



# PARÂMETROS DE ESPALHAMENTO

- Parâmetros de espalhamento
- Técnicas de medida
- Medidas “on chip”

**Profa. Dra. Fatima Salete Correra**



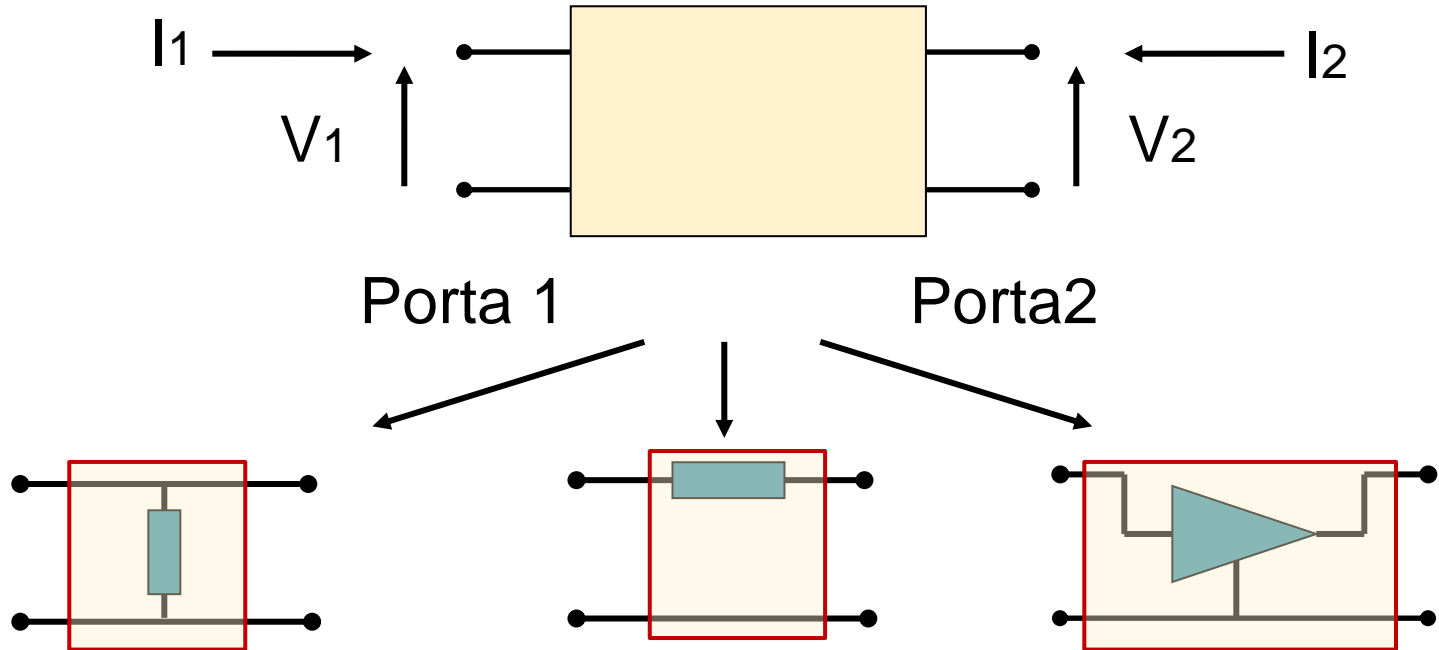
**Parâmetros “S”**

***Scattering Parameters***

**Parâmetros de Espalhamento**

# Quadripolos

- Rede com dois acessos



# Matriz “Z”

$$\begin{bmatrix} \mathbf{V}_1 \\ \mathbf{V}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{Z}_{11} & \mathbf{Z}_{12} \\ \mathbf{Z}_{21} & \mathbf{Z}_{22} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \mathbf{I}_1 \\ \mathbf{I}_2 \end{bmatrix}$$

- Medida de parâmetros  $Z_{11}$ 
  - Gerador de corrente:  $I_1 \rightarrow$  porta 1
  - $I_2=0 \rightarrow$  porta 2  $\rightarrow$  **circuito aberto**
  - Mede-se  $V_1$
$$\mathbf{Z}_{11} = \left. \frac{\mathbf{V}_1}{\mathbf{I}_1} \right|_{\mathbf{I}_2 = \mathbf{0}}$$
- Circuito aberto real  $\rightarrow$  Capacitor  $\rightarrow \mathbf{X}_C = \frac{1}{\omega \cdot \mathbf{C}}$ 
  - Validade da matriz “Z”: Frequências em que  $X_C \rightarrow \infty$

# Matriz “Y”

$$\begin{bmatrix} \mathbf{I}_1 \\ \mathbf{I}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{Y}_{11} & \mathbf{Y}_{12} \\ \mathbf{Y}_{21} & \mathbf{Y}_{22} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \mathbf{V}_1 \\ \mathbf{V}_2 \end{bmatrix}$$

- Medida de parâmetros  $Y_{11}$

- Gerador de tensão:  $V_1 \rightarrow$  porta 1
- $V_2=0 \rightarrow$  porta 2  $\rightarrow$  **curto circuito**
- Mede-se  $I_1$

$$\mathbf{Y}_{11} = \left. \frac{\mathbf{I}_1}{\mathbf{V}_1} \right|_{\mathbf{V}_2 = \mathbf{0}}$$

- Curto-circuito real  $\rightarrow$  Indutor  $\rightarrow \mathbf{X}_L = \omega \cdot \mathbf{L} = 2\pi \cdot f \cdot L$

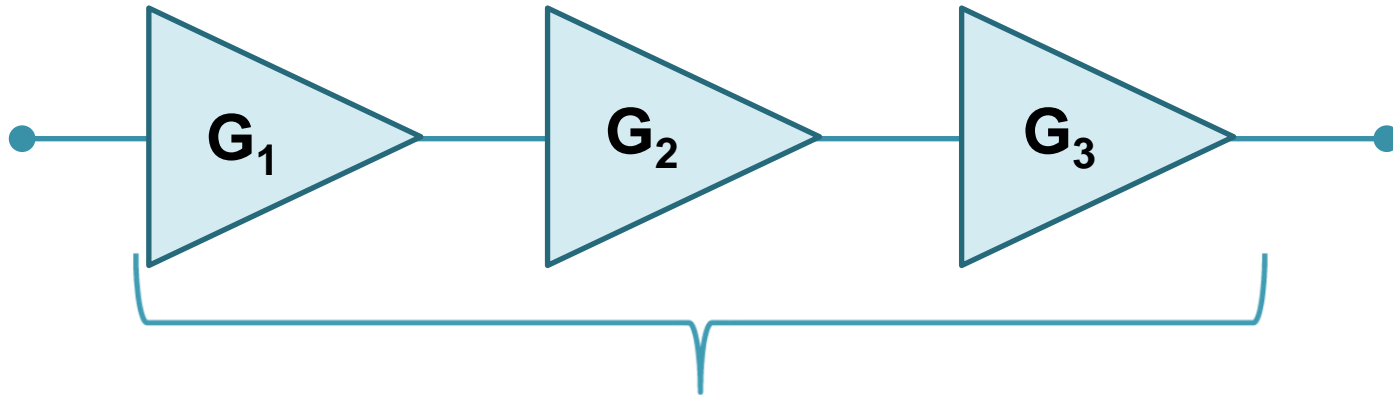
- Validade da matriz “Y”: frequências em que  $X_L \rightarrow 0$

# Medidas em micro-ondas

- Impedância de referência  $\rightarrow Z_0 = 50 \Omega$ 
  - Impedância de entrada e saída de todos os circuitos
  - Impedância Portas de equipamentos de medida
  - Impedância de cabos coaxiais usados para interconectar os circuitos e fazer medidas
- Vantagem
  - Quando componentes são interconectados, suas características individuais de mantêm.

# Medidas em micro-ondas

- Amplificadores com impedâncias de entrada e saída igual a  $Z_0 = 50 \Omega$  e ganhos de  $G_1$ ,  $G_2$  e  $G_3$  dB



- Ganho total da associação cascata dos amplificadores

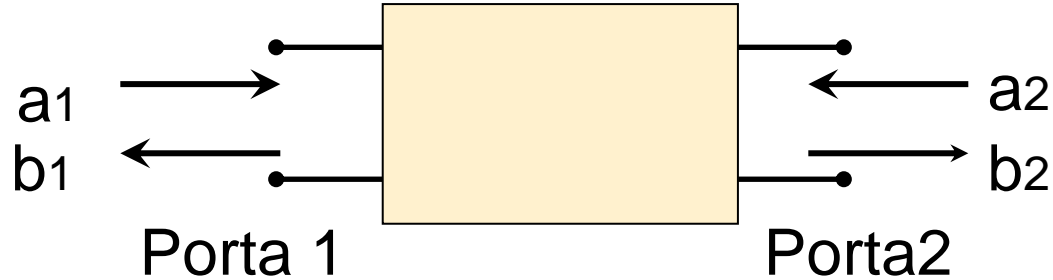
$$G_{\text{total}} = G_1 + G_2 + G_3 \text{ dB}$$

# Medidas em micro-ondas

- Matriz “S”
  - *Scattering Matrix*
  - Parâmetros “S” ou de espalhamento
- Condições de medida
  - Gerador de tensão -  $Z_G = Z_0$
  - Impedância de carga -  $Z_L = Z_0$
  - $Z_0 \rightarrow$  Impedância de referência
  - Micro-ondas  $\rightarrow Z_0 = 50$  Ohms



# Matriz "S"



$$\begin{bmatrix} \mathbf{b}_1 \\ \mathbf{b}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{S}_{11} & \mathbf{S}_{12} \\ \mathbf{S}_{21} & \mathbf{S}_{22} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \mathbf{a}_1 \\ \mathbf{a}_2 \end{bmatrix}$$

- $a_1$  e  $a_2$ : ondas de potência incidentes nas portas 1 e 2
- $b_1$  e  $b_2$ : ondas de potência refletidas nas portas 1 e 2

# Ondas de potência

$$\mathbf{a}_1 = \frac{1}{2} \left( \frac{\mathbf{V}_1}{\sqrt{\mathbf{Z}_0}} + \mathbf{I}_1 \sqrt{\mathbf{Z}_0} \right)$$

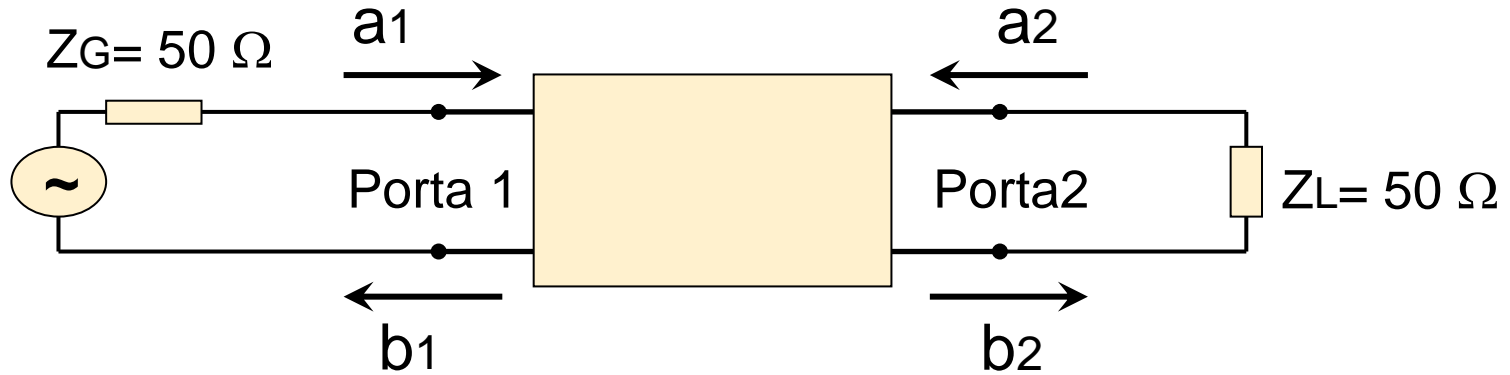
$$\mathbf{a}_2 = \frac{1}{2} \left( \frac{\mathbf{V}_2}{\sqrt{\mathbf{Z}_0}} + \mathbf{I}_2 \sqrt{\mathbf{Z}_0} \right)$$

$$\mathbf{b}_1 = \frac{1}{2} \left( \frac{\mathbf{V}_1}{\sqrt{\mathbf{Z}_0}} - \mathbf{I}_1 \sqrt{\mathbf{Z}_0} \right)$$

$$\mathbf{b}_2 = \frac{1}{2} \left( \frac{\mathbf{V}_2}{\sqrt{\mathbf{Z}_0}} - \mathbf{I}_2 \sqrt{\mathbf{Z}_0} \right)$$

- Portas 1 e 2 terminadas em  $Z_0$
- $Z_0 \rightarrow$  Impedância de referência
- Micro-ondas  $\rightarrow Z_0 = 50$  Ohms

# $S_{11}$ - conceito



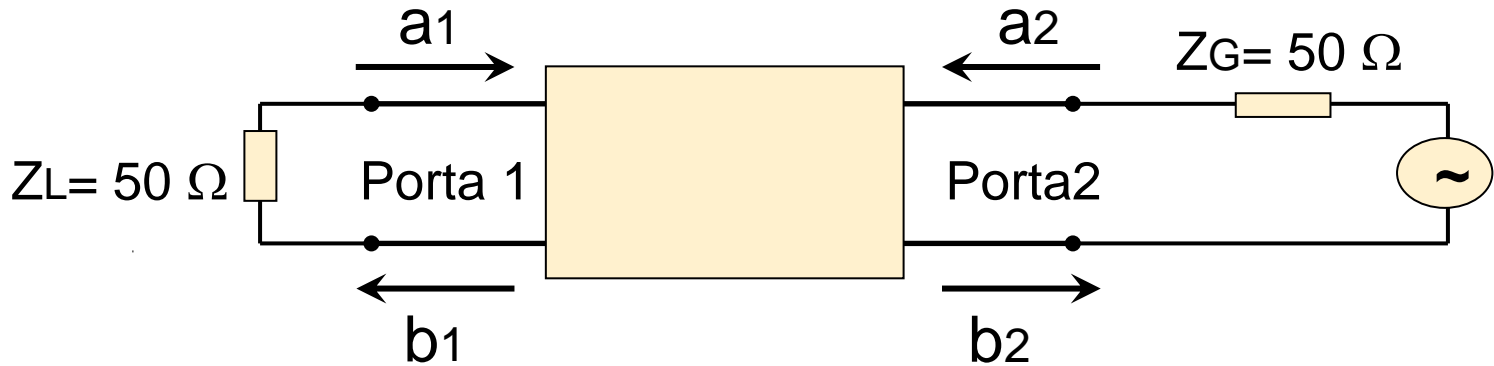
- Coeficientes de reflexão da porta 1  $\longrightarrow S_{11} = \frac{\mathbf{b}_1}{\mathbf{a}_1}$
- Associado à  $Z_1$  impedância de entrada  $\longrightarrow S_{11} = \frac{\mathbf{Z}_1 - \mathbf{Z}_0}{\mathbf{Z}_1 + \mathbf{Z}_0}$

## $S_{11}$ - exemplo

$$S_{11} = \frac{Z_1 - Z_0}{Z_1 + Z_0} = \frac{Z_1 - 50}{Z_1 + 50}$$

- $Z_1 = 50 \ \Omega \quad \rightarrow \quad S_{11} = 0$
- $Z_1 = 0 \ \Omega \quad \rightarrow \quad S_{11} = 1 \angle 180^\circ$
- $Z_1 \rightarrow \infty \quad \rightarrow \quad S_{11} = 1 \angle 0^\circ$
  
- $\text{Re}\{Z_1\}$  positiva  $\rightarrow \quad 0 \leq \text{mod}\{S_{11}\} \leq 1$
- $Z_1$  indutiva  $\rightarrow \quad 0^\circ < \text{fase}\{S_{11}\} < 180^\circ$
- $Z_1$  capacitiva  $\rightarrow \quad 180^\circ < \text{fase}\{S_{11}\} < 360^\circ$

## $S_{22}$ - conceito

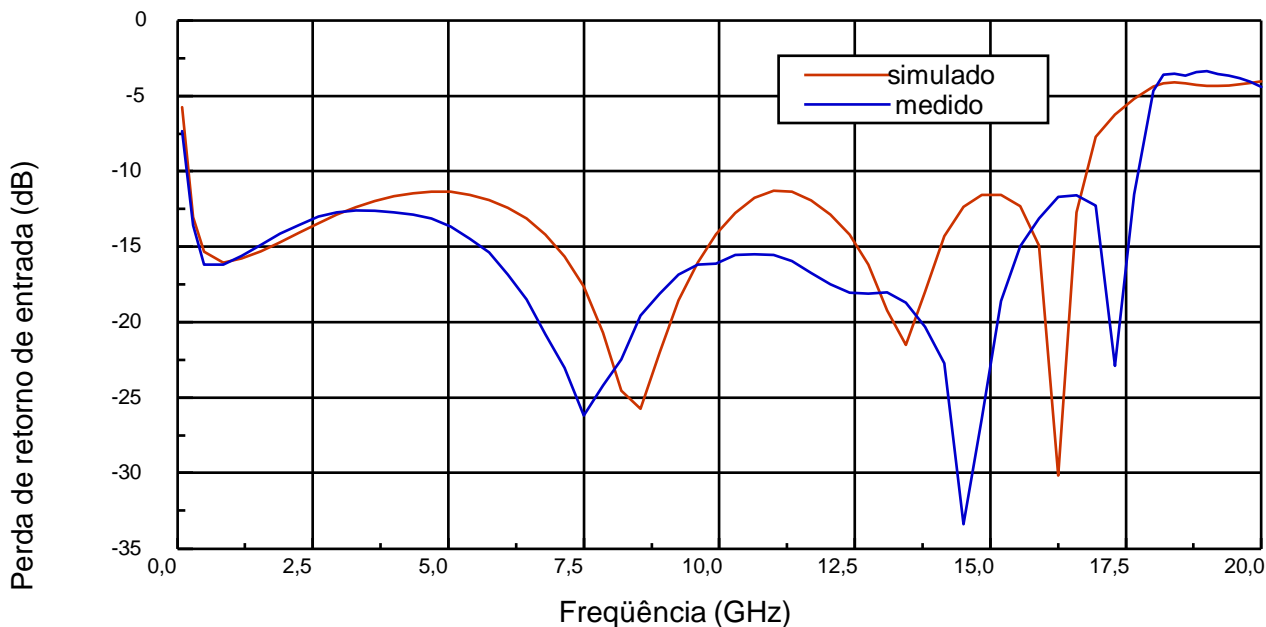


- Coeficientes de reflexão da porta 2  $\longrightarrow S_{22} = \frac{\mathbf{b}_2}{\mathbf{a}_2}$
- Associado à  $Z_2$  impedância de saída  $\longrightarrow S_{22} = \frac{\mathbf{Z}_2 - \mathbf{Z}_0}{\mathbf{Z}_2 + \mathbf{Z}_0}$

# Representação de $S_{11}$ e $S_{22}$

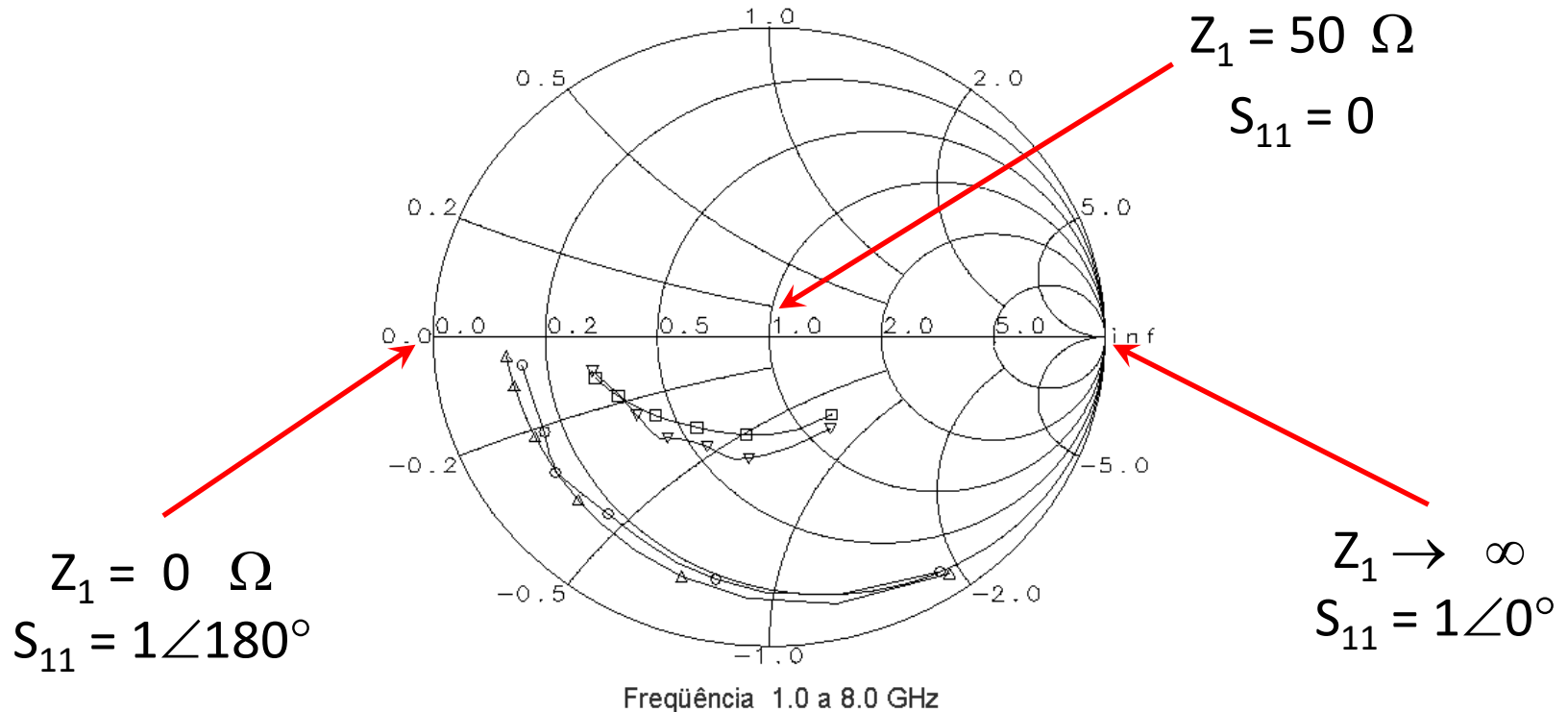
- Forma retangular  $\rightarrow$  módulo (dB) ou fase x frequência

$$S_{11} (dB) = 20 \cdot \log |S_{11}|$$

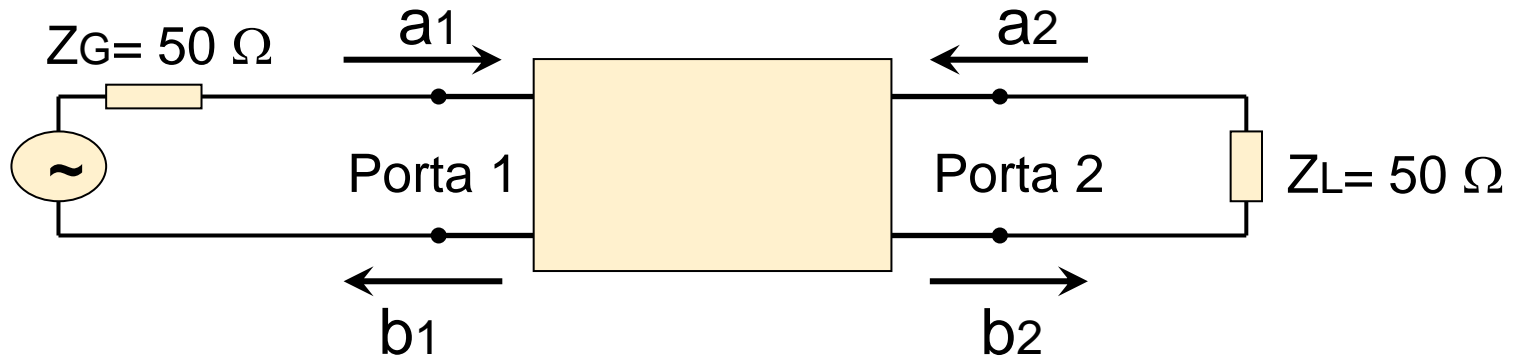


# Representação de $S_{11}$ e $S_{22}$

- Forma polar  $\rightarrow$  Carta de Smith



## $S_{21}$ - conceito



- Coeficiente de transmissão direto



$$S_{21} = \frac{\mathbf{b}_2}{\mathbf{a}_1}$$

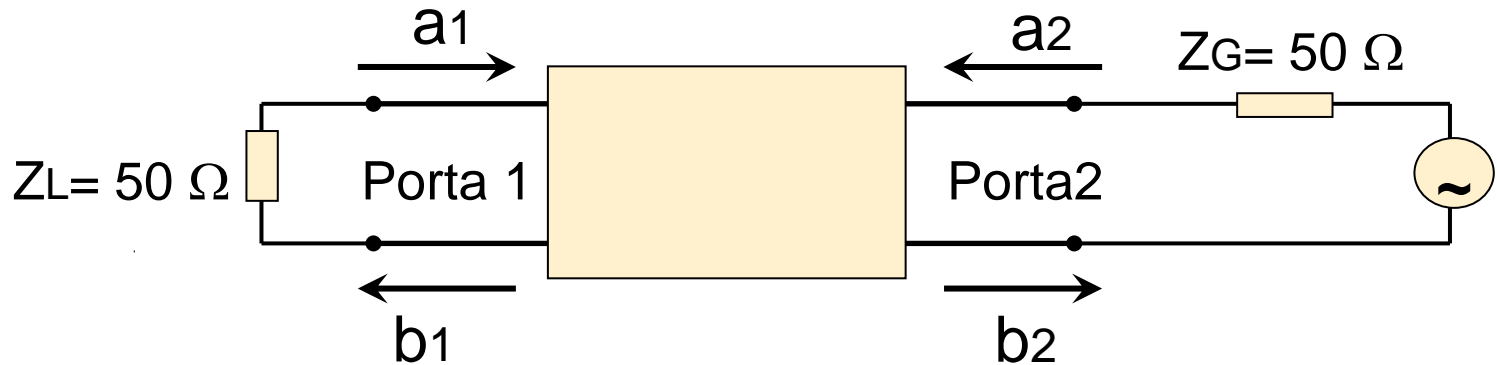
- Ganho direto de potência em  $50 \Omega$



$$|S_{21}|^2 = \mathbf{G}(@ 50\Omega)$$



## $S_{12}$ - conceito

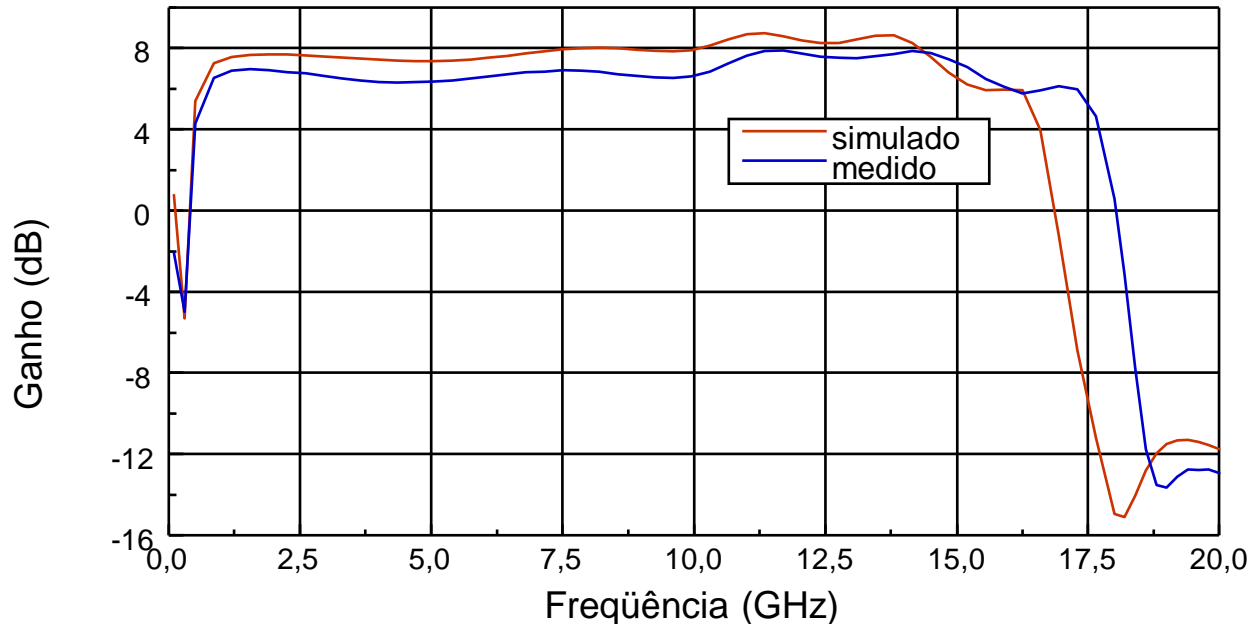


- Coeficiente de transmissão reverso  $\longrightarrow \mathbf{S}_{12} = \frac{\mathbf{b}_1}{\mathbf{a}_2}$
- Ganho reverso de potência em  $50 \Omega$   $\longrightarrow |\mathbf{S}_{12}|^2 = \mathbf{G}_R (@ 50\Omega)$

# Representação de $S_{21}$ e $S_{12}$

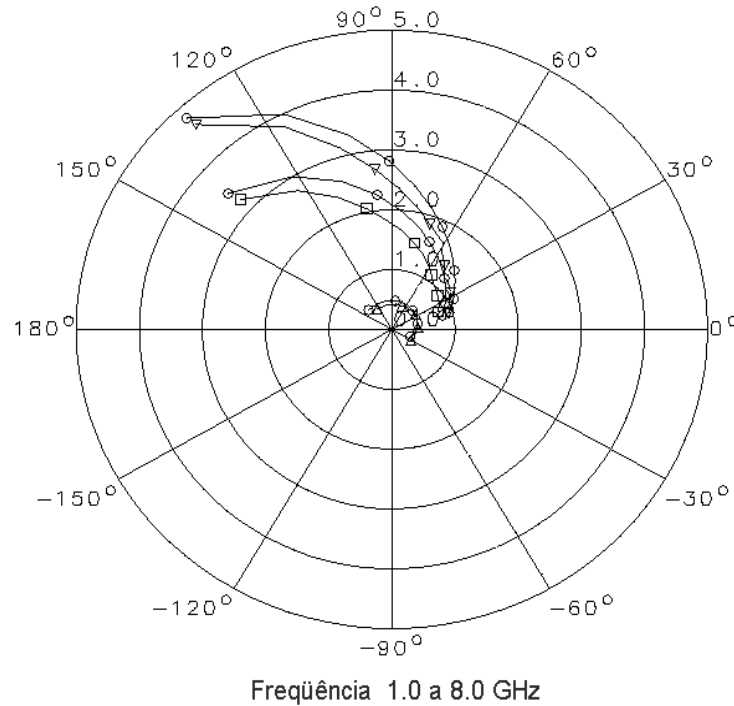
- Forma retangular → módulo (dB) ou fase x frequência

$$|S_{21}|_{dB} = 20 \cdot \log|S_{21}| = \mathbf{Ganho(dB)}$$



# Representação de $S_{21}$ e $S_{12}$

- Forma polar  $\rightarrow$  diagrama polar



# Parâmetros de Espalhamento

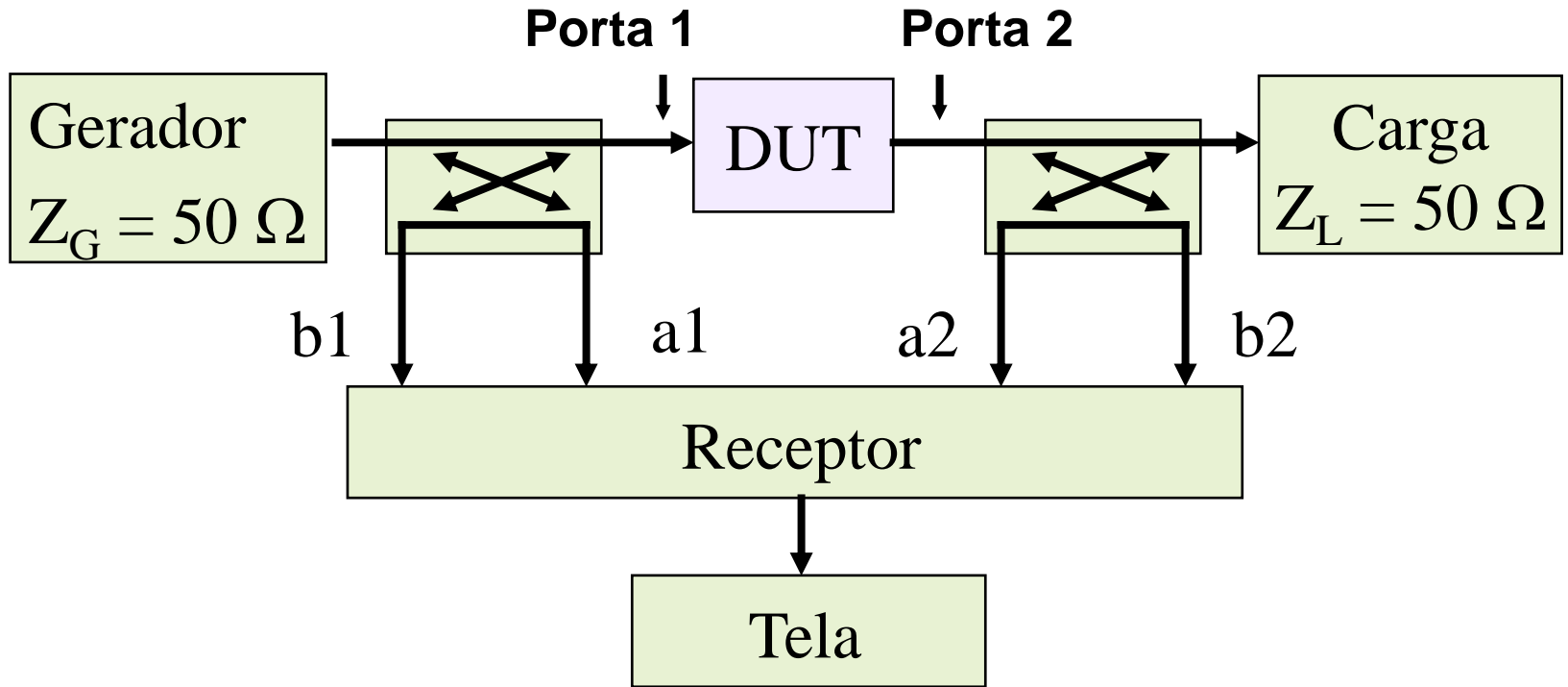
- Usados para representar o desempenho de componentes em frequências de micro-ondas
  - Capacitores, indutores, resistores (incluindo efeitos parasitas de alta frequência)
  - Transistores operando em pequenos sinais
- Simulação de circuitos de micro-ondas
  - Empregando CAD de micro-ondas
- Medidas de componentes e circuitos
  - Usando *VNA – Vector Network Analyser*

# Técnicas de medida

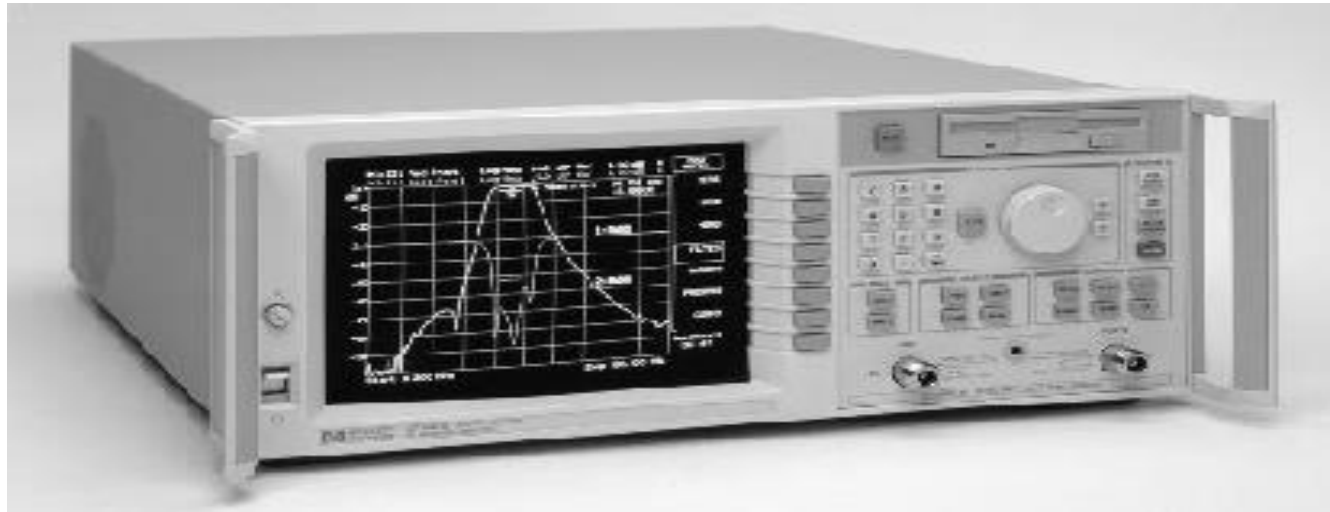
# Medida de parâmetros “S”

- Analisador Vetorial de Redes
  - Módulo e fase de  $S_{11}$ ,  $S_{21}$ ,  $S_{12}$  e  $S_{22}$
- Fabricantes de Analisadores de Rede de Microondas
  - Keysight, Anritsu, Wiltron, Rhode Schwarz, ...
- Exemplo
  - HP 8722 - 50 MHz a 40 GHz

# Analizador de redes de 2 portas



# Analizador de redes HP 8712





# Acessórios de medida da matriz “S”

- Cabos coaxiais – conexões
- Transições de micro-ondas
  - Adaptação de diferentes padrões de conectores
  - Tipo N, SMA, APC3.5, APC7
- Kits de calibração
  - Calibração do Analisador Vetorial de Redes

# Arranjo de medidas



Kit de  
calibração

Analisador  
de redes

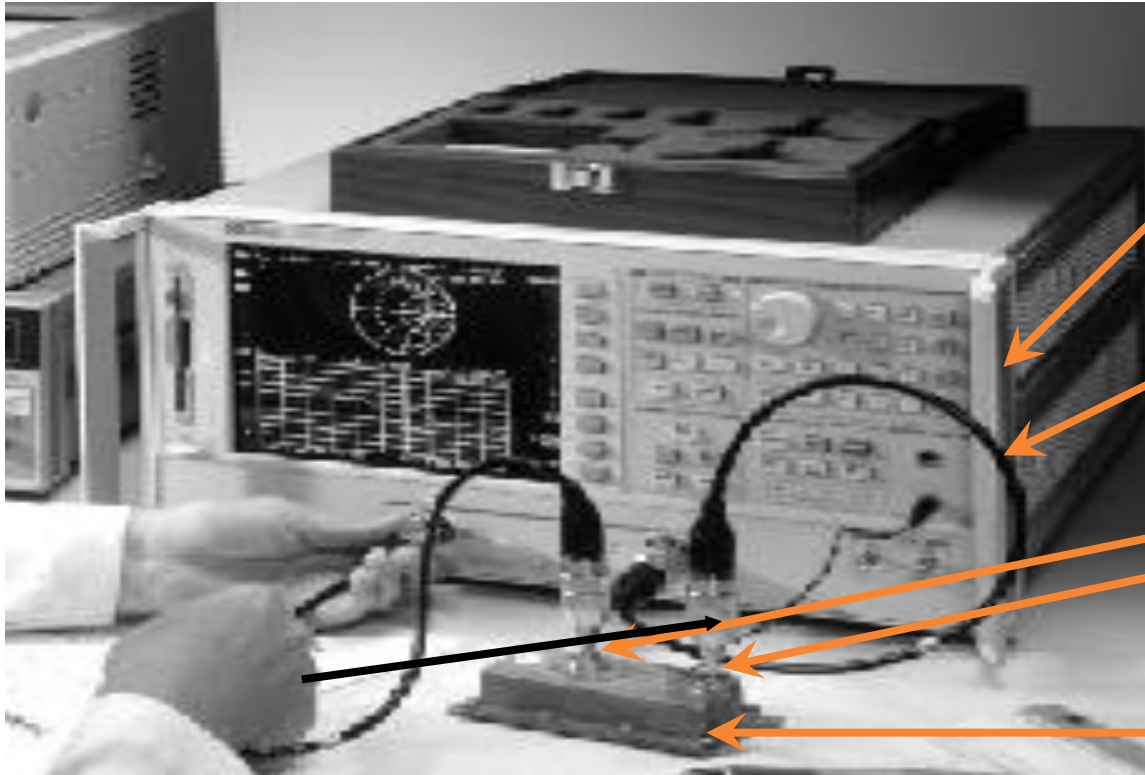
Cabos e  
conectores

Dispositivo  
em teste

# Calibração do Analisador Vetorial de Redes

- Corrigir erros do equipamento de medidas
- Deslocar os planos de medida para o plano das portas do dispositivo em teste
- Descontar perdas e rotação de fase
  - Cabos coaxiais
  - conectores e transições

# Planos de calibração



Analizador  
de redes

Cabos e  
conectores

Planos de  
calibração

Dispositivo  
em teste

# Exemplo de Kit de calibração

- Terminações padrão
  - Cargas de  $50\ \Omega$
  - Curtos circuitos
  - Circuitos em aberto
  - Linha direta
- Mídia eletrônica
  - modelos das terminações



# Exemplo de procedimento de calibração

- Ajuste do gerador
  - faixa de frequência
  - potência de saída
  - número de pontos
- Escolha do Kit de calibração
  - Tipo de conector → N, APC7, APC3.5
  - Kit do microprovador

# Rotina interna de calibração

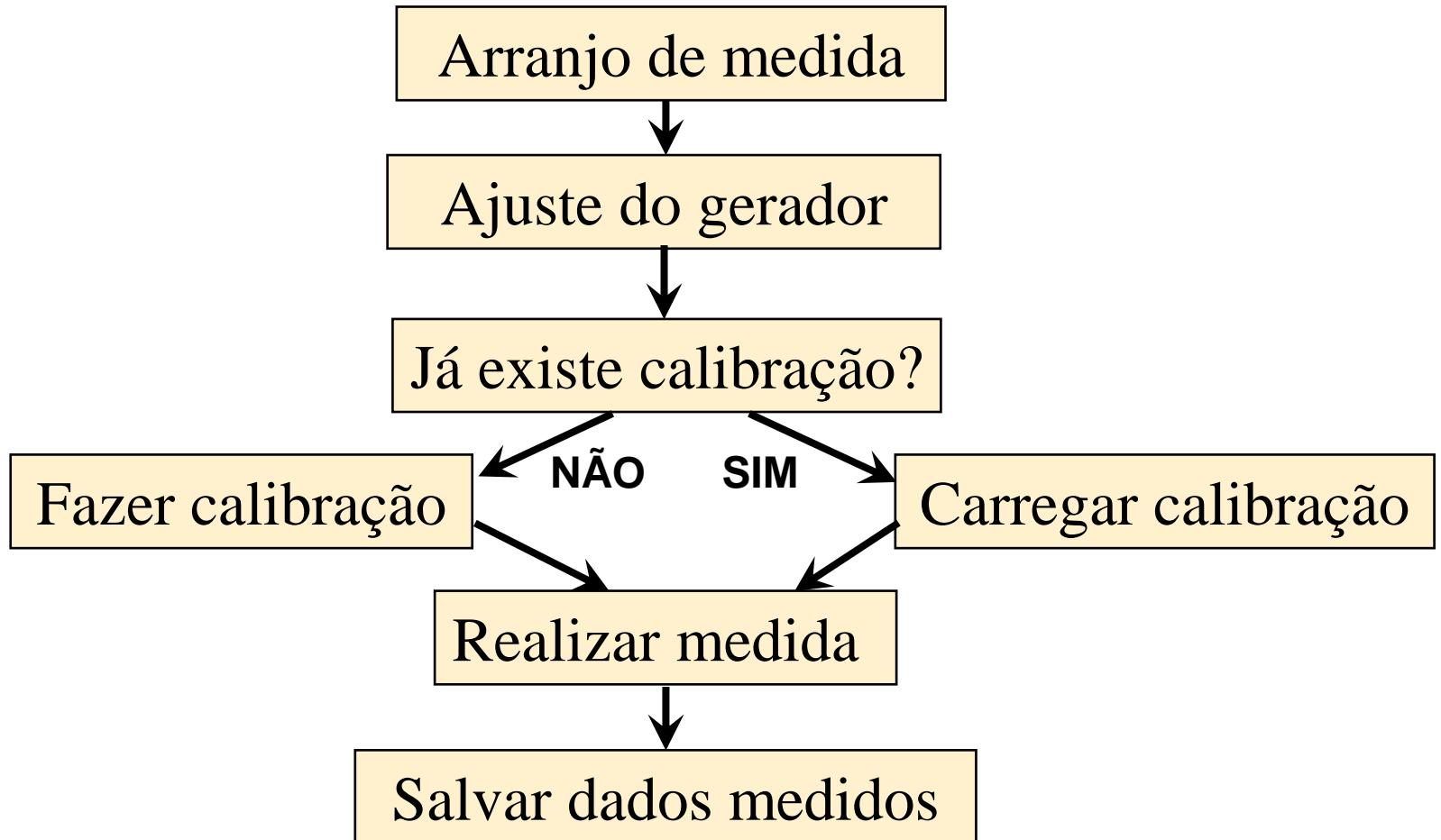
- Calibração da reflexão  $\rightarrow S_{11}$  e  $S_{22}$ 
  - Cargas de  $50 \Omega$
  - Curtos circuitos
  - Circuitos em aberto
- Calibração da transmissão  $\rightarrow S_{21}$  e  $S_{12}$ 
  - Linha direta
- Calibração da isolação
  - Calibração precisa de isolação
  - Portas 1 e 2 terminadas em  $50 \Omega$

# Conclusão da calibração

- Salvar calibração
  - disco interno ao equipamento ou mídia externa
- Verificar a calibração
  - medida dos padrões de calibração
    - 50  $\Omega$
    - curto-circuito
    - circuito em aberto
    - linha direta
  - refazer calibração, se necessário



# Procedimento de medida

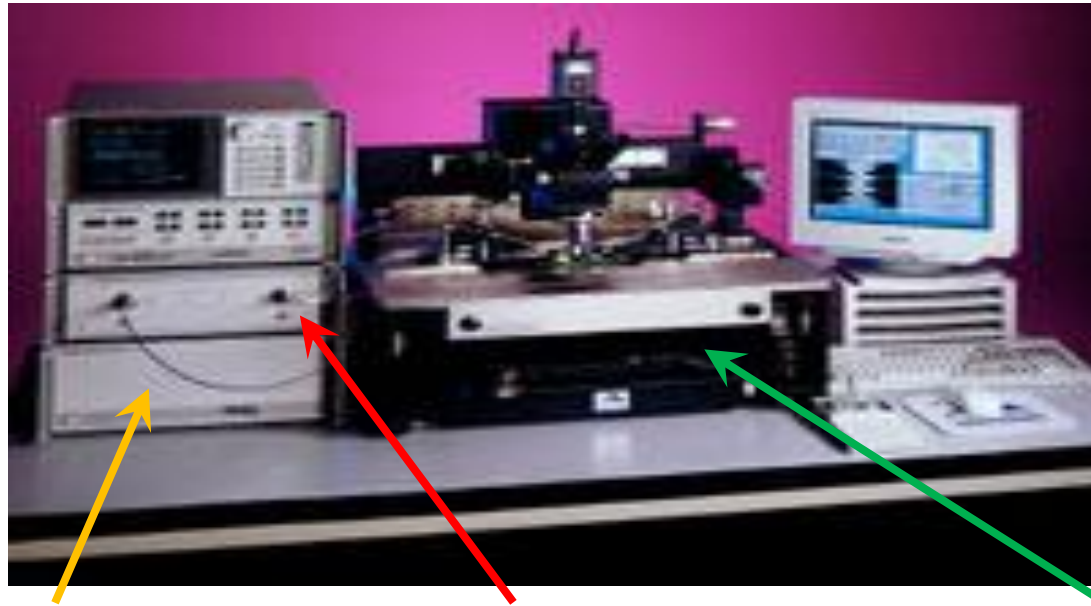


# Medidas “on Chip”

# Medidas da matriz “S” “on chip”

- Equipamentos gerais
  - Analisador de redes
  - Cabos coaxiais
  - Conectores e transições
- Equipamentos específicos
  - Estação microprovodora de microondas
  - Pontas de prova de microondas
  - Pontas de prova DC
  - Kit de calibração para medidas “on chip”

# Sistema de medidas “on chip”



Analizador  
de redes

Cabos e  
conectores

Estação  
microprovadora

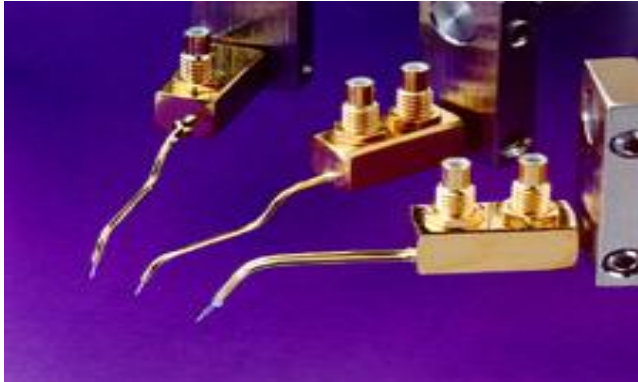
# Estações microprovadoras de micro-ondas

- Fabricante CASCADE Microtech



- Fixação do chip por vácuo
- Pontas de prova DC e RF
- Posicionamento micrométrico
- Microscópio óptico

# Pontas de prova de microondas



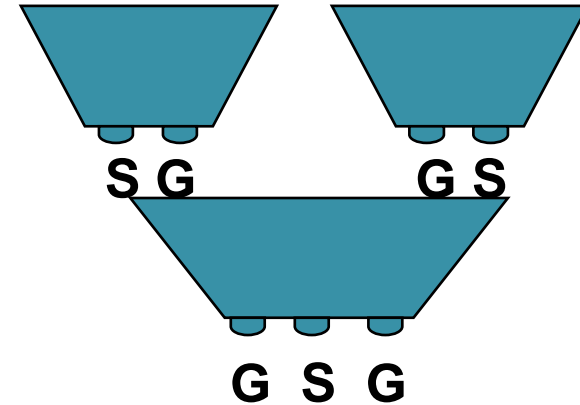
- Pontas DC
  - tensões de alimentação
  - tipo “agulha”
  - tipo coaxial

- Pontas de micro-ondas
  - sinais de entrada e saída
  - tipo coplanar
  - tipo coaxial



# Pontas de prova de micr-ondas

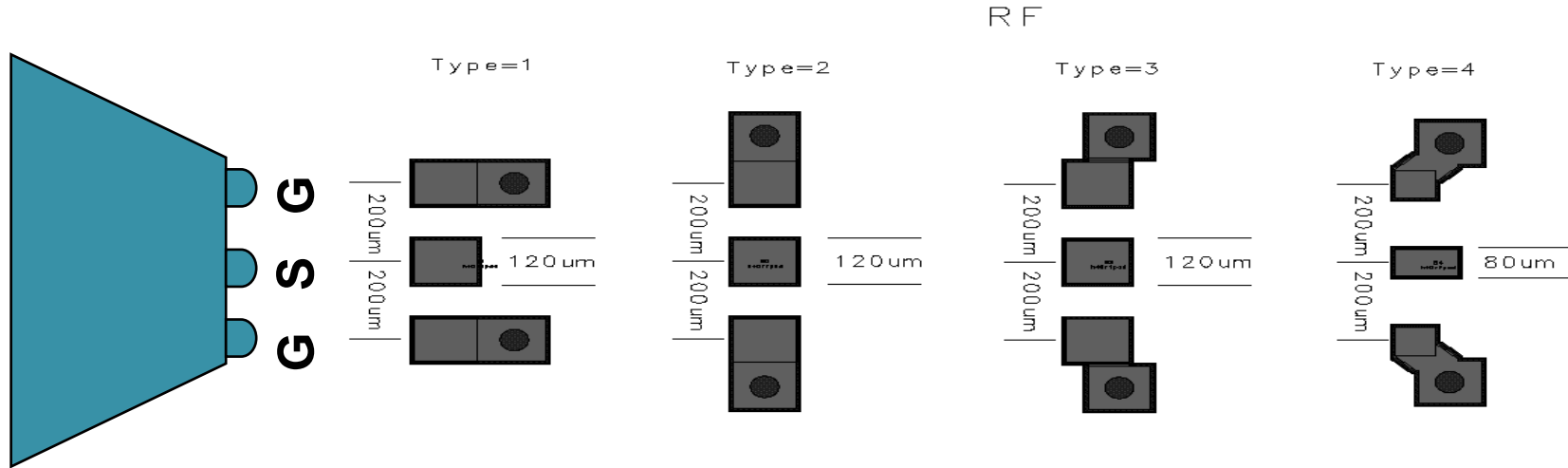
- Tipos
  - SG → signal-ground
  - GS → ground-signal
  - GSG → ground-signal-ground



- Pitch
  - distância entre centro de contatos adjacentes
  - 100  $\mu\text{m}$ , 150  $\mu\text{m}$ , 200  $\mu\text{m}$ , 250  $\mu\text{m}$  ...
- Compatível com o “pad de RF” do chip

# Pads de RF

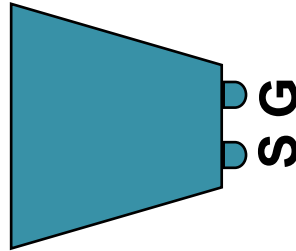
- Pontas de prova G-S-G
- Exemplo - pitch 200



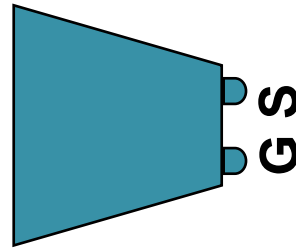


# Pads de RF

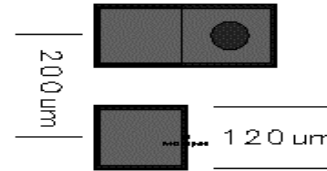
- Pontas de prova S-G



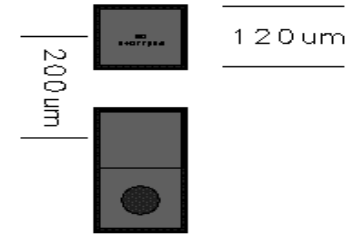
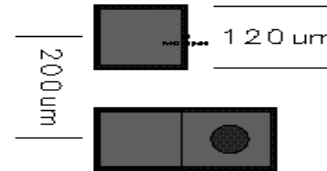
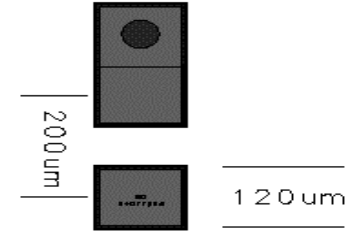
- Pontas de prova G-S



Type=1

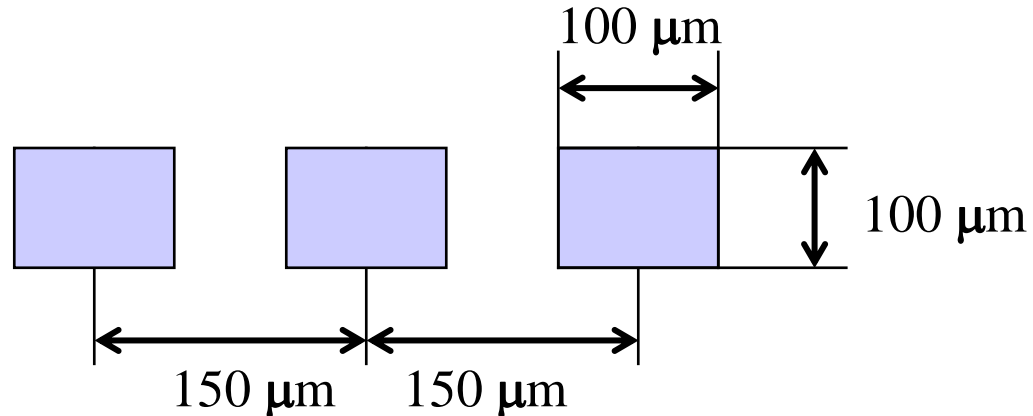


Type=2



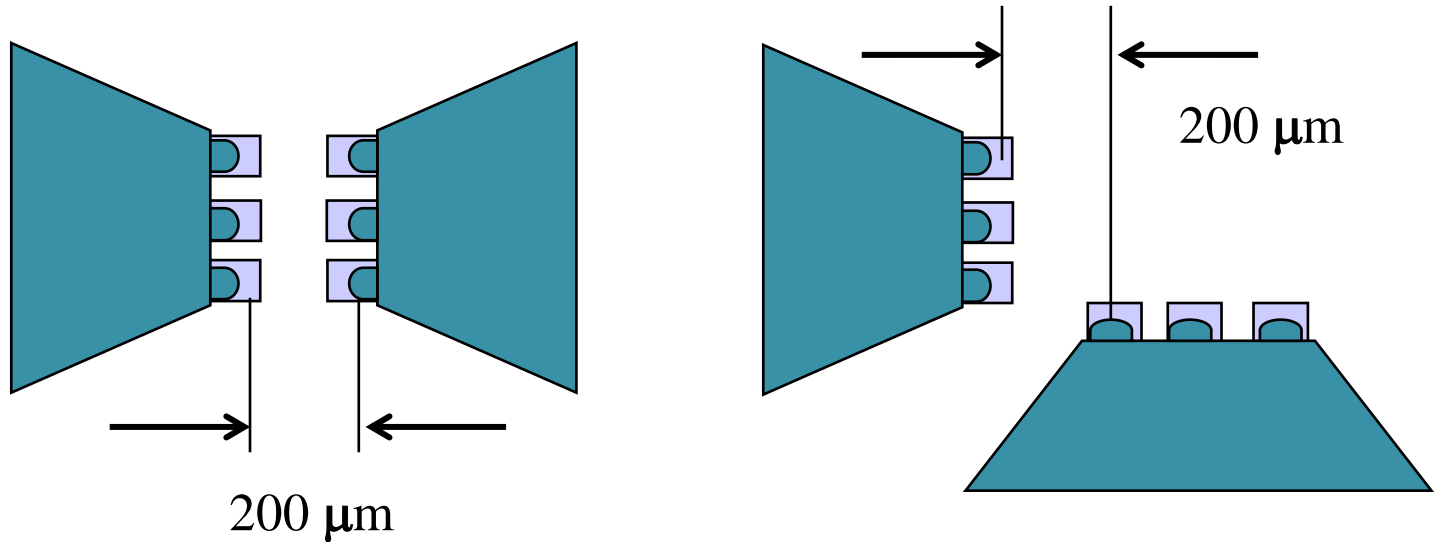
# Exemplo de Regras de leiaute dos pads

- Dimensão do “pad”
  - mínimo recomendado →  $100\ \mu\text{m} \times 100\ \mu\text{m}$
- “Pitch”
  - Mínimo recomendado →  $150\ \mu\text{m}$



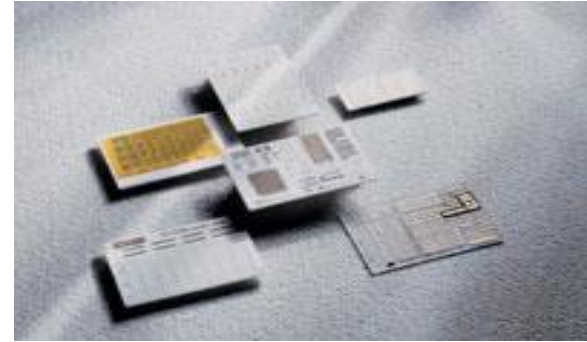
# Exemplo de Regras de leiaute dos pads

- Distância entre fileiras de “pads”
  - Mínimo recomendado →  $200\ \mu\text{m}$



# Calibração “on chip”

- Lâmina de calibração
  - Alumina
  - Terminações padrão
    - Cargas de  $50 \Omega$
    - Curto circuito
    - Linha direta
  - Pontas
    - S-G
    - G-S
    - G-S-G



# Procedimento de medida “on chip”

