

Transistores de Micro-ondas

Prof.^a Dr.^a Fatima Salete Correra

PSI5897 – Amplificadores de Micro-ondas a Transistor

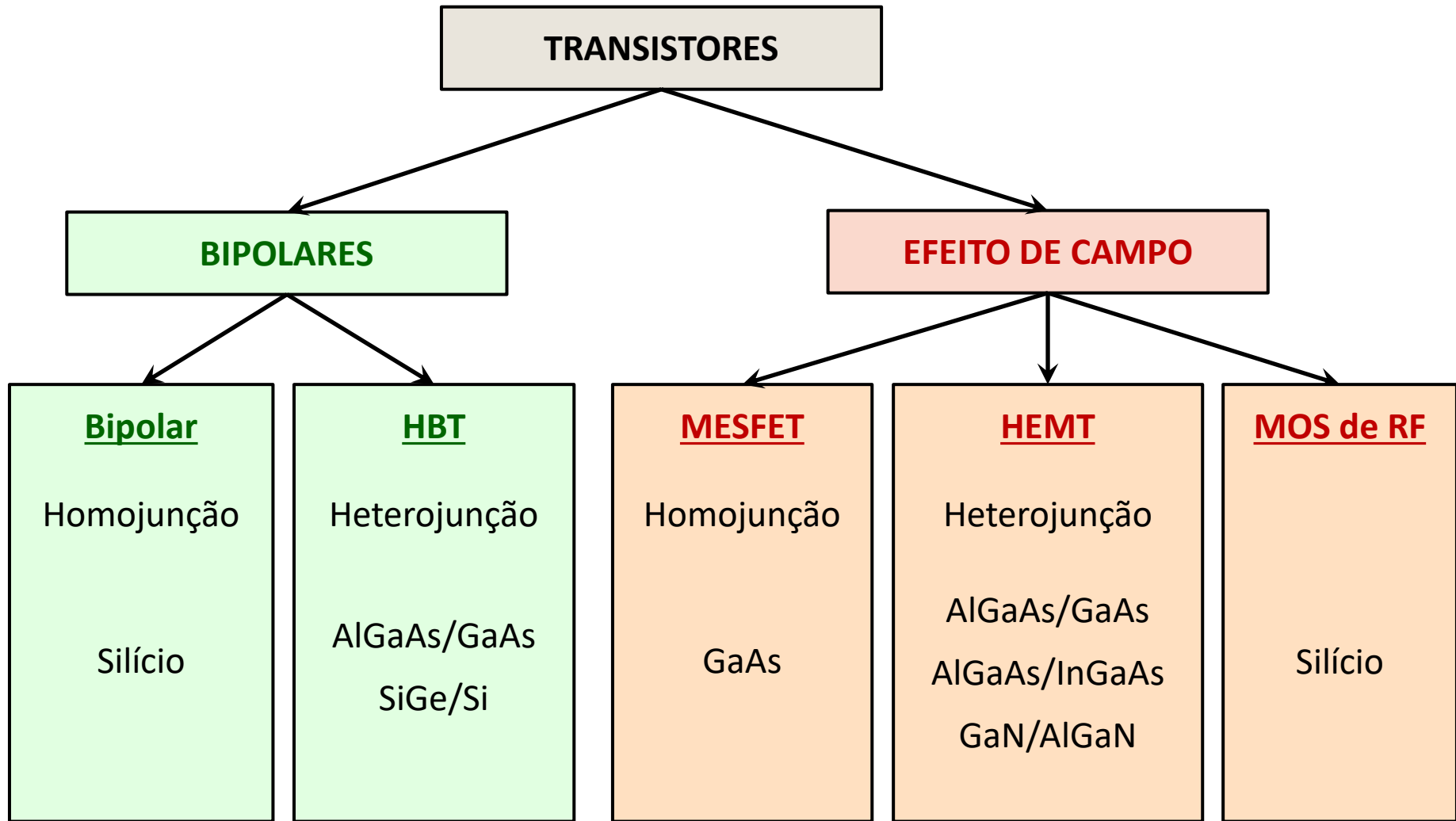
Sumário

- Transistores de micro-ondas
 - Tipos de transistores
 - Transistores bipolares
 - Transistores de efeito de campo
 - Comparação de desempenho dos transistores de micro-ondas
 - Modelos de transistores
 - Estabilidade
 - Circuitos de estabilização

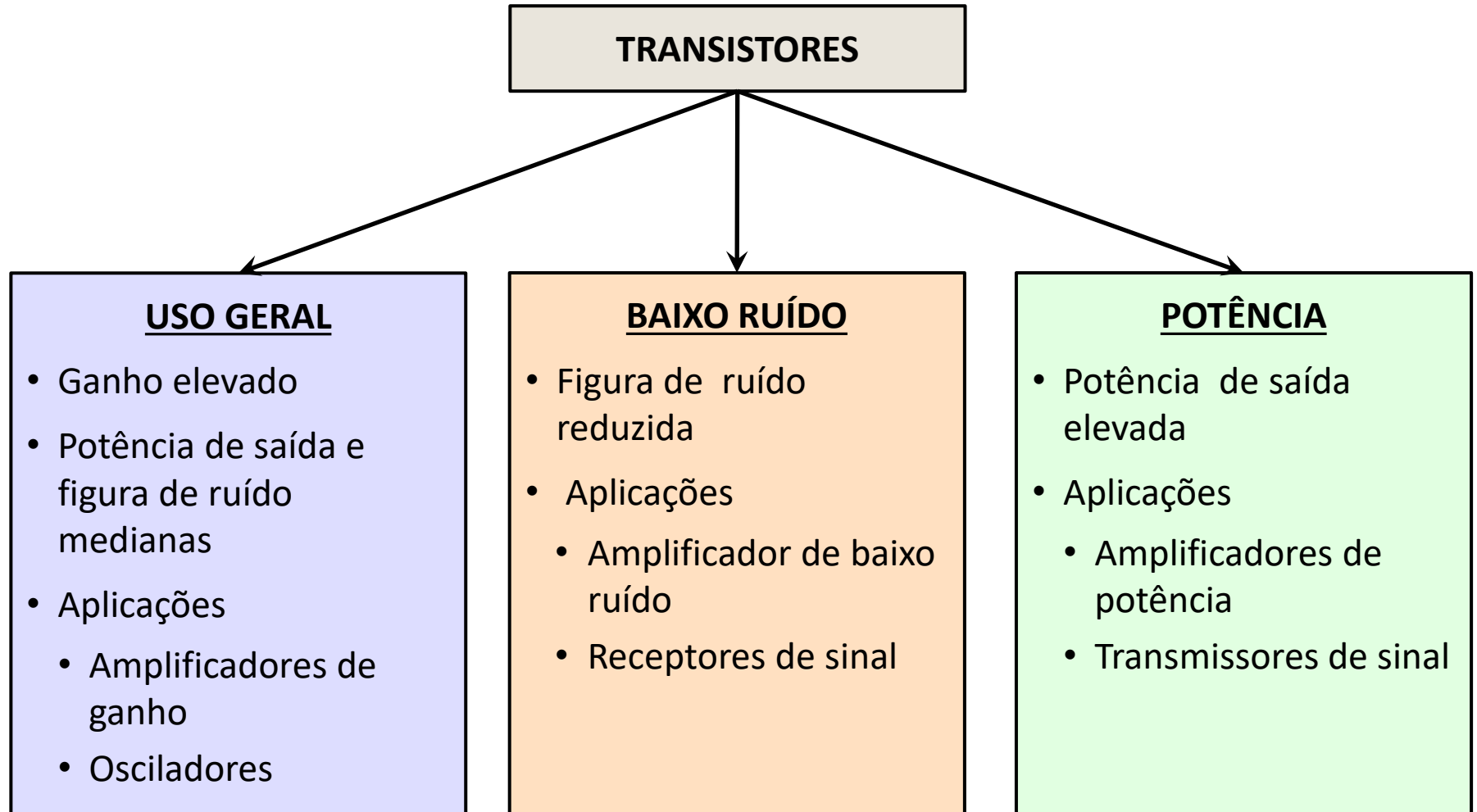
Introdução

- **Transistores de micro-ondas**
 - Dispositivos semicondutores,
 - de três terminais,
 - que apresentam ganho,
 - na faixa de frequências de micro-ondas
- **Aplicações de transistores de micro-ondas**
 - Amplificadores
 - Osciladores
 - Misturadores de frequência
 - Chaves
 - Atenuadores, etc.

Transistores de Micro-ondas

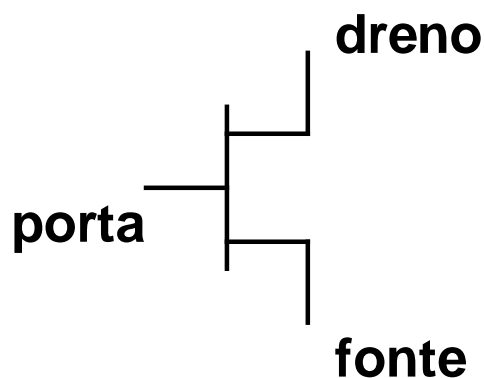


Classificação Alternativa



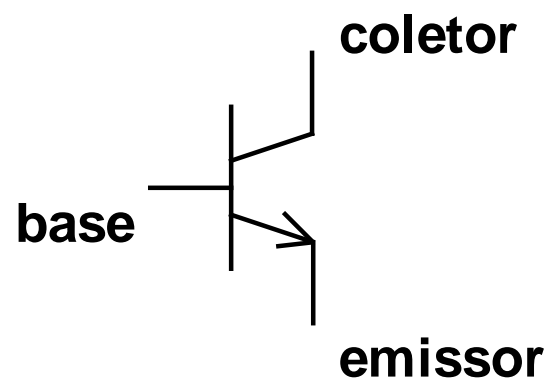
Símbolos dos Transistores de Micro-ondas

**FET : Transistores de
efeito de campo**



MESFET e HEMT

**Transistores
bipolares**



bipolar de Si e HBT

Um Pouco de História...

- **Transistor bipolar**
 - Primeiros transistores de micro-ondas
 - Silício, NPN
 - Otimizados para operar em altas frequências
- **MESFET**
 - **ME**tal-**S**emiconductor **F**ield **E**ffect **T**ransistor”
 - Lançamento comercial na década de 70
 - Arseneto de gálio (GaAs)
 - Amplificadores em geral

Um Pouco de História...

- **HEMT**

- “**H**igh **E**lectron **M**obility **T**ransistor”
- Lançamento comercial em 1985
- Heterojunção: **AlGaAs**/**GaAs**, **AlGaAs**/**InGaAs**
- Amplificadores de baixo ruído

- **HBT**

- “**H**eterojunction **B**ipolar **T**ransistor”
- Lançados comercialmente na década de 90
- Heterojunção de **AlGaAs**/**GaAs**, **SiGe**/**Si**
- Amplificadores de potência de alta linearidade

Transistores de Micro-ondas

Como maximizar a frequência de operação do transistor

- Redução do tempo de trânsito dos portadores de corrente, τ

$$f_T \propto \frac{1}{\tau}$$

- f_T frequência em que o ganho de corrente cai à unidade
- τ tempo de trânsito do portador de corrente

$$\tau = \frac{d}{v} = \frac{d}{\mu \cdot E}$$

- d distância percorrida pelo portador de corrente
- v velocidade do portador de corrente
- μ mobilidade do portador de corrente
- E campo elétrico

- **Aumento de $f_T \Rightarrow$ redução de τ**
- Uso de portadores de corrente com mobilidade μ elevada
- Transistores com percurso dos portadores de corrente d reduzido

Transistores de Micro-ondas

- **Portadores de corrente rápidos**
 - Velocidade do portador de corrente $\rightarrow v = \mu \cdot E$
 - μ – mobilidade E – campo elétrico
 - Portador de corrente rápido \rightarrow mobilidade μ elevada
 - Portadores de corrente em semicondutores
 - Lacunas e elétrons livres: $\mu_{(\text{elétron livre})} > \mu_{(\text{lacuna})}$
 - Portador de corrente mais rápido: **elétron livre**
- Transistores de micro-ondas
 - Transistores **bipolares NPN**
 - Transistores **FET canal N**

Transistores de Micro-ondas

- **Materiais semicondutores com mobilidade elevada**
 - **GaAs, InP**
 - Compostos dos grupos IIIA – VA da tabela periódica
 - Maior mobilidade de portadores de corrente do que o Si

Mobilidade dos elétrons livres ($\text{cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$)

N_d^*	10^{16} cm^{-3}	10^{17} cm^{-3}	10^{18} cm^{-3}
Si	1.250	800	230
GaAs	6.550	4.720	2.735

* dopantes por unidade de volume

Transistores de Micro-ondas

- **Redução do percurso do portador de corrente no transistor**
 - Reduz o tempo de trânsito τ do portador de corrente
 - Aumenta a frequência máxima de operação do transistor

$$\tau = \frac{d}{v}$$

- d distância percorrida pelo portador de corrente
- v velocidade do portador de corrente

- **Em transistores de micro-ondas utiliza-se**
 - Transistor bipolar → largura da base sub-micrométrica
 - FET → comprimento de porta do sub-micrométrico
 - Resultando em menores tempos de trânsito

Transistores de Micro-ondas

Como maximizar a frequência de operação do transistor

- **Redução de resistências parasitas**
 - Processo otimizado para minimizar
 - resistências de contato
 - resistências entre o transistor intrínseco e os acessos do transistor
- **Redução de capacitâncias intrínsecas**
 - Minimização da área do emissor do transistor bipolar
 - Minimização da largura de porta do FET
 - Mas, limita a potência de operação dos dispositivos

Transistores de Micro-ondas

Como maximizar a frequência de operação do transistor

- **Evolução tecnológica → novos tipos de transistores**
 - Crescimento de camadas semicondutoras
 - Usando Molecular Beam Epitaxy - MBE
 - Dispositivos com **heteroestruturas** ou **heterojunções**
- **Transistores comerciais com heterojunções**
 - **HEMT** – High Electron Mobility Transistor
 - **PHEMT** – Pseudomorphic High Electron Mobility Transistor
 - **HBT** – Heterostructure Bipolar Transistor

Transistores de Micro-ondas

- **Heteroestrutura ou heterojunção**

- Junção de dois semicondutores diferentes
- Com larguras de banda de energia proibida diferentes
- Mesmo passo de rede
- Exemplo: GaAs e AlGaAs

- **Heteroestrutura pseudomórfica**

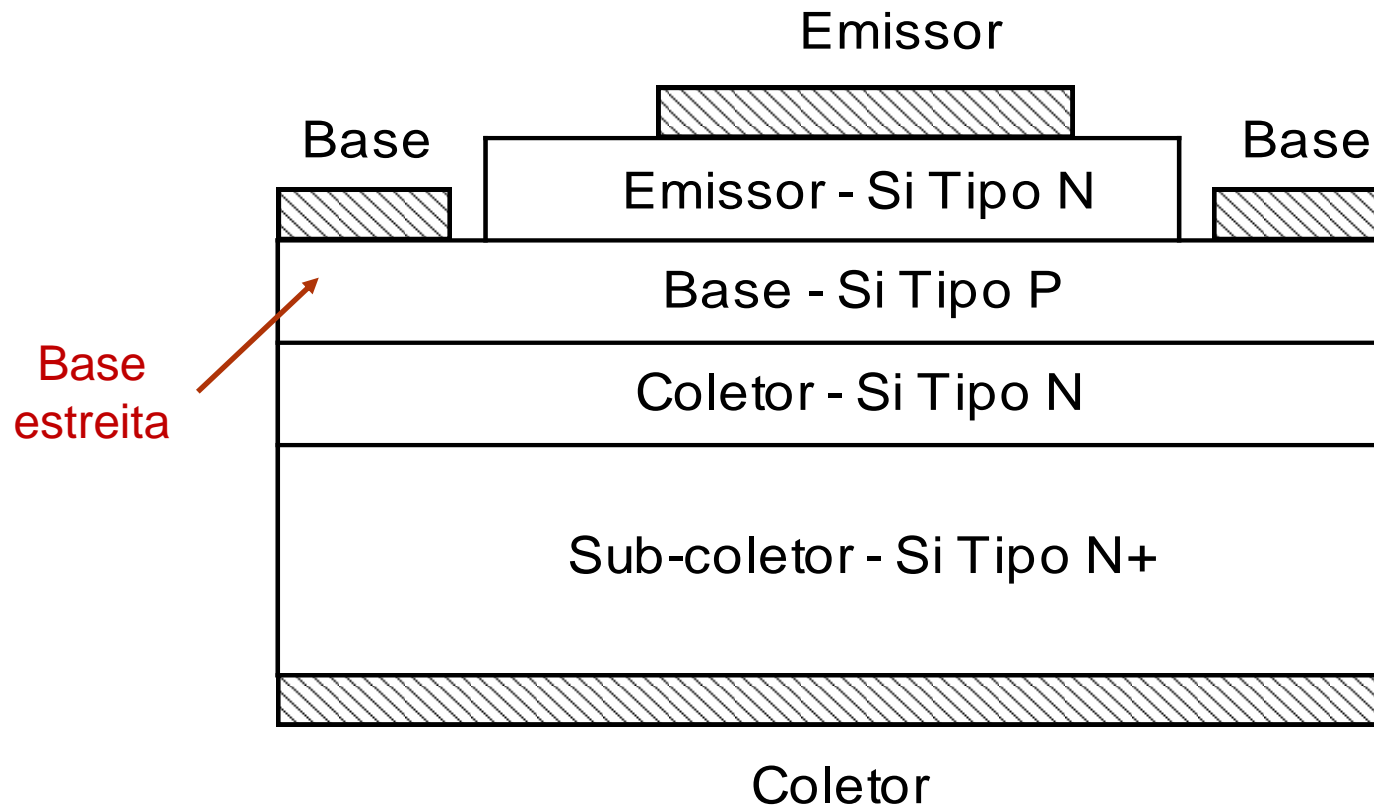
- Materiais com passos de rede diferentes, mas próximos
- Tensões mecânicas mínimas nas interfaces dos materiais
- Exemplo: AlGaAs e InGaAs

Transistores Bipolares de Micro-ondas

- **Transistor bipolar tipo NPN de silício**
 - Alto ganho
 - Bom desempenho em faixa de frequência, potência e ruído
 - Baixo custo
 - Aplicações
 - Amplificadores na faixa de 2 a 10 GHz
 - Osciladores até 20 GHz
 - Estrutura vertical → baixo ruído $1/f$
 - Osciladores com baixo ruído de fase
 - Preferido a FETs na faixa de frequências de 2 a 4 GHz

Transistores Bipolares de Micro-ondas

- Secção transversal do transistor bipolar de silício



Transistores Bipolares de Micro-ondas

- **Transistor bipolar de heterojunção**

- Transistor bipolar tipo NPN
- Junção base-emissor é uma heteroestrutura
- Exemplos de heteroestruturas de HBTs

Emissor → **Al-GaAs**

Emissor → **Si-Ge**

Emissor → **GaInAs**

Base → **GaAs**

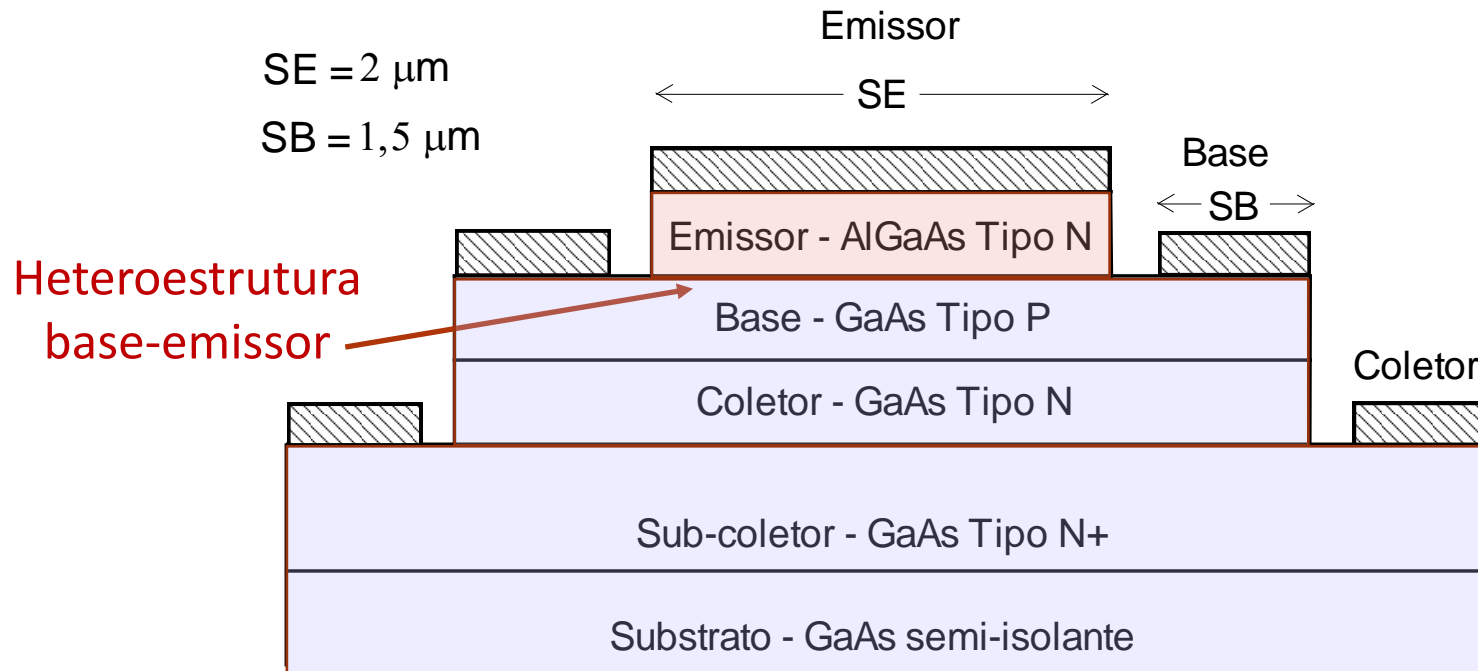
Base → **Si**

Base → **InP**

- Opera até frequências de 100 GHz e acima
- HBT de SiGe/Si operando até 60 GHz, com baixo custo
- Modelo elétrico equivalente
- O mesmo do transistor bipolar de silício

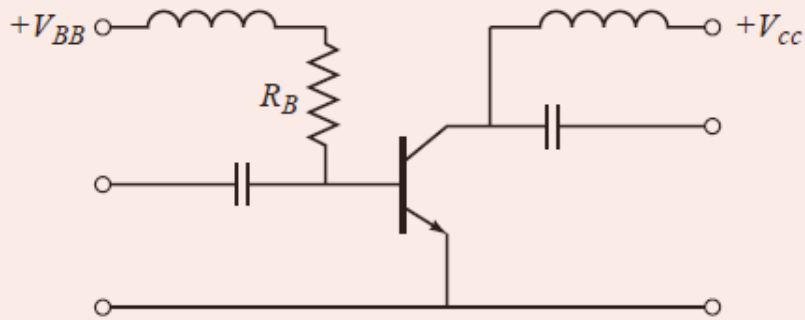
Transistores Bipolares de Micro-ondas

- **Secção transversal HBT**

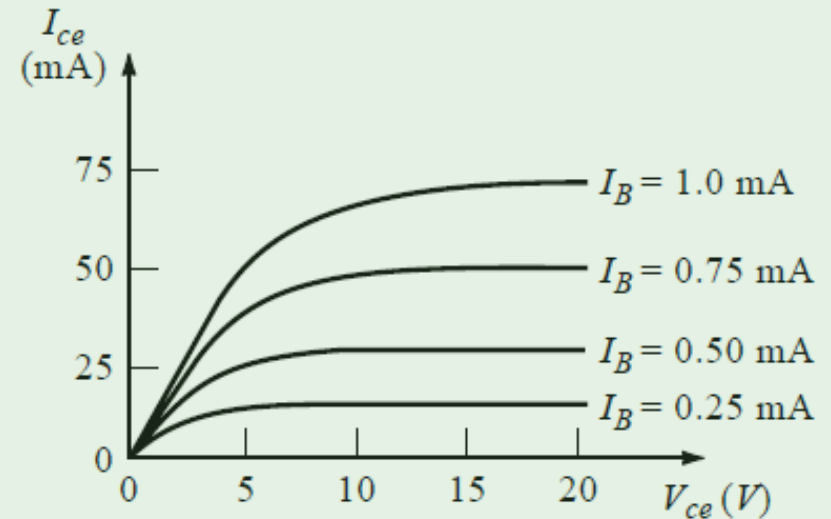


Emissor:	AlGaAs	1.000 Angstroms	$5 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$
Base:	GaAs	800 Angstroms	$7 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$
Coletor:	GaAs	7.000 Angstroms	$5 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$

Transistores Bipolares de Micro-ondas

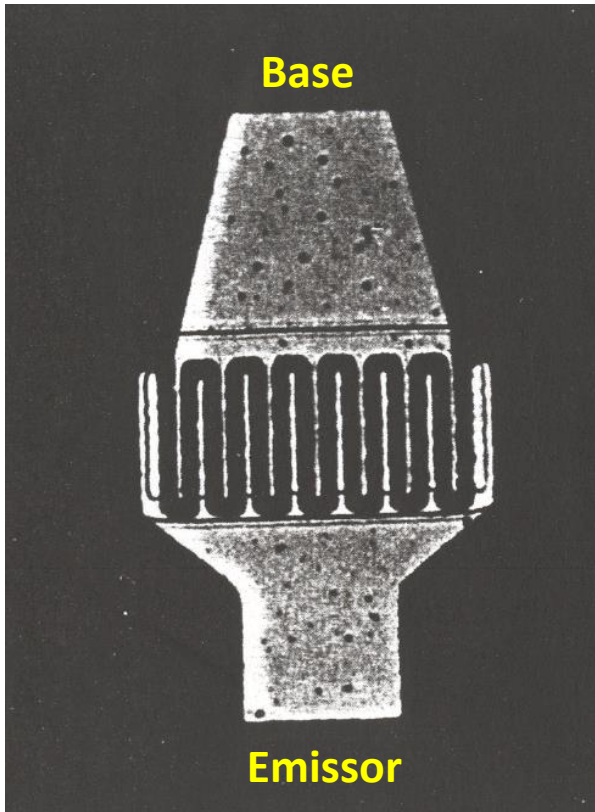


Circuito de polarização e desacoplamento do transistor bipolar NPN

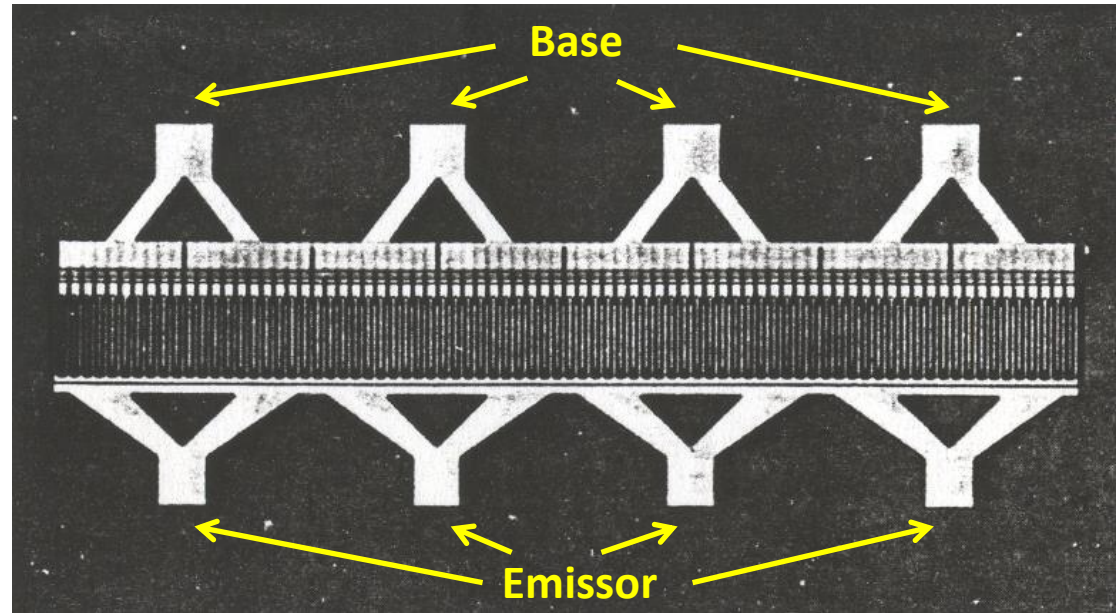


Característica $I \times V$ em DC

Transistor Bipolar de Silício

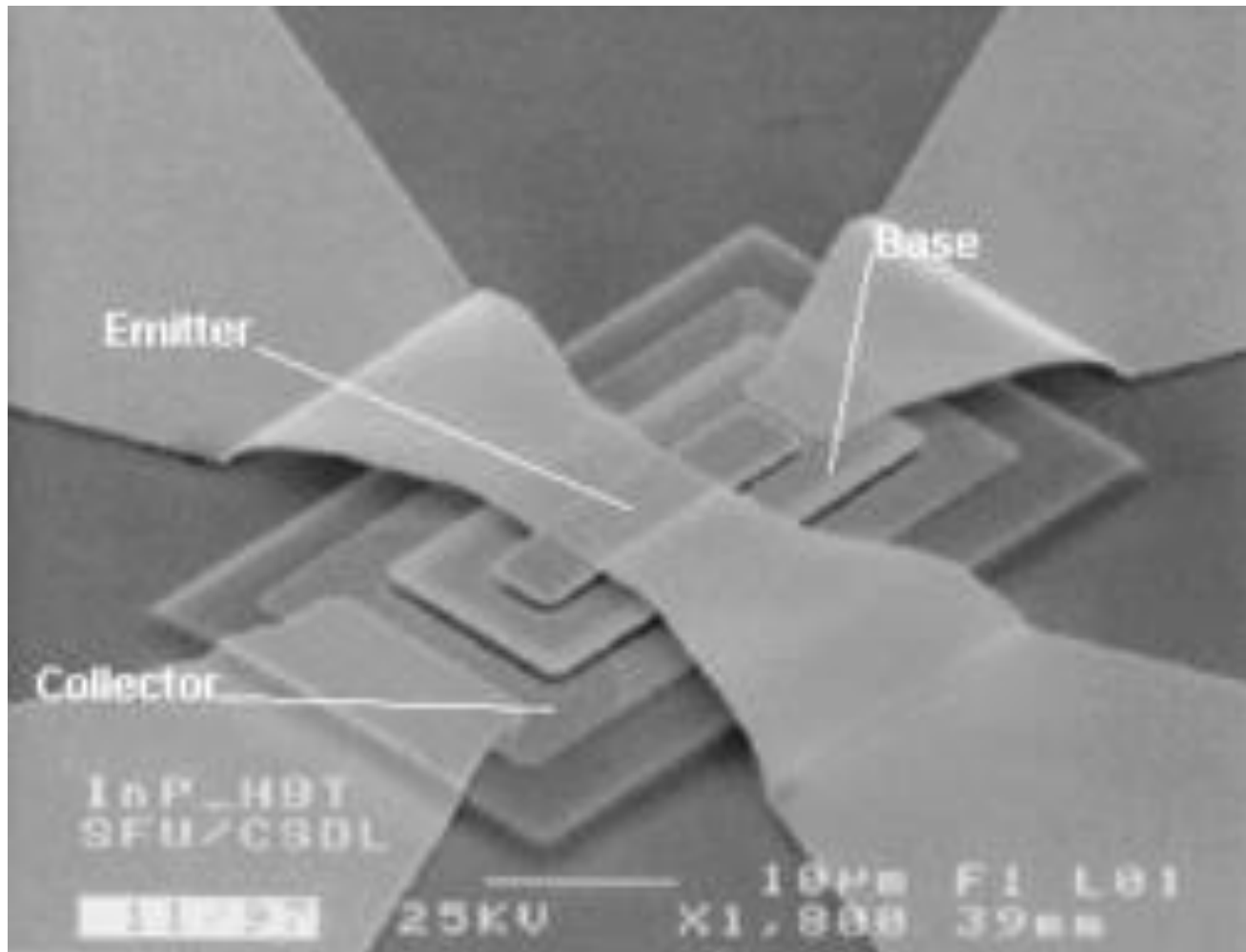


Baixo ruído
largura de emissor: 1 mm



Potência
5 W em 2 GHz

HBTs



Emissor $4 \times 12 \mu\text{m}^2$

HBT X Transistor Bipolar de Silício

- **Transistor Bipolar de Silício**

- Largura de emissor $< 0,5 \mu\text{m}$
- f_T e f_{MAX} : 20 a 40 GHz
- $b = 10$ a 50

- **HBT**

- Largura de emissor 1 a 3 mm
- f_T e f_{MAX} : 100 a 200 GHz
- $b = 5$ a 80

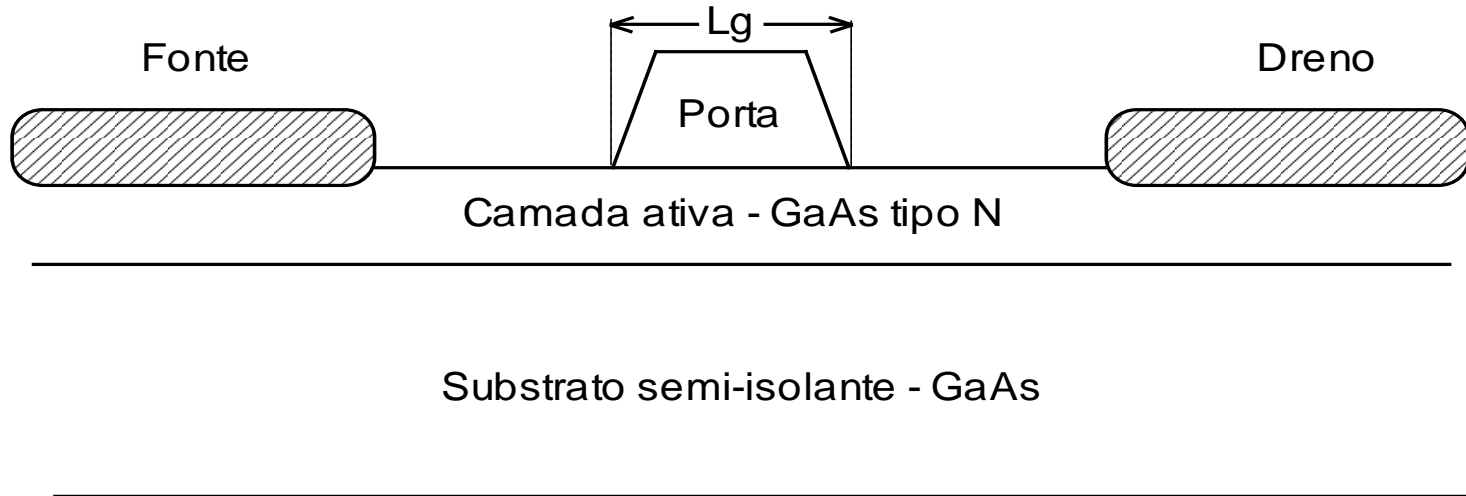
f_t frequência em que ganho de corrente cai a 1

f_{max} frequência em que ganho de potência cai a 1

β ganho de corrente

Transistores de Efeito de Campo de Micro-ondas

- **MESFET – Metal Semiconductor Field Effect Transistor**



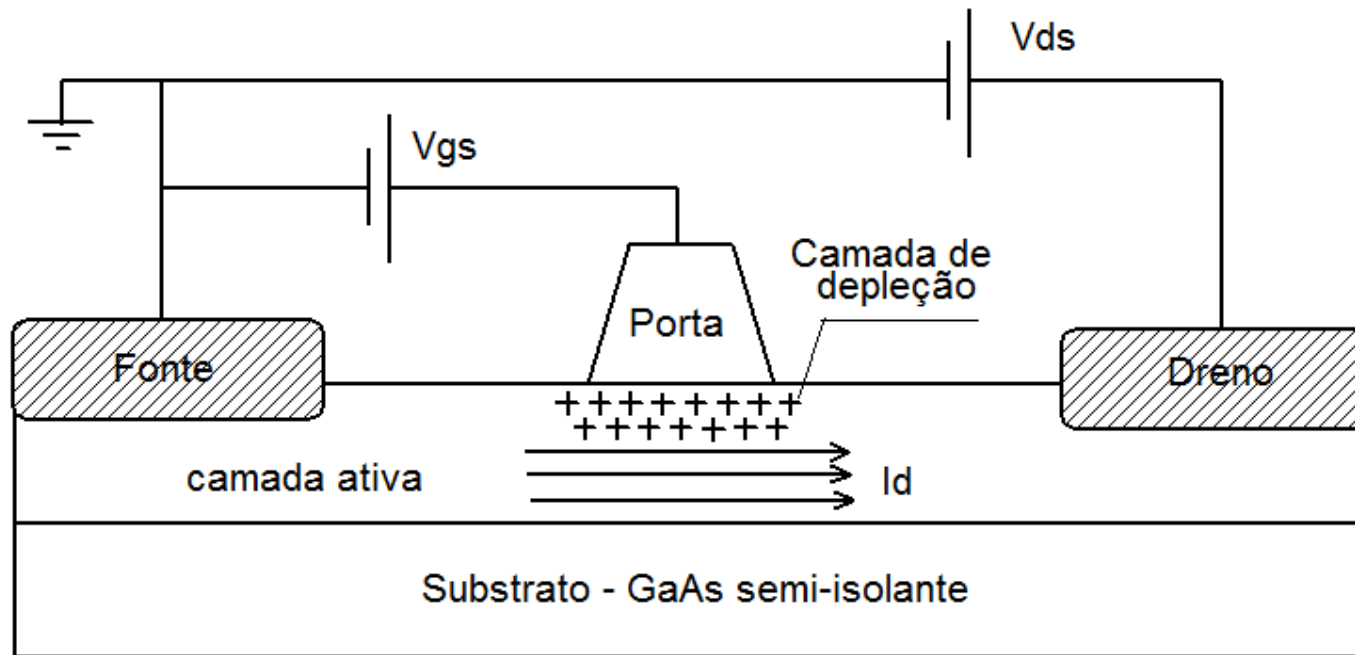
Fonte e dreno: contatos ôhmicos **Porta: diodo Schottky**

Comprimento de porta, $L_g < 1 \mu\text{m}$, p.e. $0,25 \mu\text{m}$, $0,5 \mu\text{m}$

Camada ativa: $0,15 \mu\text{m}$ de espessura,
(p.e.) $3 \cdot 10^{17}$ dopantes/ cm^3

Transistores de Efeito de Campo de Micro-ondas

- Princípio de operação do MESFET



- MESFET de depleção: $V_T < 0$, limiar de condução

- $V_{gs} < V_T$ camada ativa totalmente depletada $\Rightarrow I_d = 0$
- $V_{gs} > V_T$ espessura da camada de depleção diminui $\Rightarrow I_d > 0$
- $V_T < V_{gs} < 0,5 \text{ V}$ (se $V_{gs} > 0,5 \text{ V}$, o diodo de porta conduz!)

Transistores de Efeito de Campo de Micro-ondas

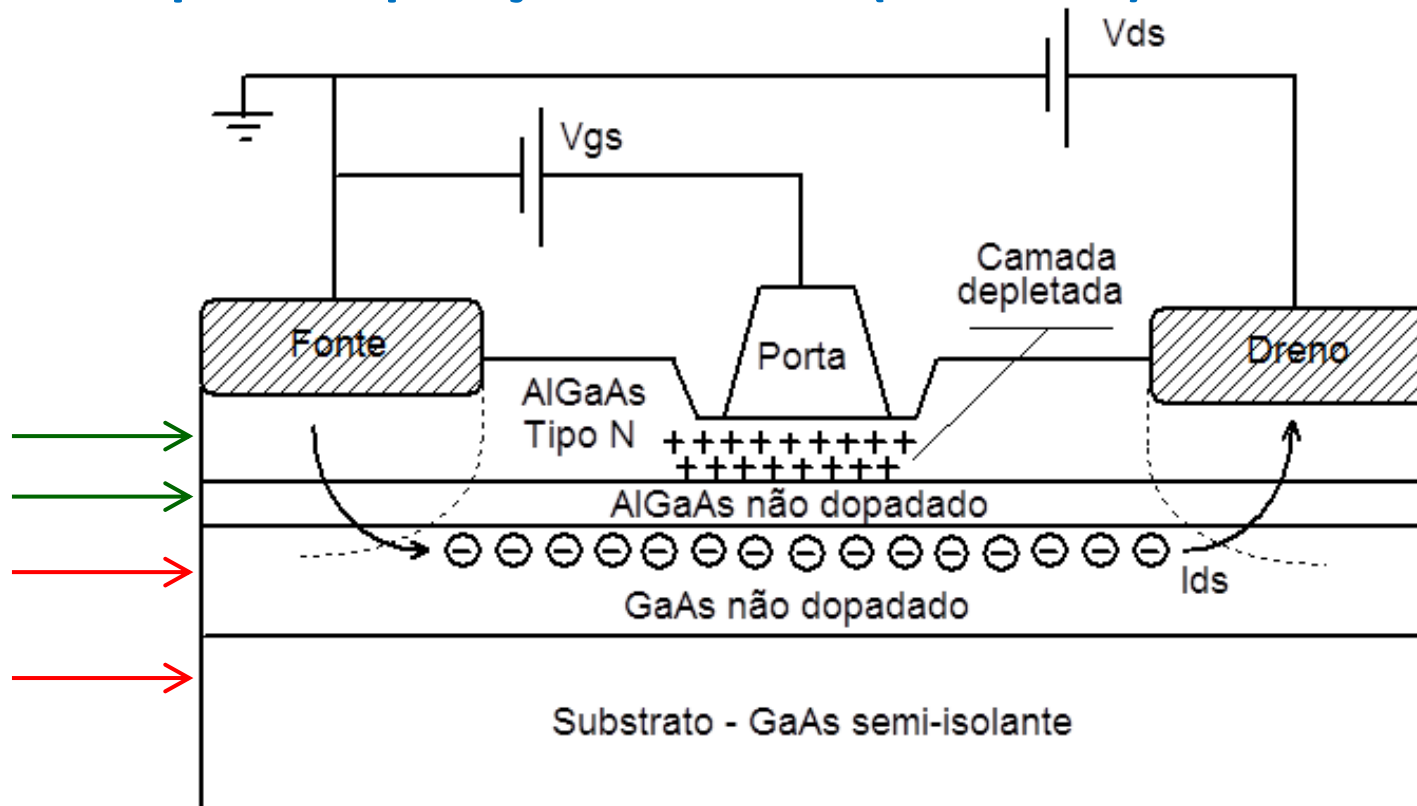
HEMT – High Electron Mobility Transistor

PHEMT – Pseudomorphic High Electron Mobility Transistor

- Transistores de efeito de campo com heterojunções
 - HEMT → Heteroestrutura, como $\text{AlGaAs}/\text{GaAs}$
 - PHEMT → Heteroestrutura pseudomórfica, como $\text{AlGaAs}/\text{InGaAs}$
 - Portadores de corrente: elétrons com alta mobilidade
 - Condução de corrente: gás bidimensional de elétrons, 2-DEG
 - HEMT e PHEMT → Alto ganho e baixa figura de ruído
- Aplicações
 - Amplificadores de baixo ruído e de média potência
 - Amplificadores de potência com alta linearidade (GaN HEMT)

Transistores de Efeito de Campo de Micro-ondas

- Princípio de operação do HEMT (e PHEMT)

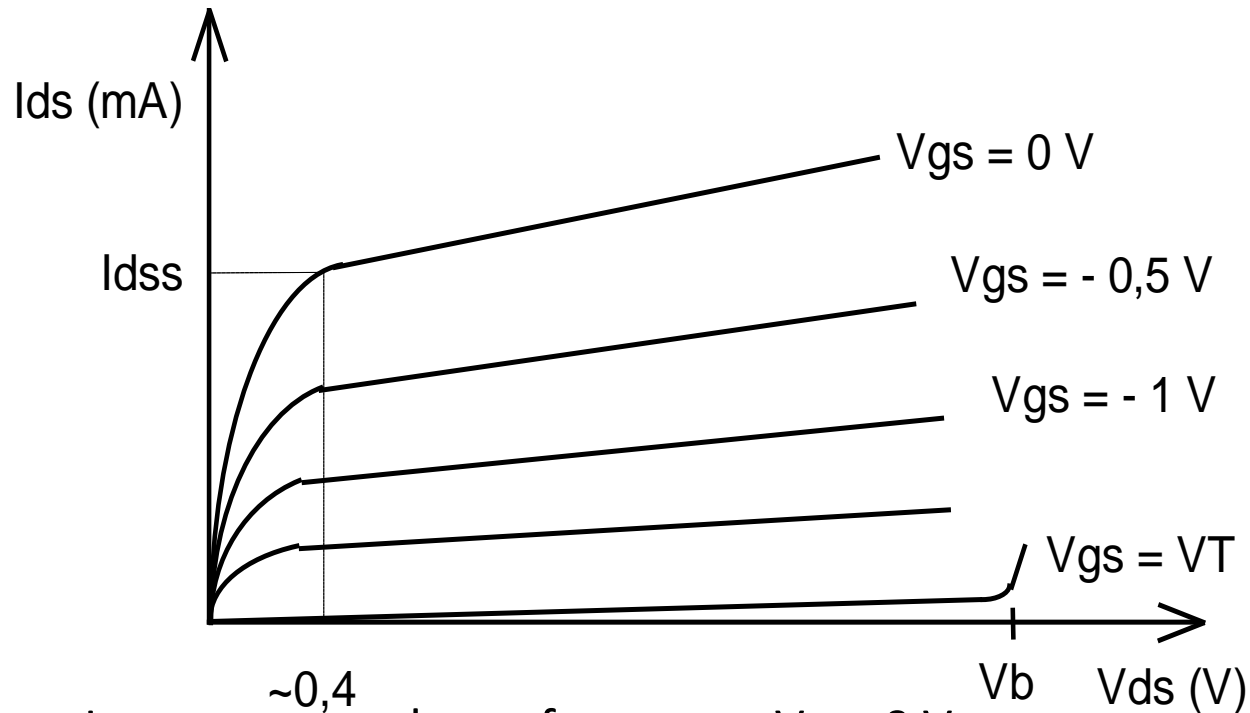


V_{gs} : controla a densidade de carga no 2-DEG \Rightarrow valor de I_d

Curva DC $I_{ds} \times V_{ds}$: comportamento similar ao do MESFET

Transistores de Efeito de Campo de Micro-ondas

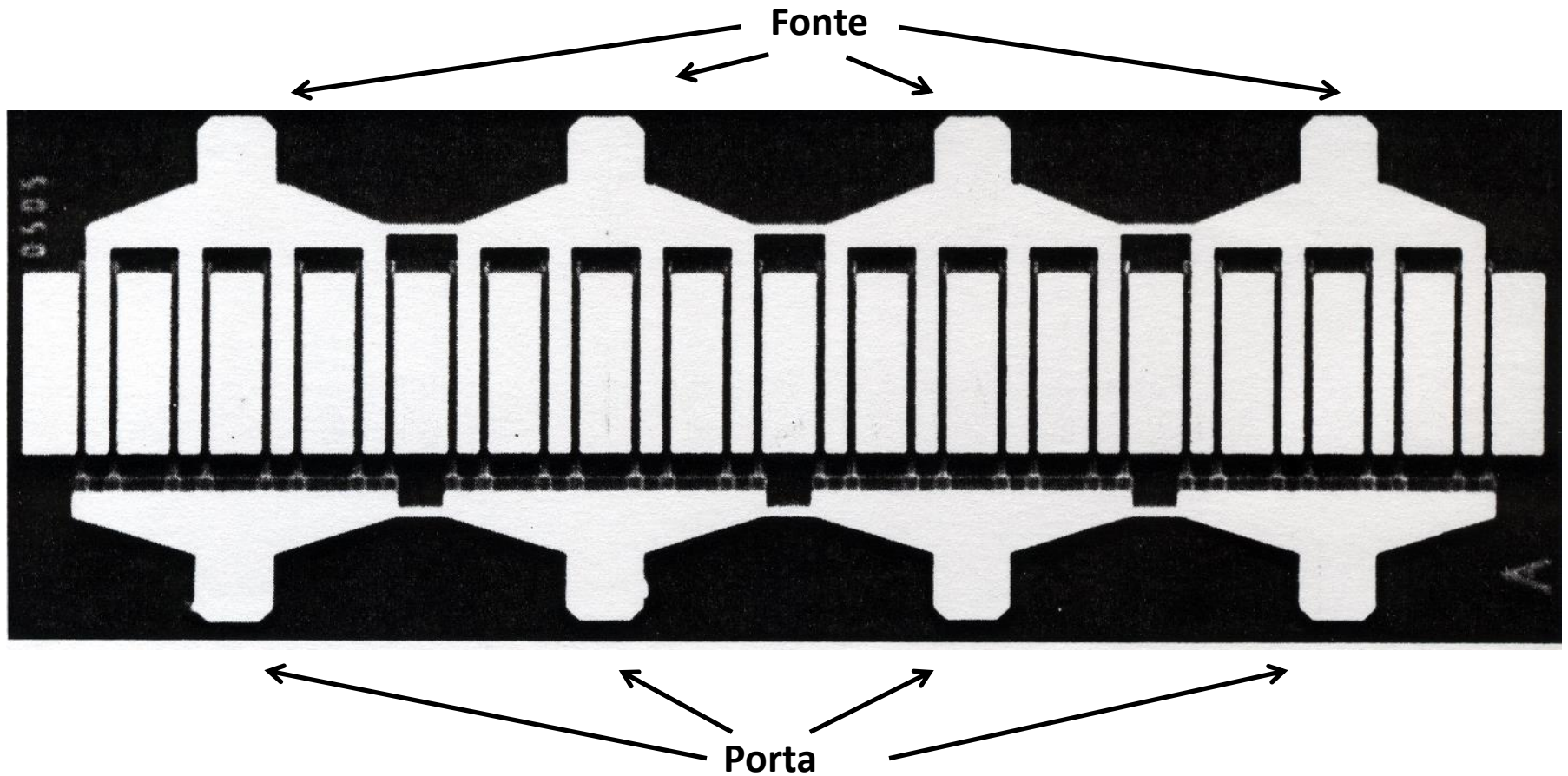
- Curva $I_{DS} \times V_{DS}$ do MESFET, HEMT e do PHEMT



I_{DSS} : corrente dreno-fonte para $V_{GS} = 0 \text{ V}$

V_b : tensão de ruptura dreno-fonte

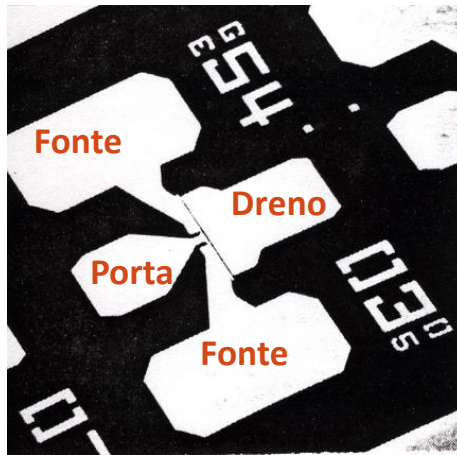
PHEMT de Potência



Porta: 32 dedos, com $W = 150 \mu\text{m}$ cada

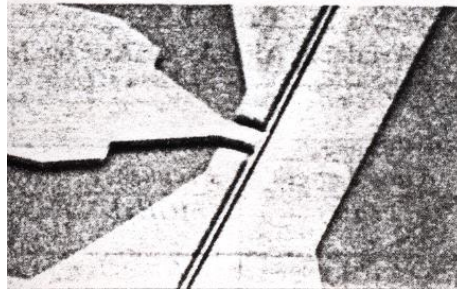
2,5 W em 20 GHz

HEMTs



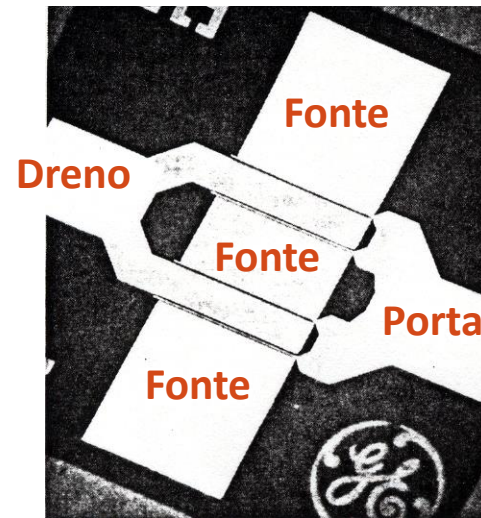
Fonte

Porta

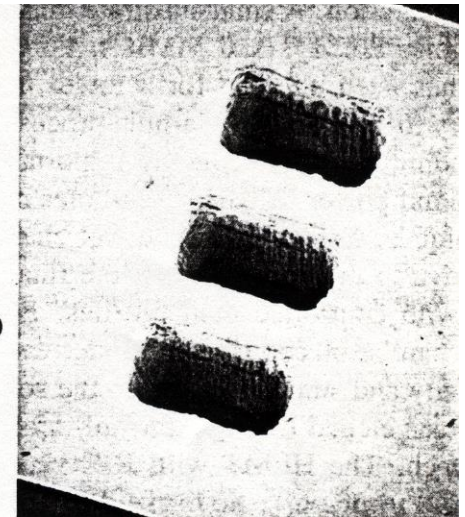


Fonte

Dreno



(b)



HEMT de potência

Porta: 4 dedos com $L = 0,25 \mu\text{m}$

HEMT de baixo ruído

Porta: 2 dedos com $0,15 \times 25 \mu\text{m}^2$

MESFET e HEMT

Transistores de baixo ruído

Dispositivo	$L_g \times W$ (μm^2)	Figura de ruído (dB)	$G_{\text{associado}}$ (dB)	Frequência (GHz)
MESFET	0,3 x 280	1,6	9,0	12
HEMT	0,3 x 280	0,6	10,5	12
PHEMT	0,2 x 200	0,5	11,5	12

Transistores de Micro-ondas

Dispositivo	Si BJT	Si CMOS	SiGe HBT	GaAs MESFET	GaAs HEMT	GaN HEMT
Faixa de frequências (GHz)	10	20	30	60	100	10
Ganho típico (dB)	10 a 15	10 a 20	10 a 15	5 a 20	10 a 20	10 a 15
Figura de Ruído (dB)	2,0 2,0 GHz	1,0 4,0 GHz	0,6 8,0 GHz	1,0 10,0 GHz	0,5 12,0 GHz	1,6 6,0 GHz
Capacidade de potência	Alta	Baixa	Média	Média	Média	Alta
Polaridade de alimentação única	Sim	Sim	Sim	Não	Não	Não
Custo	Baixo	Baixo	Médio	Médio	Alto	Médio

Fonte: Microwave Engineering, 4ª ed., D. M. Pozar, **2012**

Modelos de Transistores de Micro-ondas

- **Modelos de transistores**

- Representam o transistor em projeto de circuitos, amplificadores, osciladores, chaves, etc.
- Geralmente baseados em medidas do dispositivo
- Validade: faixa de frequência e de potência em que em que foram realizadas as medidas
- Implementados em ferramentas de CAD

- **Tipos de modelos**

Modelos lineares

Modelos não-lineares

Modelos de Transistores de Micro-ondas

- **Modelos lineares do transistor**
- Representam o transistor operando em pequenos sinais
- Sinal de RF é pequeno o suficiente de modo que
 - não altera o ponto de operação do transistor
 - não gera distorção do sinal de RF (harmônicas, intermodulação)
- Aplicações do modelo linear
 - Amplificadores de ganho
 - Amplificadores de baixo ruído

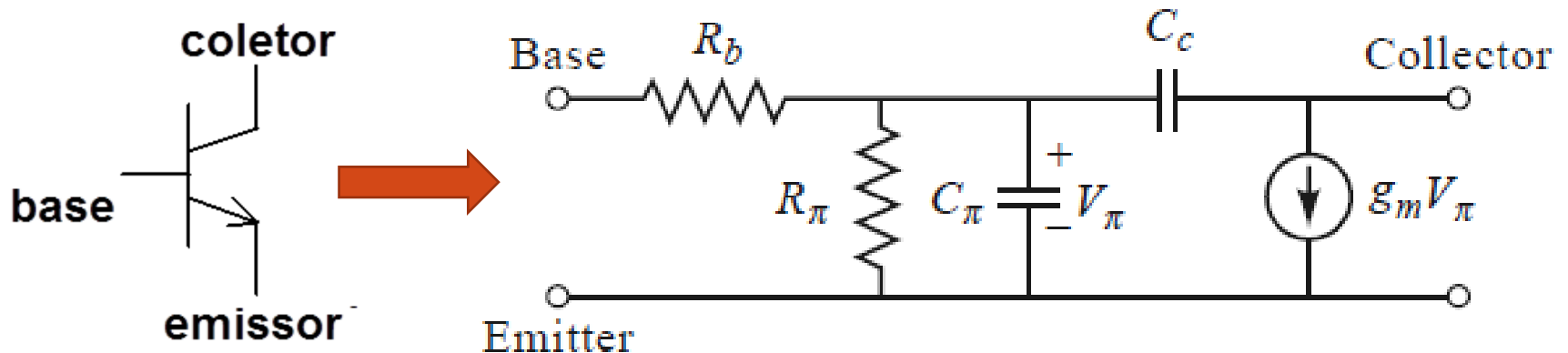
Modelos de Transistores de Micro-ondas

- **Tipos de modelos lineares do transistor**
- **Modelos de caixa preta**
 - Matriz S → Parâmetros de espalhamento, matriz ABCD, matriz Z , matriz Y , etc.
 - Relacionam as características elétricas das portas de entrada e saída
- **Modelos de circuito elétrico equivalente**
 - Associam resistores, capacitores, fontes vinculadas de tensão para representar o transistor
 - Valores dos componentes do modelo → ajustados para representar o transistor na condição de medida

Modelos de Transistores de Micro-ondas

Circuito Elétrico Equivalente de Pequenos Sinais BJT de silício e HBT

- Modelo π -híbrido

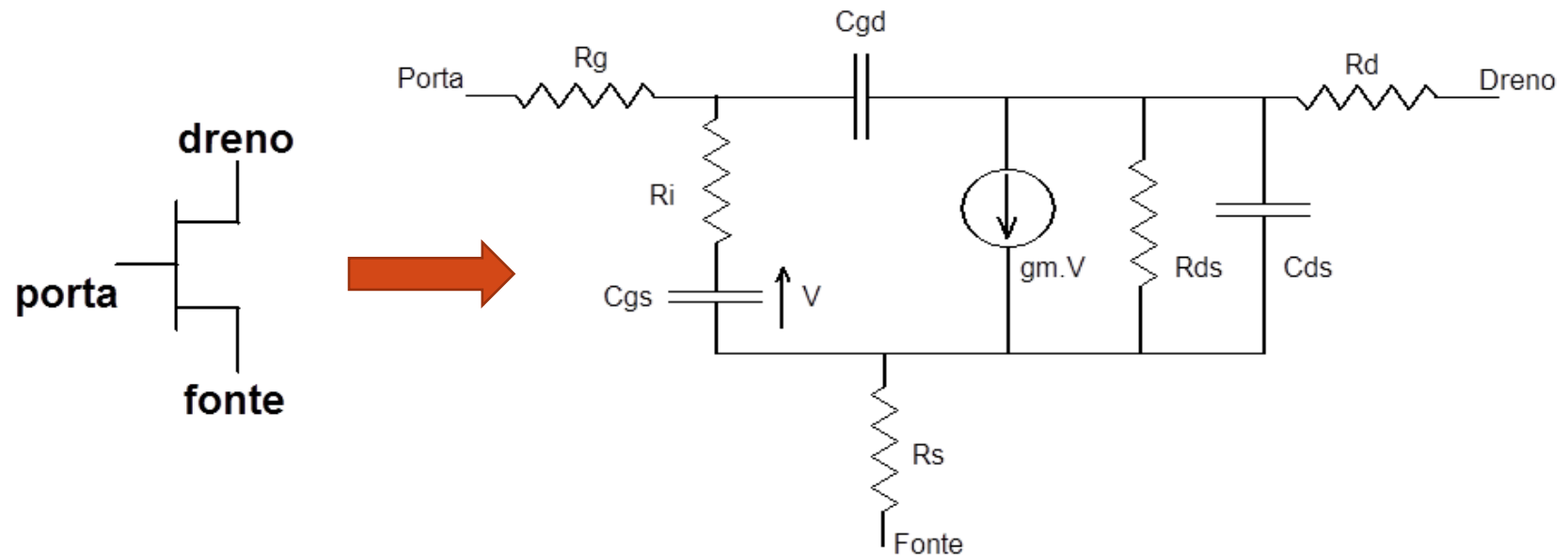


$$f_T = \frac{g_m}{2\pi \cdot C_\pi}$$

f_T , frequência em que o ganho de corrente cai a 1

Modelos de Transistores de Micro-ondas

Circuito Elétrico Equivalente de Pequenos Sinais MESFET, HEMT e PHEMT



R_g , R_s , R_d : resistências de porta, fonte e dreno

C_{gs} : capacitância porta-fonte C_{gd} : capacitância porta-dreno

C_{ds} : capacitância dreno-fonte

R_i : resistência de carga de C_{gs}

g_m : transcondutância

$1/R_{ds}$: condutância dreno-fonte

Modelos de Transistores de Micro-ondas

Atividade com o ADS

Biblioteca de parâmetros S de transistores de micro-ondas comerciais do ADS

- Abra o Workspace em que vai trabalhar
- Instale a biblioteca: “S_Parameter_vendor_kit”
- Na janela “Main” selecione
“Design Kits” → “Manage favorite design kits”
- Verifique a relação de design kits disponíveis
- Se necessário, unzip o design kit “S_Parameter_vendor_kit”
- Adicione o “S Parameters Vendor Kit” ao Workspace

Modelos de Transistores de Micro-ondas

Atividade com o ADS

Biblioteca de parâmetros S de transistores de micro-ondas comerciais do ADS

- Unzip de design kits do ADS
- Na janela “Main” selecione
“Design Kits” → “Unzip design kit...”
- Selecione o design kit desejado no endereço abaixo (ou similar)
C:\Program Files\Keysight\ADS2020_update2\oalibs\componentLib
- Siga as instruções do ADS
- Adicione o design kit a seu workspace, como no slide anterior

Modelos de Transistores de Micro-ondas

Atividade com o ADS

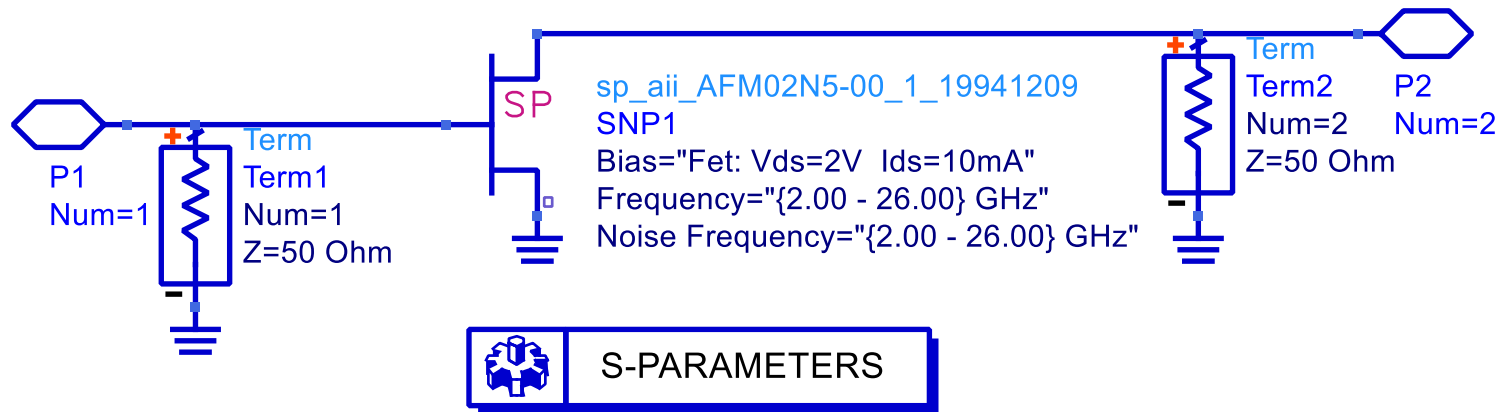
Simulando parâmetros S do transistor

- Na janela de esquemático
- Posicione um transistor do “S_Parameter_vendor_kit”
- Verifique o ponto de polarização do transistor e a faixa de frequência dos parâmetros S fornecidos
- Simule os parâmetros S do transistor
- Trace curvas de S11, S21, S12, S22 em coordenadas cartesianas
 - Módulo, fase, módulo em dB
- S11 e S22 em carta de Smith

Modelos de Transistores de Micro-ondas

Atividade com o ADS

Modelo linear de transistor: arquivo de Parâmetros S



S_Param
SP1
Start=2 GHz
Stop=26 GHz
Step=1 GHz

S_{11} e S_{22} na carta de Smith

S_{21} e S_{12} em diagrama polar

Tabela com S_{11} , S_{21} , S_{12} , S_{22}

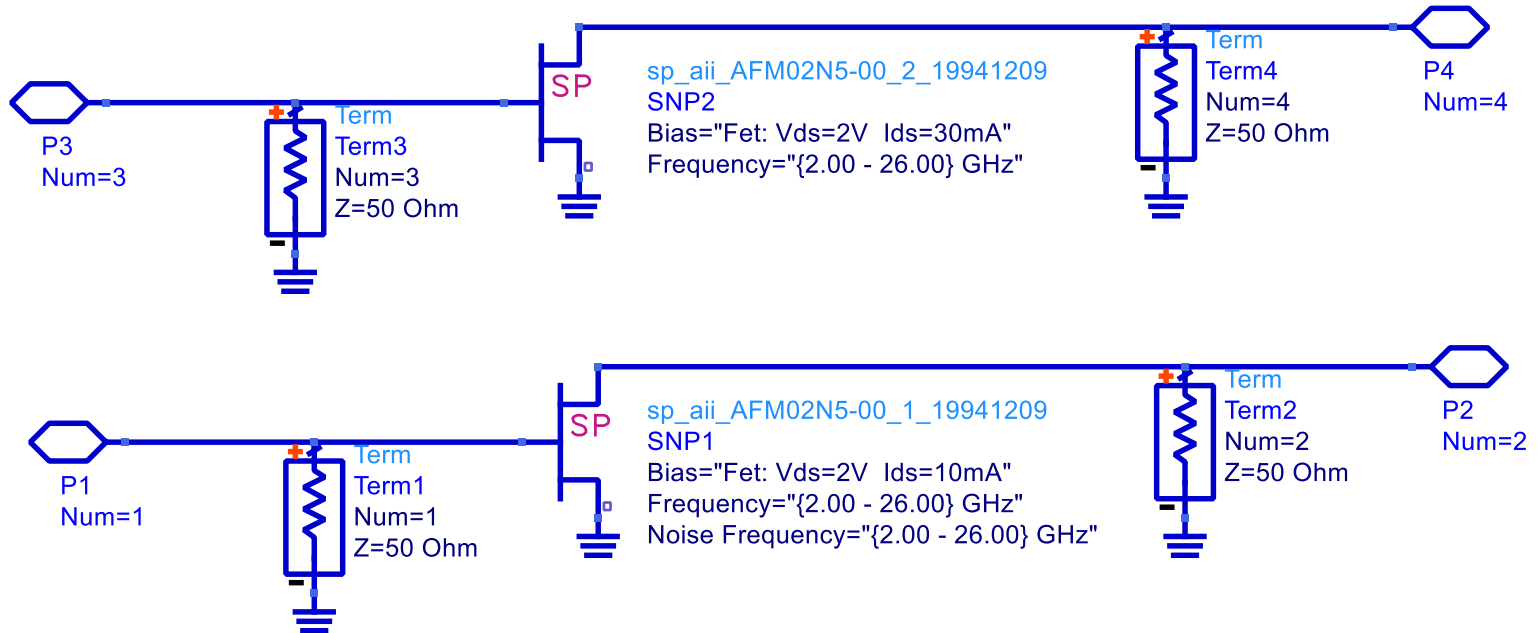
S_{21} (dB) em coordenadas cartesianas

S_{12} (dB) em coordenadas cartesianas

Modelos de Transistores de Micro-ondas

Atividade com o ADS

Parâmetros S para dois pontos de polarização diferentes



Coordenadas cartesianas

S_{21} (dB) e S_{43} (dB)

S_{12} (dB) e S_{34} (dB)

Carta de Smith

S_{11} e S_{22}

S_{33} e S_{44}

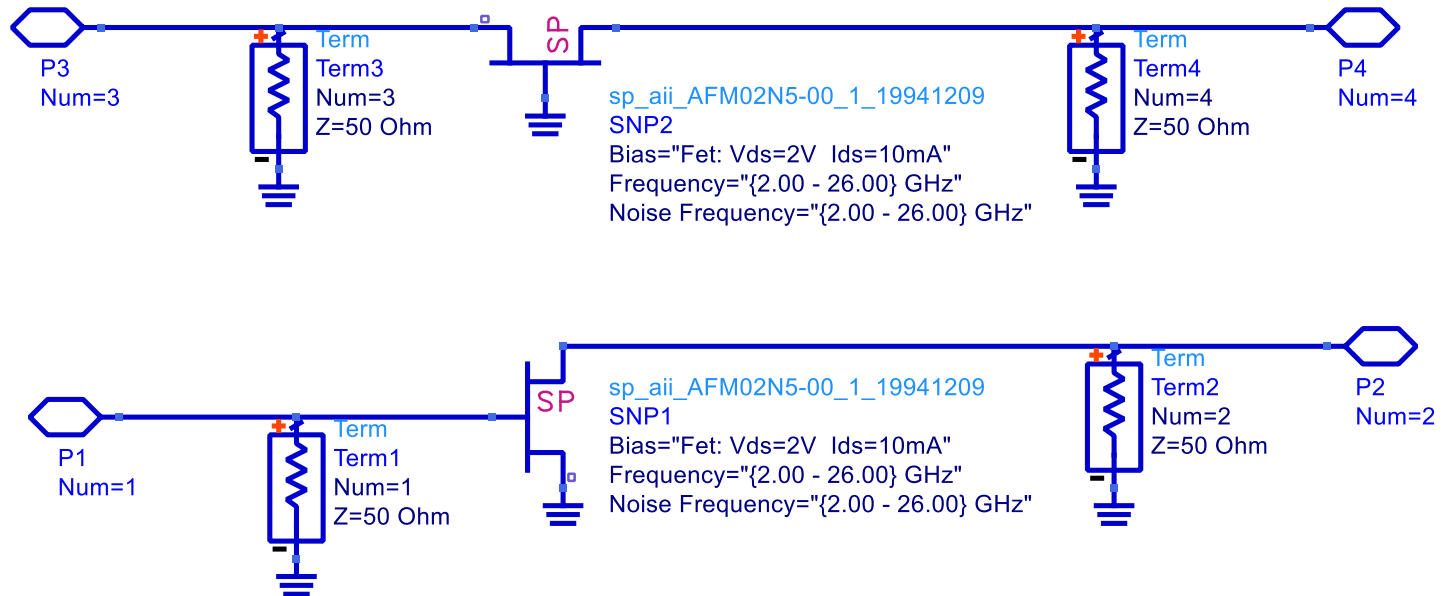
Diagrama polar

S_{21} e S_{12}

S_{43} e S_{34}

Atividade com o ADS

Parâmetros S – Transistor em fonte comum e porta comum



S_{11} e S_{22} – S_{33} e S_{44} na carta de Smith

S_{21} (dB) e S_{43} (dB) em coordenadas cartesianas

S_{12} (dB) e S_{34} (dB) em coordenadas cartesianas

Modelos de Transistores de Micro-ondas

Modelos não-lineares do transistor

- Representam o transistor operando em grandes sinais
- Permitem calcular
 - Curvas DC $\rightarrow I \times V$
 - Desempenho em alta potência
 - Distorção do sinal de RF (harmônicas, intermodulação)
- Aplicações do modelo não-linear
 - Amplificadores de potência de alta linearidade (classe A)
 - Amplificadores de alta eficiência (classe AB, B, F)
 - Osciladores, misturadores de frequência, chaves, atenuadores, etc.

Modelos de Transistores de Micro-ondas

Atividade com o ADS

Modelos de grandes sinais do transistor

- Modelos editáveis no ADS nos menus
 - Devices-GaAs
 - Devices-BJT
- Modelos de transistores comerciais
 - Biblioteca “Microwave_Transistors”

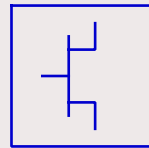
Modelos de Transistores de Micro-ondas

Atividade com o ADS

Modelos de grandes sinais do transistor

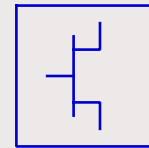
- Ver modelos de transistor em “Devices GaAs”
- Ver equações dos modelos no “Help” do componente

MESFET
Exemplos de
modelos de
grandes sinais



Curtice2_Model
MESFETM1

NFET=yes	Cgd=	Gdfwd=	R=
PFET=no	Rgd=	Gdrev=	P=
Vto=	Gdcap=	R1=	C=
Beta=	Fc=	R2=	Taumdl=no
Lambda=	Rd=	Vbi=	wVg fwd=
Alpha=	Rg=	Vbr=	wBvgs=
Tau=	Rs=	Vjr=	wBvgd=
Tnom=	Ld=	Is=	wBvds=
Idstc=	Lg=	Ir=	wIdsmax=
Vtotc=	Ls=	Imax=	wPmax=
Betatce=	Cds=	Imelt=	AllParams=
Rin=	Rc=	Xti=	
Rf=	Crf=	Eg=	
Gscap=	Gsfwd=	N=	
Cgs=	Gsrev=	Fnc=	



Statz_Model
MESFETM2

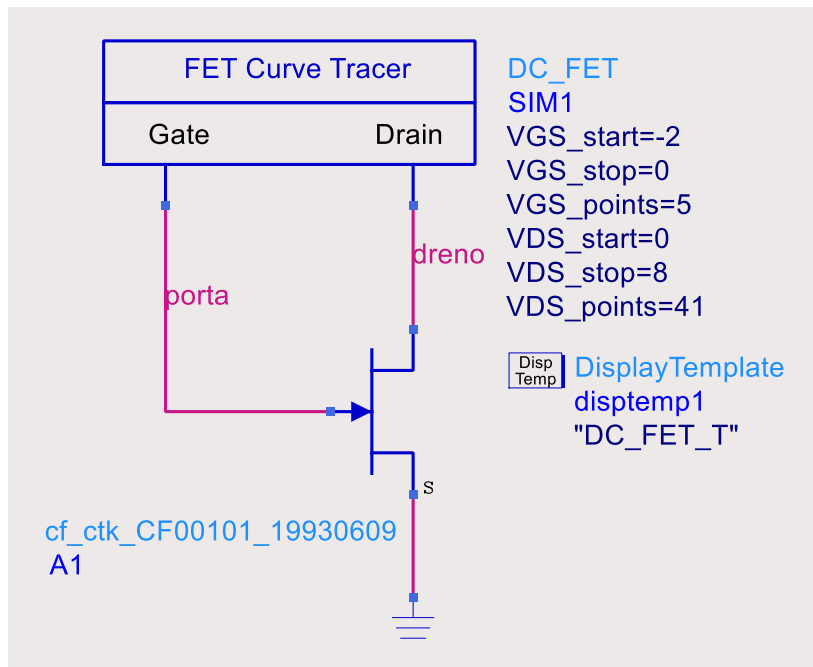
NFET=yes	Gscap=	Crf=	Vtotc=
PFET=no	Cgs=	Rc=	Rin=
Vto=	Gdcap=	Gsfwd=2	Taumdl=no
Beta=	Cgd=	Gsrev=2	Fnc=
Lambda=	Rgd=	Gdfwd=2	R=
Alpha=	Tqm=	Gdrev=2	C=
B=	Vmax=	Vjr=	P=
Tnom=	Fc=	Is=	wVg fwd=
Trise=	Rd=	Ir=	wBvgs=
Idstc=	Rg=	Imax=	wBvgd=
Vbi=	Rs=	Imelt=	wBvds=
Tau=	Ld=	Xti=	wIdsmax=
Betatce=	Lg=	N=	wPmax=
Delta1=	Ls=	Eg=	AllParams=
Delta2=	Cds=	Vbr=	

Modelos de Transistores de Micro-ondas

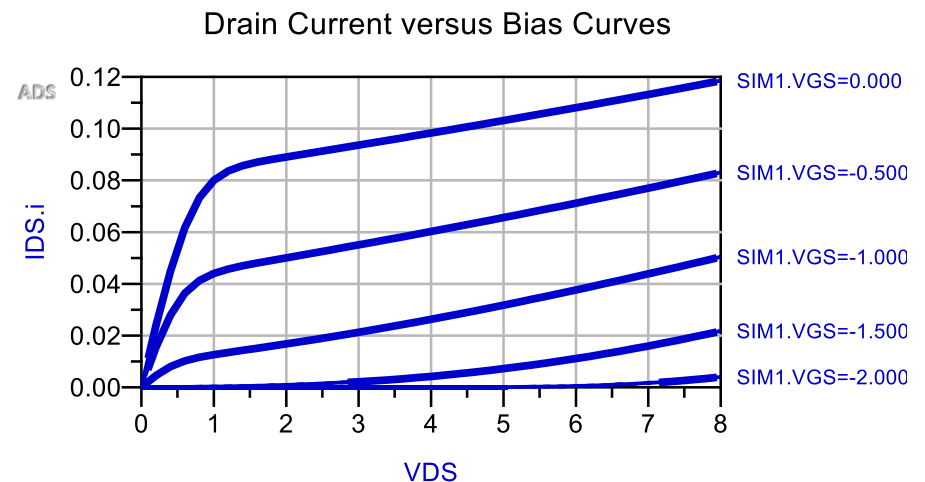
Atividade com o ADS

Modelos de grandes sinais do transistor

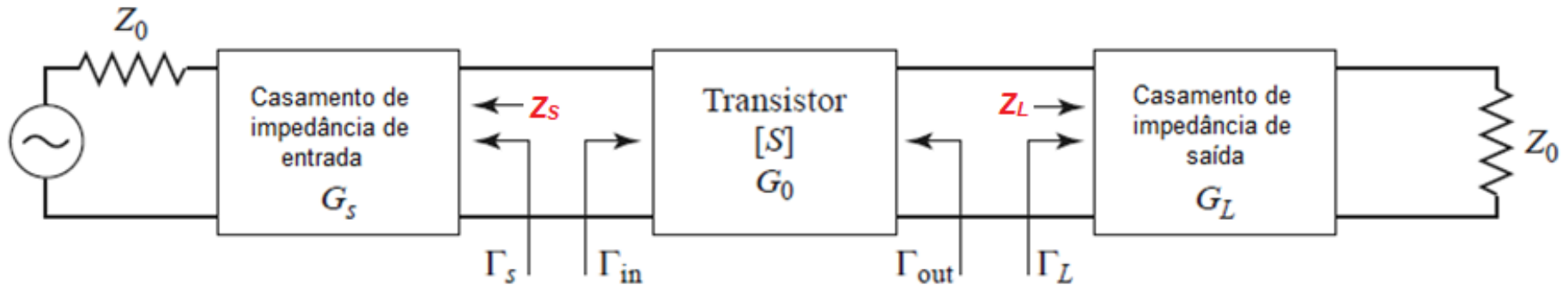
Modelos de transistores comerciais da biblioteca "Microwave_Transistors"



Exemplo: simulação da curva I_xV de um transistor de efeito de campo



Amplificador de um estágio



Ganho de potência de transdução $G_T = G_S \cdot G_0 \cdot G_L$

$$G_S = \frac{(1 - |\Gamma_S|^2)}{|1 - \Gamma_S \Gamma_{in}|^2} \quad G_0 = |S_{21}|^2 \quad G_L = \frac{(1 - |\Gamma_L|^2)}{|1 - S_{22} \Gamma_L|^2}$$

Ganho

Parâmetros S , Γ_S e Γ_L

$$Z_S \rightarrow \Gamma_S \rightarrow \Gamma_{out}$$

$$Z_L \rightarrow \Gamma_L \rightarrow \Gamma_{in}$$

Estabilidade do transistor

Mas, se

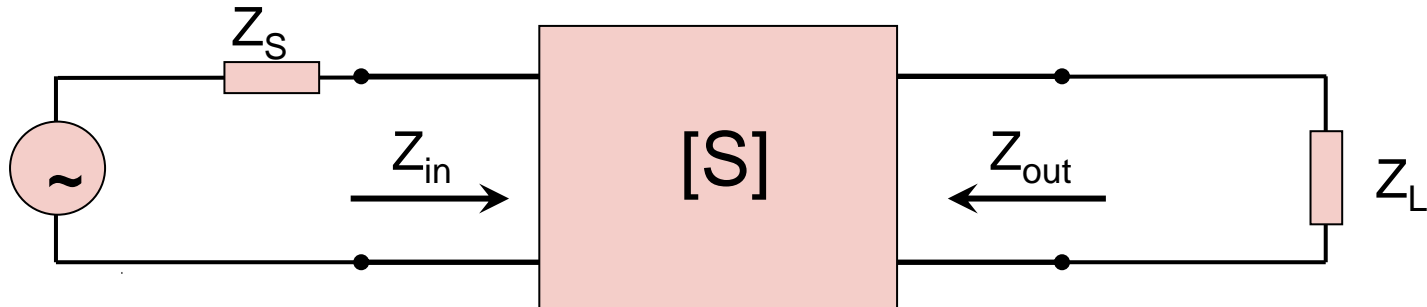
$$\Gamma_{in} > 1 \quad \text{e/ou} \quad \Gamma_{out} > 1$$

transistor pode oscilar!

Estabilidade do Transistor

Estabilidade de uma rede de duas portas

- Rede de dois acessos



- A rede é instável e pode oscilar se

$$\text{Re}(Z_{in}) < 0 \rightarrow |\Gamma_{in}| > 1 \quad \text{ou} \quad \text{Re}(Z_{out}) < 0 \rightarrow |\Gamma_{out}| > 1$$

Z_{in} depende de: **Matriz S** e de Z_L

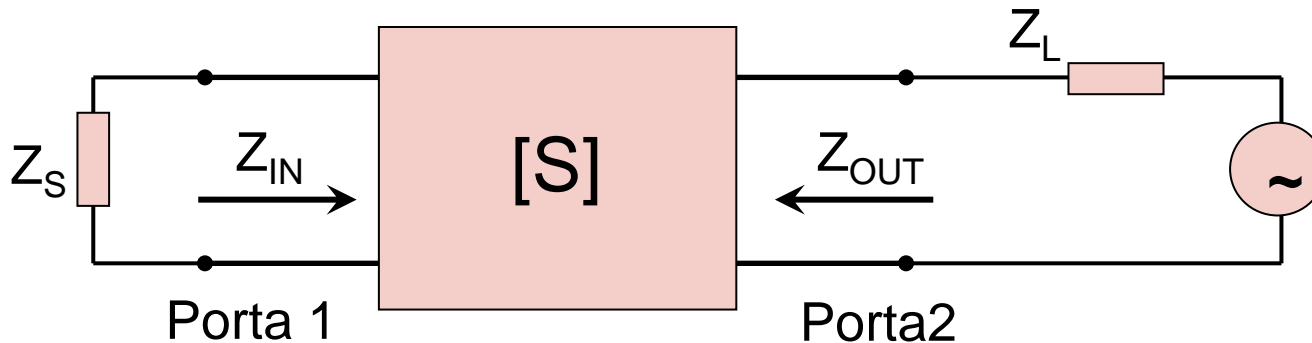
$$|\Gamma_{in}| = \left| S_{11} + \frac{S_{12}S_{21}\Gamma_L}{1 - S_{22}\Gamma_L} \right|$$

Z_{out} depende de: **Matriz S** e de Z_S

$$|\Gamma_{out}| = \left| S_{22} + \frac{S_{12}S_{21}\Gamma_S}{1 - S_{11}\Gamma_S} \right|$$

Estabilidade do Transistor

Estabilidade de uma rede de duas portas



Incondicionalmente estável

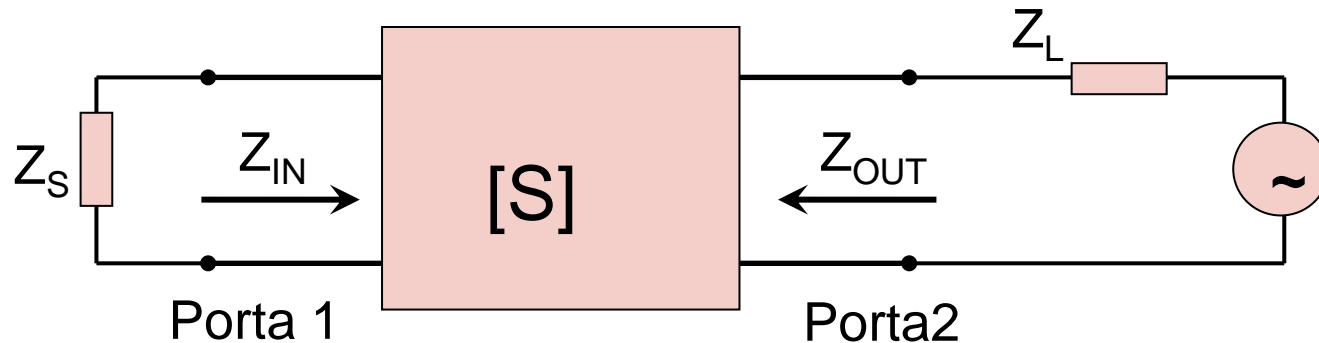
- A rede é incondicionalmente estável se $|\Gamma_{IN}| < 1$ e $|\Gamma_{OUT}| < 1$ para qualquer valor de $\text{Re}(Z_{IN}) > 0$ e $\text{Re}(Z_{OUT}) > 0$

Condicionalmente estável

- A rede é condicionalmente estável $|\Gamma_{IN}| > 1$ e/ou $|\Gamma_{OUT}| < 1$ para alguma faixa de valores de $\text{Re}(Z_{IN}) > 0$ e $\text{Re}(Z_{OUT}) > 0$

Estabilidade do Transistor

Estabilidade de uma rede de duas portas



Critérios para verificação da estabilidade da rede

Círculos de estabilidade

- Mapeiam na carta de Smith
- Valores de Z_L que causam $|\Gamma_{IN}| > 1$
- Valores de Z_S que causam $|\Gamma_{OUT}| > 1$

Teste K e Δ - Teste μ

- Testes de estabilidade baseados em equações

Estabilidade do Transistor

Círculos de Estabilidade

- Para redes unilaterais
 - $S_{12} \approx 0 \rightarrow \Gamma_{in} \approx S_{11}$ e $\Gamma_{out} \approx S_{22}$
 - Logo, $|S_{11}| < 1$ e $|S_{22}| < 1 \rightarrow$ rede incondicionalmente estável

- Para redes bilaterais

$$|\Gamma_{in}| = \left| S_{11} + \frac{S_{12}S_{21}\Gamma_L}{1 - S_{22}\Gamma_L} \right|$$

- $S_{12} \neq 0 \rightarrow$

$$|\Gamma_{out}| = \left| S_{22} + \frac{S_{12}S_{21}\Gamma_S}{1 - S_{11}\Gamma_S} \right|$$

- Análise \rightarrow círculos de estabilidade
 - Sobrepostos à Carta de Smith
 - Definem Z_S e Z_L que causam $\Gamma_{in} > 1$ ou $\Gamma_{out} > 1$

Estabilidade do Transistor

Círculos de Estabilidade

- Cálculo do círculo de estabilidade de SAIDA
- Impondo-se

$$|\Gamma_{in}| = \left| S_{11} + \frac{S_{12}S_{21}\Gamma_L}{1 - S_{22}\Gamma_L} \right| = 1$$

- Obtém-se o centro C_L e o raio R_L do círculo de estabilidade das cargas que causam $\Gamma_{in} = 1$

$$C_L = \frac{(S_{22} - \Delta S_{11}^*)^*}{|S_{22}|^2 - |\Delta|^2}$$

$$\Delta = S_{11}S_{22} - S_{12}S_{21}$$

$$R_L = \left| \frac{S_{12}S_{21}}{|S_{22}|^2 - |\Delta|^2} \right|$$

Estabilidade do Transistor

Círculos de Estabilidade

- Cálculo do círculo de estabilidade ENTRADA
- Impondo-se

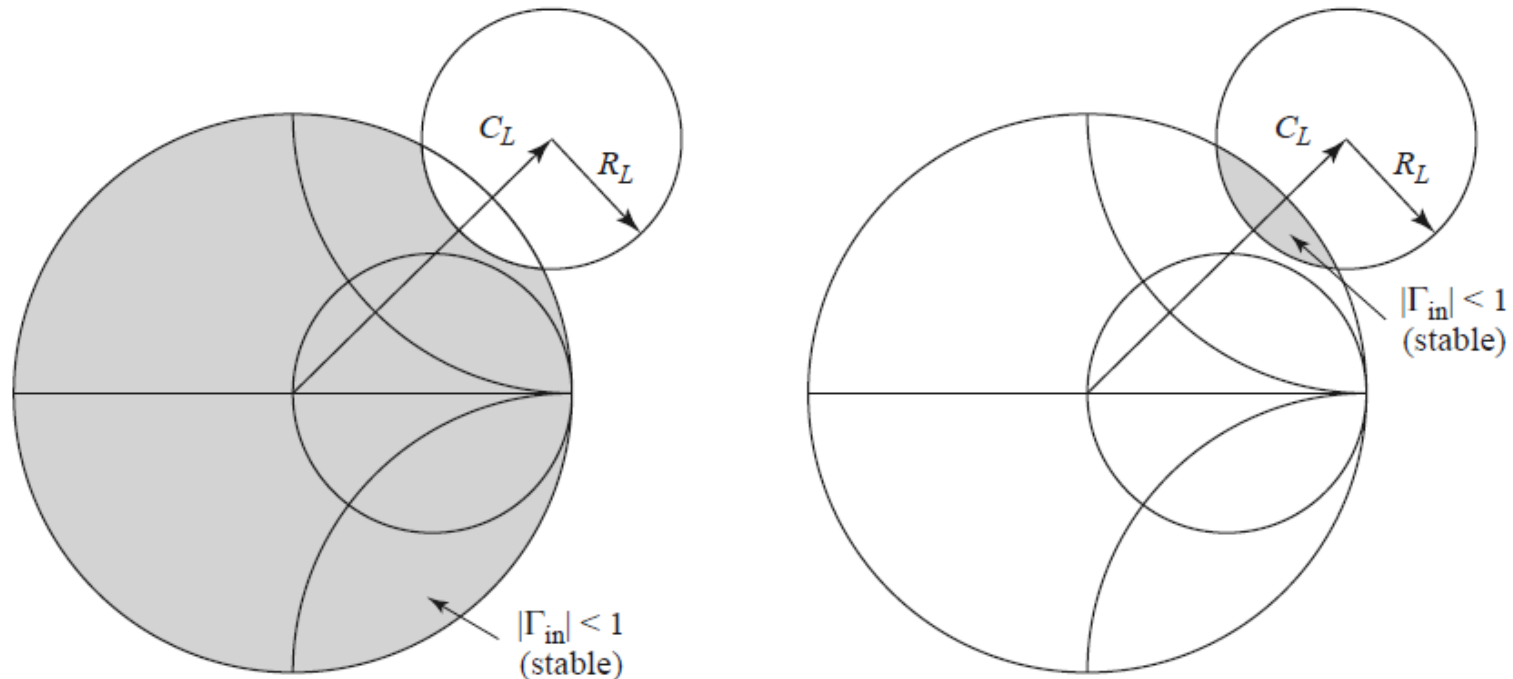
$$|\Gamma_{\text{out}}| = \left| S_{22} + \frac{S_{12}S_{21}\Gamma_S}{1 - S_{11}\Gamma_S} \right| = 1$$

- Obtém-se o centro C_S e o raio R_S do círculo de estabilidade das impedâncias de gerador que causam $\Gamma_{\text{out}} = 1$

$$C_S = \frac{(S_{11} - \Delta S_{22}^*)^*}{|S_{11}|^2 - |\Delta|^2} \quad \Delta = S_{11}S_{22} - S_{12}S_{21}$$
$$R_S = \left| \frac{S_{12}S_{21}}{|S_{11}|^2 - |\Delta|^2} \right|$$

Estabilidade do Transistor

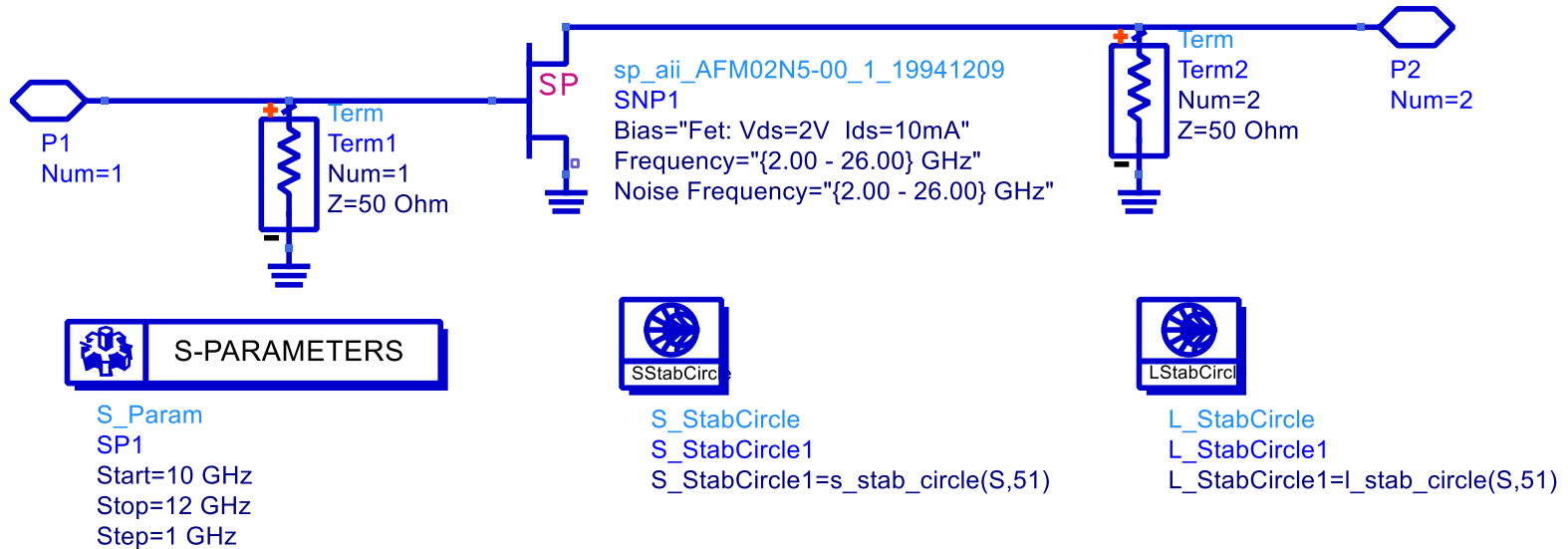
Exemplos de Círculos de Estabilidade de Saída



- É necessário testar se as impedâncias que causam instabilidade estão fora ou dentro do círculo
- Verifica-se se $Z_L = 50 \Omega \rightarrow \Gamma_{in} < 1$ ou $\Gamma_{in} > 1$

Atividade com o ADS

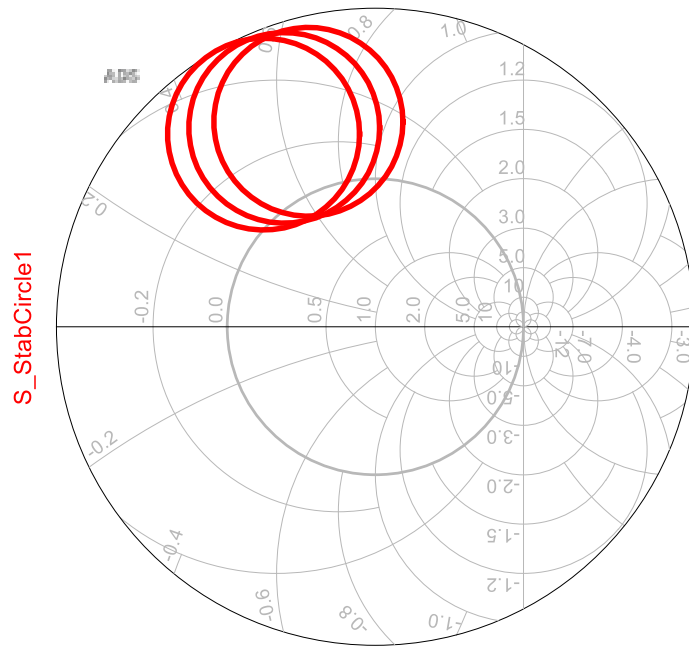
Círculos de estabilidade



- Traçar de estabilidade de entrada e de saída entre 10 e 12 GHz
- Analisar quais impedâncias podem causar instabilidade
- O transistor é incondicionalmente estável?
- Repita para frequências entre 2 e 26 GHz

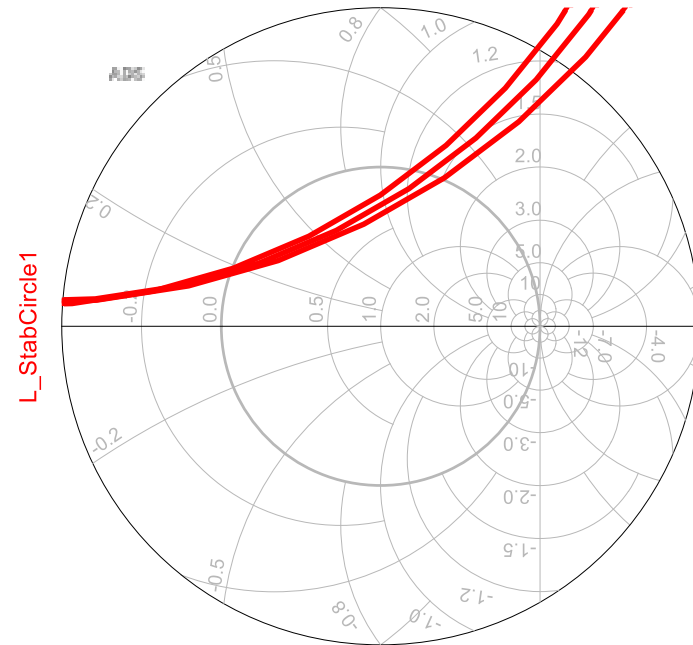
Atividade com o ADS

Círculos de estabilidade



indep(S_StabCircle1) (0.000 to 51.000)

Círculos de estabilidade de entrada
(Efeito de ZS, impedância da fonte)



indep(L_StabCircle1) (0.000 to 51.000)

Círculos de estabilidade de saída
(Efeito de ZL, impedância da carga)

Estabilidade do Transistor

Testes para estabilidade incondicional

Teste K e Δ

- Duas condições devem ser obedecidas simultaneamente
 - K - Fator de Estabilidade de Rollett

$$K = \frac{1 - |S_{11}|^2 - |S_{22}|^2 + |\Delta|^2}{2|S_{12}S_{21}|} > 1$$

e

- Módulo de Δ , sendo Δ o determinante da Matriz S.

$$|\Delta| = |S_{11}S_{22} - S_{12}S_{21}| < 1$$

Estabilidade do Transistor

Testes para estabilidade incondicional

Teste K e B1

- Duas condições devem ser obedecidas simultaneamente
 - K - Fator de Estabilidade de Rollett

$$K = \frac{1 - |S_{11}|^2 - |S_{22}|^2 + |\Delta|^2}{2|S_{12}S_{21}|} > 1$$

e

- B1 – medida de estabilidade

$$B_1 = 1 + |S_{11}|^2 - |S_{22}|^2 - |\Delta|^2 > 0$$

Estabilidade do Transistor

Testes para estabilidade incondicional

$$\mu = \frac{1 - |S_{11}|^2}{|S_{22} - \Delta S_{11}^*| + |S_{12}S_{21}|} > 1$$

Teste μ

- Distância do centro da carta de Smith até o ponto mais próximo do círculo de estabilidade de saída

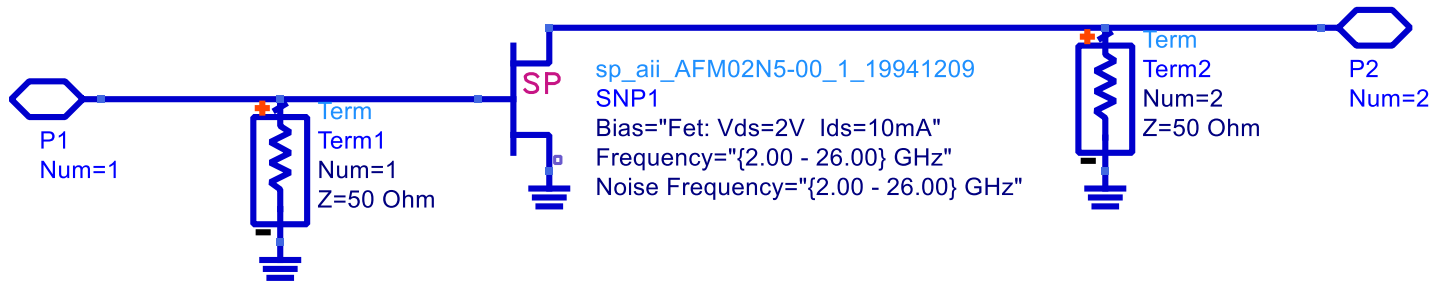
Teste μ_{prime}

- Distância do centro da carta de Smith até o ponto mais próximo do círculo de estabilidade de entrada

$$\mu > 1 \text{ ou } \mu_{\text{prime}} > 1$$

Modelos de Transistores de Micro-ondas

Atividade com o ADS



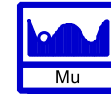
S_Param
SP1
Start=10 GHz
Stop=12 GHz
Step=1 GHz



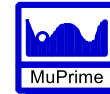
S_StabCircle
S_StabCircle1
S_StabCircle1=s_stab_circle(S,51)



L_StabCircle
L_StabCircle1
L_StabCircle1=l_stab_circle(S,51)



Mu
Mu1
Mu1=mu(S)



MuPrime
MuPrime1
MuPrime1=mu_prime(S)

- Simular um transistor de 2 a 26 GHz
- Traçar os parâmetros de estabilidade K , Δ , μ e μ_{prime}
- Analisar a estabilidade do transistor através dos testes:

$$K > 1 \text{ e } |\Delta| < 1$$

ou

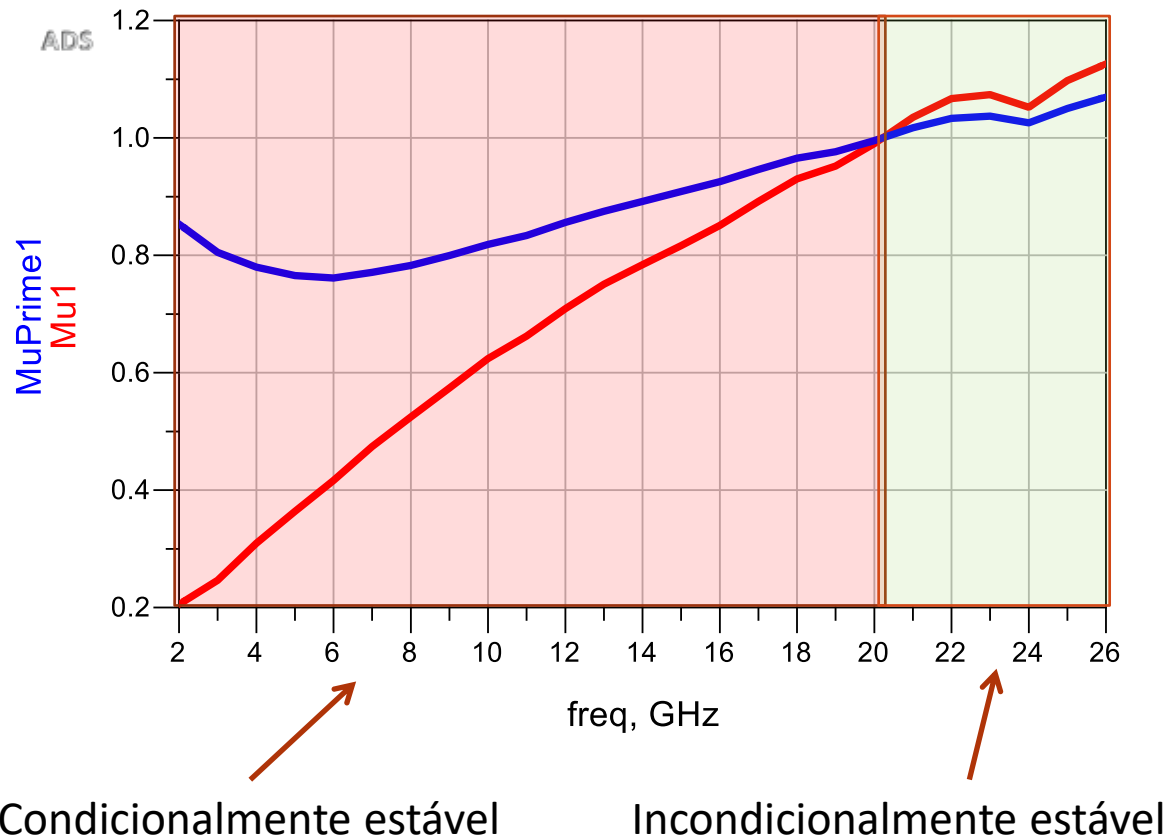
$$K > 1 \text{ e } B1 > 0$$

ou

$$\mu > 1 \text{ ou } \mu_{\text{prime}} > 1$$

Modelos de Transistores de Micro-ondas

$$\mu > 1 \text{ ou } \mu_{\text{prime}} > 1$$



Estabilização do Transistor

- No projeto do amplificador, deve-se analisar a estabilidade do transistor
 - Na banda de frequência do amplificador
 - Em toda a banda de operação do transistor
 - Objetivo → evitar oscilações “in band” e “out band”
- Se o transistor é incondicionalmente estável
 - Projeto das redes de casamento de impedância
- Se o transistor é condicionalmente estável
 - Estabilização do transistor
 - Projeto das redes de casamento de impedância

Estabilização do Transistor

Circuitos de estabilização do transistor

- Auxiliam na estabilidade
- Afetam parâmetros do transistor
 - Ganho
 - Figura de Ruído
 - Potência de saída
 - Linearidade
- Solução de compromisso
- Estabilidade x desempenho do amplificador
- Podem estabilizar o transistor
 - Em banda larga de frequência
 - Em frequências abaixo da banda do amplificador

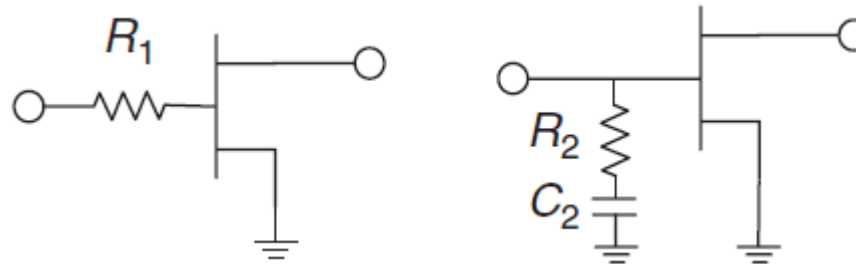
Estabilização do Transistor

Exemplos de circuitos de estabilização

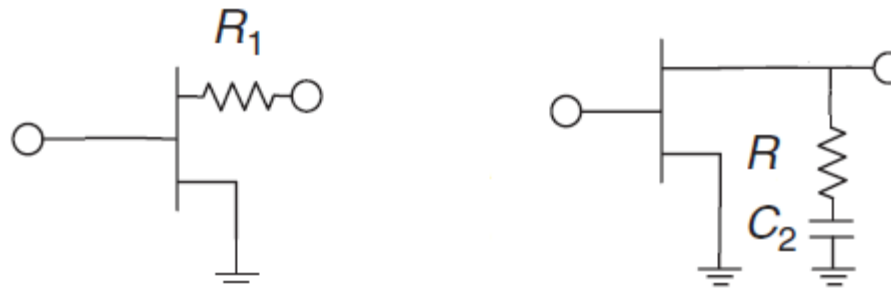
- Resistores conectados aos acessos do transistor
 - Atuam em banda larga de frequência
- Resistores com capacitores de *bypass* em paralelo
 - Estabilização do transistor em frequências abaixo da banda do amplificador
- Resistores associados a filtros de polarização
 - Estabilização do transistor em frequências abaixo da banda do amplificador

Estabilização do Transistor - Exemplos

- Resistor em série ou paralelo com a **entrada do transistor**
 - Desvantagem: aumenta a Figura de Ruído
 - Aplicações: amplificadores de ganho e de potência

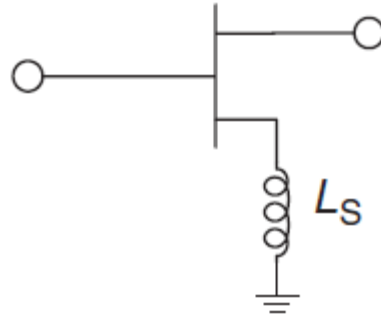


- Resistor em série ou paralelo com a **saída do transistor**
 - Desvantagem: reduz a potência de saída
 - Aplicações: amplificadores de ganho e de baixo ruído

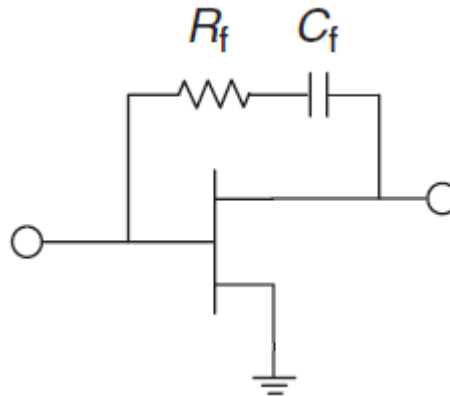


Estabilização do Transistor - Exemplos

- Realimentação série

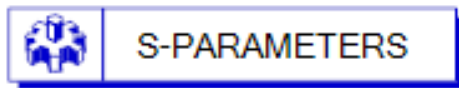
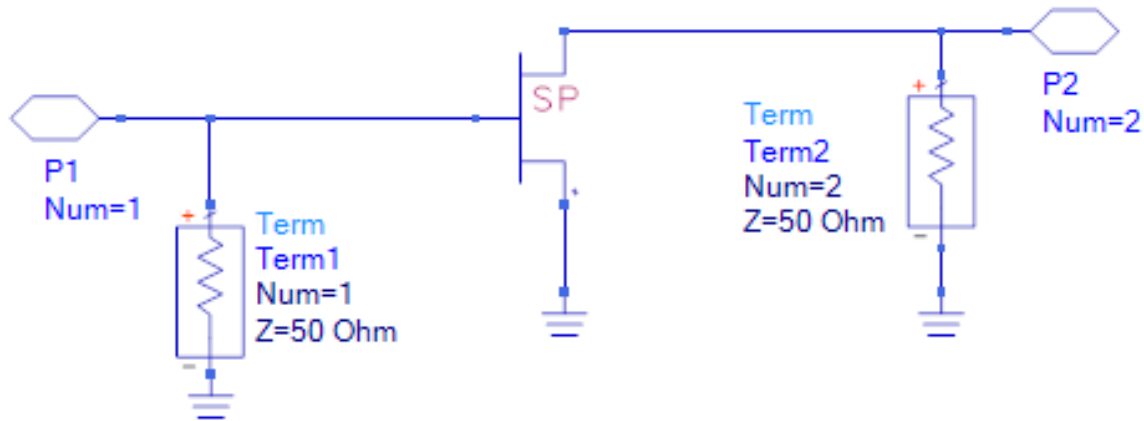


- Realimentação paralela



Estabilização do Transistor – Exemplos ADS

- Transistor FSX52WF da Fujitsu
- Círculos de Estabilidade @2 GHz



S_Param
SP1
Start=
Stop=
Step=



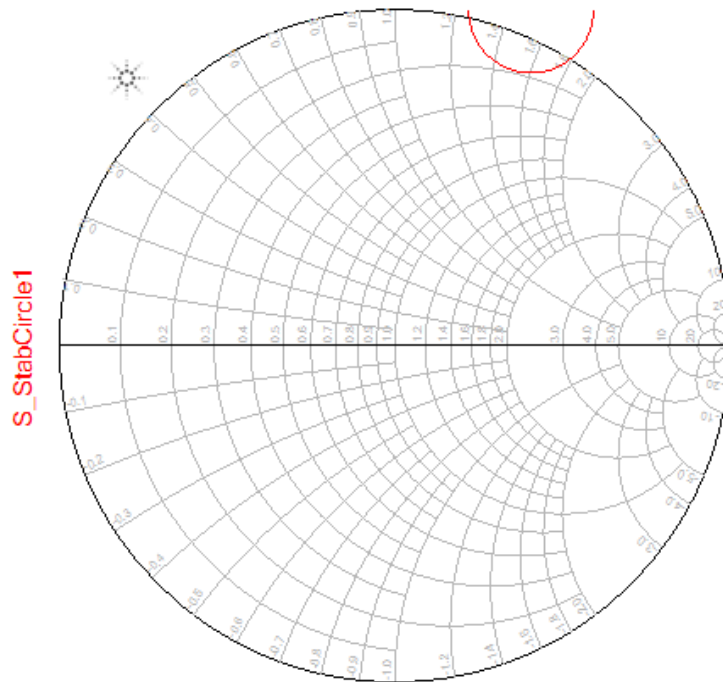
L_StabCircle
L_StabCircle1
L_StabCircle1=l_stab_circle(S,51)



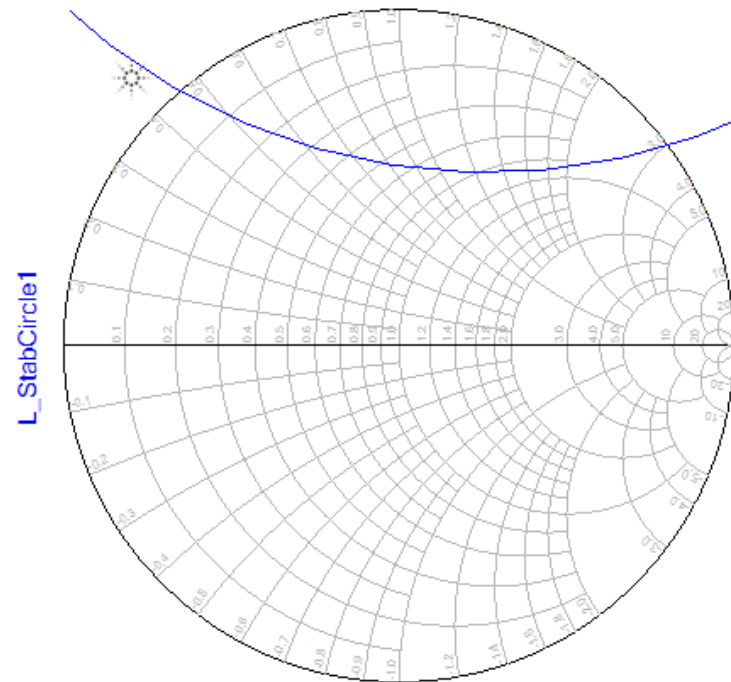
S_StabCircle
S_StabCircle1
S_StabCircle1=s_stab_circle(S,51)

Estabilização do Transistor – Exemplos ADS

- Transistor FSX52WF da Fujitsu
- Círculos de Estabilidade @2 GHz



indep(S_StabCircle1) (0.000 to 51.000)

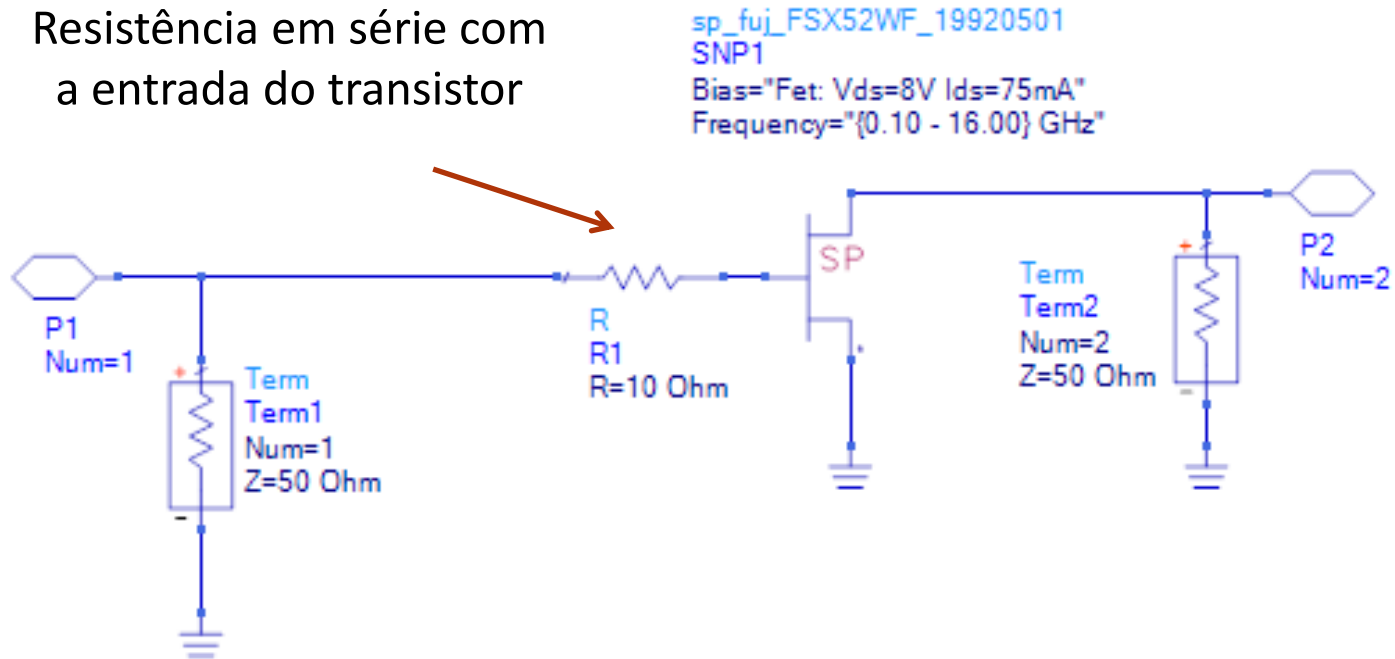


indep(L_StabCircle1) (0.000 to 51.000)

Estabilização do Transistor – Exemplos ADS

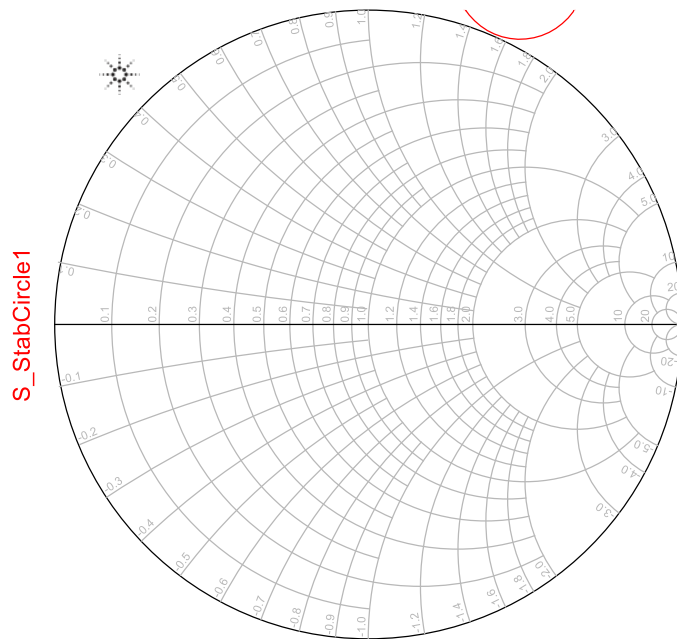
- Transistor FSX52WF da Fujitsu

Resistência em série com a entrada do transistor

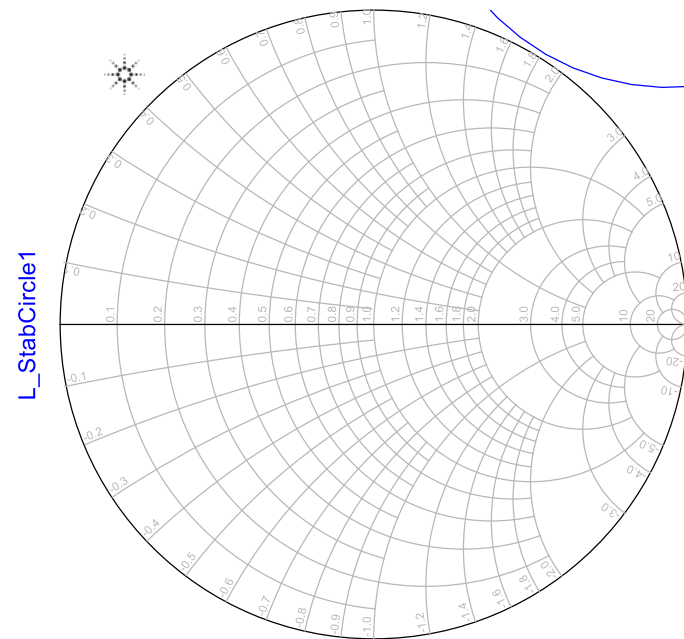


Estabilização do Transistor – Exemplos ADS

- Transistor FSX52WF da Fujitsu
- Círculos de Estabilidade @ 2 GHz
- Resistência em série com a porta do transistor



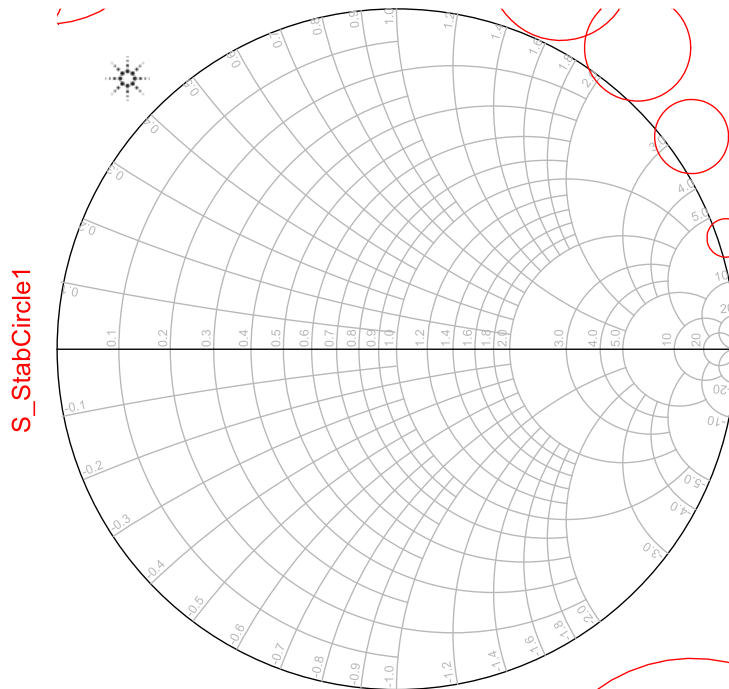
indep(S_StabCircle1) (0.000 to 51.000)



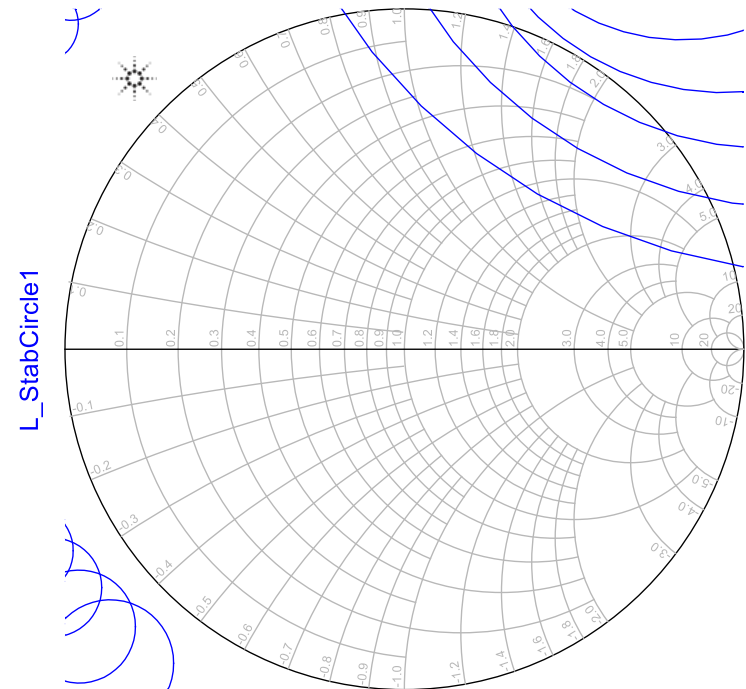
indep(L_StabCircle1) (0.000 to 51.000)

Estabilização do Transistor – Exemplos ADS

- Transistor FSX52WF da Fujitsu
- Círculos de Estabilidade – 0,5 a 16 GHz
- Resistência em série com a porta do transistor



indep(S_StabCircle1) (0.000 to 51.000)



indep(L_StabCircle1) (0.000 to 51.000)

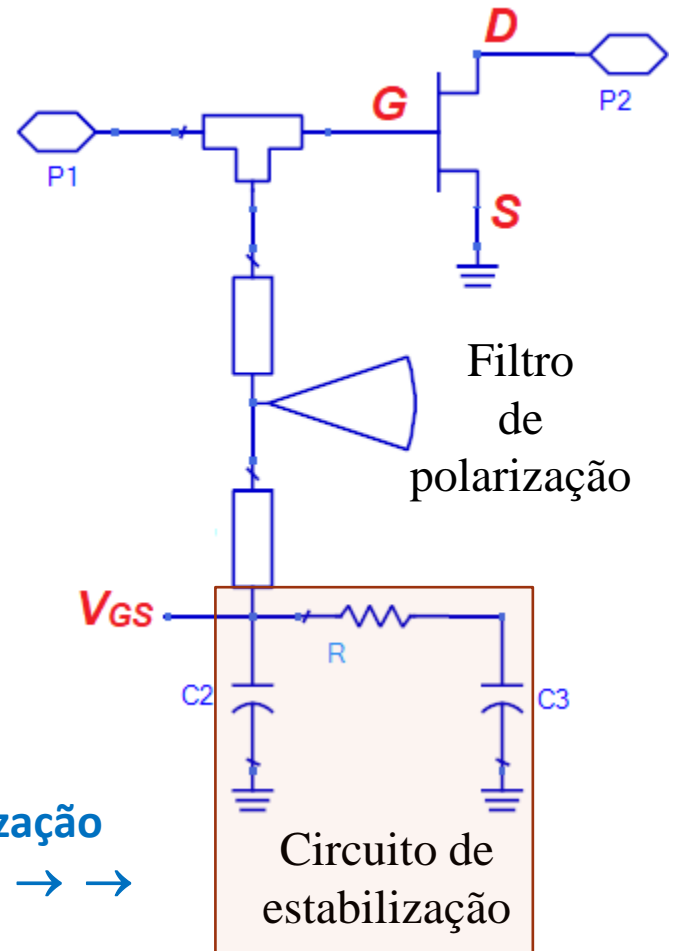
Modelos de Transistores de Micro-ondas

Estabilização do transistor via o filtro de polarização

- Usado para estabilizar o transistor em baixas frequências

Circuito de estabilização

- Conectado ao filtro de polarização, em paralelo com C1 que tem baixa reatância na banda de operação desejada
- Resistor R, geralmente de 50Ω
- Capacitor C3 com baixa reatância na faixa de frequência a ser estabilizada

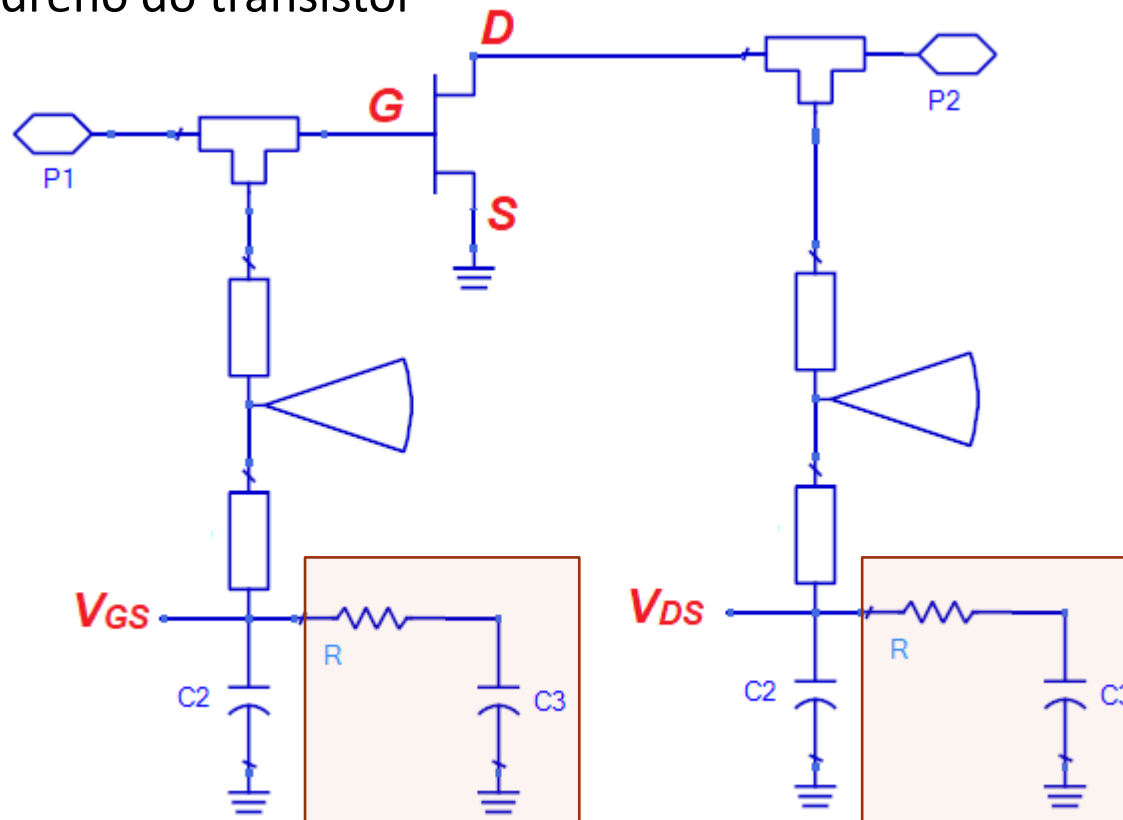


**Exemplo de circuito de estabilização
na entrada do transistor → → → →**

Modelos de Transistores de Micro-ondas

Estabilização do transistor via o filtro de polarização

Exemplo de circuito de estabilização usando filtros de polarização da porta e no dreno do transistor

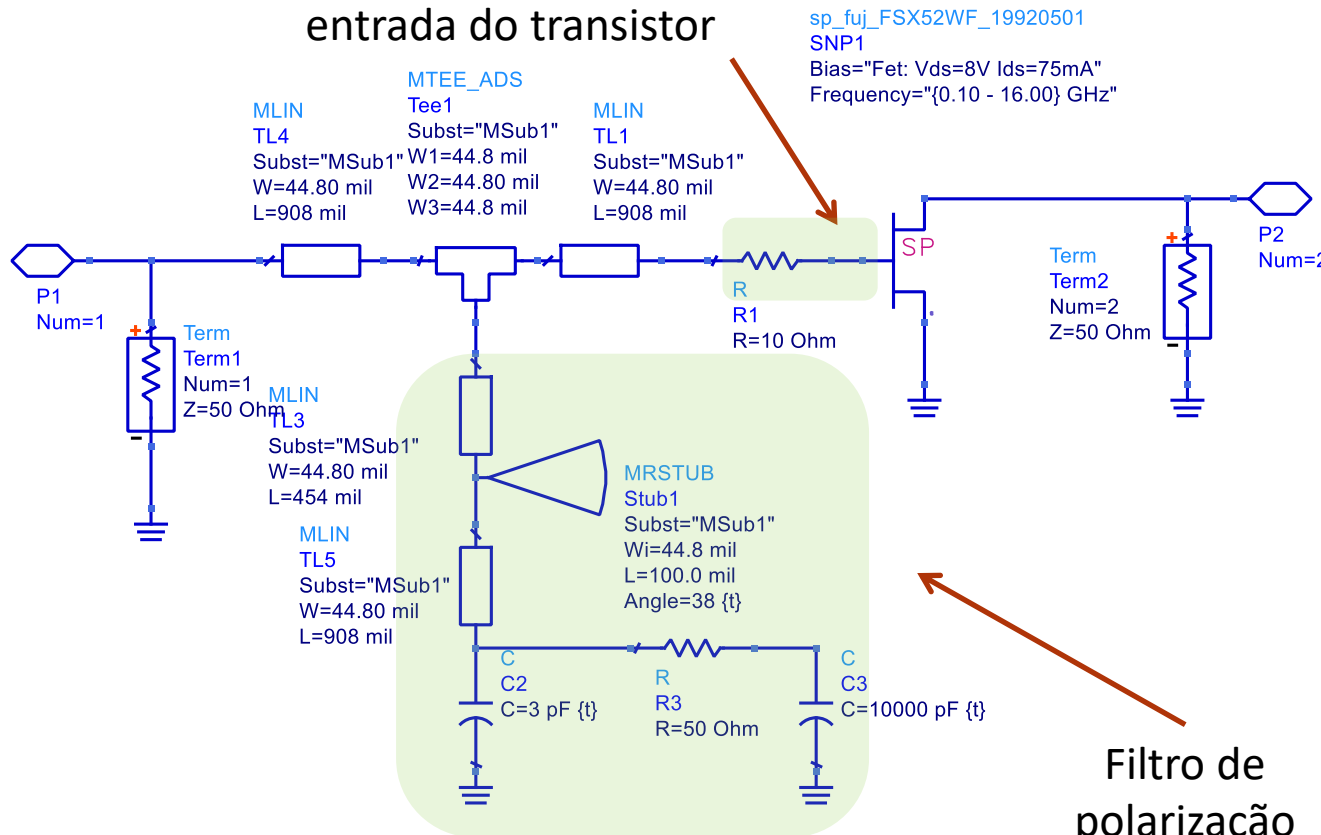


Circuitos de estabilização

Estabilização do Transistor – Exemplos ADS

- Transistor FSX52WF da Fujitsu

Resistência em série com a entrada do transistor



S-PARAMETERS

S_Param
SP1
Start=0.5 GHz
Stop=16 GHz
Step=0.5 GHz

LStabCircle

L_StabCircle
L_StabCircle1
L_StabCircle1=l_stab_circle(S,51)

SStabCircle

S_StabCircle
S_StabCircle1
S_StabCircle1=s_stab_circle(S,51)

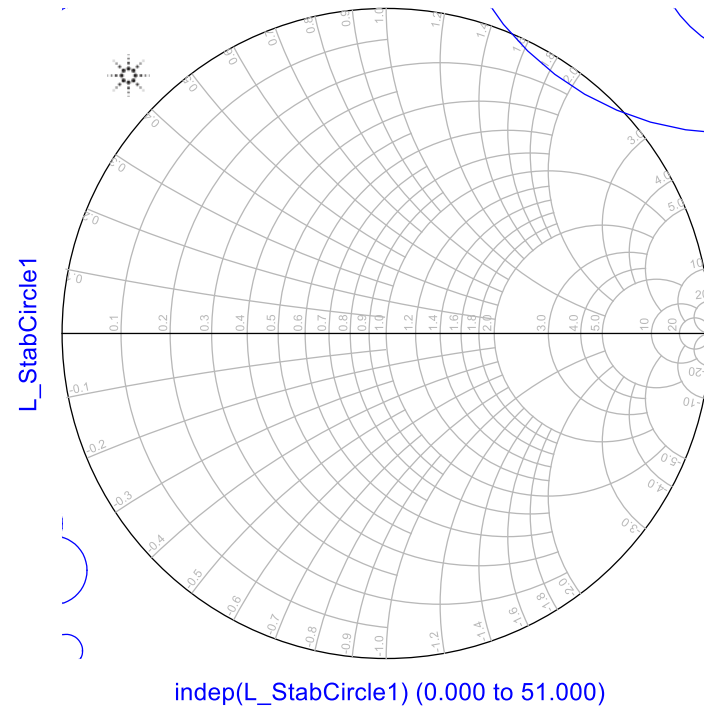
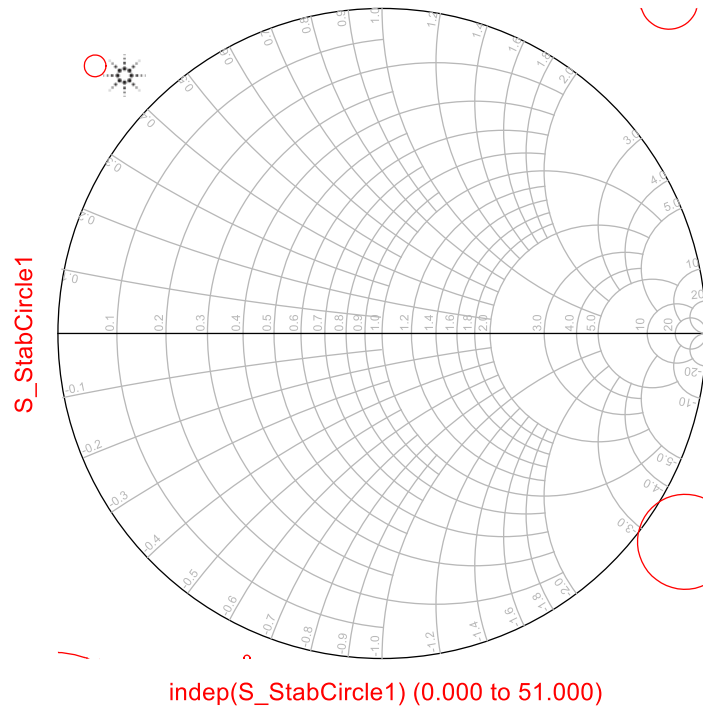
MSub

MSUB
MSub1
H=20 mil
Er=3.38
Mur=1
Cond=1.0E+50
Hu=3.9e+034 mil
T=35 um
TanD=0.0027
Rough=0 mil

Filtro de polarização

Estabilização do Transistor – Exemplos ADS

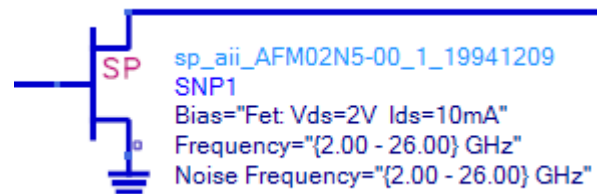
- Transistor FSX52WF da Fujitsu
- Círculos de Estabilidade – 0,5 a 16 GHz
- Resistência em série com a portado transistor + filtro de polarização



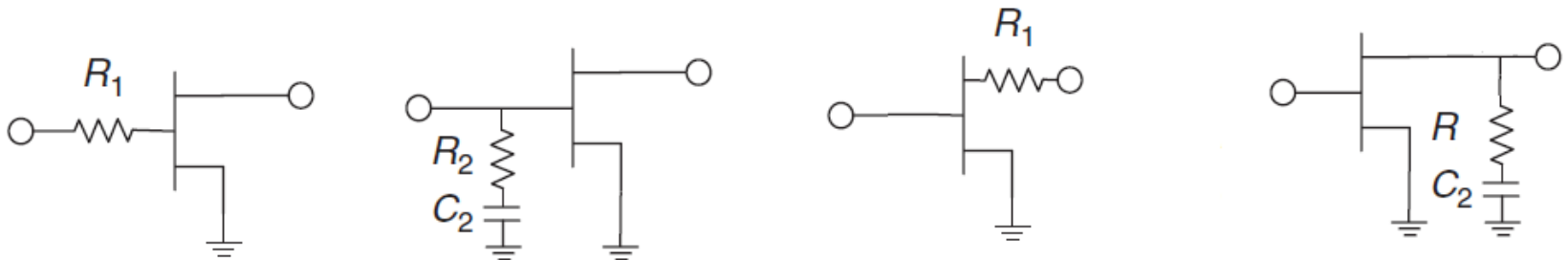
Modelos de Transistores de Micro-ondas

Atividade com o ADS

- Estude a estabilização do transistor AFM02N5-00



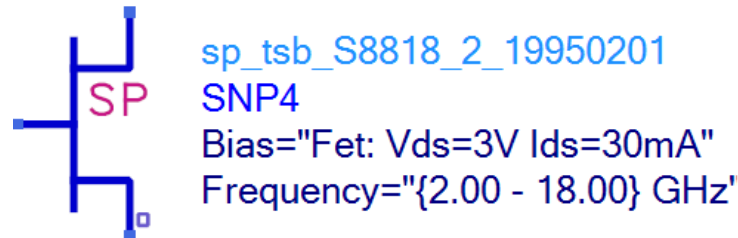
- Teste o efeito dos circuitos abaixo
 - Utilize C_2 tal que sua reatância seja desprezível em 2 GHz



Modelos de Transistores de Micro-ondas

Transistor Toshiba S8818

- Projeto de um amplificador operando em 5 GHz
- Transistor na biblioteca do ADS, com $V_{ds} = 3\text{ V}$ e $I_{ds} = 30\text{ mA}$



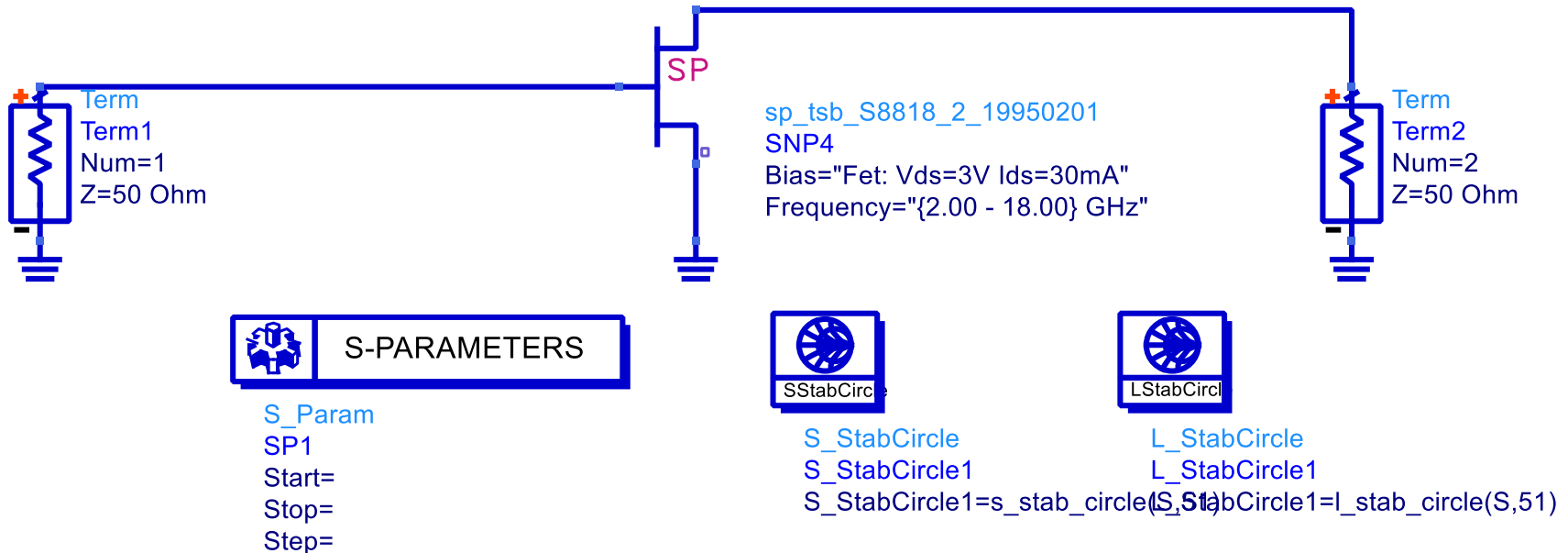
Primeira etapa do projeto

- Estabilizar o transistor em 5 GHz, afetando o menos possível seu ganho@ $50\ \Omega$, S_{21} (dB)
- Elementos de estabilização a serem usados:
- Resistência em série com a entrada do transistor
- Filtro de polarização da porta do transistor

Moelos de Transistores de Micro-ondas

Transistor Toshiba S8818

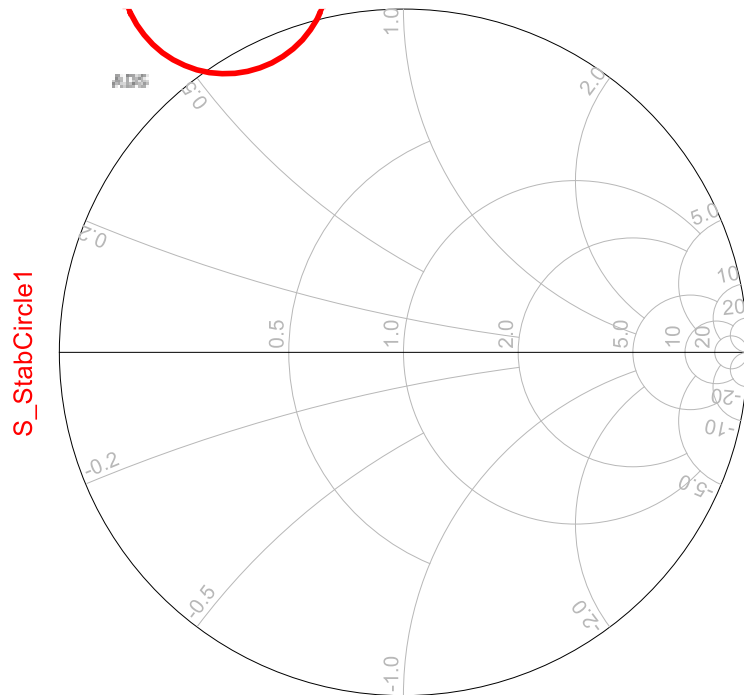
- Trace os círculos de estabilidade de entrada e saída em 5 GHz



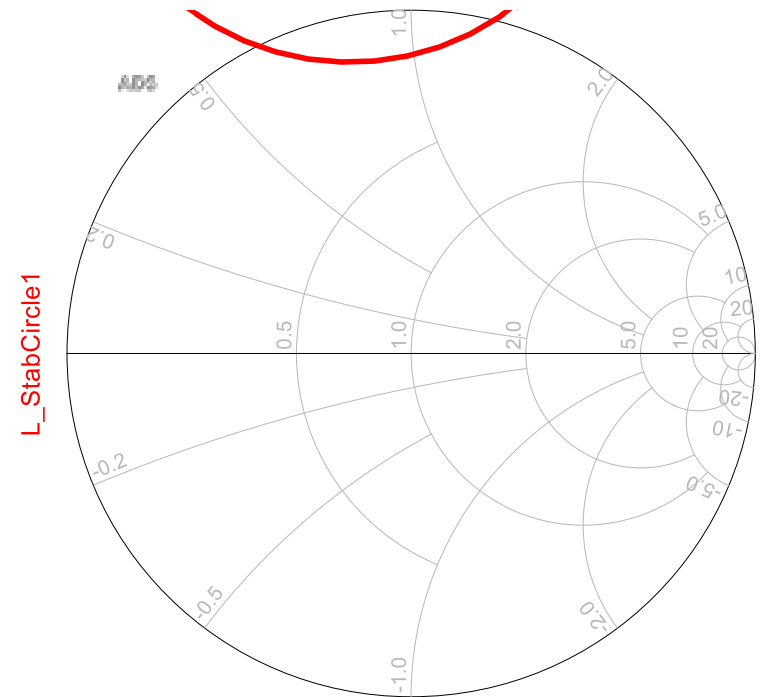
Modelos de Transistores de Micro-ondas

Transistor Toshiba S8818

Círculos de Estabilidad @5 GHz



indep(S_StabCircle1) (0.000 to 51.000)



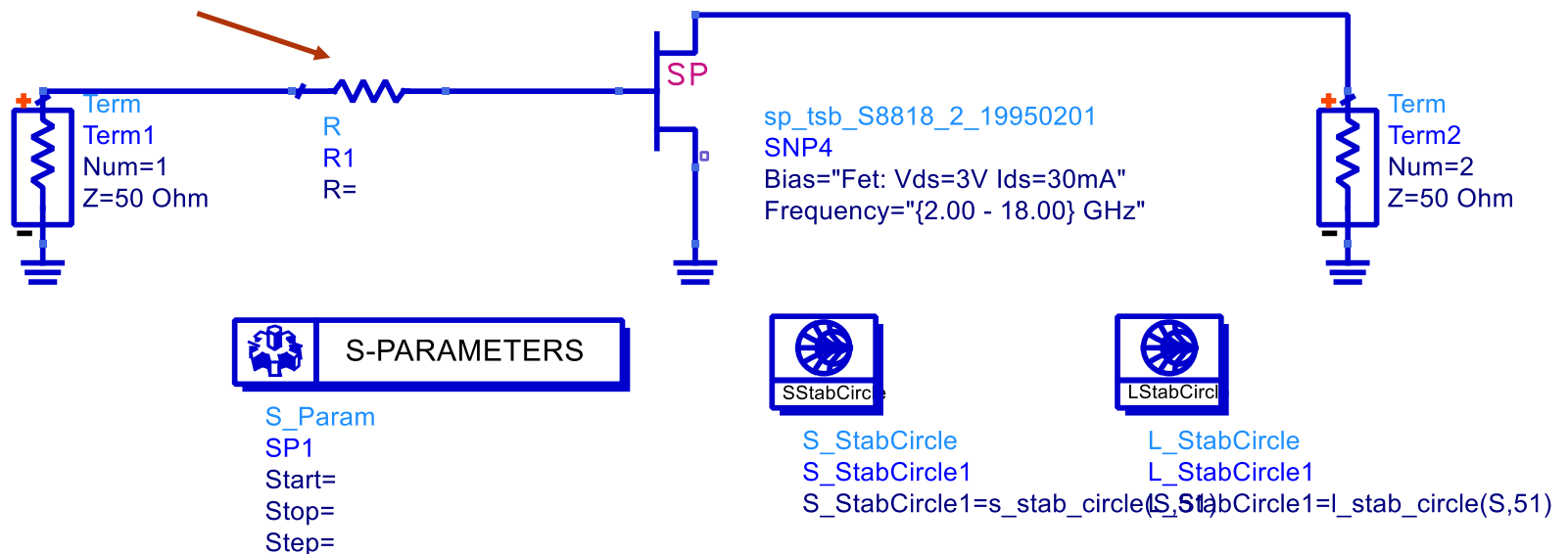
indep(L_StabCircle1) (0.000 to 51.000)

Modelos de Transistores de Micro-ondas

Transistor Toshiba S8818

- 1) Ajuste o resistor R1 para o mínimo valor que estabilize o transistor em 5 GHz
- 2) Verifique como o resistor de estabilização afetou S_{21} (dB)

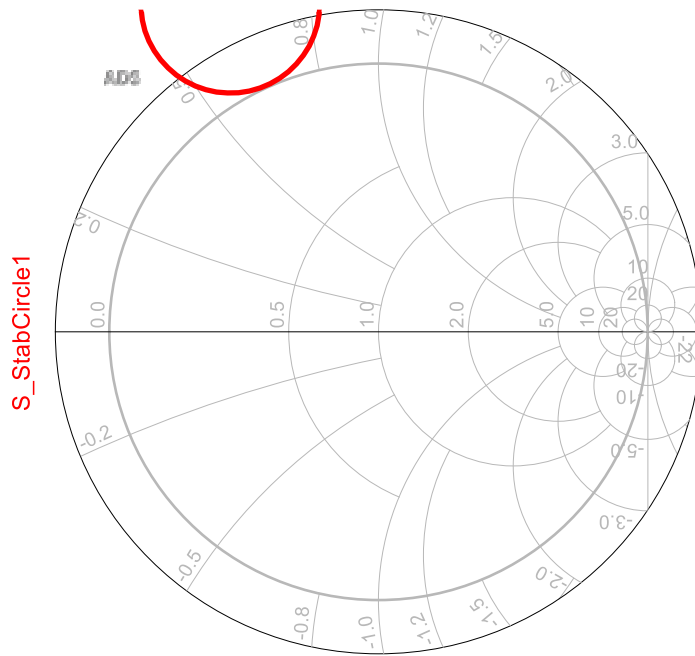
Resistância em série com a entrada do transistor



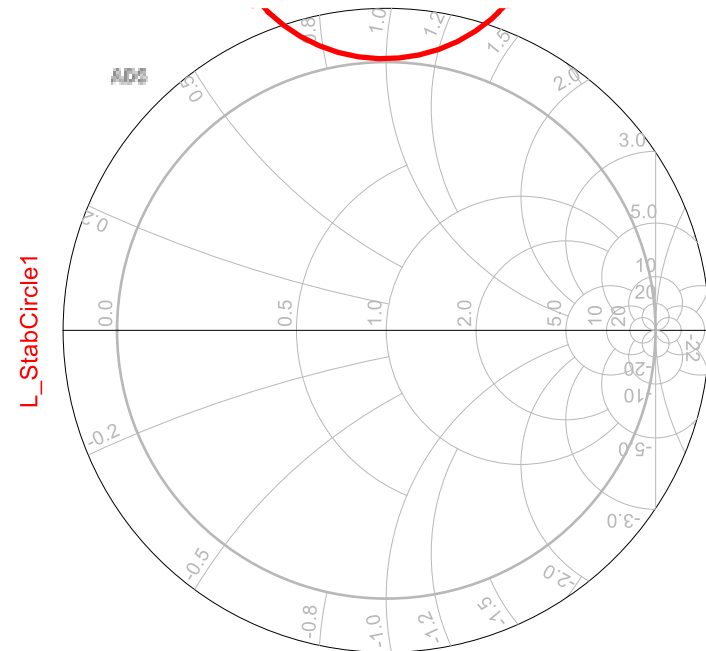
Modelos de Transistores de Micro-ondas

Transistor Toshiba S8818

- Círculos de Estabilidade @ 5 GHz
- Resistência de 3Ω em série com a porta do transistor



indep(S_StabCircle1) (0.000 to 51.000)

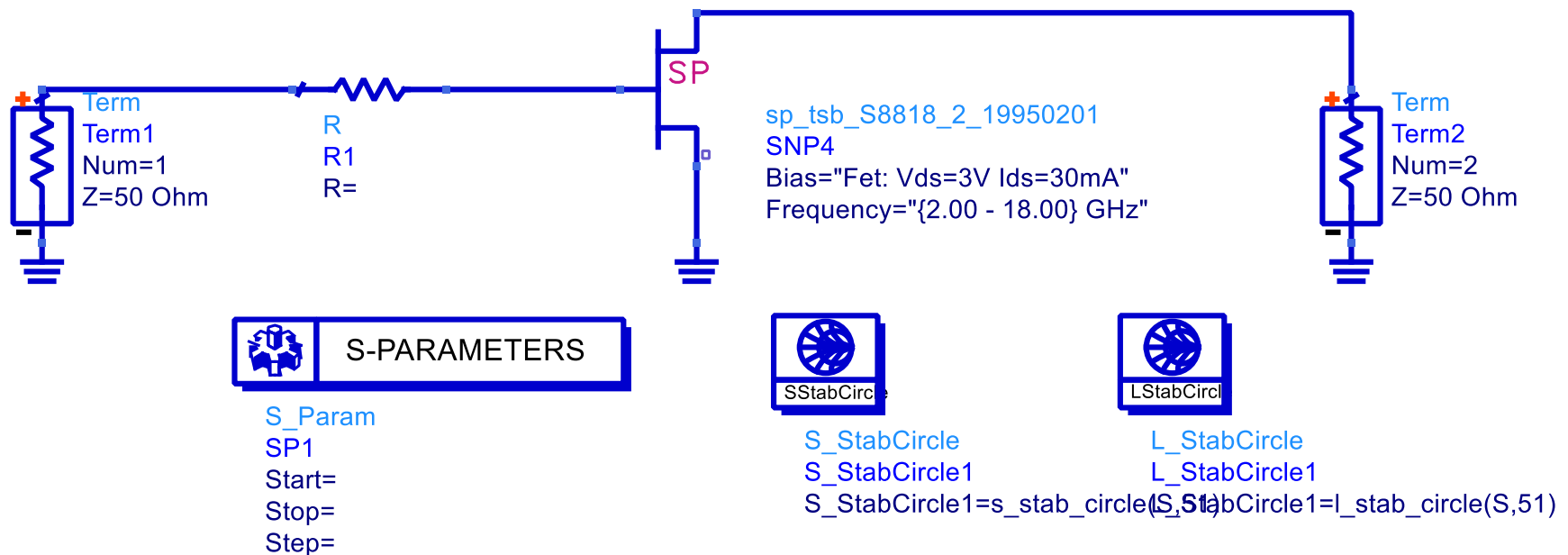


indep(L_StabCircle1) (0.000 to 51.000)

Modelos de Transistores de Micro-ondas

Transistor Toshiba S8818

- Verifique os círculos de estabilidade de 2 a 18 GHz
- Reajuste o resistor R1 para o mínimo valor que estabilize o transistor de 2 a 18 GHz
- O que ocorreu com S21(dB)?



Modelos de Transistores de Micro-ondas

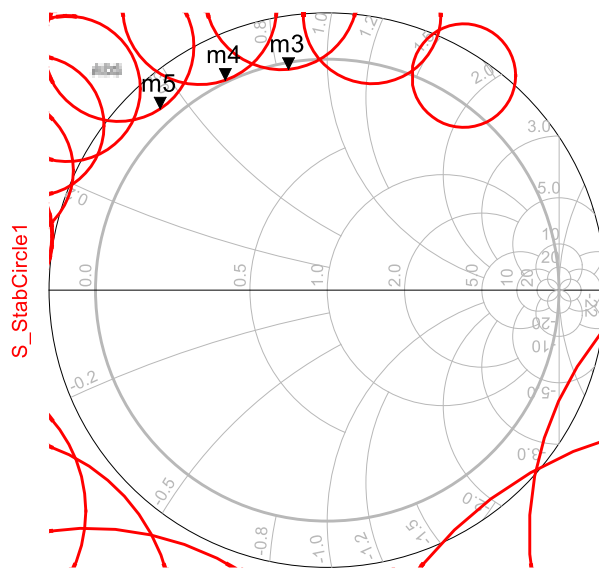
Transistor Toshiba S8818

- Círculos de Estabilidade – 2 a 18 GHz
- Resistência em série com a porta do transistor se 3Ω

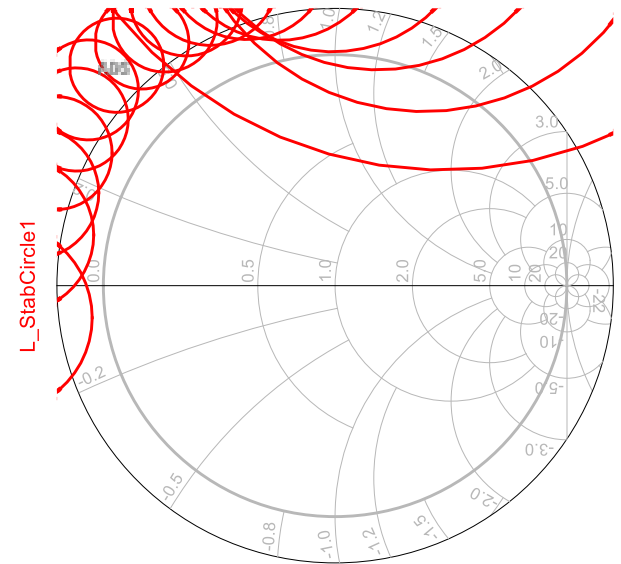
m3
indep(m3)=39
S_StabCircle1=0.970 / 99.928
freq=4.000GHz
impedance = $Z_0 * (0.026 + j0.840)$

m4
indep(m4)=41
S_StabCircle1=1.010 / 115.832
freq=5.000GHz
impedance = $Z_0 * (-0.007 + j0.627)$

m5
indep(m5)=43
S_StabCircle1=1.065 / 132.567
freq=6.000GHz
impedance = $Z_0 * (-0.038 + j0.439)$



indep(S_StabCircle1) (0.000 to 51.000)



indep(L_StabCircle1) (0.000 to 51.000)

Modelos de Transistores de Micro-ondas

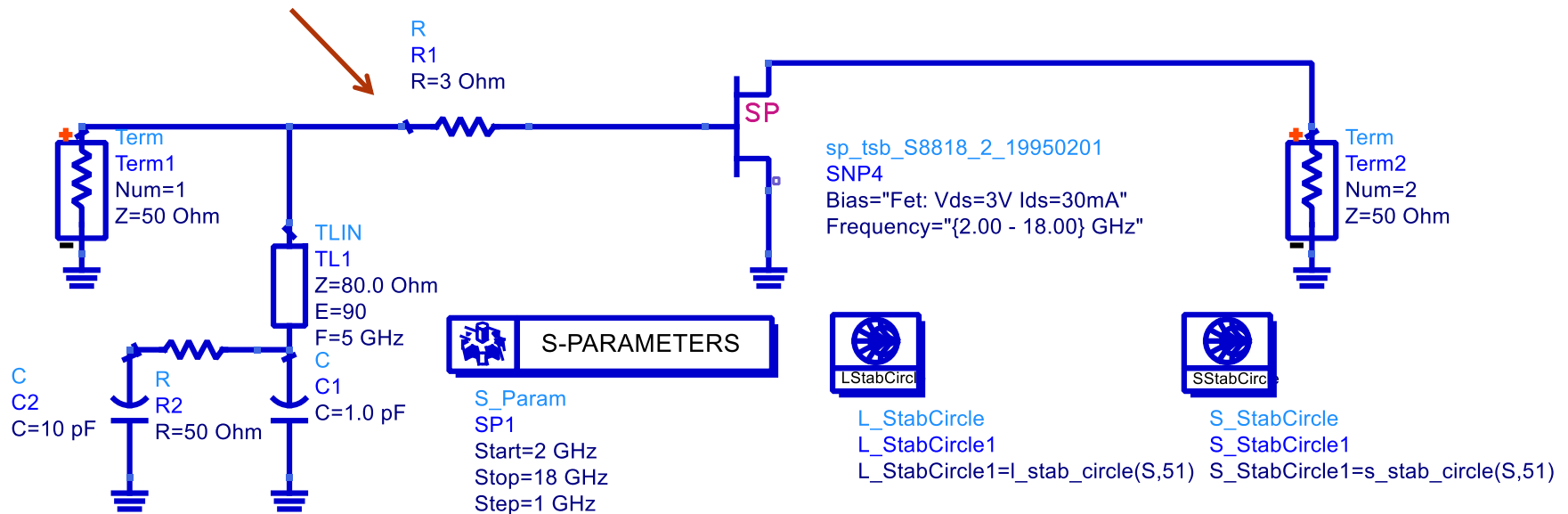
Transistor Toshiba S8818

- Em quais frequência o transistor é condicionalmente estável usando $R1 = 2 \Omega$?
- Verifique que o valor de $R1$ é necessário para estabilizar o transistor em banda larga.
- Verifique qual o impacto desse valor de $R1$ em $S21(\text{dB})$ do transistor
- Mantenha $R1$ em 3Ω e estabilize o transistor em baixa frequência usando o filtro de alimentação de porta
- Verifique o valor de $S21(\text{dB})$ do transistor em 5 GHz nessa última condição

Modelos de Transistores de Micro-ondas

Transistor Toshiba S8818

Resistência em série com a entrada do transistor



Filtro de polarização com elementos ideais

Modelos de Transistores de Micro-ondas

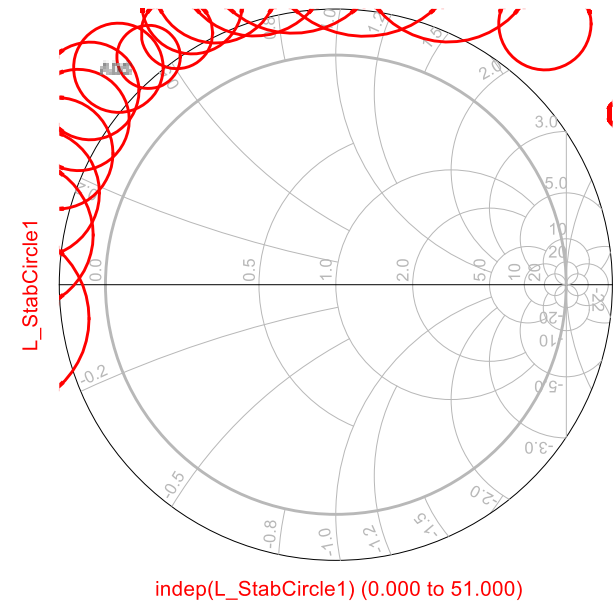
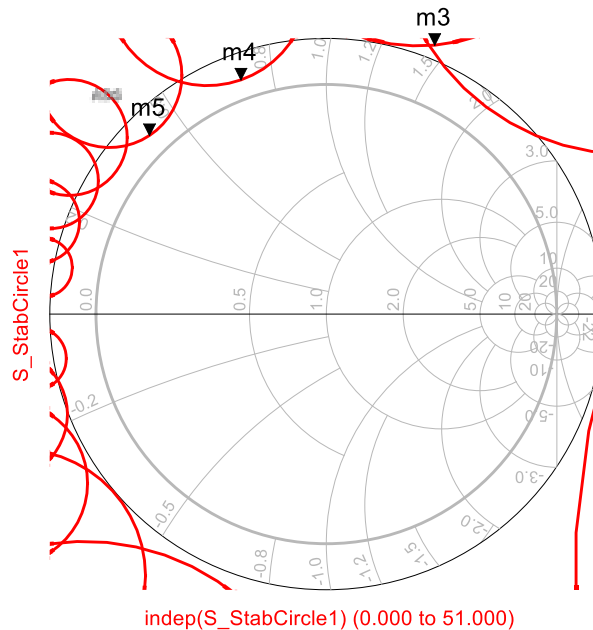
Transistor Toshiba S8818

- Círculos de Estabilidade – 2 a 18 GHz
- Resistência em série com a portado transistor + filtro de polarização

m3
indep(m3)=39
S_StabCircle1=1.262 / 68.115
freq=4.000GHz
impedance = Z0 * (-0.358 + j1.418)

m4
indep(m4)=41
S_StabCircle1=1.085 / 109.959
freq=5.000GHz
impedance = Z0 * (-0.061 + j0.699)

m5
indep(m5)=43
S_StabCircle1=1.092 / 134.637
freq=6.000GHz
impedance = Z0 * (-0.052 + j0.417)



Modelos de Transistores de Micro-ondas

Modelos de Transistores de Micro-ondas

Estabilização do transistores com componentes reais

Após a escolha de um circuito de estabilização usando componentes ideais deve-se considerar efeitos reais, como segue

- Substituir componentes do circuito de estabilização (resistores, capacitores e indutores) por seus parâmetros de espalhamento para considerar na simulação os efeitos parasitas que afetam o desempenho dos mesmos em frequências de micro-ondas
- Incluir no circuito esquemático os trechos de linha de transmissão usados para interligar o transistor e componentes de estabilização, de modo que a simulação considere defasagens no sinal de micro-ondas introduzidas pelas conexões de comprimento físico não nulo