



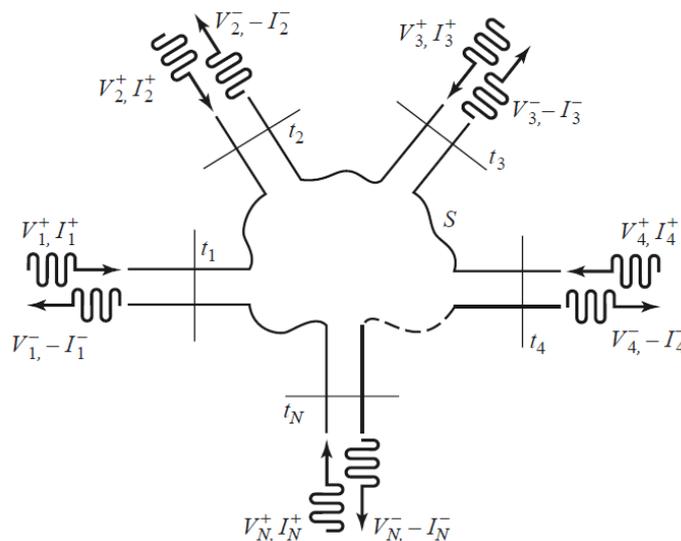
Matriz de Espalhamento

PSI 3483 – Ondas Eletromagnéticas em
Meios Guiados

Profa. Fatima Salete Correra

Modelos de caixa preta

- Modelos de caixa preta
 - Relacionam parâmetros nos acessos da rede
 - Permitem prever o comportamento da rede, mesmo sem conhecer seu conteúdo
 - Exemplo: rede com N portas ou acessos



- Modelo da rede relacionando tensões incidentes e refletidas nos acessos da rede

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

$[V^-]$ vetor das tensões refletidas V^-_i

$[V^+]$ vetor das tensões incidentes V^+_i

$[S]$ Matriz— ordem $N \times N$

Modelos de caixa preta de redes lineares e de pequenos sinais

- **Redes lineares**
 - Redes cujas características não variam com a amplitude do sinal
- **Redes de pequenos sinais**
 - Redes que operam com sinais de baixa amplitude, que não alteram suas características, e comportam-se como redes lineares
- **Modelos de caixa preta de redes lineares e de pequenos sinais de baixa frequência**
 - Matriz $Z \rightarrow$ relaciona tensões com correntes nos acessos
 - Matriz $Y \rightarrow$ relaciona correntes com tensões nos acessos

Redes de micro-ondas

Em frequências de micro-ondas

- **Matriz de Espalhamento [S]**
 - *Scattering Matrix*
- **Denominações usuais**
 - Matriz S
 - Parâmetros S
 - Parâmetros de Espalhamento
- **Modelo de caixa preta, que relaciona**
 - ondas de tensão refletidas nas portas da rede com
 - ondas de tensão incidentes nas portas da rede

Matriz de Espalhamento

- **Aplicação da Matriz de Espalhamento**

Representação em frequências de micro-ondas



Redes lineares

- Circuitos passivos
 - Filtros
 - Atenuadores
 - Acopladores, ...

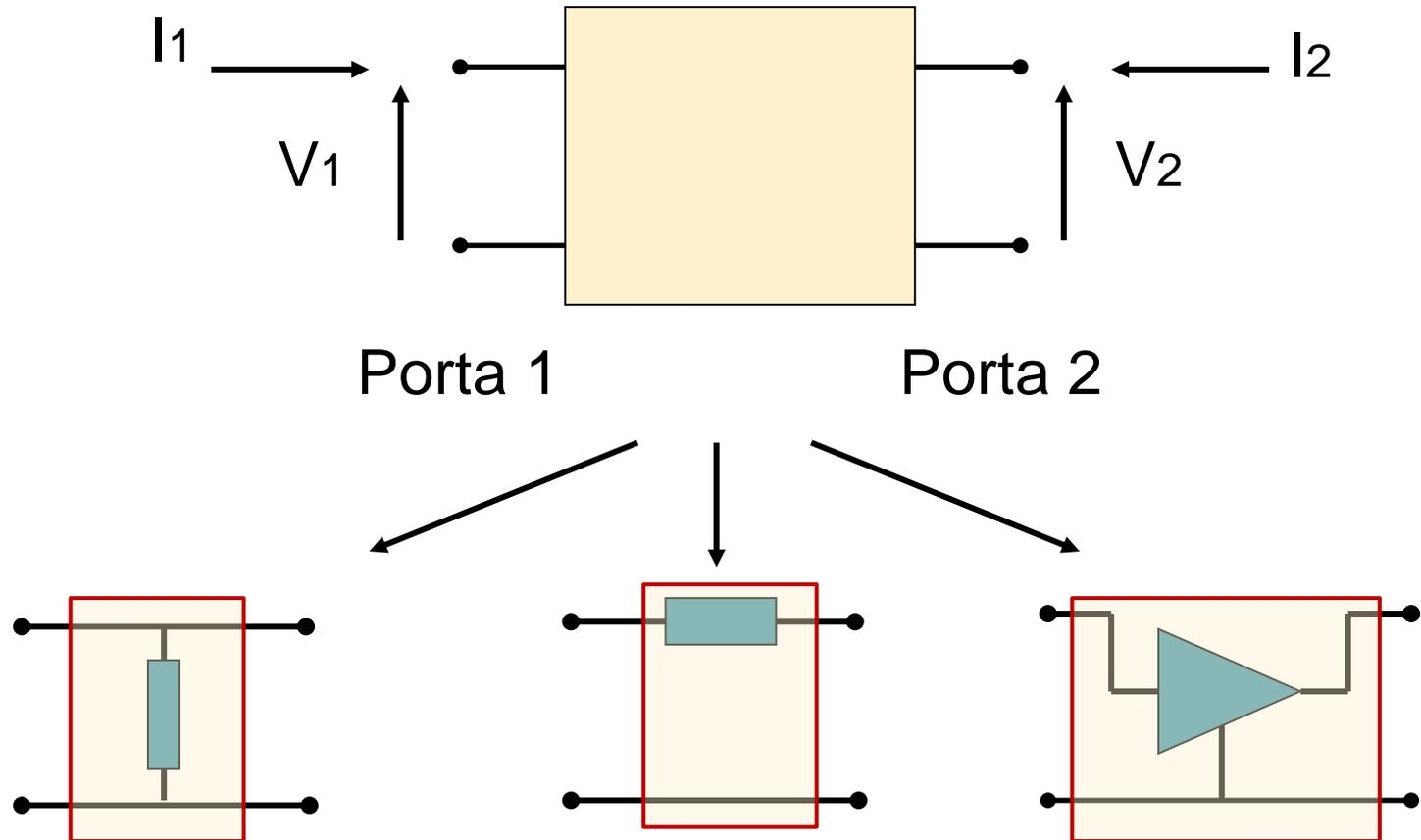
Redes de pequenos sinais

- Dispositivos e circuitos ativos
 - Transistores
 - Diodos
 - Amplificadores, ..
- Operando em pequenos sinais

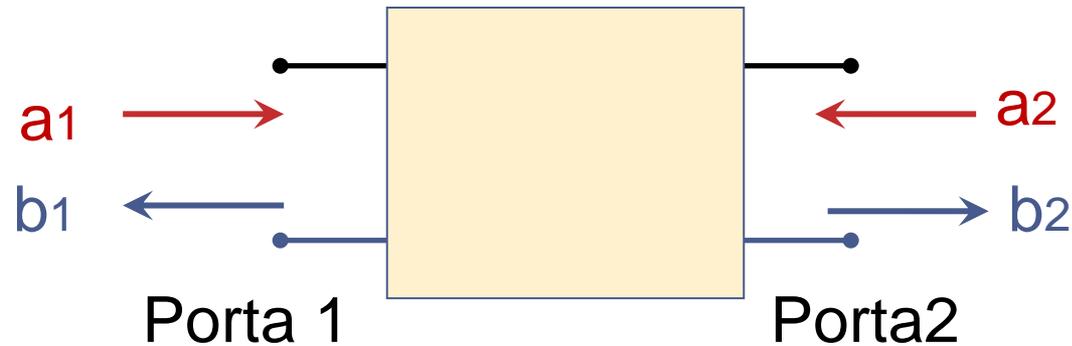
- **Uso da Matriz de Espalhamento**

- *Data sheet* de dispositivos e circuitos de micro-ondas
- CAD de projeto de circuitos de micro-ondas
- Equipamentos de caracterização (VNA)

Redes com dois acessos - quadripolos



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

- 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: $Z_L = Z_0$

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

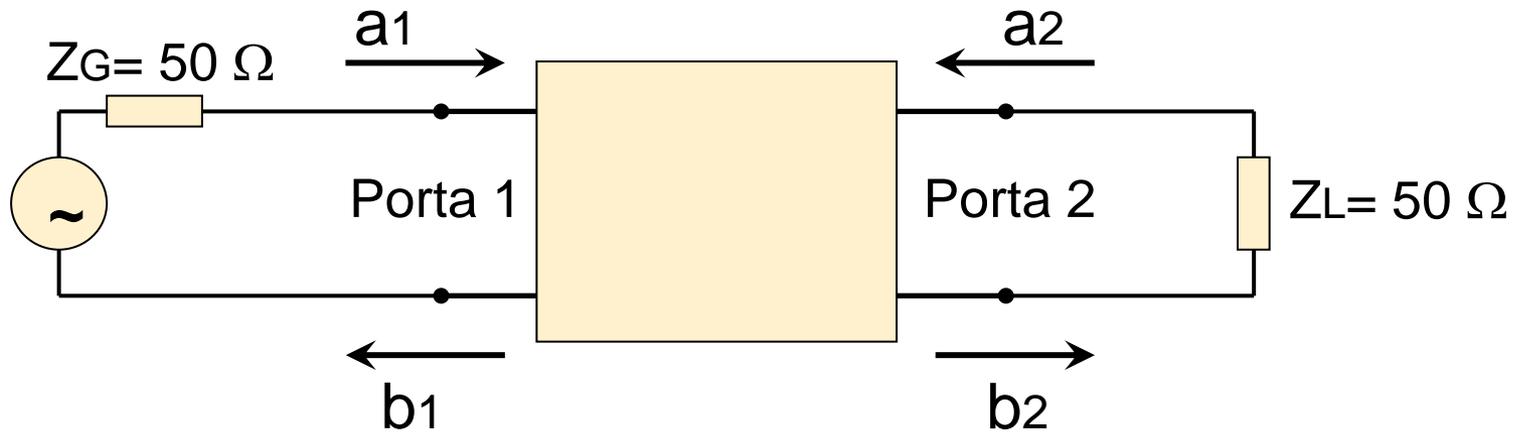
$$b_1 = \frac{1}{2} \cdot \left(\frac{V_1}{\sqrt{Z_0}} - I_1 \sqrt{Z_0} \right)$$

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

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

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

S_{11} – medida e conceito



- Coeficiente de reflexão de tensão da porta 1



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

- Associado à Z_1 impedância de entrada, com a saída terminada por 50Ω



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

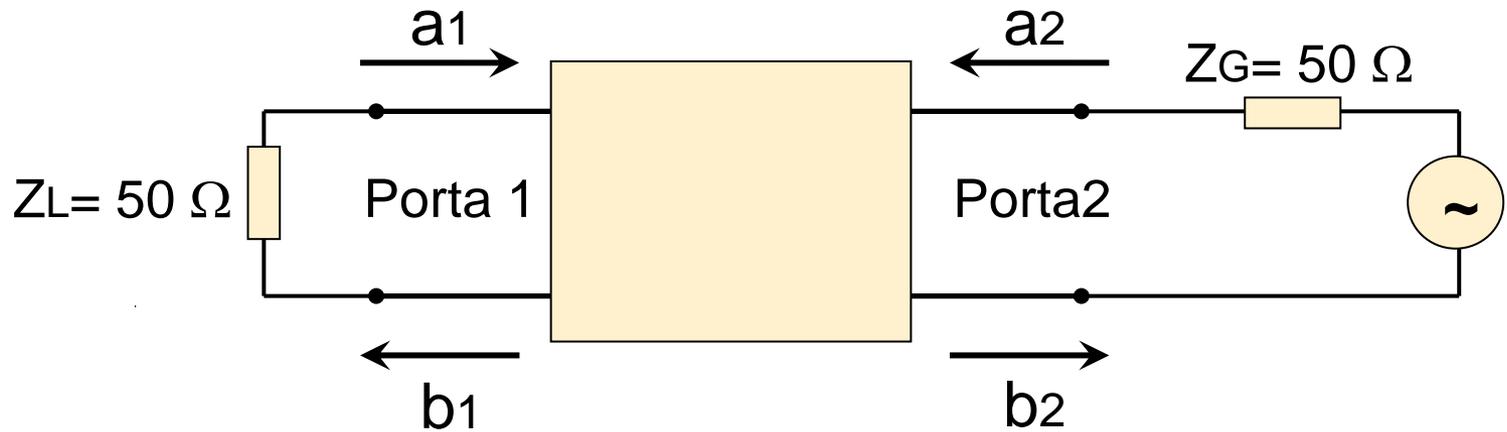
S_{11} - exemplos

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

- $Z_1 = 50 \Omega \rightarrow S_{11} = 0$
- $Z_1 = 0 \Omega \rightarrow S_{11} = 1 \angle 180^\circ$
- $Z_1 \rightarrow \infty \rightarrow S_{11} = 1 \angle 0^\circ$

- $\text{Re}\{Z_1\}$ 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



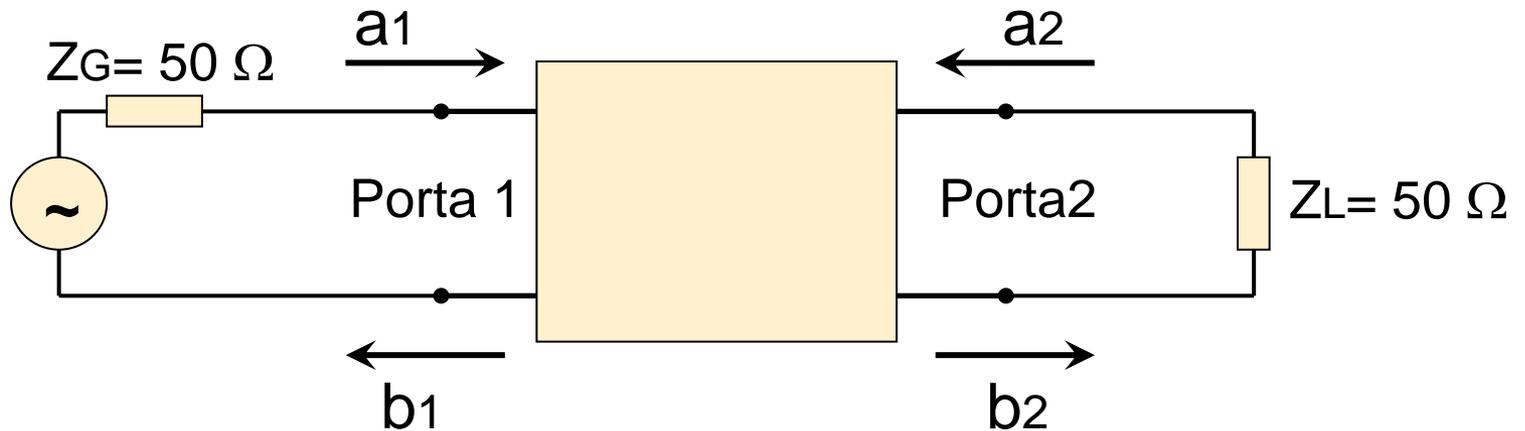
$$S_{22} = \frac{b_2}{a_2}$$

- Associado à Z_2
impedância de saída



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

S_{21} – medida e conceito



- Coeficiente de transmissão direto



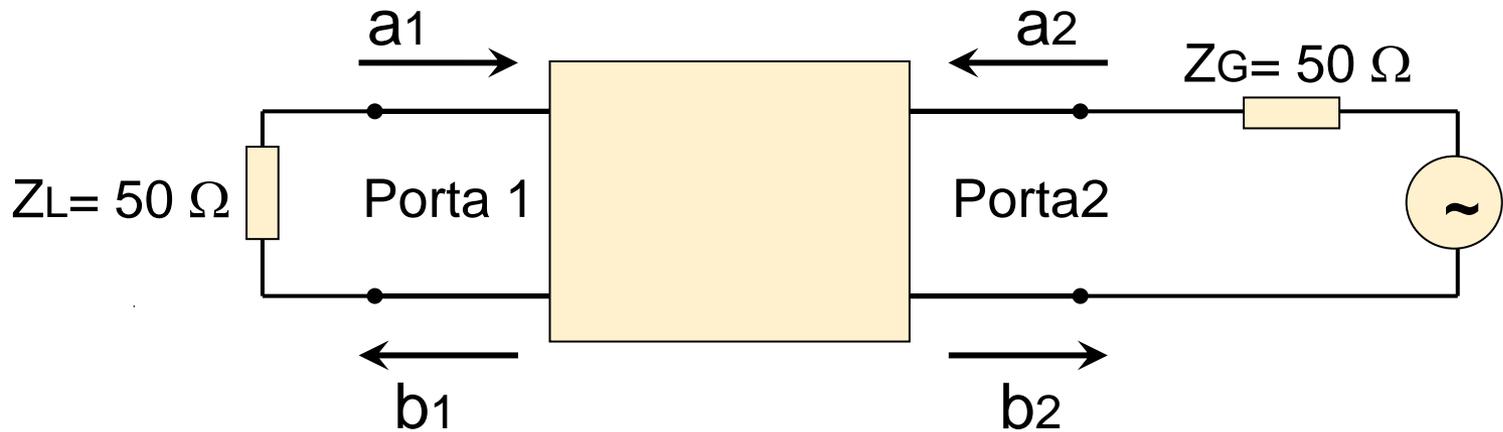
$$S_{21} = \frac{b_2}{a_1}$$

- Ganho direto de potência com entrada e saída em 50Ω



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

S_{12} – medida e conceito



- Coeficiente de transmissão reverso →

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

- Ganho reverso de potência em 50Ω →

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

Parâmetros de Espalhamento

S_{11} , S_{21} , S_{12} e S_{22}  Números complexos
Função da frequência

Apresentação dos Parâmetros S

- Tabelas

- Carta de Smith

- S_{11}
- S_{22}

- Diagrama polar

- S_{12}
- S_{21}

- Gráficos cartesianos

- Amplitude x frequência
- Fase x frequência
- Amplitude em dB x frequência

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

$$S_{22}(dB) = 20 \cdot \log |S_{22}|$$

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

$$S_{12}(dB) = 20 \cdot \log |S_{12}|$$

Exemplo de tabela de parâmetros S

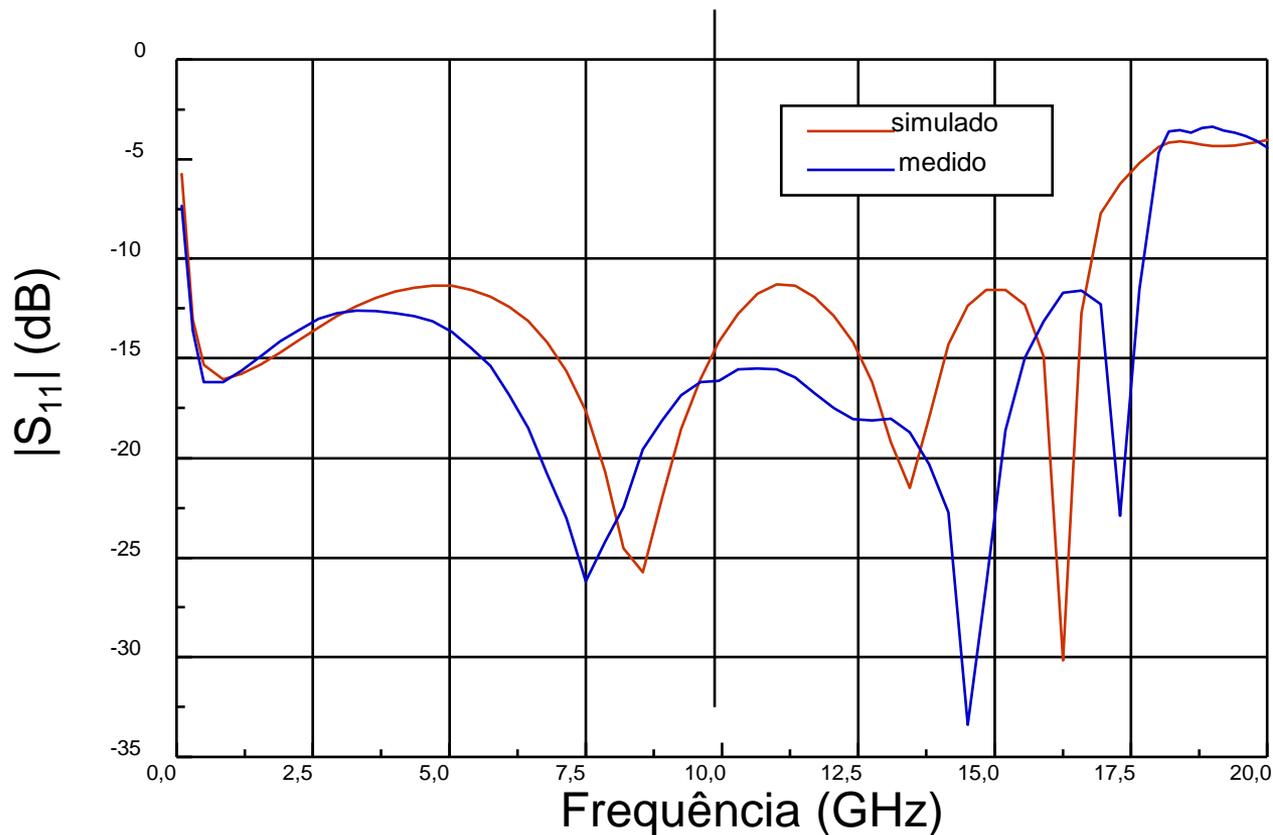
Extraído do *Data Sheet* do transistor ATF-36077, da HP

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

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

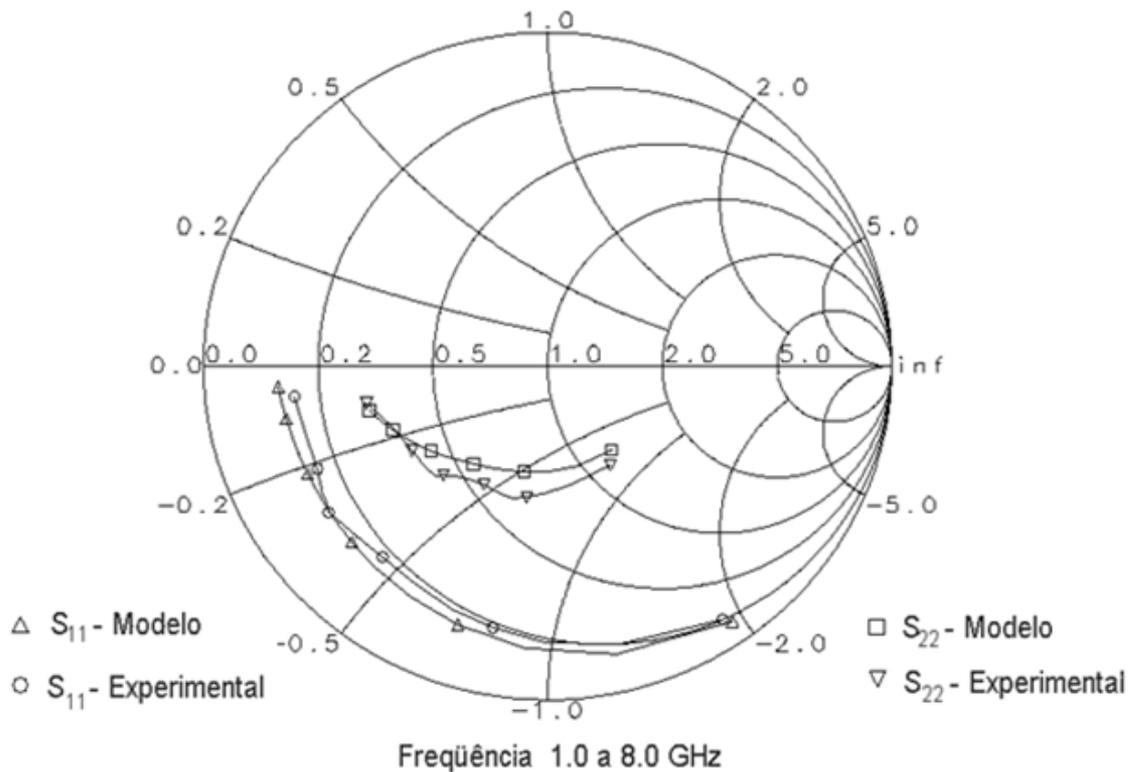
- Gráfico cartesiano



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

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

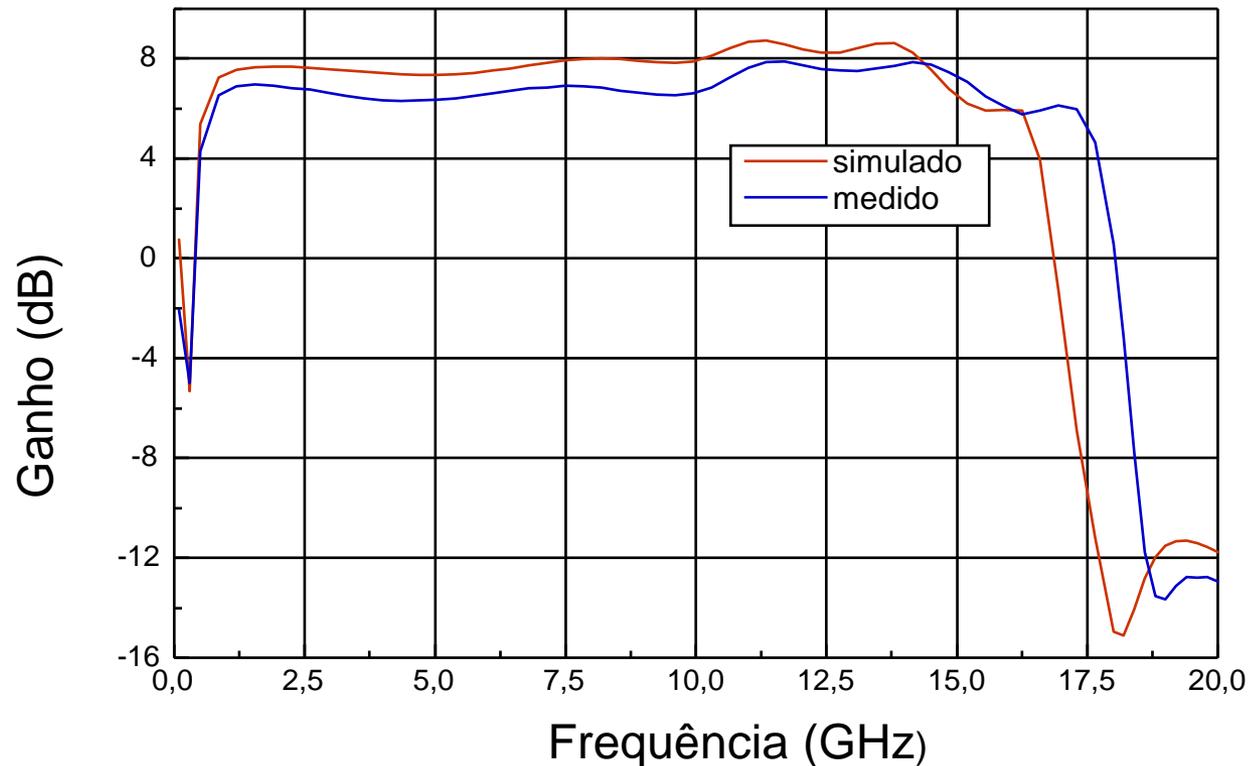
- Carta de Smith



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

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

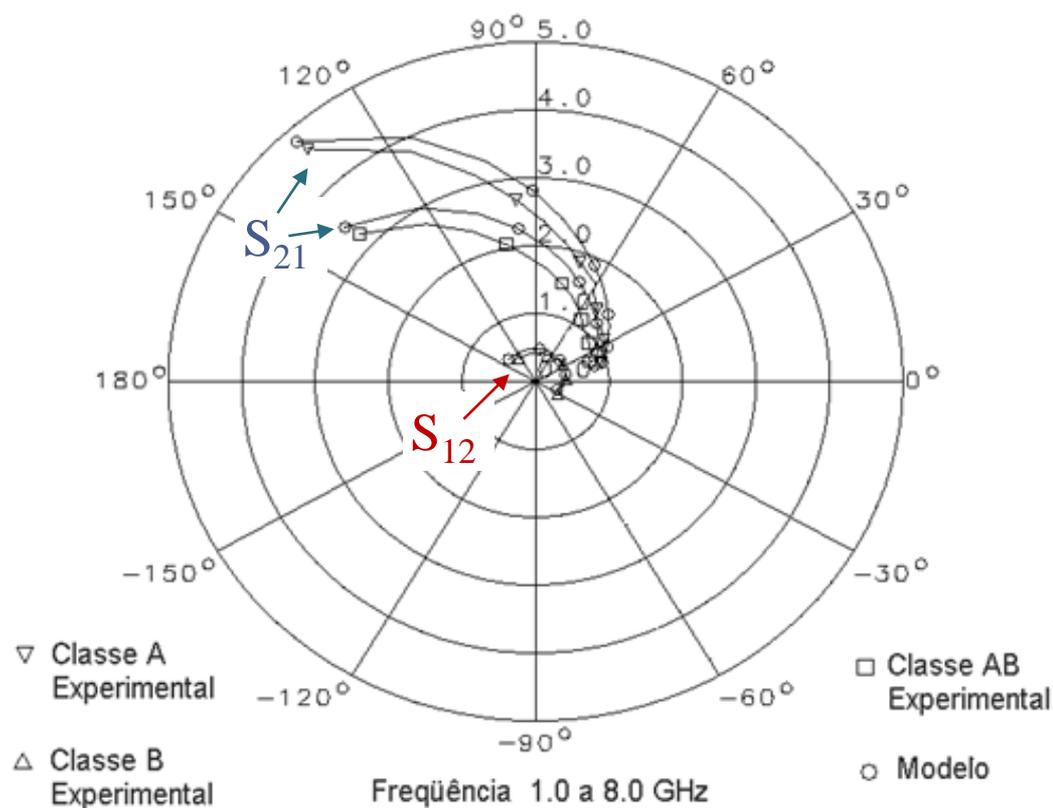
- Gráfico cartesiano



Ganho de um amplificador de banda ultra-larga

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

- Diagrama polar



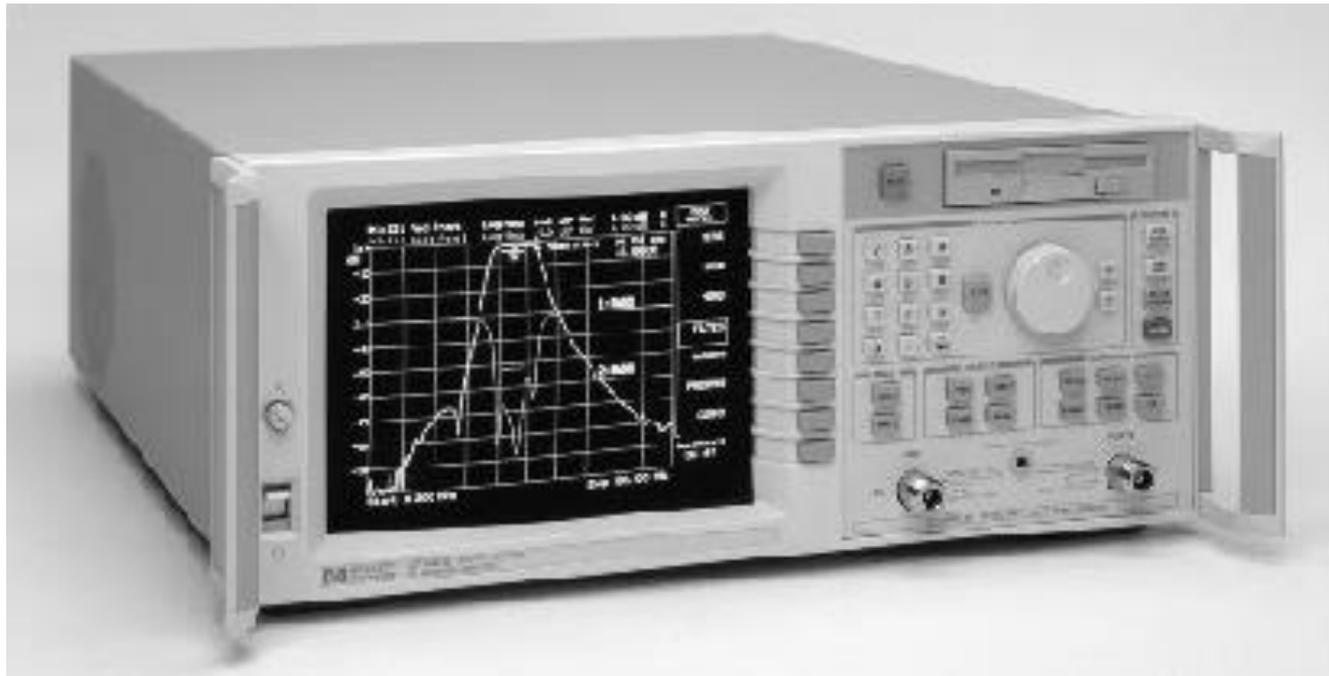
S_{21} e S_{12} de um transistor MESFET de 1 a 8 GHz

Técnicas de medida

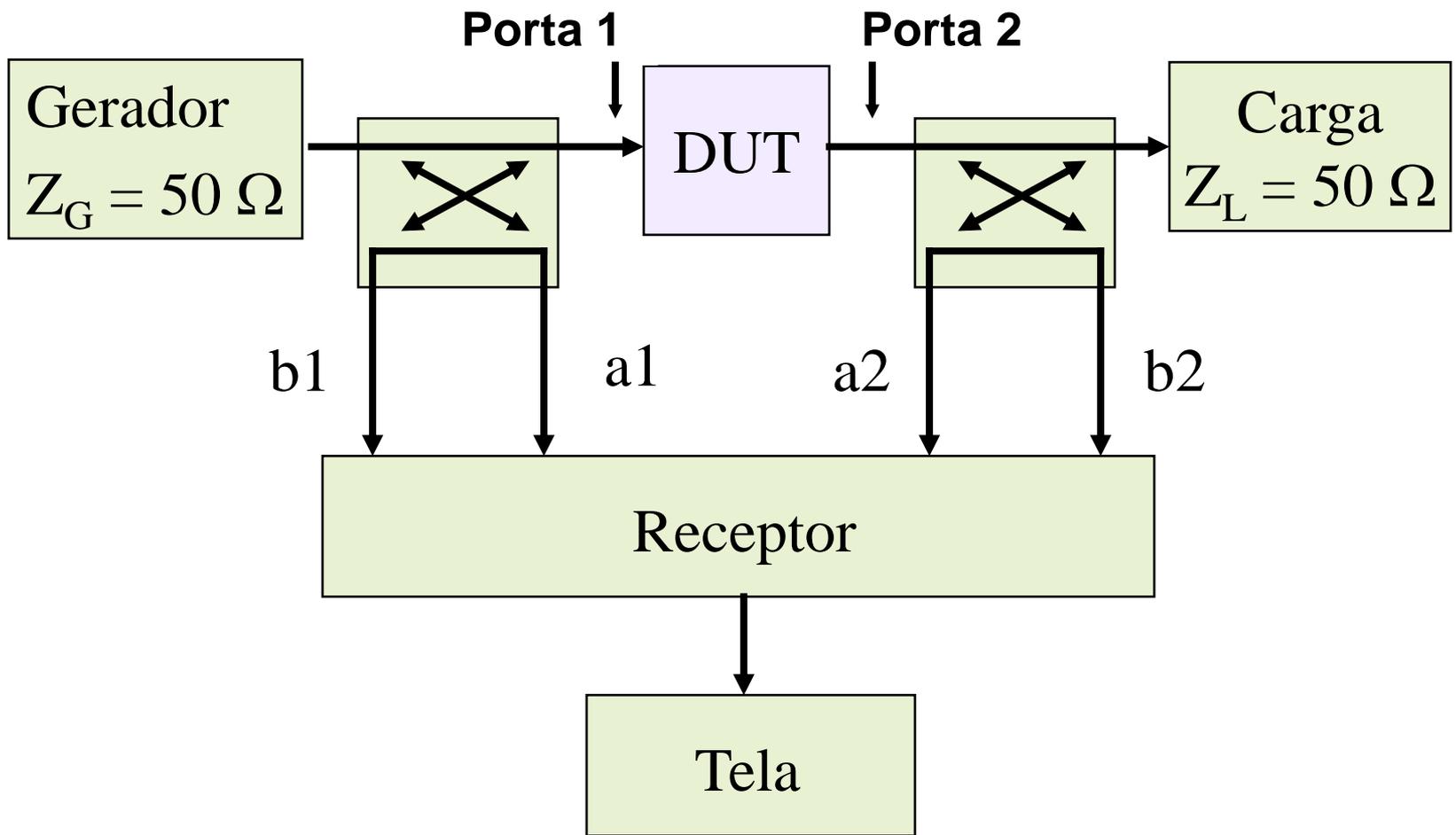
Medida de parâmetros “S”

- Analisador Vetorial de Redes
 - *Vector Network Analyzer – VNA*
 - Módulo e fase dos Parâmetros
 - Exemplo HP 8722 - 50 MHz a 40 GHz
- Analisador Escalar de Redes
 - Módulo dos Parâmetros S
- Fabricantes de Analisadores de Redes
 - Keysight
 - Rhode Schwarz
 - Anritsu
 - Wiltron

Analizador de redes HP 8712



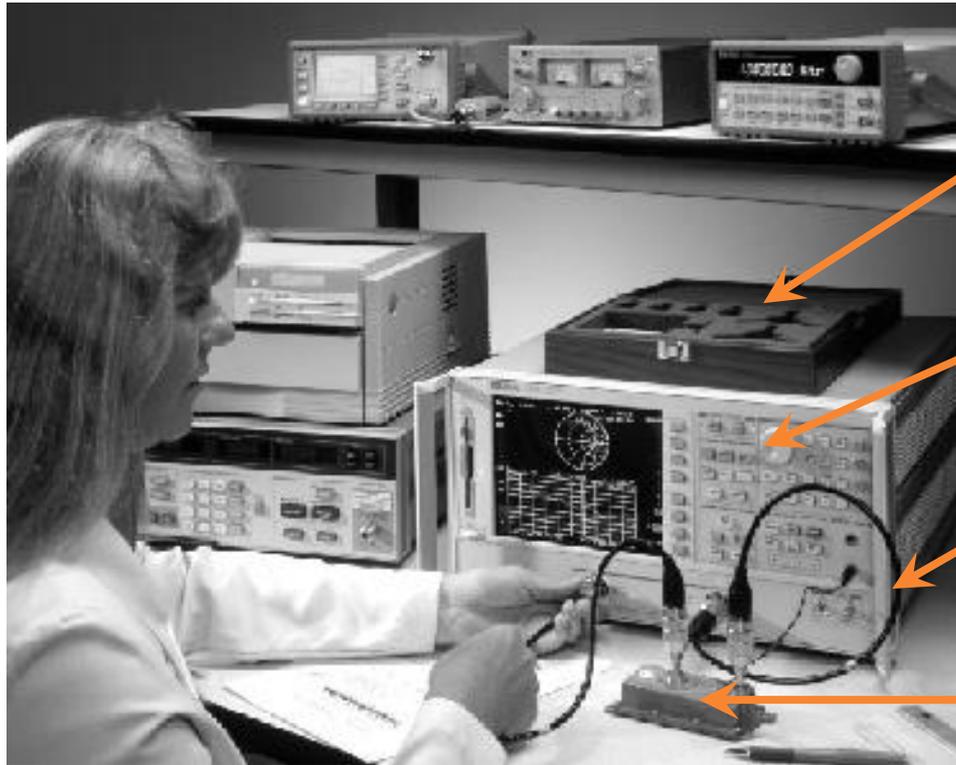
Analizador de redes



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

Analisador
de redes

Cabos e
conectores

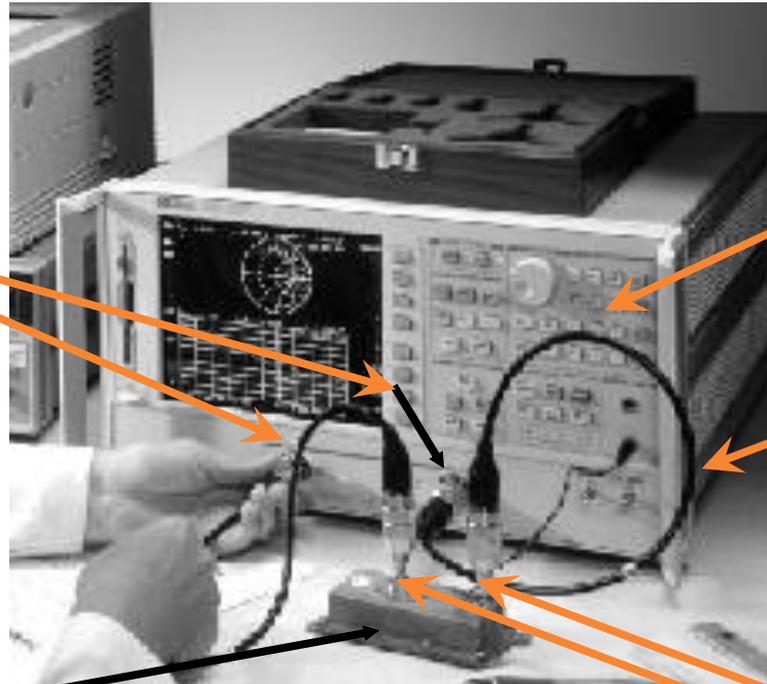
Dispositivo
em teste

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

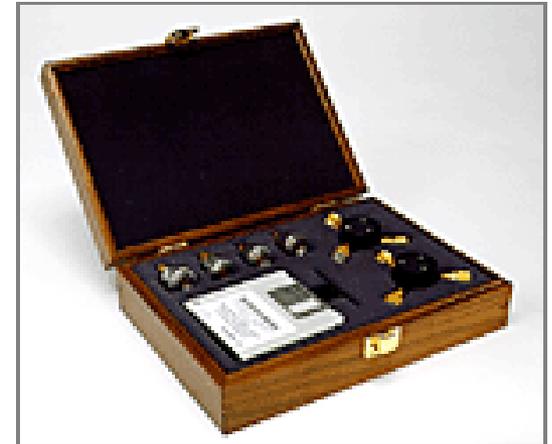
Cabos e
conectores

Dispositivo
em teste

Planos de
calibração

Kit de calibração

- Terminações padrão
 - Cargas de 50Ω
 - Curto-circuito
 - Circuito em aberto
 - Linha direta
- Mídia eletrônica
 - modelos das terminações



Caixa com kit de calibração coaxial



Cargas coaxiais de 50Ω

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

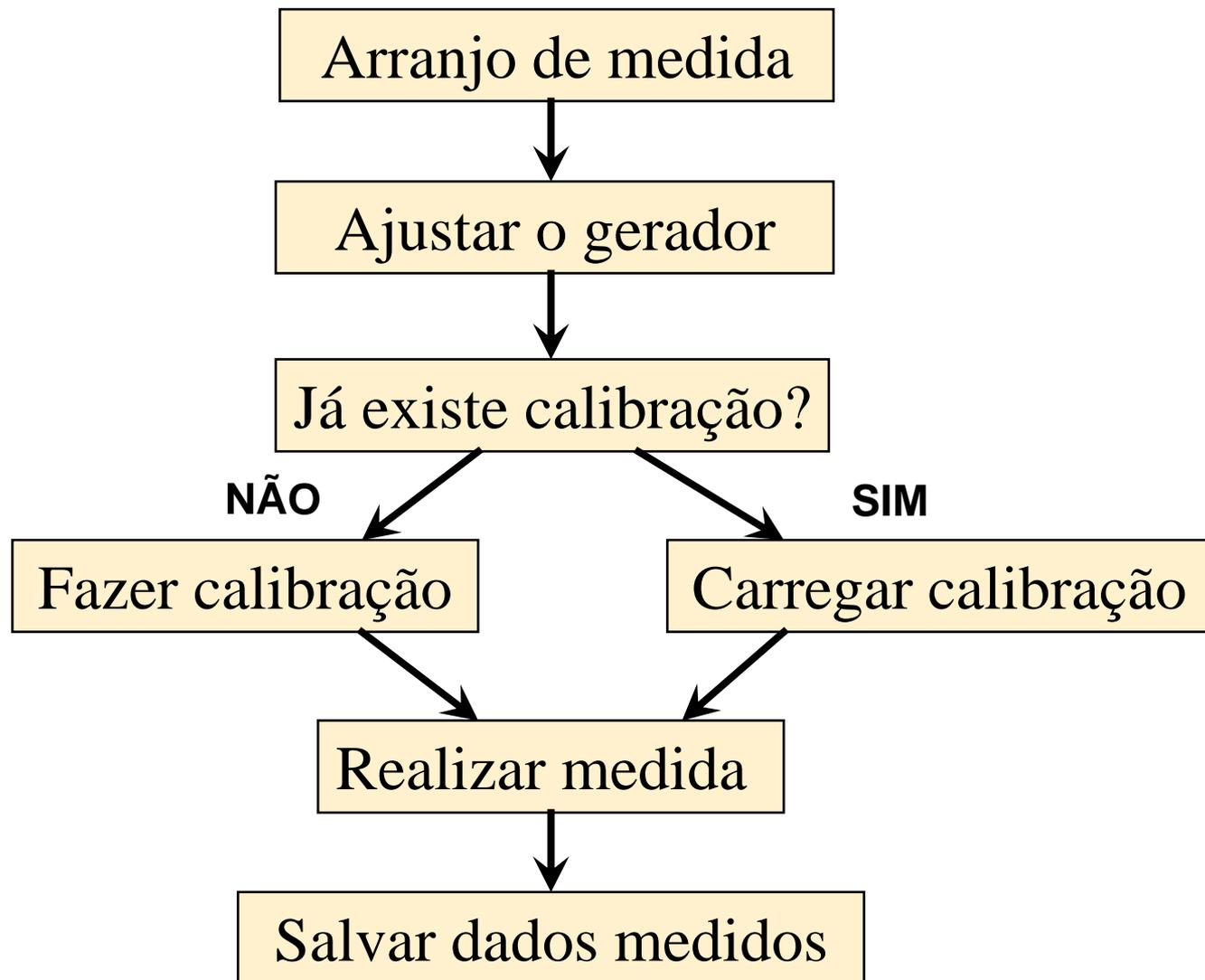
Rotina interna de calibração

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

Conclusão da calibração

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

Procedimento de medida

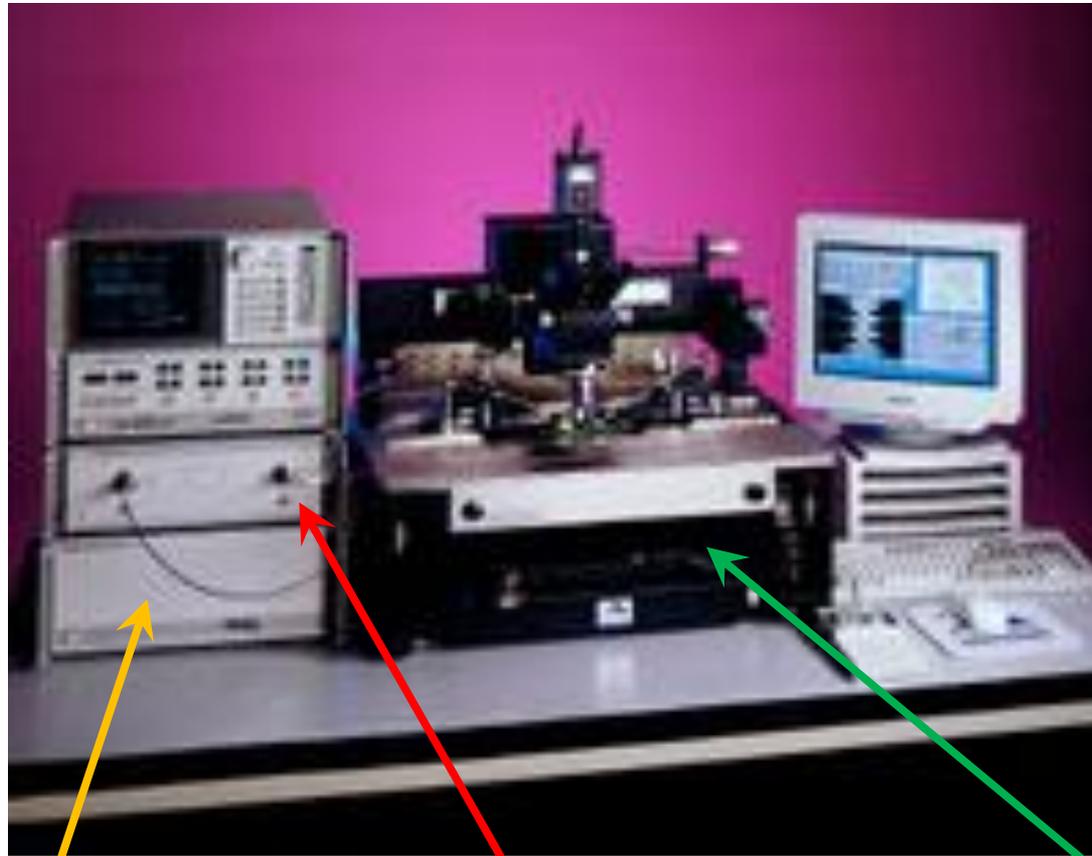


Medidas “on Chip”

Medidas da matriz “S” “on chip”

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

Sistema de medidas “on chip”



Analizador
de redes

Cabos e
conectores

Estação
microprovadora

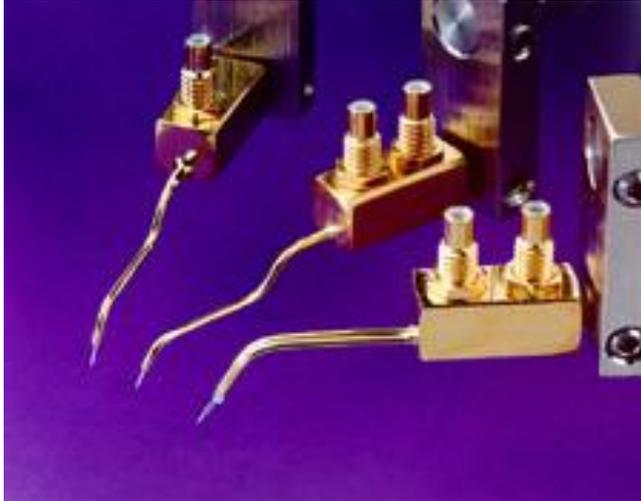
Estações microprovadoras de micro-ondas

- 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

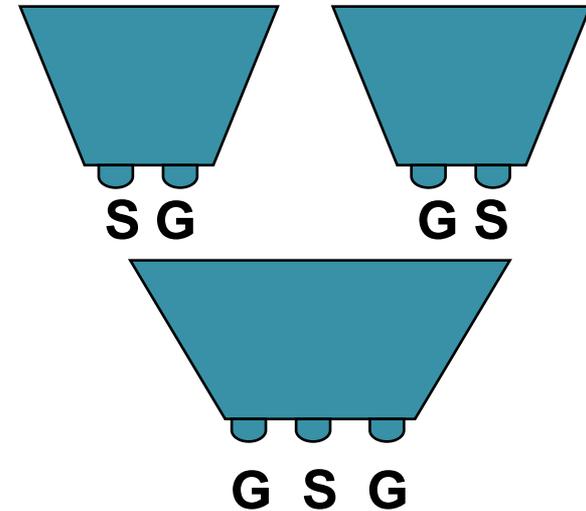
- Pontas de microondas
 - sinais de entrada e saída
 - tipo coplanar
 - tipo coaxial



Pontas de prova de micro-ondas

- Tipos

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



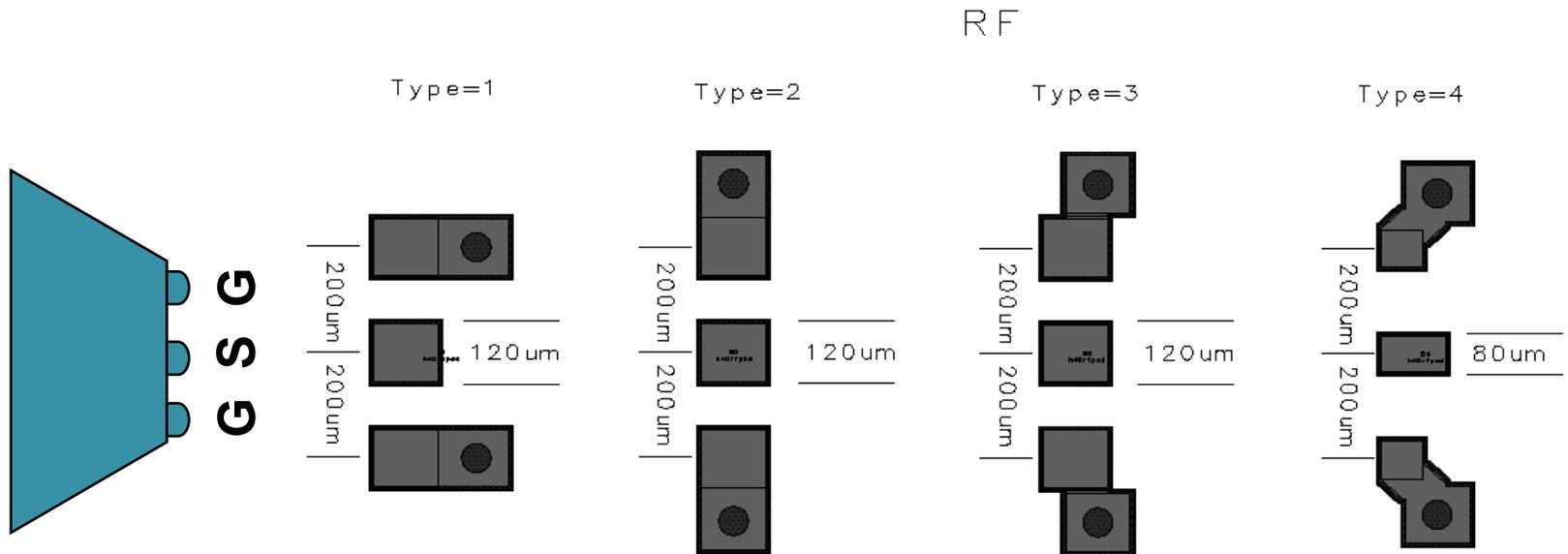
- Pitch

- distância entre centro de contatos adjacentes
- 100 μm , 150 μm , 200 μm , 250 μm . . .

- Compatível com o “pad de R” do chip

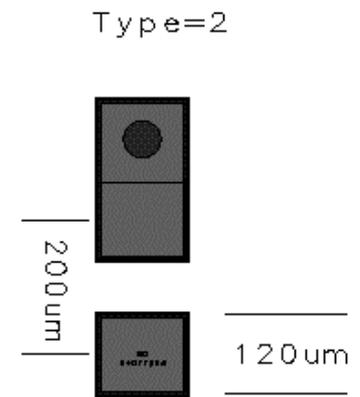
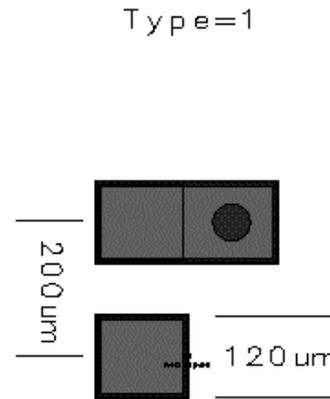
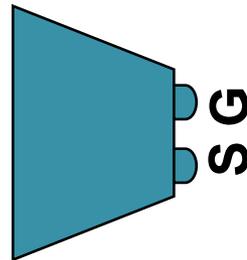
Pads de RF

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

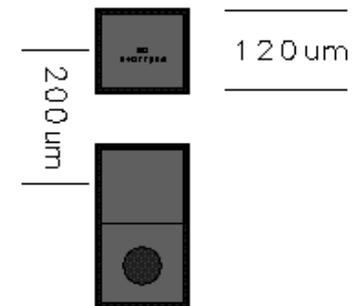
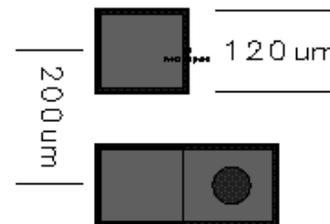
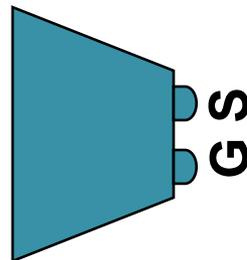


Pads de RF

- Pontas de prova S-G

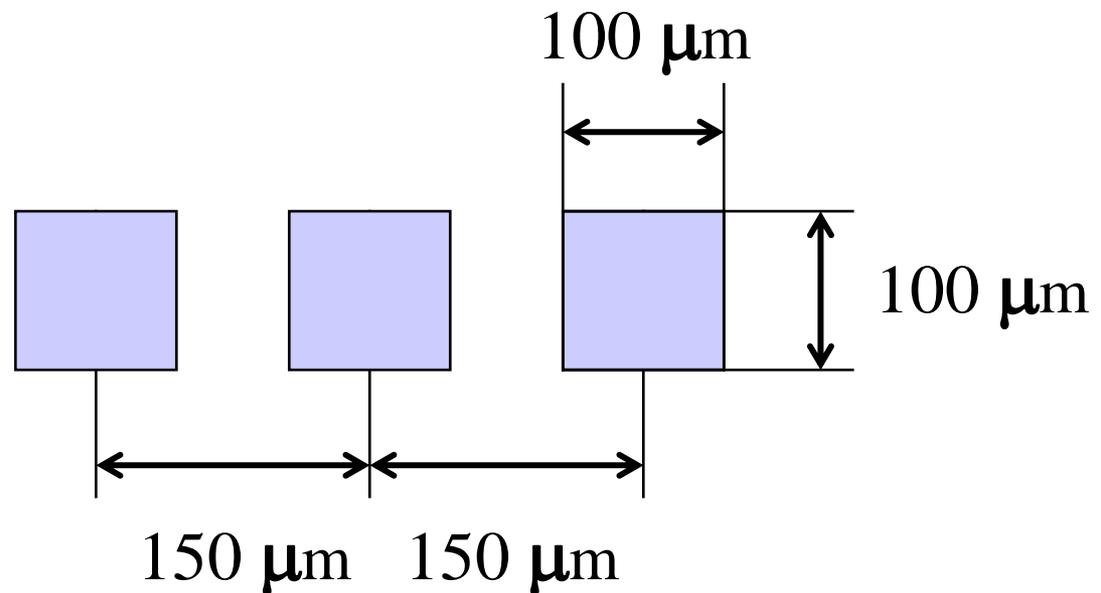


- Pontas de prova G-S



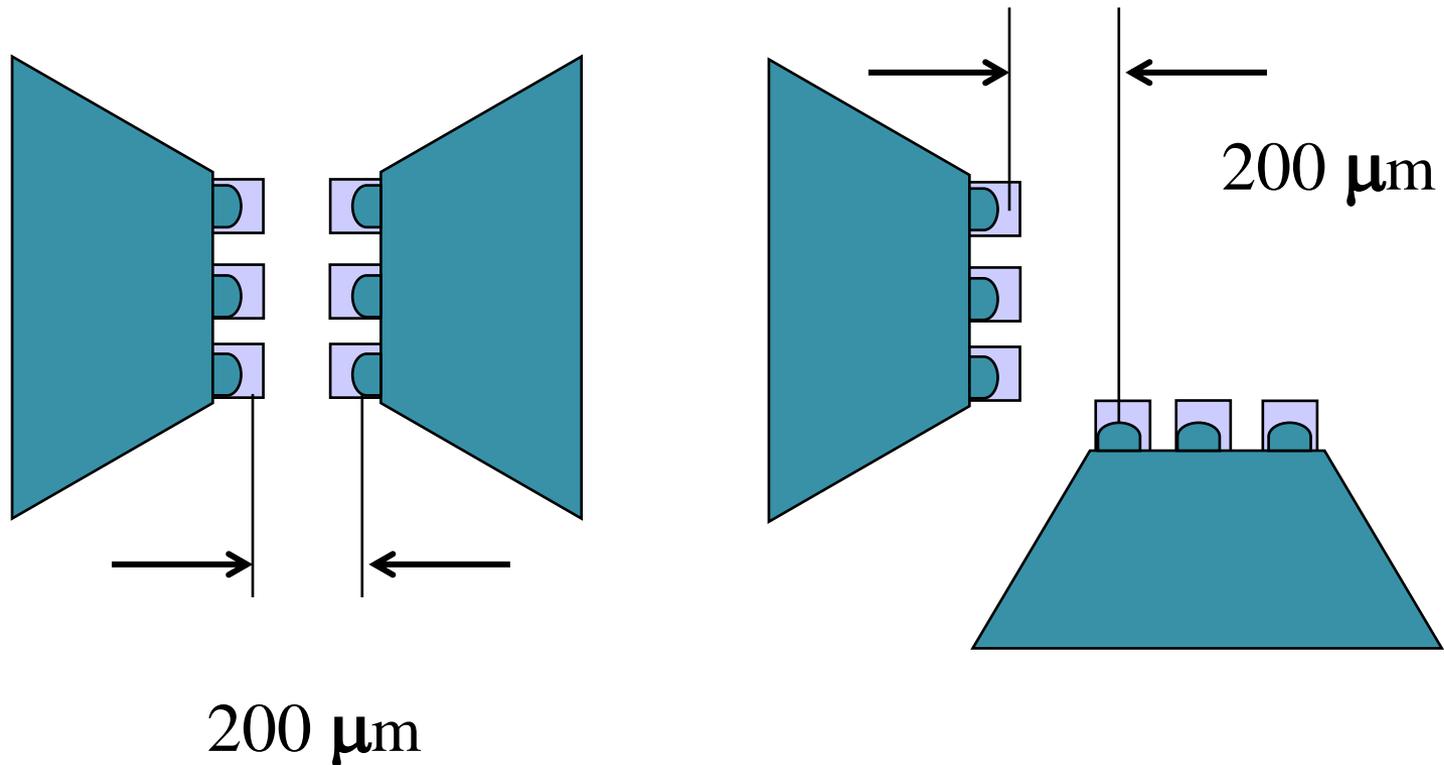
Exemplo de regras de leiaute dos pads

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



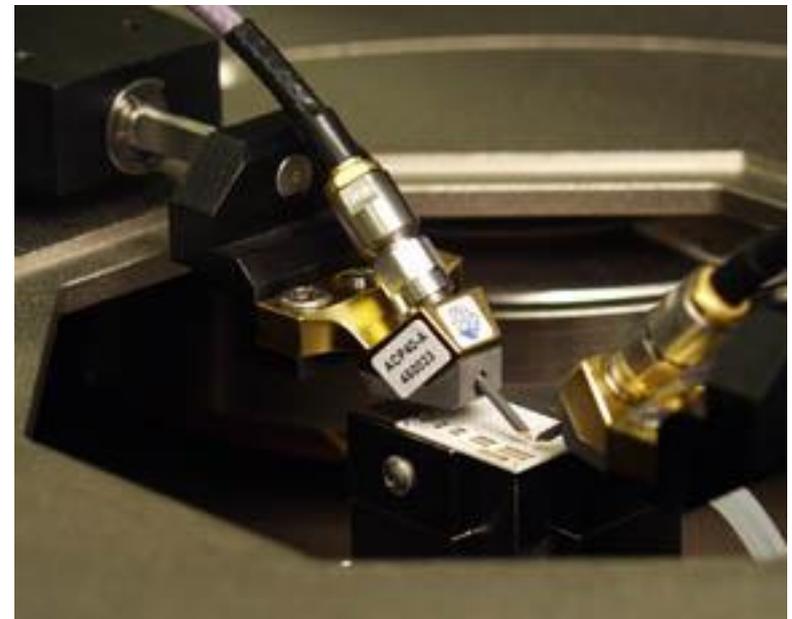
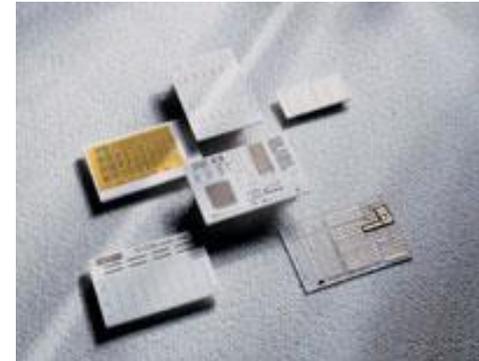
Exemplo de regras de leiaute dos pads

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



Calibração “on chip”

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



Procedimento de medida “on chip”

