{\text{Potência média dissipada no circuito externo}}$$

- Modelo RLC série

$$Q_E = \frac{\omega_r \cdot L}{R_g}$$

- Modelo RLC paralelo

$$Q_E = \frac{\omega_r \cdot C}{G_g}$$

# Cavidades Retangulares - Índice de Mérito

- $Q_L$  - *índice de mérito carregado*

$$Q_L = \omega_r \frac{\text{Energia armazenada no circuito ressonante}}{\text{Potência média dissipada no circuito ressonante}}$$

- Modelo RLC série

- Modelo RLC paralelo

$$Q_E = \frac{\omega_r \cdot L}{R_g + R}$$

$$Q_E = \frac{\omega_r \cdot C}{G_g + G}$$

$Q_L$  depende do acoplamento entre o circuito ressonante e o circuito externo

- Relações entre os índices de mérito

$$\frac{1}{Q_L} = \frac{1}{Q_E} + \frac{1}{Q_U} \quad \text{e} \quad Q_L = \frac{f_r}{f_2 - f_1} = \frac{f_r}{\Delta f} = \frac{\text{frequência de ressonância}}{\text{Banda de 3 dB}}$$

$f_1$  e  $f_2$  - frequências em que a tensão cai a 0,707 do máximo e a potência a 3 dB do máximo

# Cavidades Retangulares - Índice de Mérito – modos $TE_{10p}$

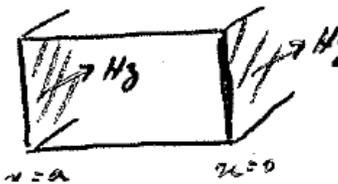
- *Índice de mérito não carregado – modos  $TE_{10p}$*

$$Q_L = \omega_r \frac{\text{Energia armazenada no circuito ressonante}}{\text{Potência média total dissipada}} = \omega_r \frac{W_E}{P_d}$$

- Considerando cavidade com paredes metálicas feitas com condutores reais com resistência superficial  $R_s$

$$P_d = \frac{R_s}{2} \int_{\text{paredes}} |H_z|^2 \cdot dS$$

- Calcula-se  $P_d$  em cada uma das 6 paredes da cavidade ressonante
- Em cada parede lateral  $\rightarrow H_z = H_t$



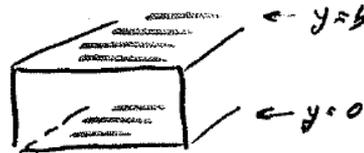
$$P_d = \frac{1}{2} R_s \int |H_z|^2 \cdot dS = \frac{1}{2} R_s \int_0^b \int_0^c H_0^2 \cdot \rho_m^2 \left( \frac{\pi}{c} z \right) \cdot dy dz = \frac{R_s H_0^2}{2} \cdot \frac{b \cdot c}{2}$$

- Considerando duas paredes laterais  $\rightarrow P_d = \frac{R_s}{2} H_0^2 b \cdot c$

# Cavidades Retangulares - Índice de Mérito – modos $TE_{10p}$

- Paredes superior e inferior

$$|H_z|^2 = |H_x|^2 + |H_y|^2$$



$$P_d = R_s H_0^2 \left(\frac{k_z}{k_x}\right)^2 \int_0^a \int_0^c \sin^2\left(\frac{\pi}{a}x\right) \cdot \cos^2\left(\frac{\pi}{c}z\right) dx dz + R_s H_0^2 \int_0^a \int_0^c \cos^2\left(\frac{\pi}{a}x\right) \cdot \sin^2\left(\frac{\pi}{c}z\right) dx dz$$

$$= \frac{H_0^2 R_s}{2} a^2 \left[ \frac{1}{2} \left(\frac{a}{c}\right) + \frac{1}{2} \left(\frac{c}{a}\right) \right]$$

- Paredes anterior e posterior



$$P_d = \frac{R_s}{2} a^2 H_0^2 \left[ \frac{a \cdot b}{c^2} \right]$$

## Cavidades Retangulares - Índice de Mérito – modos $TE_{10p}$

- Potência média total nas seis paredes

$$Pd = \frac{R_s}{2} \cdot a^2 \cdot H_0^2 \left[ \frac{a \cdot b}{c^2} + \frac{b \cdot c}{a^2} + \frac{1}{2} \left( \frac{a}{c} + \frac{c}{a} \right) \right]$$

- Energia armazenada no campo elétrico

$$W_E = \frac{\epsilon}{2} \int_{\text{volume}} |\mathbf{E}|^2 \cdot dV = \frac{\epsilon}{2} \int_V |\mathbf{E}_y|^2 \cdot dV \quad \text{com } E_y = H_0 \text{ per}(1) \text{ per}(1)$$

$$W_E = \frac{H_0^2 \cdot \epsilon}{2} \left( \frac{\eta}{f \cdot c} \right) \cdot \frac{a \cdot b \cdot c}{4}$$

# Cavidades Retangulares - Índice de Mérito – modos $TE_{101}$

- Índice de mérito não-carregado do modo  $TE_{101}$

$$Q_U = \frac{W_r \cdot W_e}{P_d} = \frac{(2\pi f_r)^2 \left[ \frac{\mu_0^2 \epsilon}{2} \left( \frac{n f_r}{f_c} \right) \frac{abc}{4} \right]}{\frac{R_s}{2} \cdot a^2 \cdot \mu_0^2 \left[ \frac{ab}{c^2} + \frac{bc}{a^2} + \frac{1}{2} \left( \frac{a}{c} + \frac{c}{a} \right) \right]}$$

$$Q_U = \frac{\pi \eta}{4R_s} \left[ \frac{2b (a^2 + c^2)^{3/2}}{ac(a^2 + c^2) + 2b(a^3 + c^3)} \right] = \frac{2\pi \eta}{4R_s} \left[ \frac{\text{volume}}{\text{Área da Superfície}} \right]$$

# Cavidades Retangulares - Índice de Mérito – modos $TE_{101}$

- Primeiro exemplo: cavidade cúbica:  $a = b = c$

$$Q_U = \frac{\sigma \pi \sqrt{2}}{R_s} \quad \text{— ar e cobre} \quad \sigma = 5,8 \times 10^7 \text{ S/m}$$
$$R_s = 2,6 \times 10^{-2} \Omega$$

Paredes de cobre, modo  $TE_{101}$ ,  $f_r = 10 \text{ GHz} \rightarrow Q_U = 10.737$

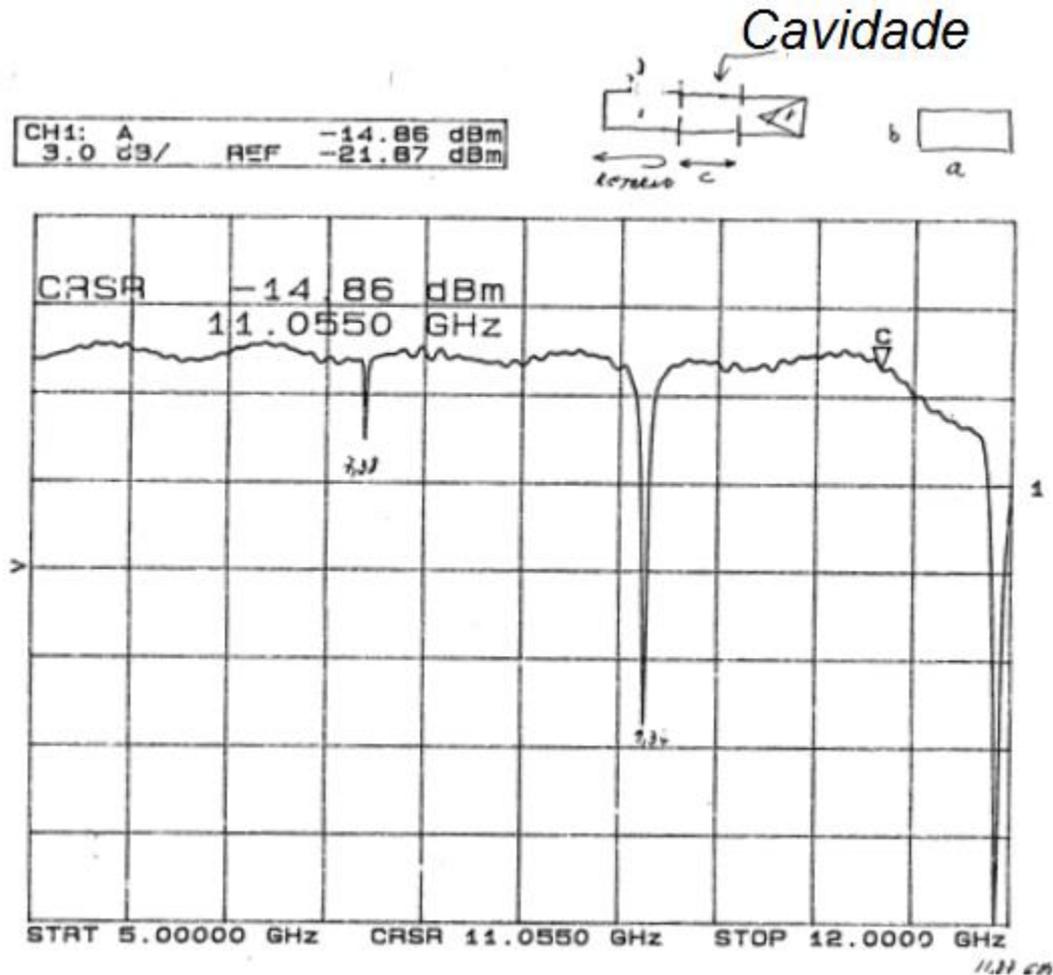
- Segundo exemplo: cavidade retangular  $a = 2b$  e  $a = c$

$$Q_U = \frac{\sigma \pi}{2R_s} \cdot \frac{\sqrt{1 + \beta^2}}{2 + \frac{a}{b}}$$

Paredes de cobre, modo  $TE_{101}$ ,  $f_r = 10 \text{ GHz} \rightarrow Q_U = 8.052$

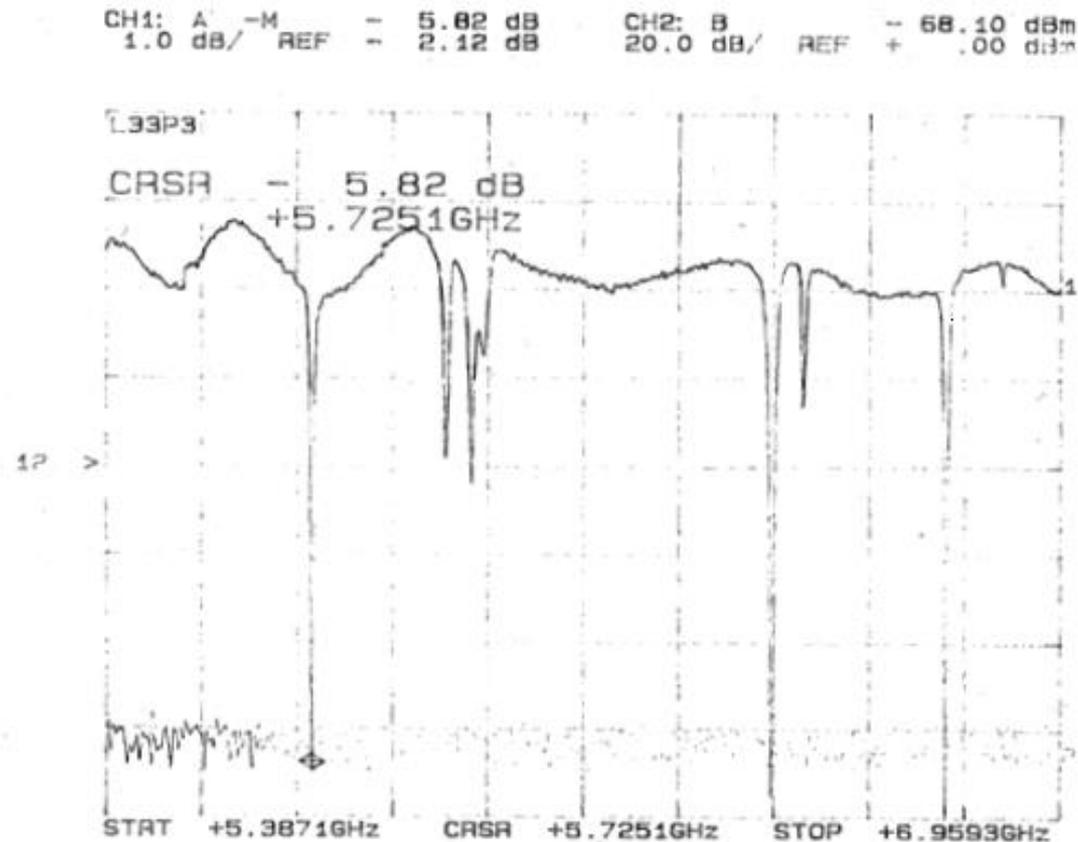
# Cavidades Retangulares - Índice de Mérito – modos $TE_{101}$

Cavidade ressonante usando guia de ondas retangular WR90 -  $S_{11}$  x f



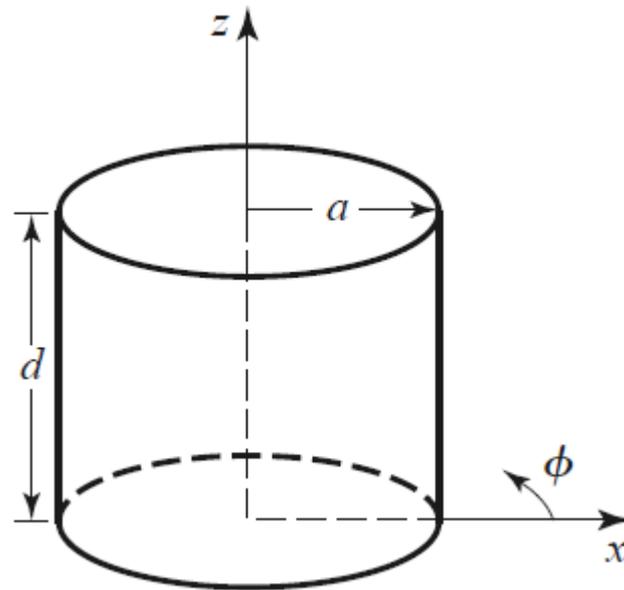
# Cavidades Retangulares - Índice de Mérito – modos $TE_{101}$

Cavidade ressonante usando guia de ondas retangular WR229 -  $S_{11}$  x f



## Cavidades Cilíndricas

- Modos  $TE_{n,l,p} \rightarrow H_z \neq 0$  e  $E_z = 0$



- Modos idênticos aos de guia de ondas cilíndrico
- Parte-se da equação de  $H_z(r,\phi)$  de guias cilíndricos com propagação segundo a direção z

## Cavidades Cilíndricas - Modos $TE_{n,l,p}$

- Tem-se

$$H_z(r, \phi) = H_0 \cdot J_m(k_c r) \cos(m\phi) \quad \text{com } k_c = \frac{\beta'_{m,l}}{a} \quad \begin{array}{l} m = 0, 1, 2, \dots \\ l = 1, 2, 3, \dots \end{array}$$

- Para propagação segundo  $z$ , obtém-se

$$H_z(r, \phi, z) = H_0 \cdot J_m(k_c r) \cdot \cos(m\phi) [H_{0+} \cdot e^{-j\beta z} + H_{0-} \cdot e^{j\beta z}]$$

- Impondo-se curto-circuitos em  $z = 0$  e em  $z = d$ ,
  - Condições de contorno para o campo  $H_z$  na cavidade cilíndrica

## Cavidades Cilíndricas - Modos $TE_{n,l,p}$

- Primeira equação

$$\frac{R}{R} \left[ \frac{\delta R}{\delta R} + R \frac{\delta^2 R}{\delta R^2} \right] + R^2 k_c^2 - m^2 = 0 \quad \times \frac{R}{R^2}$$

$$\frac{1}{R} \frac{\delta R}{\delta R} + \frac{\delta^2 R}{\delta R^2} + R k_c^2 - \frac{m^2 R}{R^2} = 0$$

$$\frac{\delta^2 R}{\delta R^2} + \frac{1}{R} \frac{\delta R}{\delta R} + \left( k_c^2 - \frac{m^2}{R^2} \right) R = 0 \quad - \text{solução e'}$$

EQUAÇÃO DE BÉSSÉL - soluções.

$$R = F \cdot J_m(k_c R) + G \cdot N_m(k_c R)$$

## Cavidades Cilíndricas - Modos $TE_{n,l,p}$

- Segunda equação  $\frac{\partial^2 \phi}{\partial \phi^2} + n^2 \phi = 0$

Solução  $\phi = G \cdot \cos(n\phi) + D \cdot \sin(n\phi)$

- Condições de contorno
- No centro da cavidade ( $r = 0$ ),  $H_z$  é finito
  - Como  $N_m(0) \rightarrow \infty$ , então  $G = 0$  e  $R = J_n(k_c r)$
- $\phi = G' \cdot \cos(n\phi) + D' \cdot \sin(n\phi)$ . deve ter o mesmo valor a cada rotação, e assim podemos considerar

$$\phi = G'' \cdot \cos(n\phi)$$

## Cavidades Cilíndricas - Modos $TE_{n,l,p}$

- Assim, temos

$$H_z = C'_l \cos(n\phi) \cdot F \cdot J_n(k_c r) \cdot [A \cdot \cos(k_z z) + B \cdot \sin(k_z z)]$$

- Para

$$z=0 \rightarrow H_z=0 \text{ logo } A=0$$

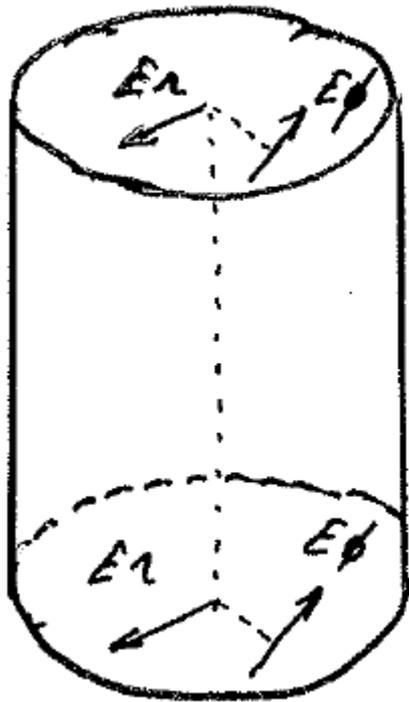
$$z=d \rightarrow H_z=0 \text{ logo } k_z = \frac{p\pi}{d} \therefore p = 1, 2, \dots$$

- Campo ressonante  $H_z$

$$H_z(n, \phi, z) = H_0 \cdot J_n(k_c r) \cdot \cos(n\phi) \cdot \sin(k_z z)$$

# Cavidades Cilíndricas - Modos $TE_{n,l,p}$

- Condições de contorno



← PLANO  $z = d$  →  $E_\phi = 0$  mas  $E_\phi = -j\omega\mu \frac{\delta H_z}{k_c^2 \delta r} = 0$

→  $E_r = 0$  mas  $E_r = -\frac{j\omega\mu}{k_c^2} \frac{\delta H_z}{\delta \phi} \frac{1}{r} = 0$

← PLANO  $z = 0$  →  $E_\phi = 0$  contínuo  $\therefore -\frac{\delta H_z}{\delta r} = 0$

→  $E_r = 0$  ..  $\therefore -\frac{1}{r} \frac{\delta H_z}{\delta \phi} = 0$

## Cavidades Cilíndricas - Modos $TE_{n,l,p}$

- Condição de contorno para o plano inferior,  $z = 0$

$$\frac{H_z}{r} = 0 \Rightarrow H_z = \text{cte} = 0$$

$$\therefore H_z(r, \phi, 0) = H_0 \cdot \text{J}_n(k_c r) \cdot \cos(n\phi) \cdot [H_{0+} e^{-j\beta z} + H_{0-} e^{+j\beta z}]$$

$$H_{0+} = H_{0-}$$

$$H_z(r, \phi, z) = H_0 \cdot \text{J}_n(k_c r) \cdot \cos(n\phi) \cdot [H_{0+} e^{-j\beta z} - H_{0+} e^{+j\beta z}]$$

## Cavidades Cilíndricas - Modos $TE_{n,l,p}$

- Condição de contorno para o plano superior,  $z = d$

$$H_z(r, \phi, z=d) = H_0 \cdot J_n(k_c r) \cdot \cos(n\phi) \left[ H_{0+} \cdot e^{-j\beta d} - H_{0+} \cdot e^{j\beta d} \right]$$

$$H_z(r, \phi, d) = H_0 \cdot J_n(k_c r) \cdot \cos(n\phi) \cdot H_{0+} (-2j \beta \cos \beta d)$$

$$\text{logo } \beta d = p\pi \therefore \beta = \frac{p\pi}{d} \quad p = 1, 2, \dots$$

$p \neq 0$

- Expressão geral para o modo  $TE_{n,l,p}$

$$H_z(r, \phi, z) = H_0 \cdot J_n(k_c r) \cdot \cos(n\phi) \cdot \cos\left(\frac{p\pi}{d} z\right)$$

$$n = 0, 1, 2, \dots \quad l = 1, 2, 3, \dots \quad p = 1, 2, 3, \dots$$

$$TE_{nlp} \rightarrow k_c = \frac{p\pi}{a} = \frac{1,841}{a}$$

## Cavidades Cilíndricas

- Das equações anteriores pode-se deduzir a relação

$$k_c^2 + k_z^2 = k^2 = \omega_n^2 \mu \epsilon$$

- Frequências de ressonância do modo  $TE_{n,l,p}$

$$k_c^2 + k_z^2 = k^2 = \omega_n^2 \mu \epsilon$$

$$\left(\frac{p'_{m,l}}{a}\right)^2 + \left(\frac{p'_{n,p}}{d}\right)^2 = \omega_n^2 \mu \epsilon = (2\pi f_n)^2 \mu \epsilon$$

$$f_n^2 = \frac{1}{\mu \epsilon} \left[ \left(\frac{p'_{m,l}}{2\pi a}\right)^2 + \left(\frac{p'_{n,p}}{2\pi d}\right)^2 \right]$$

$$\left(f_n\right)_{TE_{n,l,p}} = \frac{c}{\sqrt{\mu_r \epsilon_r}} \left[ \left(\frac{p'_{m,l}}{\pi D}\right)^2 + \left(\frac{p}{2d}\right)^2 \right]^{1/2}$$

$$m = 0, 1, 2, \dots \quad l = 1, 2, 3, \dots \quad p = 1, 2, \dots$$

# Cavidades Cilíndricas

- Frequências de ressonância – 1º. caso

1º. caso.  $\frac{d}{a} = 0,5 \Rightarrow \frac{a}{d} = 2$   
 ou  $\frac{2a}{d} = 4$



- Modo  $TM_{010}$  - modo dominante

- $p_{n,l} = p_{0,1} = 2,4$

$$(f_n)_{TM_{010}} = \frac{c}{2\pi a} \left[ (2,40)^2 + \left( \frac{p_{0,1}}{d} \cdot a \right)^2 \right]^{1/2}$$

$$= \frac{c}{2\pi a} [ (2,40) ] = \frac{c}{2\pi a} \cdot 2,40$$

# Cavidades Cilíndricas

- Frequências de ressonância – 1º. caso

1º. caso.  $\frac{d}{a} = 0,5 \Rightarrow \frac{a}{d} = 2$   
 ou  $\frac{2a}{d} = 4$



- Modo TE<sub>111</sub>

- $p'_{n,l} = p'_{1,1} = 1,84$

$$\begin{aligned}
 (f_r)_{TE_{111}} &= \frac{c}{2\pi a} \left[ (1,84)^2 + \left(\frac{1,2}{d} \cdot a\right)^2 \right]^{1/2} \\
 &= \frac{c}{2\pi a} \left[ (1,84)^2 + (2,2)^2 \right]^{1/2} = \frac{c}{2\pi a} \cdot 6,5 \\
 (f_r)_{TE_{111}} &= 2,72 (f_r)_{TM_{010}}
 \end{aligned}$$

## Cavidades Cilíndricas

- Frequências de ressonância – 1º. caso

1º. caso.  $\frac{d}{a} = 0,5 \Rightarrow \frac{a}{d} = 2$   
 ou  $\frac{2a}{d} = 4$



- Modo  $TM_{110}$

- $p_{n,l} = p_{1,1} = 3,83$

$$(f_r)_{TM_{110}} = \frac{c}{2\pi a} \left[ (3,83)^2 + \left(\frac{0,5 \cdot \pi \cdot 0}{a}\right)^2 \right]^{\frac{1}{2}}$$

$$= \frac{c}{2\pi a} \cdot 3,83$$

$$(f_r)_{TM_{110}} = 1,59 (f_r)_{TM_{010}}$$

## Cavidades Cilíndricas - Modos $TE_{n,l,p}$

- Frequências de ressonância

Modos  $TE_{n,l,p}$

$$f_{TE} = \frac{c}{\sqrt{\mu_0 \epsilon_0}} \left[ \left( \frac{p_{n,l}}{\pi D} \right)^2 + \left( \frac{p}{2d} \right)^2 \right]^{1/2}$$

$$n = 0, 1, 2, 3, \dots$$

$$l = 1, 2, 3, \dots$$

$$p = 1, 2, 3, \dots$$

Modos  $TM_{n,l,p}$

$$f_{TM} = \frac{c}{\sqrt{\mu_0 \epsilon_0}} \left[ \left( \frac{p_{n,l}}{\pi D} \right)^2 + \left( \frac{p}{2d} \right)^2 \right]^{1/2}$$

$$n = 0, 1, 2, \dots$$

$$l = 1, 2, 3, \dots$$

$$p = 0, 1, 2, 3, \dots$$

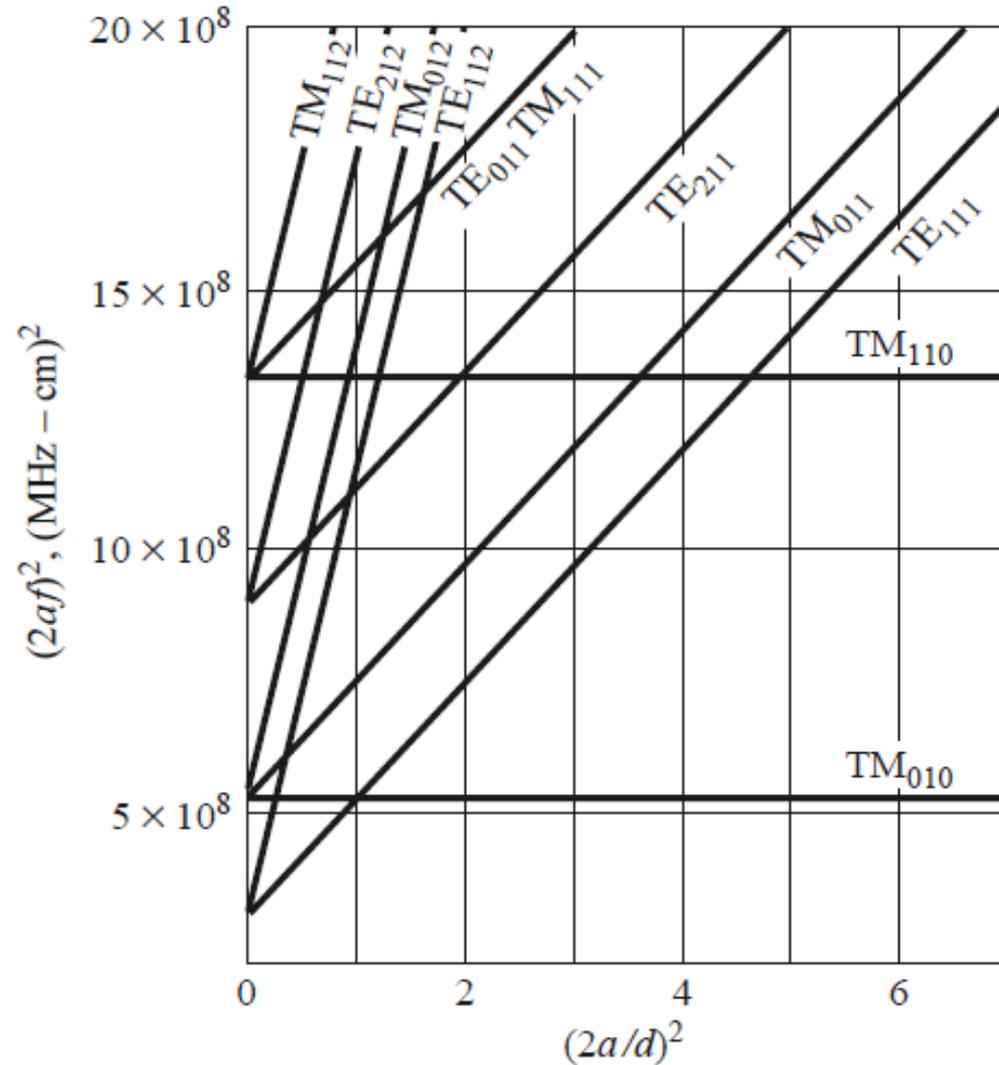
# Cavidades Cilíndricas

- Comparação entre frequências de ressonância

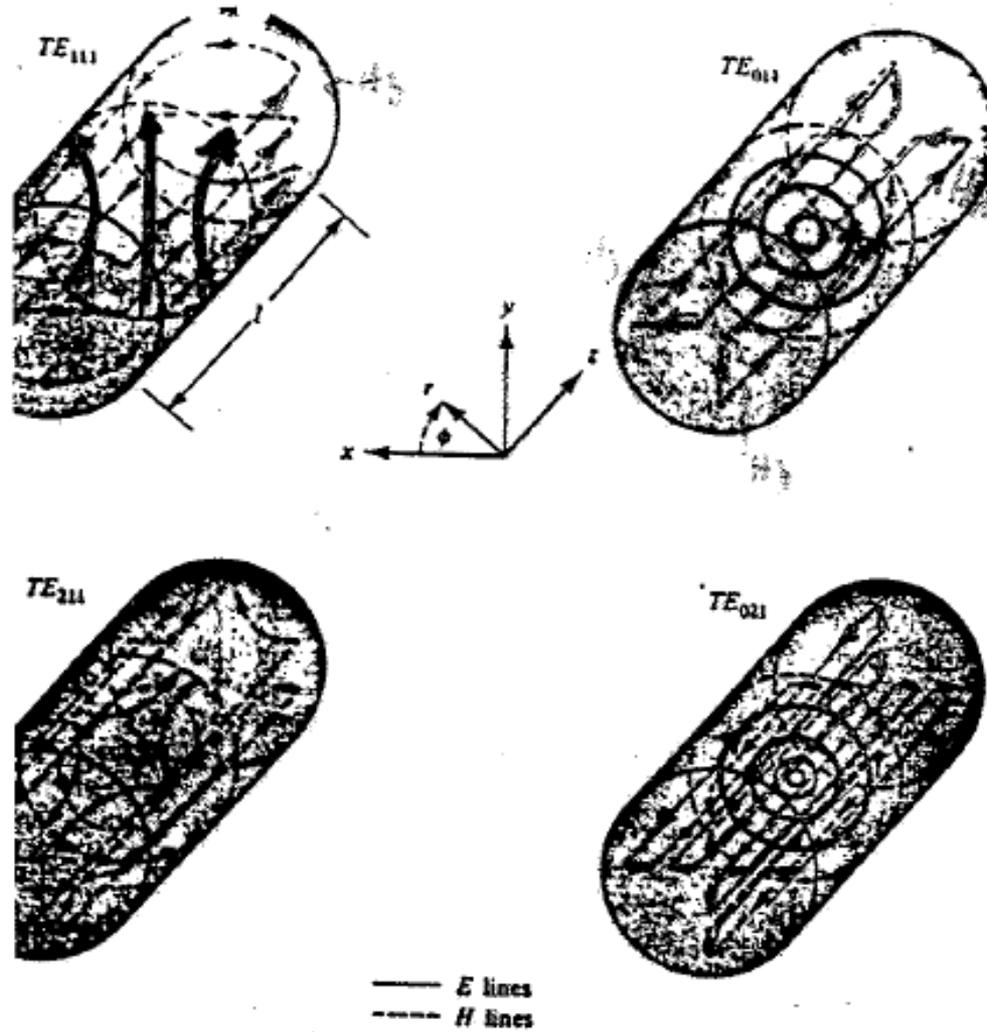
1º	1º MODO	2º MODO	3º MODO
$5 \cdot \frac{a}{d} = 2$ 	$TM_{010}$ $p_{0,1} = 2,40$ $f_2 = \frac{c}{2\pi a} \cdot 2,40$	$TM_{110}$ $p_{11} = 3,83$ $f_2 = \frac{c}{2\pi a} \cdot 3,83$	$TE_{111}$ $p'_{11} = 4,89$ $f_2 = \frac{c}{2\pi a} \cdot 6,55$
$\frac{a}{d} = 1$ 	$TM_{010}$ $f_1 = \frac{c}{2\pi a} \cdot 2,40$	$TE_{111}$ $f_1 = \frac{c}{2\pi a} \cdot 3,64$	$TM_{110}$ $f_1 = \frac{c}{2\pi a} \cdot 3,83$
$\frac{a}{d} = 0,5$ 	$TM_{010}$ $f_2 = \frac{c}{2\pi a} \cdot 2,40$	$TE_{111}$ $f_1 = \frac{c}{2\pi a} \cdot 2,40$	$TM_{011}$ $f_2 = \frac{c}{2\pi a} \cdot 2,82$
$\frac{a}{d} = 0,33$ 	$TE_{111}$ $f_2 = \frac{c}{2\pi a} \cdot 2,12$	$TM_{010}$ $f_1 = \frac{c}{2\pi a} \cdot 2,40$	$TM_{011}$ $f_2 = \frac{c}{2\pi a} \cdot 2,82$

# Cavidades Cilíndricas

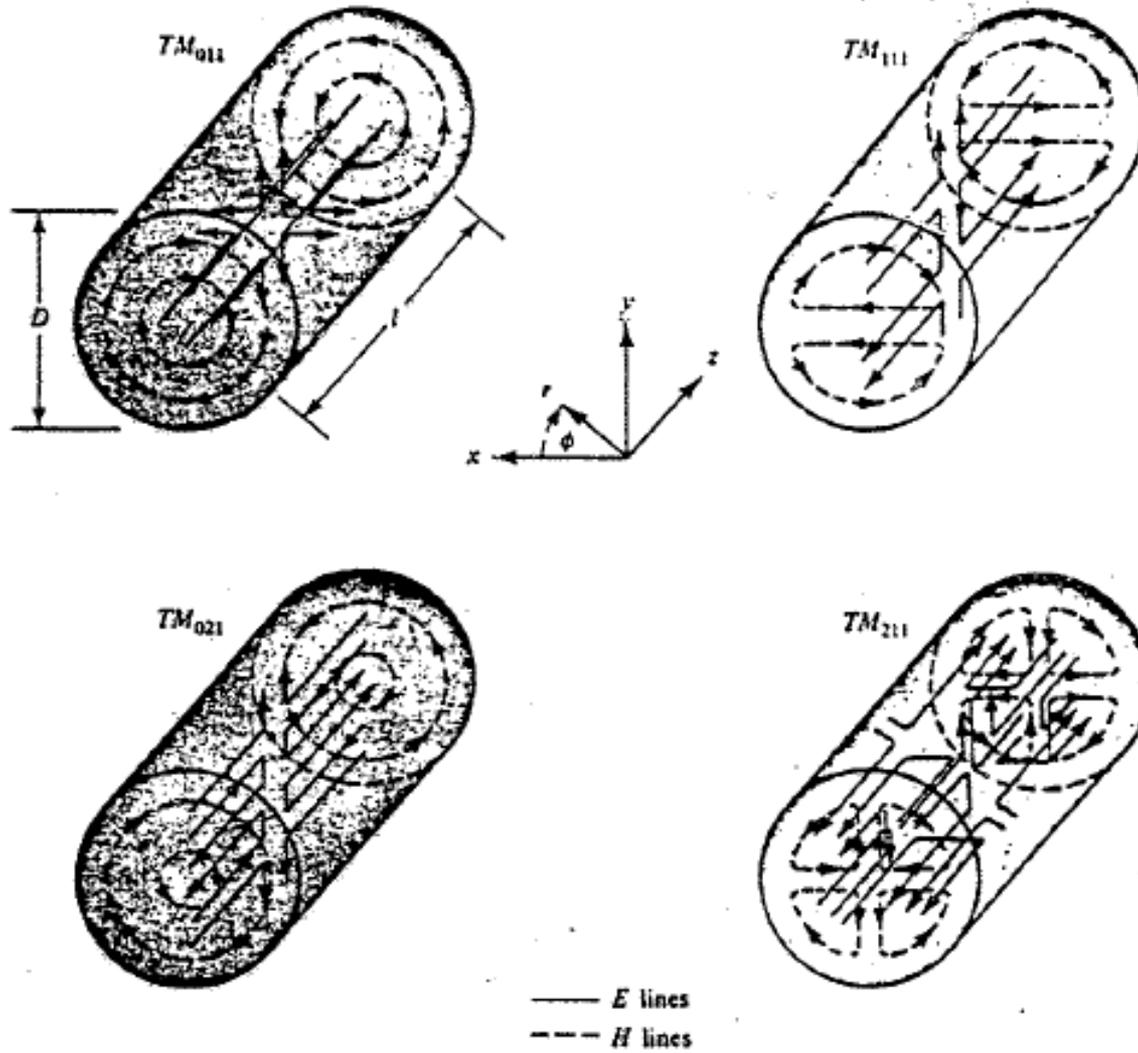
Carta de modos  
ressonantes da  
cavidade cilíndrica



# Cavidades Cilíndricas

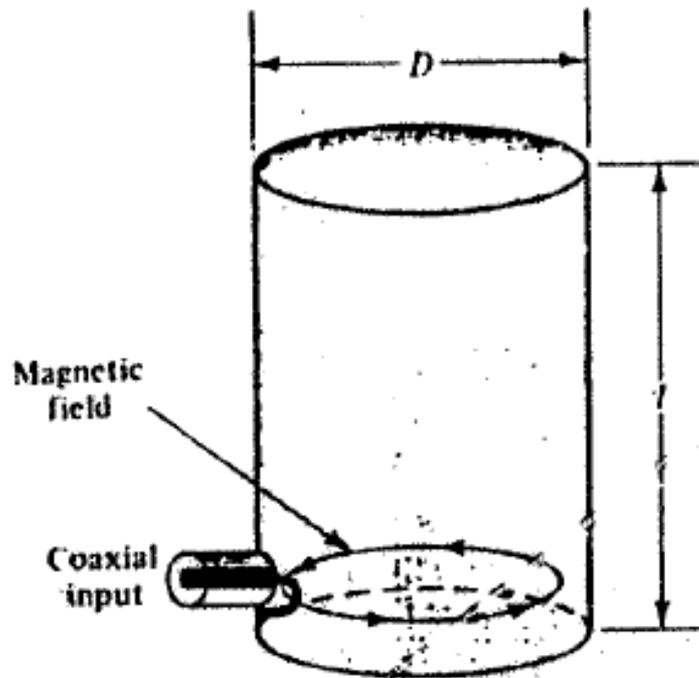


# Cavidades Cilíndricas

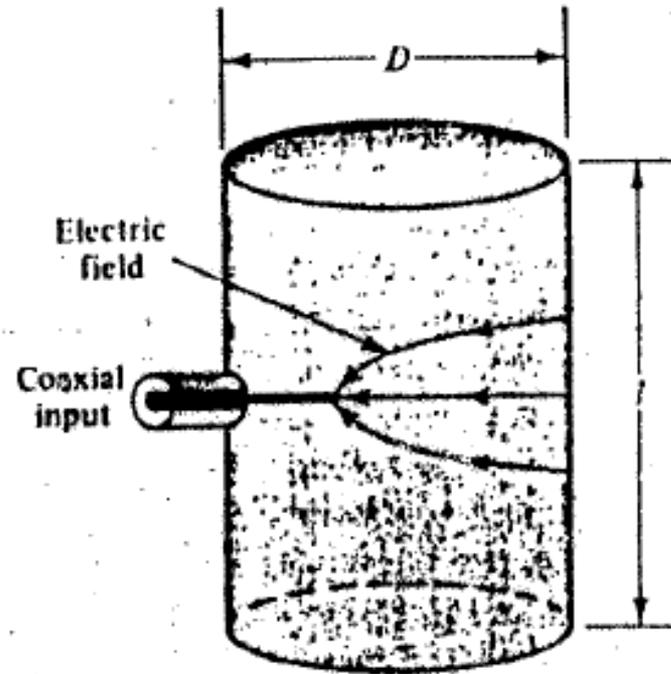


# Cavidades Cilíndricas

Métodos de alimentação da cavidade cilíndrica



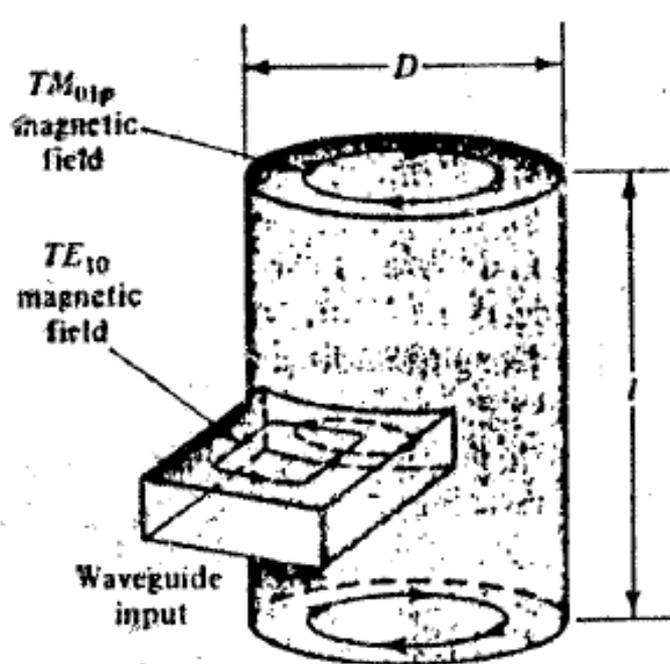
(a) Loop coupling



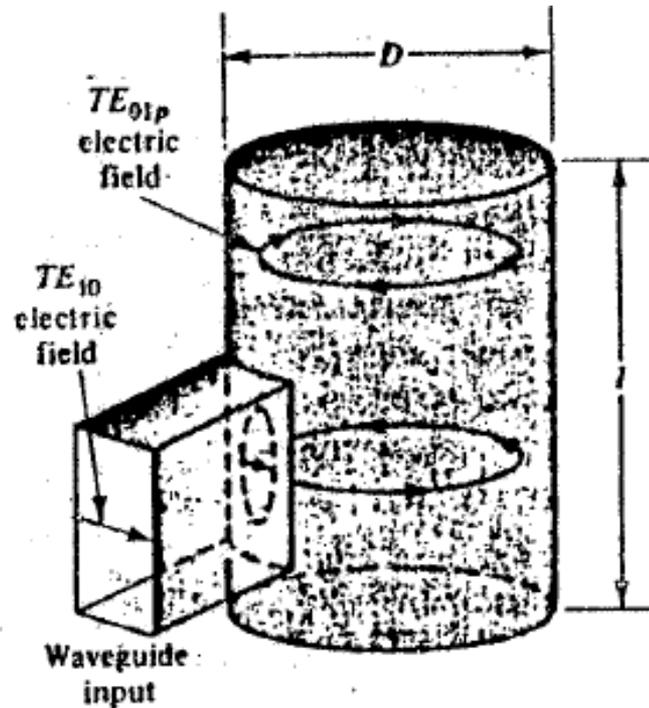
(b) Probe coupling

# Cavidades Cilíndricas

Métodos de alimentação da cavidade cilíndrica



(c) Aperture coupling for  $TM_{np}$  cavity modes



(d) Aperture coupling for  $TE_{np}$  cavity modes

# Cavidades Cilíndricas

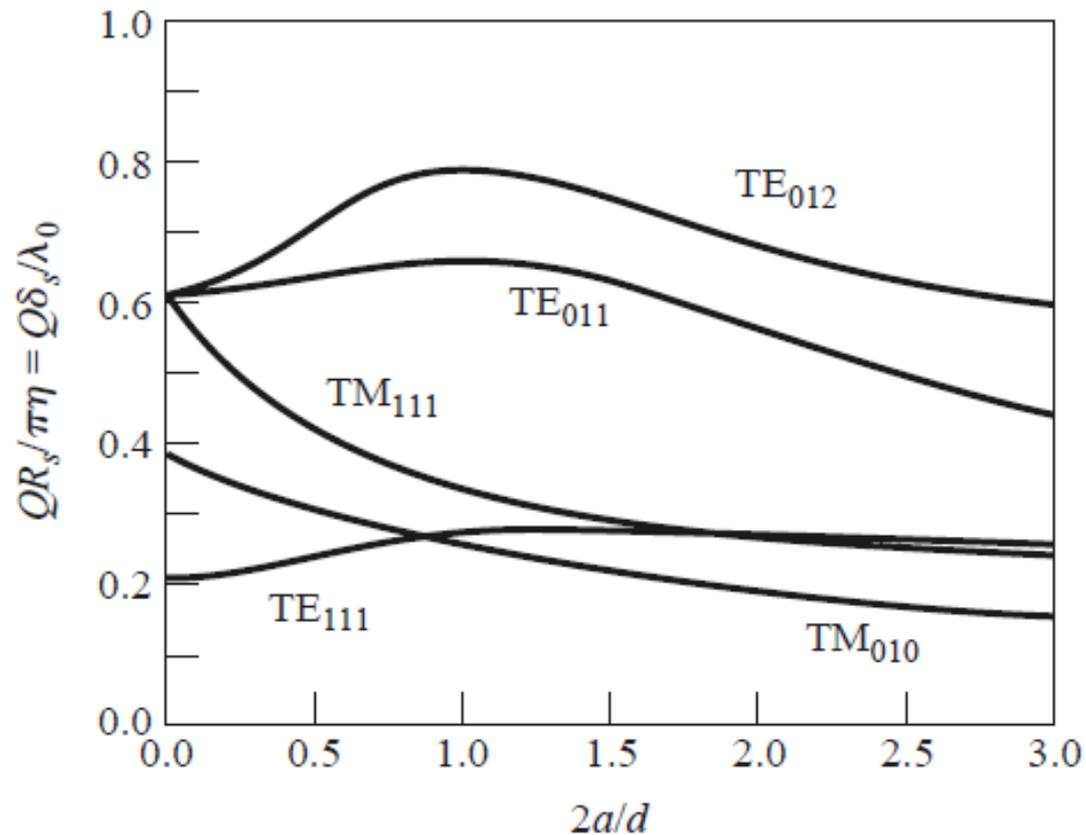
Índice de Mérito Não-Carregado – modos  $TE_{m,l,p}$

- Dielétrico – ar, sem perdas
- Condutores reais – perdas condutivas

$$Q_c = \frac{\omega_0 W}{P_c} = \frac{(ka)^3 \eta a d}{4(p'_{nm})^2 R_s} \frac{1 - \left(\frac{n}{p'_{nm}}\right)^2}{\left\{ \frac{ad}{2} \left[ 1 + \left(\frac{\beta a n}{(p'_{nm})^2}\right)^2 \right] + \left(\frac{\beta a^2}{p'_{nm}}\right)^2 \left(1 - \frac{n^2}{(p'_{nm})^2}\right) \right\}}.$$

# Cavidades Cilíndricas

- Índice de mérito normalizado para vários modos da cavidade cilíndrica



## Cavidades Cilíndricas

- Tabela de índices de mérito normalizados para vários modos da cavidade cilíndrica

	$TE_{11p}$	$TE_{01p}$
p	$Q_c \cdot \delta / \lambda_0$	$Q_c \cdot \delta / \lambda_0$
1	0,275	0,657
2	0,416	0,735
3	0,581	0,902
4	0,753	1,090

## Ressonadores dielétricos

- Cilindros (ou outra forma) de dielétrico que ressoa em frequências de micro-ondas
- Dual da cavidade em guia de onda
- Usualmente
  - Material dielétrico com  $\epsilon_r$  elevado (40, por exemplo)
  - Perdas dielétricas reduzidas
  - Coeficiente de temperatura da frequência de ressonância ajustável através da composição química do material, como
    - + 10 ppm/°C   +8 ppm/°C   +6 ppm/°C   + 4 ppm/°C   +2 ppm/°C
    - 0 ppm/°
    - 10 ppm/°C   -8 ppm/°C   -6 ppm/°C   -4 ppm/°C   -2 ppm/°C