



# **MEDIDAS EM MICRO-ONDAS**

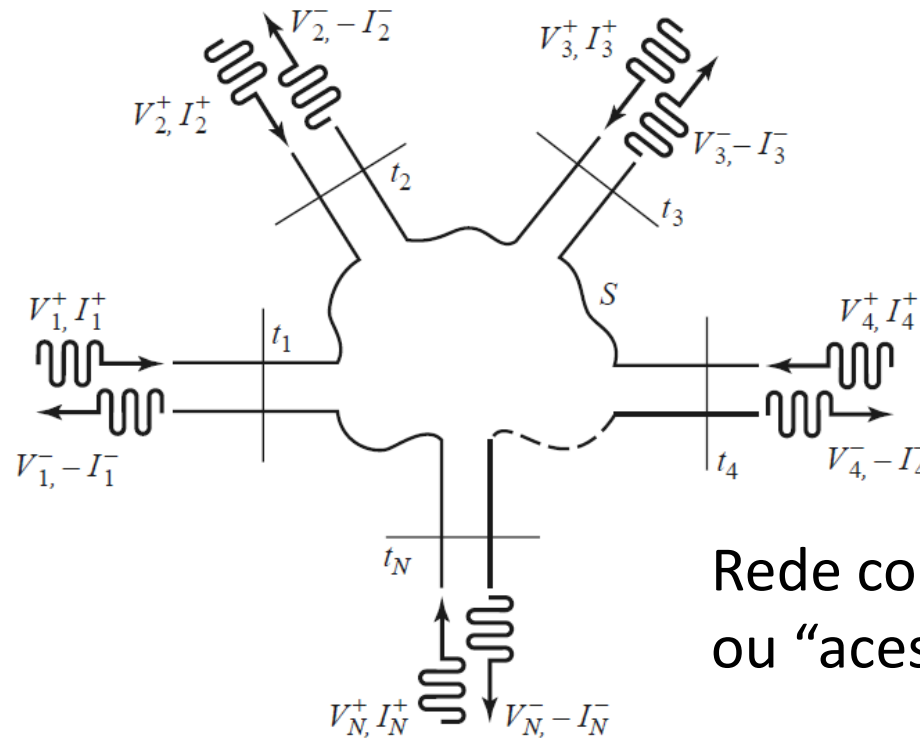
- **Matriz de Impedância e Matriz de Admitância**
- **Matriz de Espalhamento**
- **Medida de Matriz de Espalhamento**
- **Medidas “on chip”**

**Profa. Dra. Fatima Salete Correra**



# **Matriz de Impedância e Matriz de Admitância**

# Rede arbitrária de micro-ondas



Rede com N “portas”  
ou “acessos”

- No plano  $t_n$  da porta N, tem-se
  - $V_n^+, I_n^+ \rightarrow$  tensão e corrente incidentes
  - $V_n^-, I_n^- \rightarrow$  tensão e corrente incidentes

Tensão total:  $V_n = V_n^+ + V_n^-$       Corrente total:  $I_n = I_n^+ - I_n^-$

# Matriz de Impedância [Z]

- Relaciona as tensões com as correntes nos acessos da rede

$$\begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \\ \vdots \\ V_N \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_{11} & Z_{12} & \cdots & Z_{1N} \\ Z_{21} & & & \vdots \\ \vdots & & & \vdots \\ Z_{N1} & \cdots & \cdots & Z_{NN} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \\ \vdots \\ I_N \end{bmatrix}$$

- Em forma matricial

$$[V] = [Z][I]$$

[V] vetor das tensões  $V_i$ , com  $i$  de 1 a  $N$

[I] vetor das correntes  $I_i$ , com  $i$  de 1 a  $N$

[Z] Matriz de impedância – ordem  $N \times N$

# Matriz de Admitância [Y]

- Relaciona as correntes com as tensões nos acessos da rede

$$\begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \\ \vdots \\ I_N \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Y_{11} & Y_{12} & \cdots & Y_{1N} \\ Y_{21} & & & \vdots \\ \vdots & & & \vdots \\ Y_{N1} & \cdots & \cdots & Y_{NN} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \\ \vdots \\ V_N \end{bmatrix}$$

- Em forma matricial

$$[I] = [Y][V]$$

[I] vetor das correntes  $I_i$ , com  $i$  de 1 a  $N$

[V] vetor das tensões  $V_i$ , com  $i$  de 1 a  $N$

[Y] Matriz de admitância – ordem  $N \times N$

$$[Y] = [Z]^{-1}$$

# Determinação da Matriz de Impedância

- Como

$$\begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \\ \vdots \\ V_N \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_{11} & Z_{12} & \cdots & Z_{1N} \\ Z_{21} & & & \vdots \\ \vdots & & & \vdots \\ Z_{N1} & \cdots & \cdots & Z_{NN} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \\ \vdots \\ I_N \end{bmatrix}$$

- Tem-se  $V_i = Z_{i1}I_1 + Z_{i2}I_2 + \dots + Z_{ij}I_j + \dots + Z_{iN}I_N$

- Logo 
$$Z_{ij} = \left. \frac{V_i}{I_j} \right|_{I_k=0 \text{ for } k \neq j}$$

- Medida de  $Z_{ij}$ 
  - Porta  $j$  é alimentada por uma fonte de corrente  $I_j$
  - Portas  $k$ , com  $k \neq j$ , terminadas em circuito aberto  $\rightarrow I_k=0$
  - Mede-se  $V_i$

# Determinação da Matriz de Admitância

- Como

$$\begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \\ \vdots \\ I_N \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Y_{11} & Y_{12} & \cdots & Y_{1N} \\ Y_{21} & & & \vdots \\ \vdots & & & \vdots \\ Y_{N1} & \cdots & \cdots & Y_{NN} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \\ \vdots \\ V_N \end{bmatrix}$$

- Tem-se  $I_i = Y_{i1}V_1 + Y_{i2}V_2 + \dots + Y_{ij}V_j + \dots + Y_{iN}V_N$

- Logo 
$$Y_{ij} = \frac{I_i}{V_j} \Big|_{V_k=0 \text{ for } k \neq j}$$

- Medida de  $Y_{ij}$ 
  - Porta  $j$  é alimentada por uma fonte de tensão  $V_j$
  - Portas  $k$ , com  $k \neq j$ , terminadas em curto-circuito  $\rightarrow V_k=0$
  - Mede-se  $I_i$



# **Matriz de Espalhamento**



# Medidas em micro-ondas

- Matriz de Espalhamento [S]
  - *Scattering Matrix*
- Denominações usuais
  - Matriz S
  - Parâmetros S
  - Parâmetros de Espalhamento
- Relaciona
  - ondas de tensão refletidas nas portas da rede com
  - ondas de tensão incidentes nas portas da rede

# Matriz de espalhamento [S]

- Relaciona ondas de tensão incidente e refletidas nas portas

$$\begin{bmatrix} V_1^- \\ V_2^- \\ \vdots \\ V_N^- \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} & \cdots & S_{1N} \\ S_{21} & & & \vdots \\ S_{N1} & \cdots & & S_{NN} \\ \vdots & & & \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_1^+ \\ V_2^+ \\ \vdots \\ V_N^+ \end{bmatrix}$$

- Em forma matricial

$$[V^-] = [S][V^+]$$

$[V^-]$  vetor das tensões refletidas  $V^-_i$ , com  $i$  de 1 a  $N$

$[V^+]$  vetor das tensões incidentes  $V^+_i$ , com  $i$  de 1 a  $N$

$[S]$  Matriz de Espalhamento – ordem  $N \times N$

# Determinação da Matriz de Espalhamento

- Como 
$$\begin{bmatrix} V_1^- \\ V_2^- \\ \vdots \\ V_N^- \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} & \cdots & S_{1N} \\ S_{21} & & & \vdots \\ S_{N1} & \cdots & & S_{NN} \\ \vdots & & & \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_1^+ \\ V_2^+ \\ \vdots \\ V_N^+ \end{bmatrix}$$

- Tem-se 
$$V_i^- = S_{i1}V_1^+ + S_{i2}V_2^+ + \dots + S_{ij}V_j^+ + \dots + S_{iN}V_N^+$$

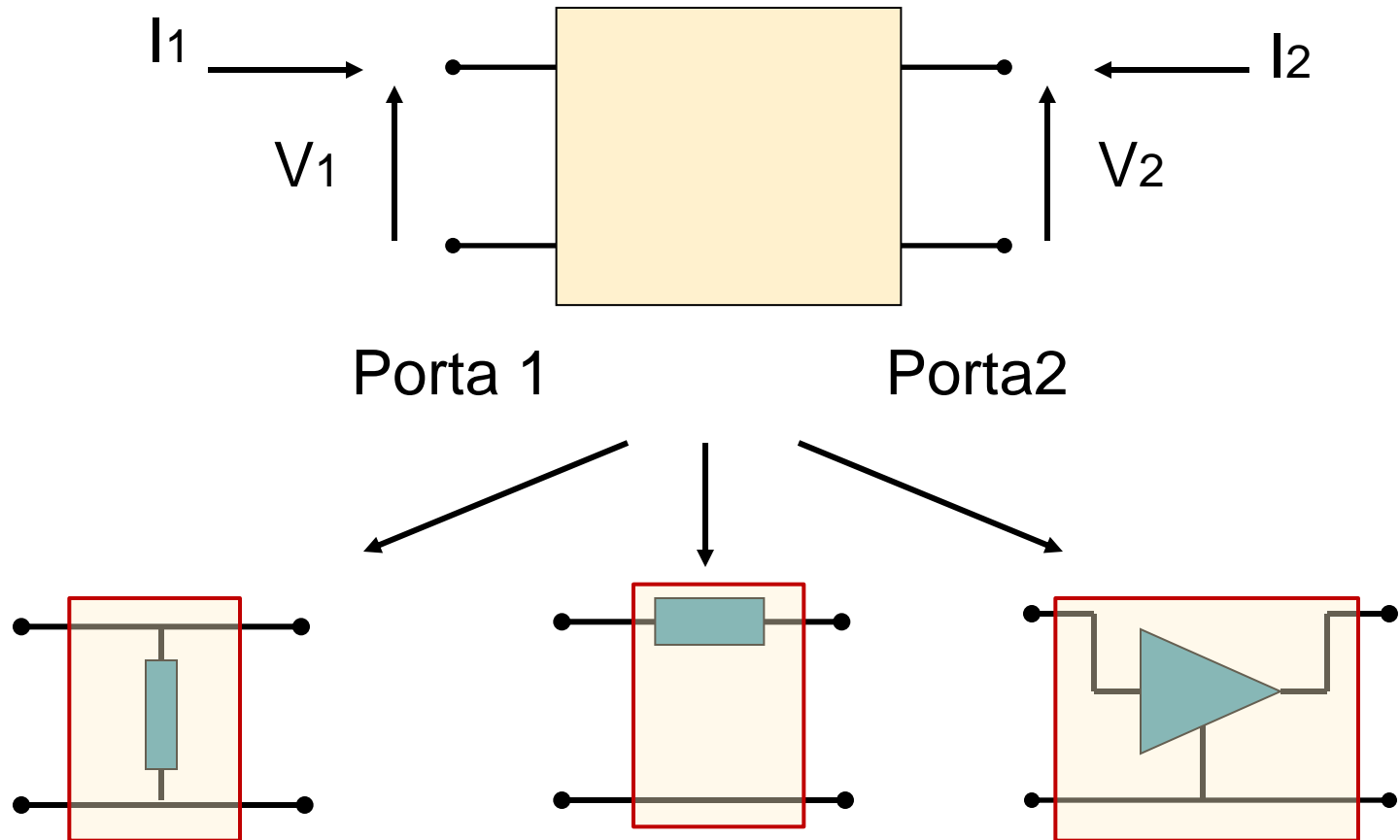
- Logo 
$$S_{ij} = \left. \frac{V_i^-}{V_j^+} \right|_{V_k^+ = 0 \text{ for } k \neq j}$$

- Medida de  $S_{ij}$

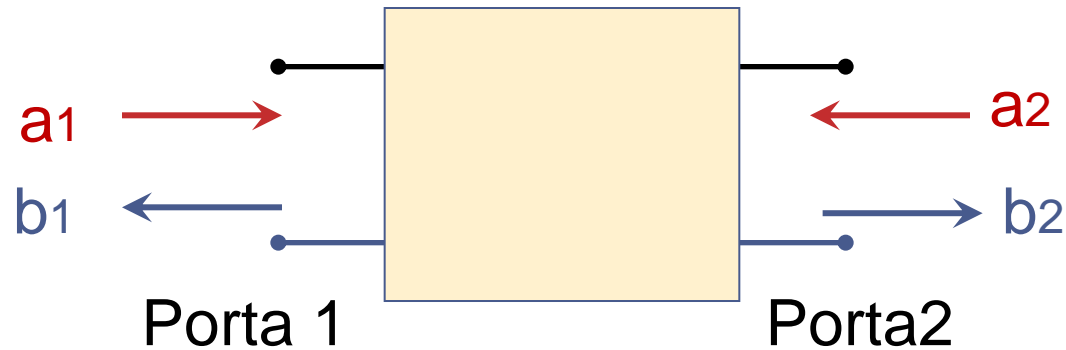
- Porta  $j$  é alimentada por uma fonte de tensão  $V_j$
- Portas  $k$ , com  $k \neq j$ , terminadas com cargas casadas  $\rightarrow V_k^- = 0$

# Redes com dois acessos

## Representação como quadripolo



# Matriz "S"



$$\begin{bmatrix} b_1 \\ b_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} \\ S_{21} & S_{22} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} a_1 \\ a_2 \end{bmatrix}$$

- $a_1$  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

$$a_1 = \frac{1}{2} \left( \frac{V_1}{\sqrt{Z_0}} + I_1 \sqrt{Z_0} \right)$$

$$b_1 = \frac{1}{2} \left( \frac{V_1}{\sqrt{Z_0}} - I_1 \sqrt{Z_0} \right)$$

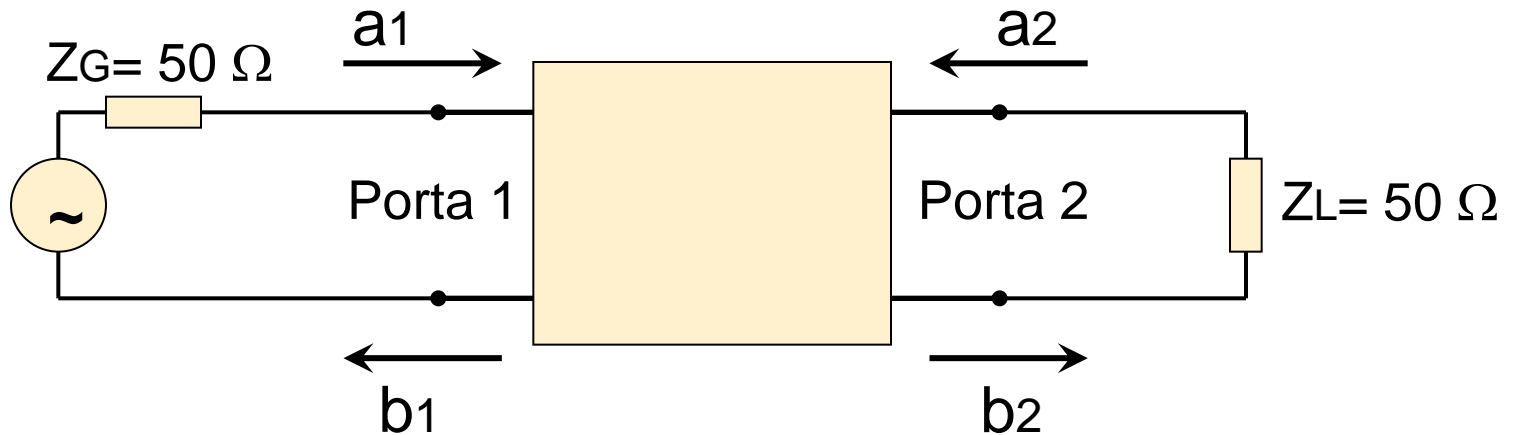
$$a_2 = \frac{1}{2} \left( \frac{V_2}{\sqrt{Z_0}} + I_2 \sqrt{Z_0} \right)$$

$$b_2 = \frac{1}{2} \left( \frac{V_2}{\sqrt{Z_0}} - I_2 \sqrt{Z_0} \right)$$

- Portas 1 e 2 terminadas em  $Z_0$ 
  - $Z_0 \rightarrow$  Impedância de referência, real
  - Micro-ondas  $\rightarrow Z_0 = 50 \Omega$
  - Impedância interna do gerador:  $Z_G = Z_0$
  - Impedância de carga:  $Z_L = Z_0$

Unidade de  $a_1, a_2, b_1, b_2$ : raiz quadrada de potência

# $S_{11}$ – medida e conceito



- Coeficiente de reflexão se tensão da porta 1



$$S_{11} = \frac{b_1}{a_1}$$

- Associado à  $Z_1$  impedância de entrada, com a saída terminada por  $50 \Omega$



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

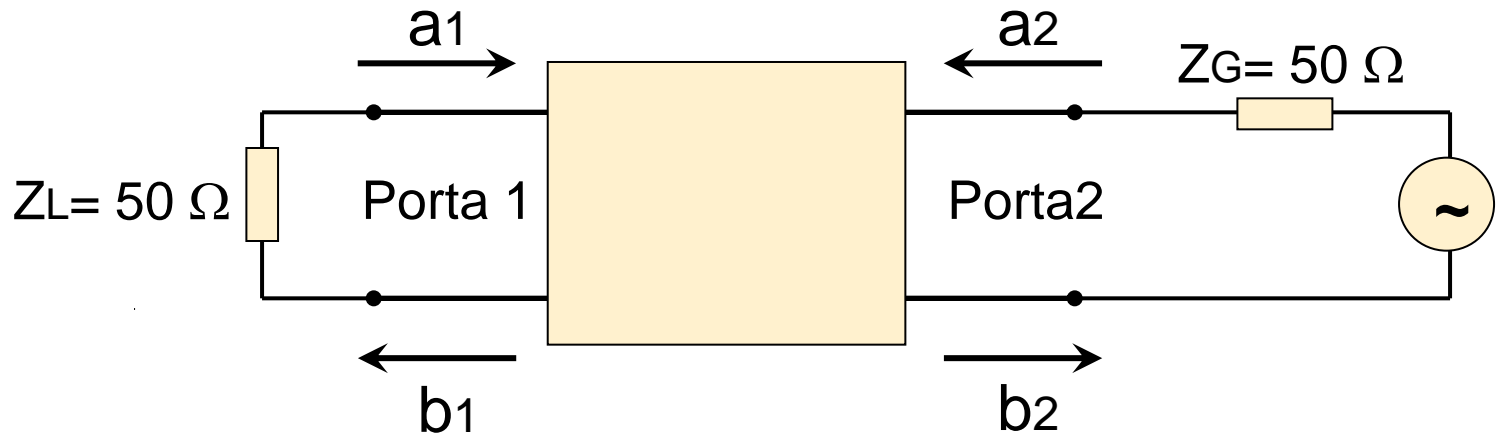
## $S_{11}$ - exemplos

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

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



# $S_{22}$ - medida e conceito



- Coeficientes de reflexão da porta 2



$$S_{22} = \frac{b_2}{a_2}$$

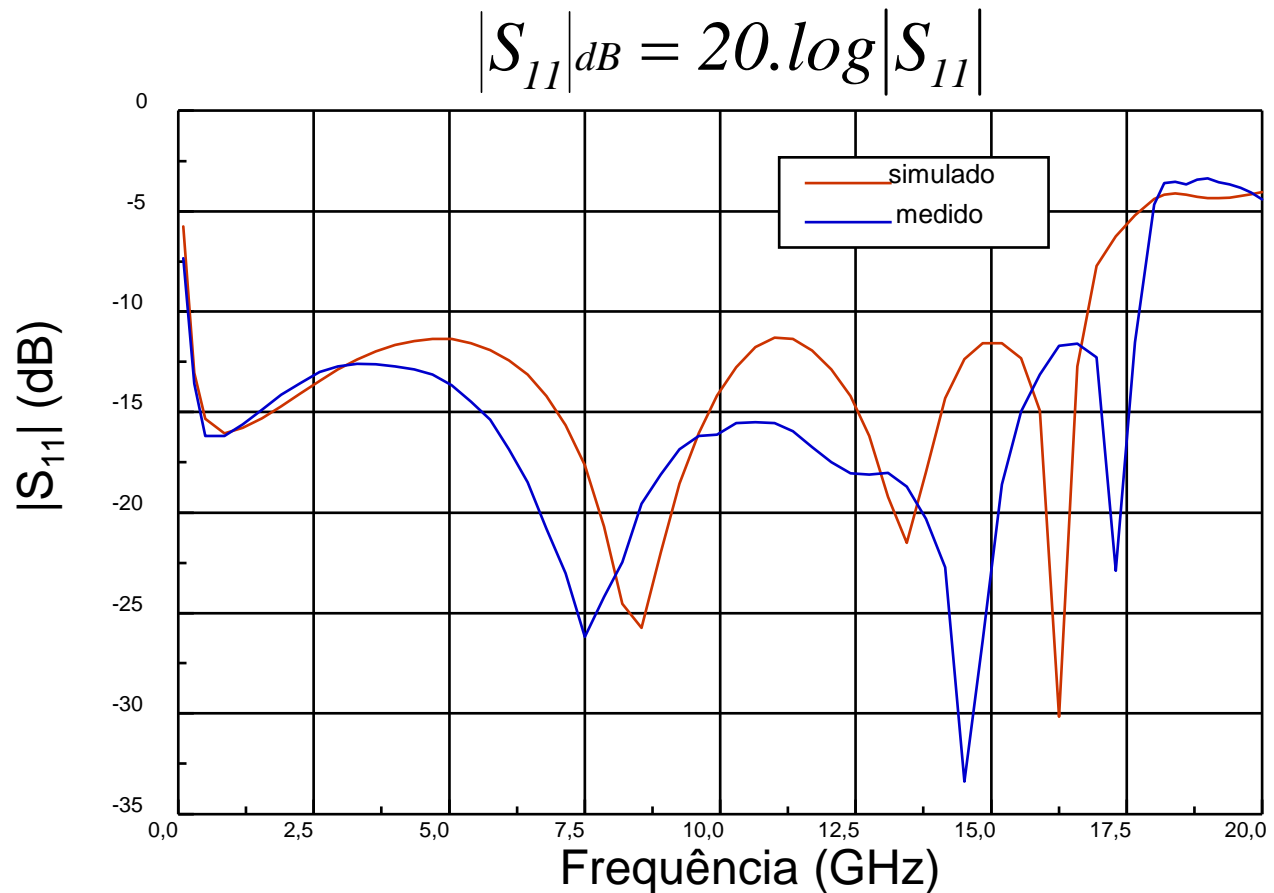
- Associado à  $Z_2$  impedância de saída



$$S_{22} = \frac{Z_2 - Z_0}{Z_2 + Z_0}$$

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

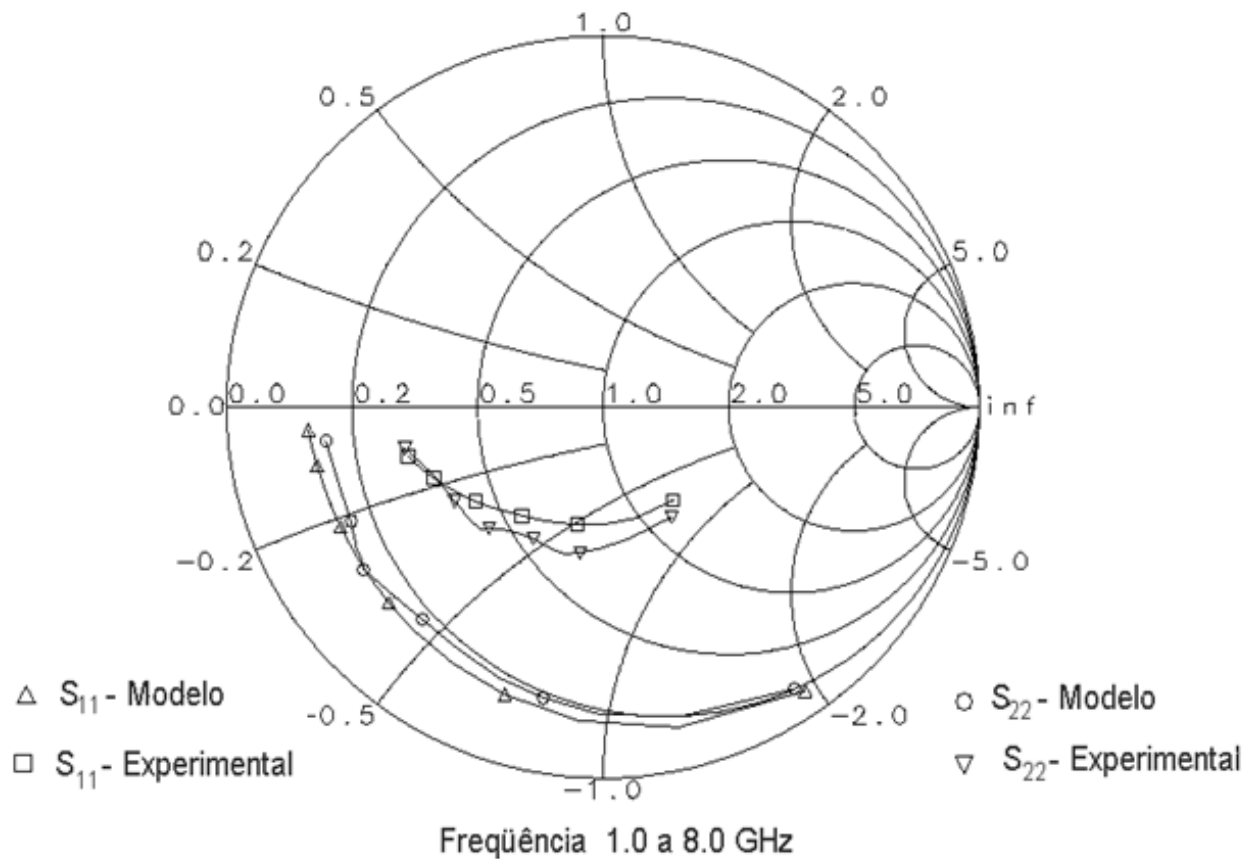
- Forma retangular → módulo (dB) e fase x frequência



$|S_{11}|_{dB}$  de um amplificador de banda ultra-larga

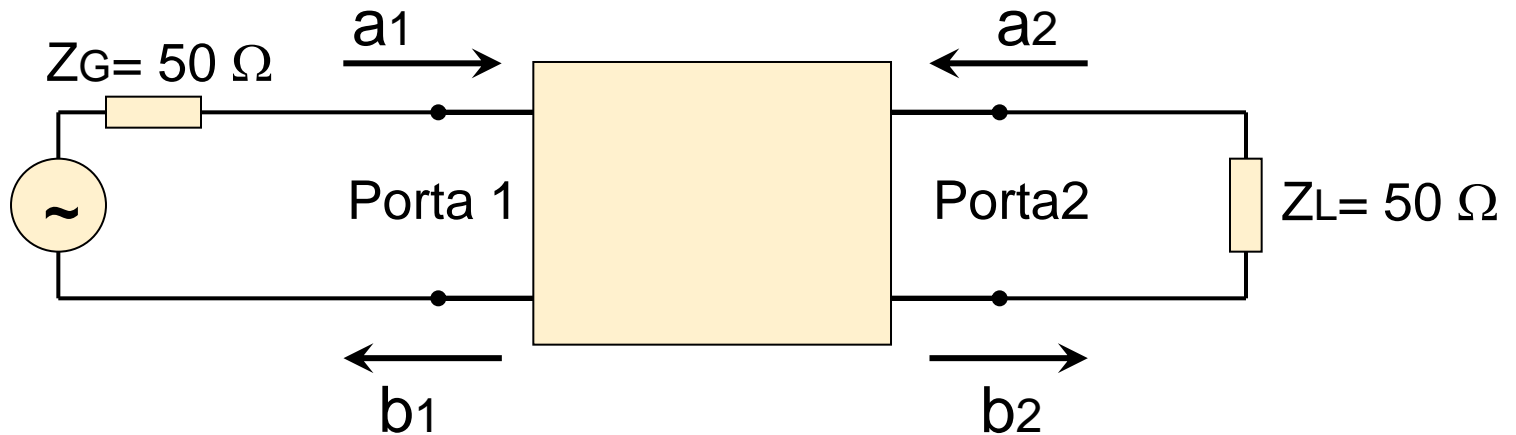
# Representação gráfica de $S_{11}$ e $S_{22}$

- Forma polar → Carta de Smith



$S_{11}$  e  $S_{22}$  de um transistor MESFET de 1 a 8 GHz

# $S_{21}$ – medida e conceito



- Coeficiente de transmissão direto



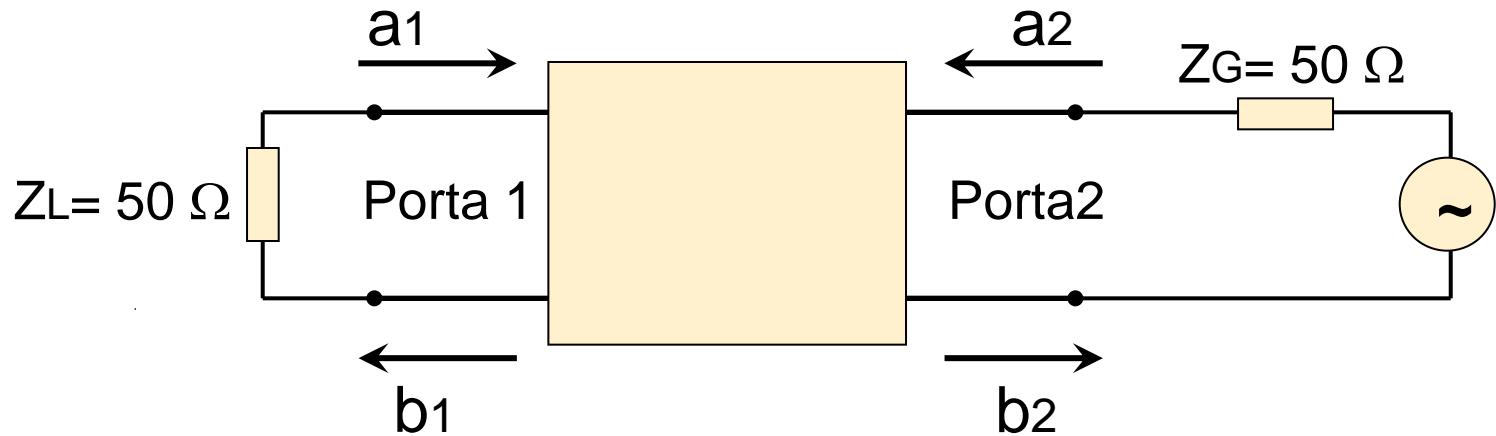
$$S_{21} = \frac{b_2}{a_1}$$

- Ganho direto de potência com entrada e saída em  $50 \Omega$



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

# $S_{12}$ – medida e conceito



- Coeficiente de transmissão reverso



$$S_{12} = \frac{b_1}{a_2}$$

- Ganho reverso de potência em  $50 \Omega$

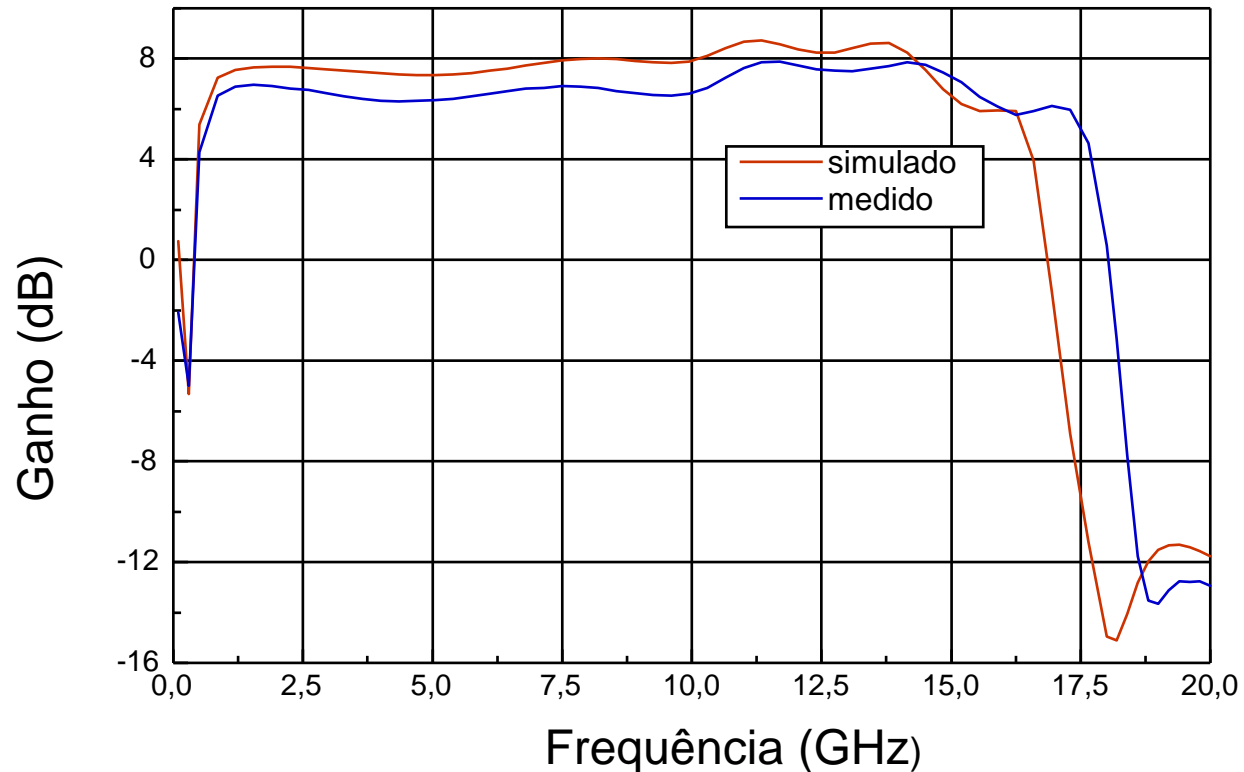


$$|S_{12}|^2 = G_R (@50\Omega)$$

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

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

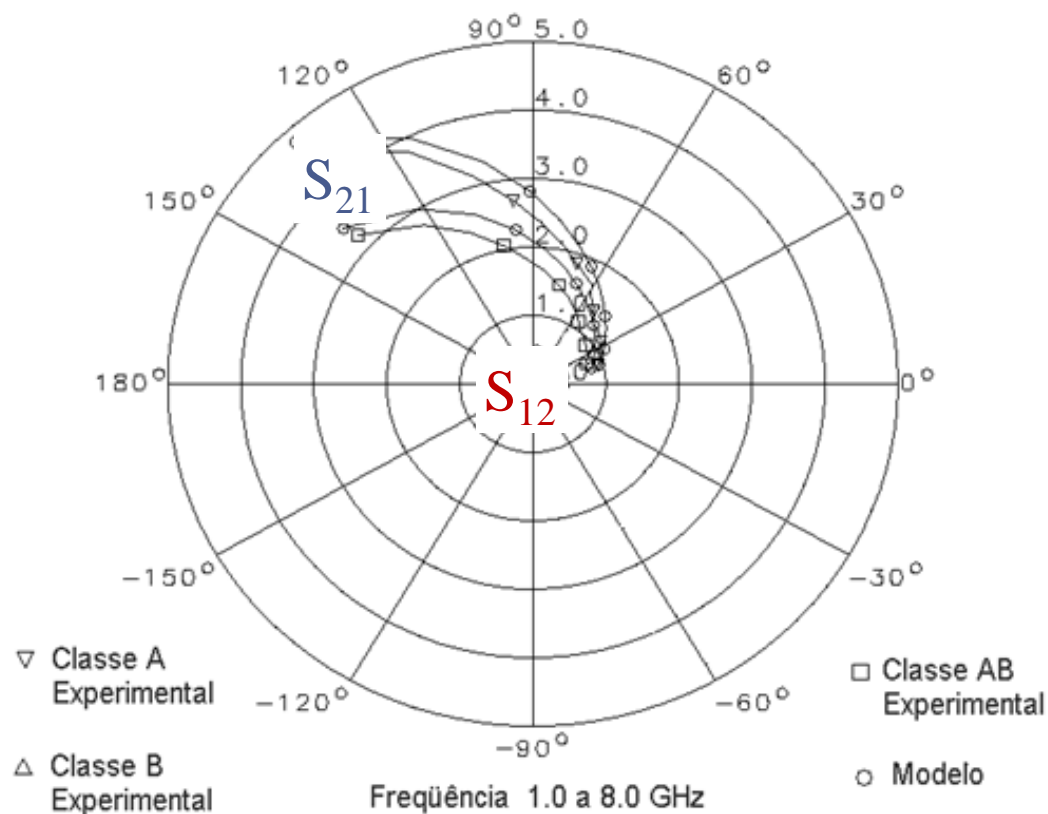
$$|S_{21}|_{dB} = 20 \cdot \log |S_{21}| = \text{Ganho (dB)}$$



Ganho de um amplificador de banda ultra-larga

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

- Forma polar → diagrama polar



$S_{21}$  e  $S_{12}$  de um transistor MESFET de 1 a 8 GHz



# Tabelas de parâmetros S

## ATF-36077 Typical Scattering Parameters,

Common Source,  $Z_0 = 50 \Omega$ ,  $V_{DS} = 1.5 \text{ V}$ ,  $I_D = 10 \text{ mA}$

Freq. GHz	$S_{11}$		dB	$S_{21}$		dB	$S_{12}$		$S_{22}$	
	Mag.	Ang.		Mag.	Ang.		Mag.	Ang.	Mag.	Ang.
1.0	0.99	-17	14.00	5.010	163	-36.08	0.016	78	0.60	-14
2.0	0.97	-33	13.81	4.904	147	-30.33	0.030	66	0.59	-28
3.0	0.94	-49	13.53	4.745	132	-27.25	0.043	54	0.57	-41
4.0	0.90	-65	13.17	4.556	116	-25.32	0.054	43	0.55	-54
5.0	0.86	-79	12.78	4.357	102	-24.04	0.063	33	0.53	-66
6.0	0.82	-93	12.39	4.162	88	-23.17	0.069	24	0.50	-78
7.0	0.78	-107	12.00	3.981	75	-22.58	0.074	16	0.48	-89
8.0	0.75	-120	11.64	3.820	62	-22.17	0.078	8	0.46	-99
9.0	0.72	-133	11.32	3.682	49	-21.90	0.080	1	0.44	-109
10.0	0.69	-146	11.04	3.566	37	-21.71	0.082	-6	0.42	-119
11.0	0.66	-159	10.81	3.473	25	-21.57	0.083	-13	0.40	-129
12.0	0.63	-172	10.63	3.401	13	-21.44	0.085	-19	0.38	-139
13.0	0.61	175	10.50	3.349	1	-21.32	0.086	-25	0.37	-149
14.0	0.60	161	10.41	3.315	-12	-21.19	0.087	-32	0.35	-160
15.0	0.58	147	10.36	3.296	-24	-21.04	0.089	-39	0.33	-171
16.0	0.57	131	10.34	3.289	-37	-20.87	0.091	-47	0.31	177
17.0	0.56	114	10.34	3.289	-50	-20.69	0.092	-55	0.29	164
18.0	0.57	97	10.35	3.291	-64	-20.53	0.094	-65	0.26	148

Extraído do *Data Sheet* do transistor ATF-36077, da HP

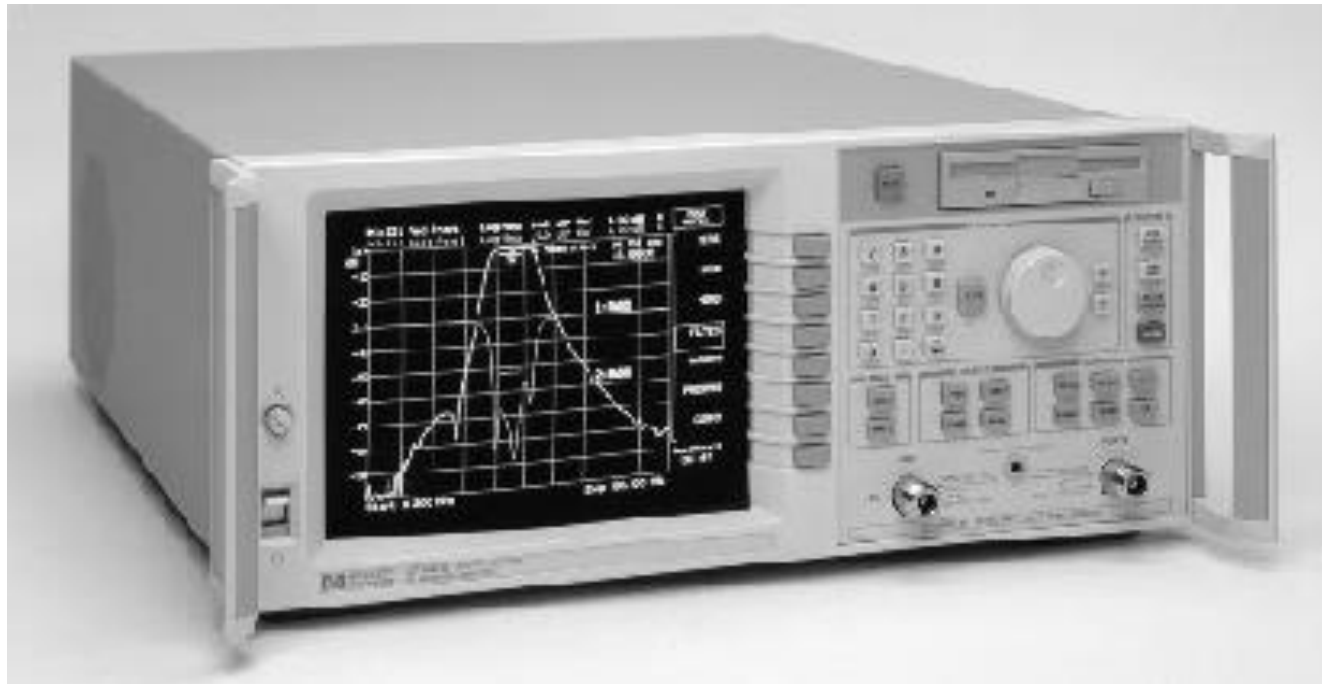


# Técnicas de medida

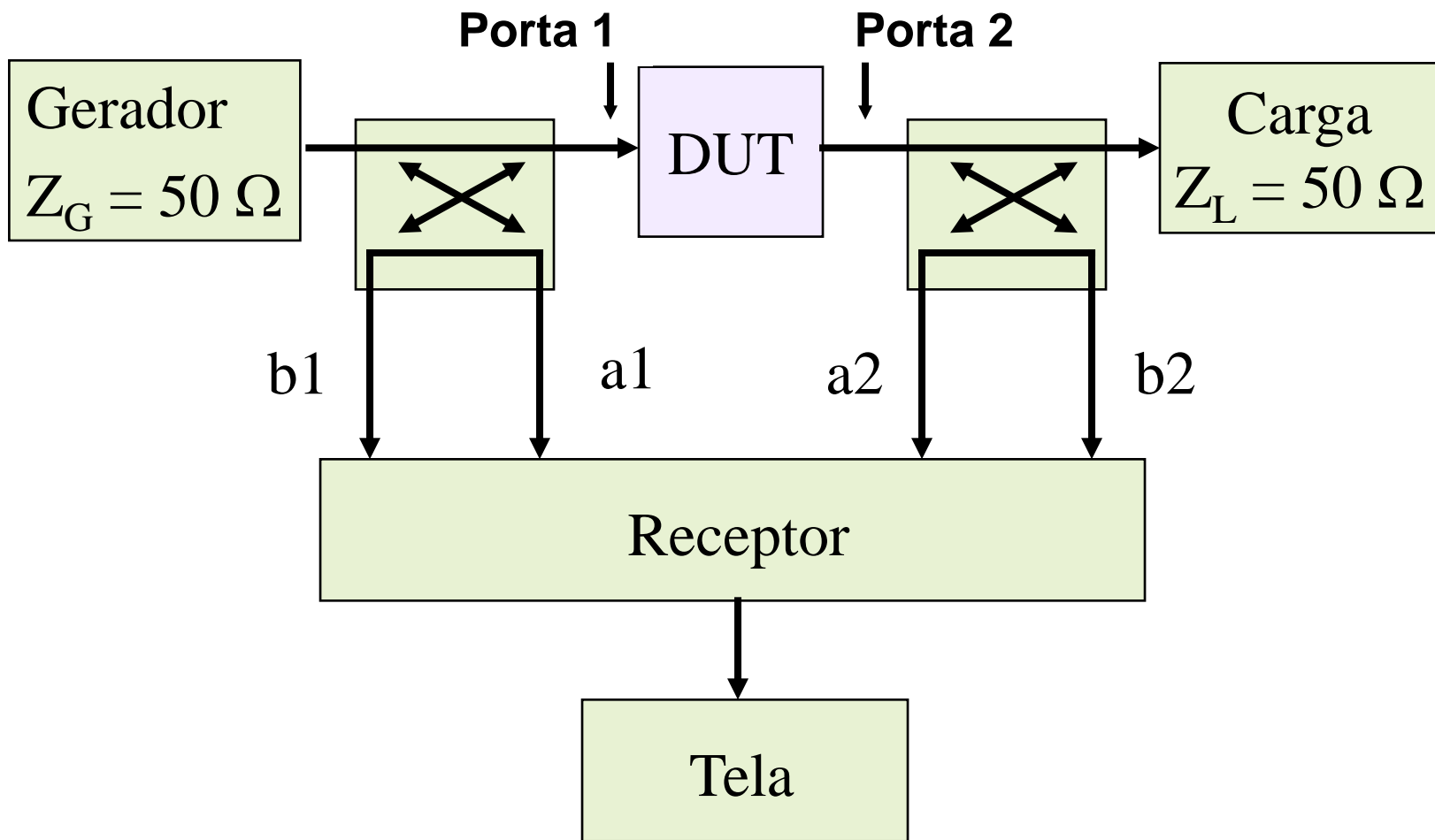
# Medida de parâmetros “S”

- Analisador Vetorial de Redes
  - *Vector Network Analyzer - VNA*
  - Módulo e fase de  $S_{11}$ ,  $S_{21}$ ,  $S_{12}$  e  $S_{22}$
- Analisadores de Rede de Micro-ondas
  - Fabricantes  
Keysight (HP), Anritsu, Wiltron, Rhode Schwarz
  - Exemplo  
HP 8722 - 50 MHz a 40 GHz

# Analizador de redes HP 8712



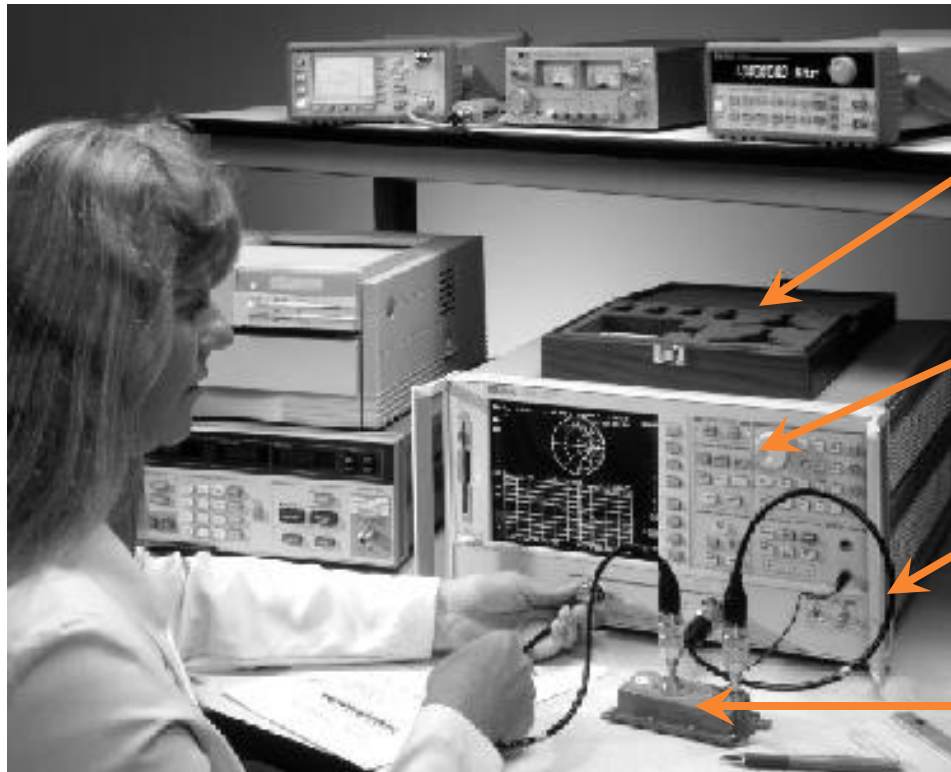
# Analizador de redes



# Acessórios de medida da matriz “S”

- Cabos coaxiais
- Transições de micro-ondas
  - Adaptação de diferentes tipos de conectores
  - Tipo N, SMA, APC3.5, APC7
- Kits de calibração

# Arranjo de medidas



Kit de  
calibração

Analizador  
de redes

Cabos e  
conectores

Dispositivo  
em teste

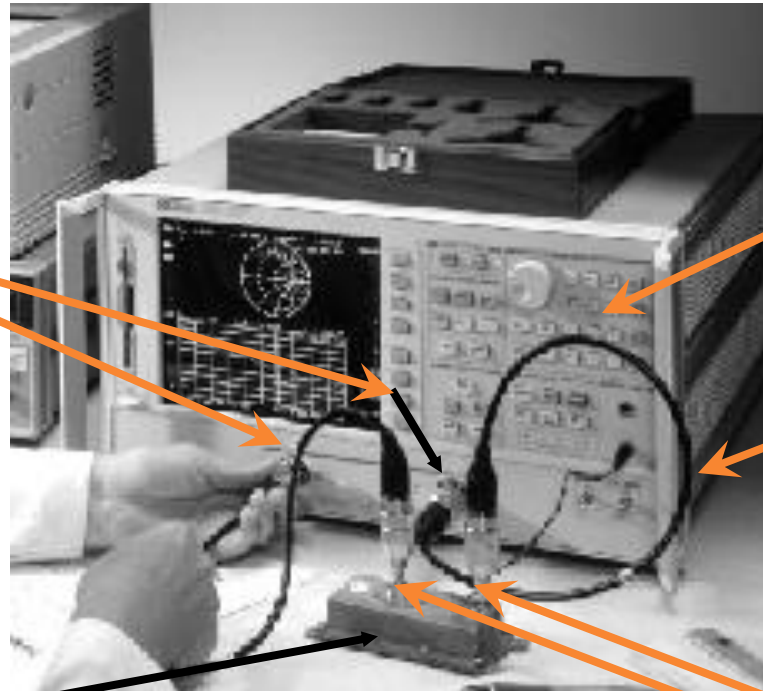
# Calibração da medida

- Corrigir erros do analisador vetorial de redes
- 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

Portas 1 e 2  
do analisador  
de redes



Analisador  
de redes

Cabos e  
conectores

Dispositivo  
em teste

Planos de  
calibração



# Kit de calibração

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



Caixa com kit de calibração coaxial



Cargas coaxiais de  $50 \Omega$

# 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

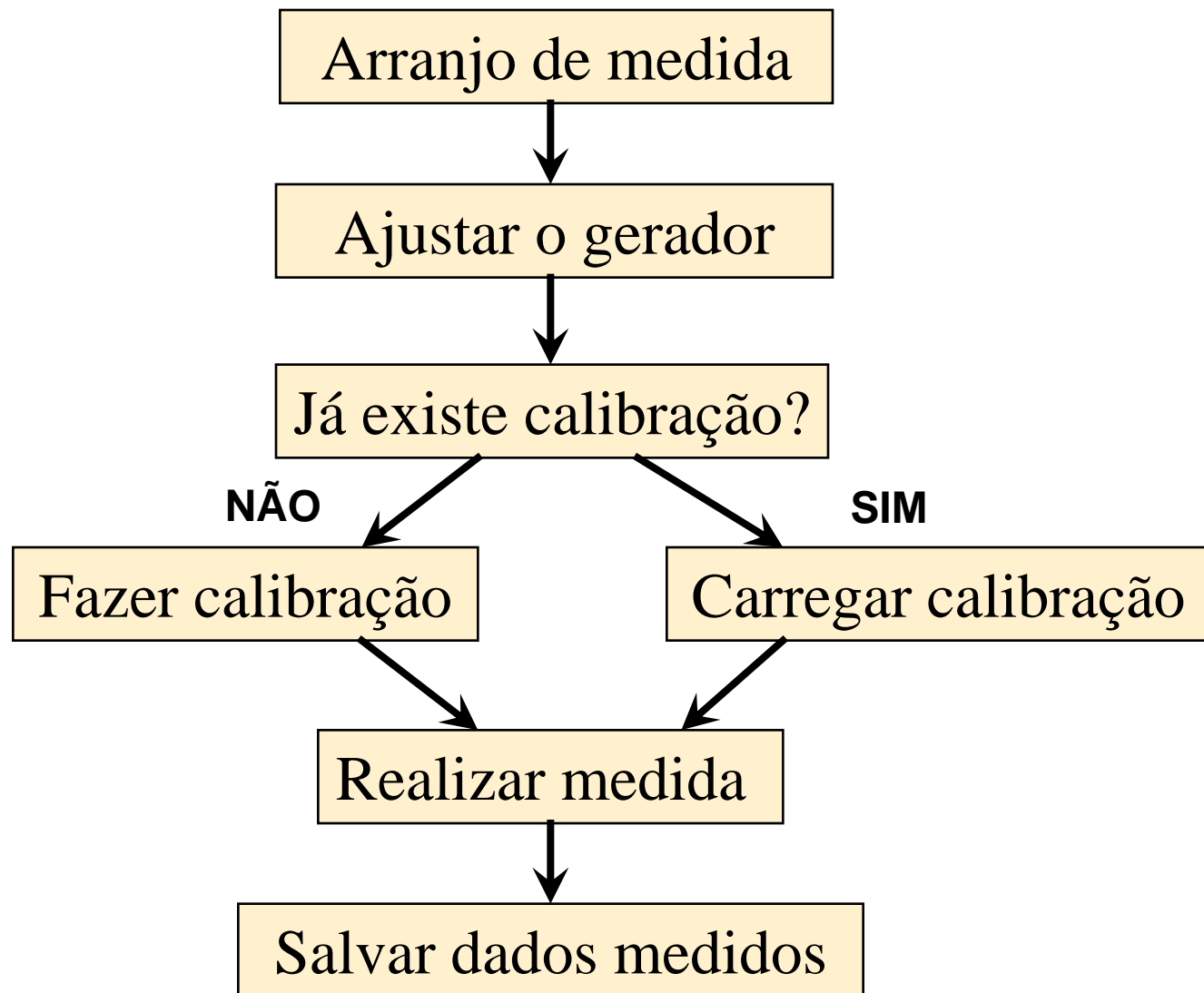
# Rotina interna de calibração

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

# Conclusão da calibração

- Salvar calibração
  - Disco interno do equipamento
  - Disquete externo
- Verificar a calibração
  - Medida dos padrões de calibração
    - 50  $\Omega$
    - curto-circuito
    - circuito em aberto
    - linha direta
  - Refazer calibração, se necessário

# Procedimento de medida



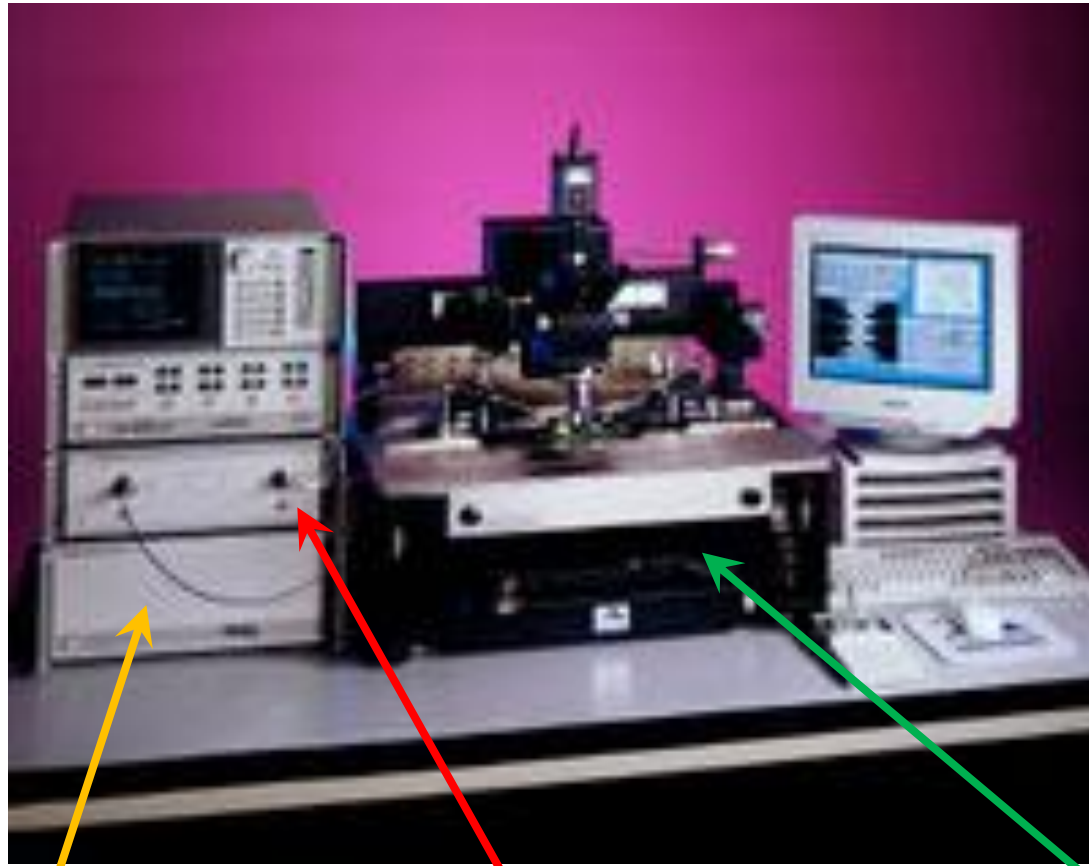
# Medidas “on Chip”

# 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



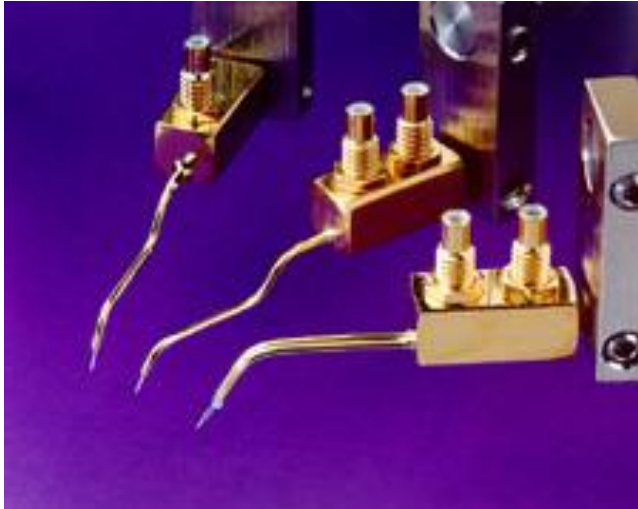
# Estações microprovadoras de micro-ondas

- 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

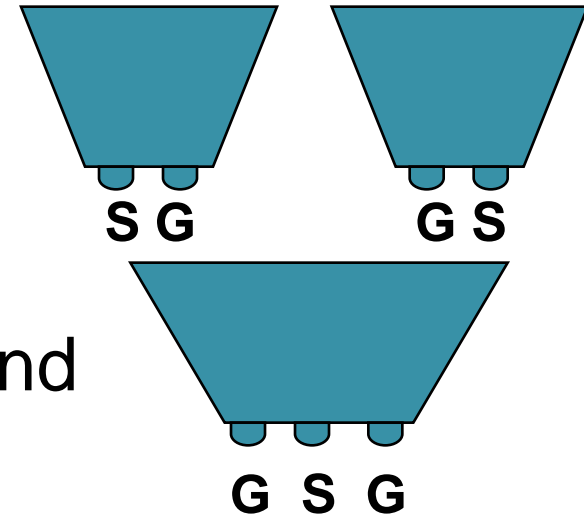
- Pontas de microondas
  - sinais de entrada e saída
  - tipo coplanar
  - tipo coaxial



# Pontas de prova de micro-ondas

- Tipos

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



- Pitch

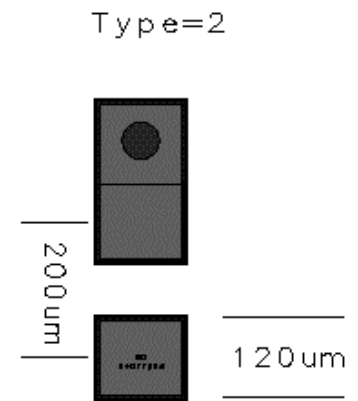
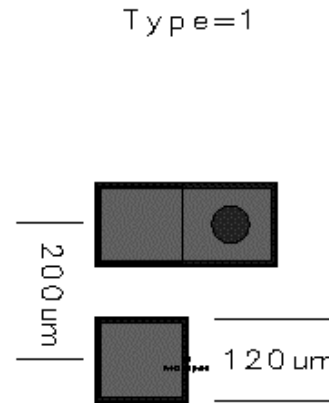
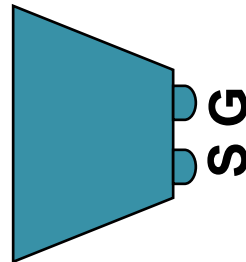
- distância entre centro de contatos adjacentes
- 100  $\mu\text{m}$ , 150  $\mu\text{m}$ , 200  $\mu\text{m}$ , 250  $\mu\text{m}$  . . .

- Compatível com o “pad de R” do chip

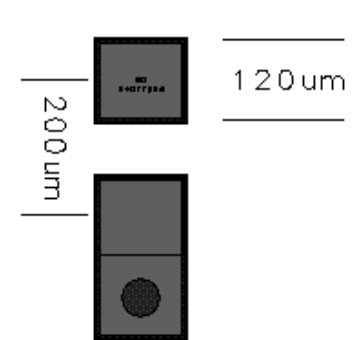
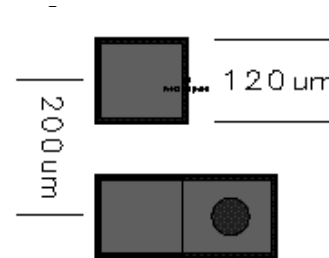
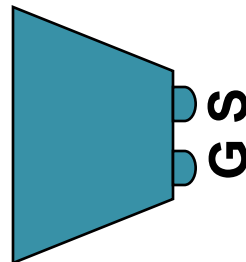


# Pads de RF

- Pontas de prova S-G

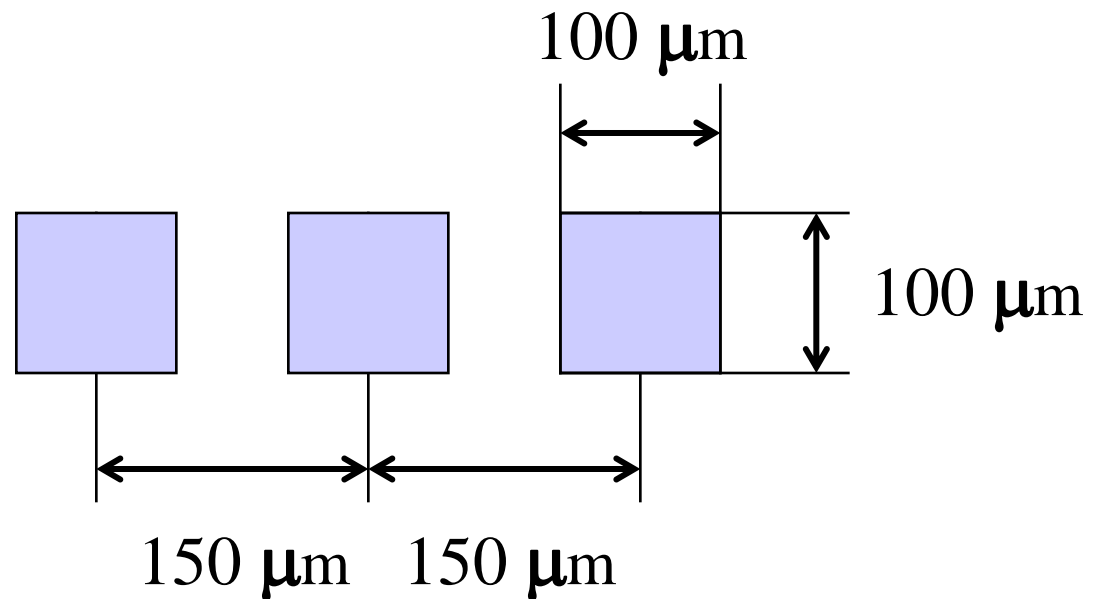


- Pontas de prova G-S



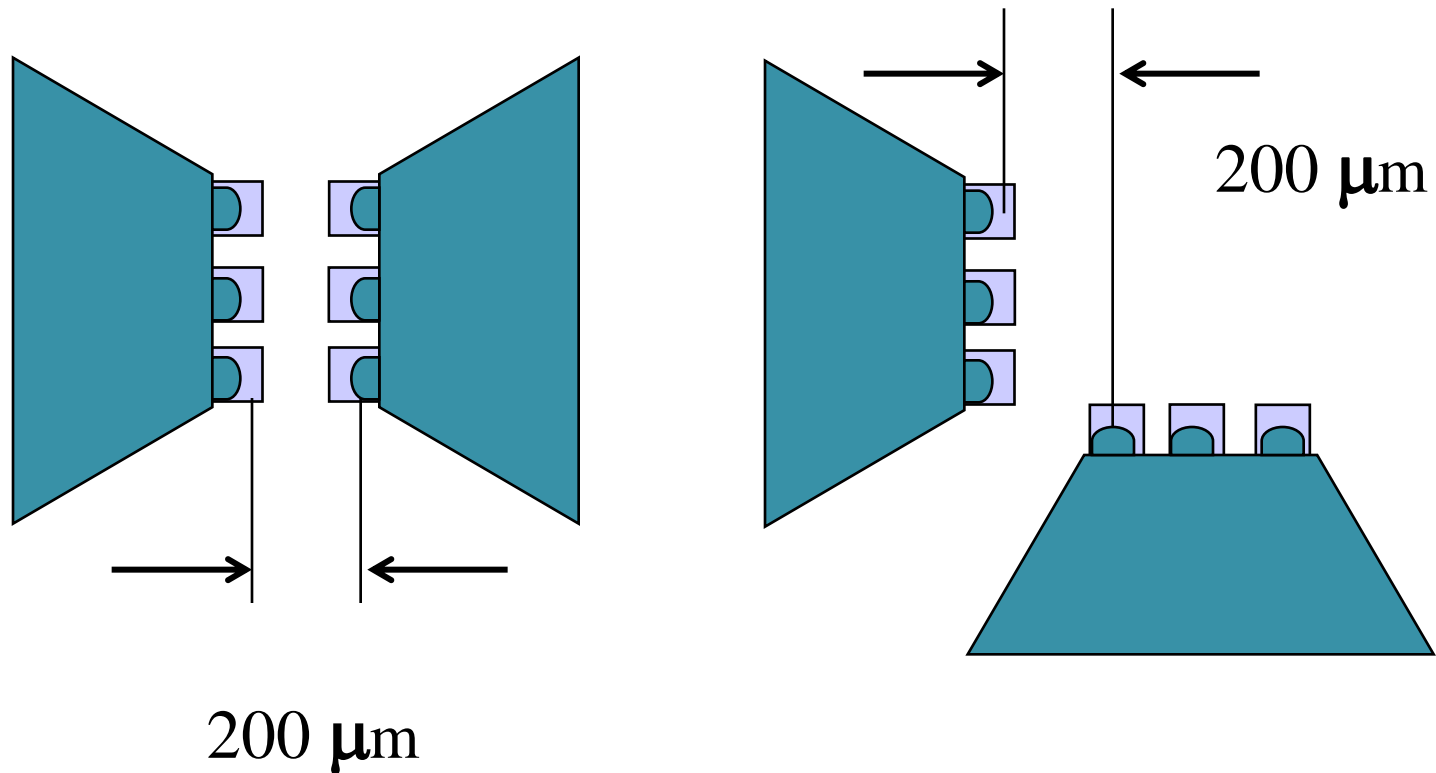
# Exemplo de regras de leiaute dos pads

- 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

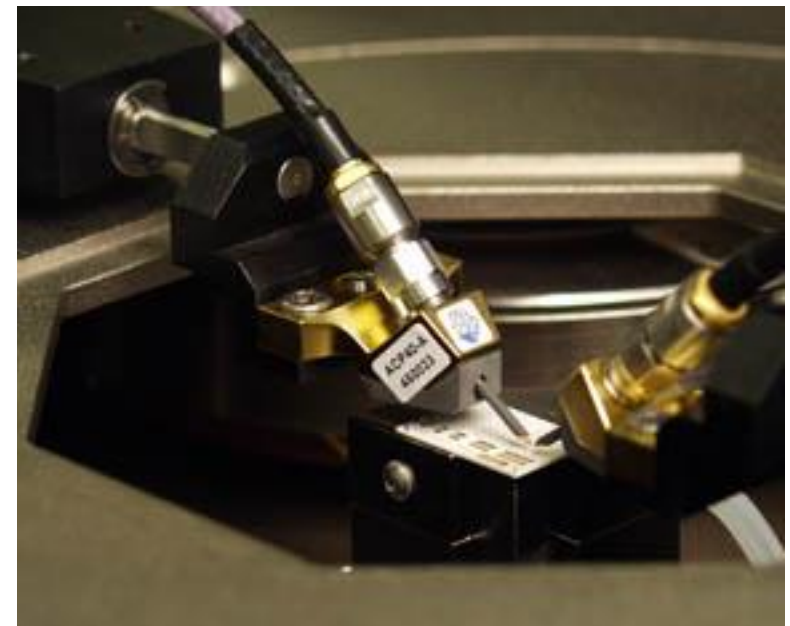
- Distância entre fileiras de “pads”
  - Mínimo recomendado →  $200\ \mu\text{m}$





# 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”

