



PSI 358 I - Circuitos de Micro-ondas

# Osciladores de Micro-ondas

Profa. Fatima Salete Correra

# Osciladores de Micro-ondas

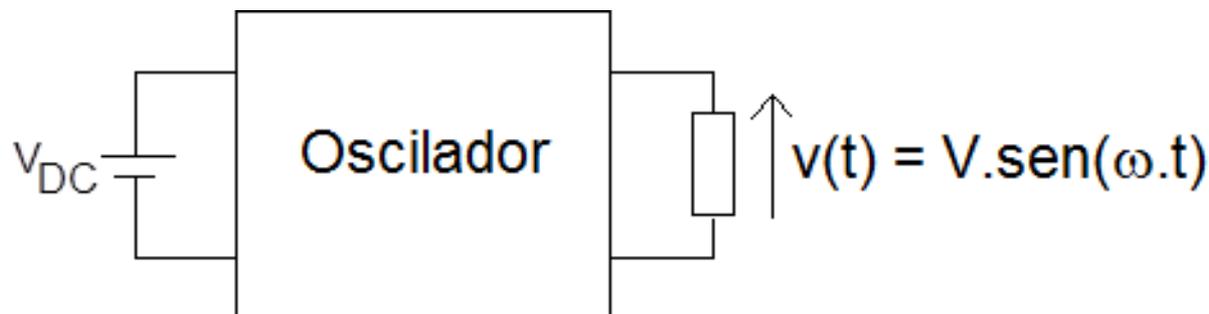
## Sumário

- Introdução
- Teoria de osciladores a resistência negativa
- Projeto de osciladores a transistor
- Simulação de grandes sinais

# Osciladores de Micro-ondas

## Introdução

- Conceito de oscilador → conversor DC/RF



- Função dos osciladores
  - Geram as frequências de operação de sistemas
- Aplicações
  - Sistemas de telecomunicações (terrestre e via satélite)
  - Telemetria (radiômetros, radares, pedágio eletrônico, etc)
  - Defesa e guerra eletrônica (comunicações militares, mísseis teleguiados)
  - Industrial (fornos de secagem, fornos domésticos)

# Osciladores de Micro-ondas

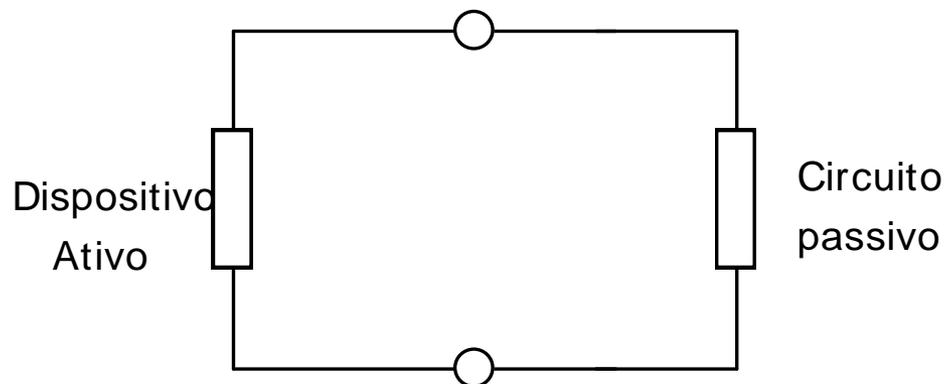
## Introdução

- Tipos de osciladores
  - Frequência fixa
  - Sintonizável (mecânica ou eletronicamente)
  - Baixo ruído de fase
- Principais parâmetros de osciladores
  - Frequência de oscilação
  - Potência de saída
  - Rendimento RF/DC
  - Pureza espectral (ruído AM e FM, geração de harmônicas)
  - Estabilidade (com temperatura, variação da polarização, etc)
  - Faixa de sintonia de frequência
  - Sensibilidade de sintonia de frequência

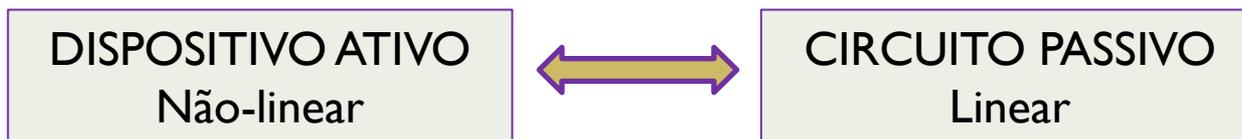
# Osciladores de Micro-ondas

## Introdução

- Diagrama de blocos do oscilador



- Princípio de funcionamento
  - Interação não-linear



# Osciladores de Micro-ondas

## Introdução

- Dispositivo ativo
  - Válvulas
    - Klystron, TWT, Magnetron
    - Uso em osciladores de média e alta potência
    - Geram de centenas Watts a Megawatts
  - Dispositivos a estado sólidos
    - Diodos GUNN e IMPATT
    - Transistores Bipolar, MESFET, HEMT e HBT
    - Uso em osciladores de baixa potência
    - Geram de miliwatts a dezenas de Watts

# Osciladores de Micro-ondas

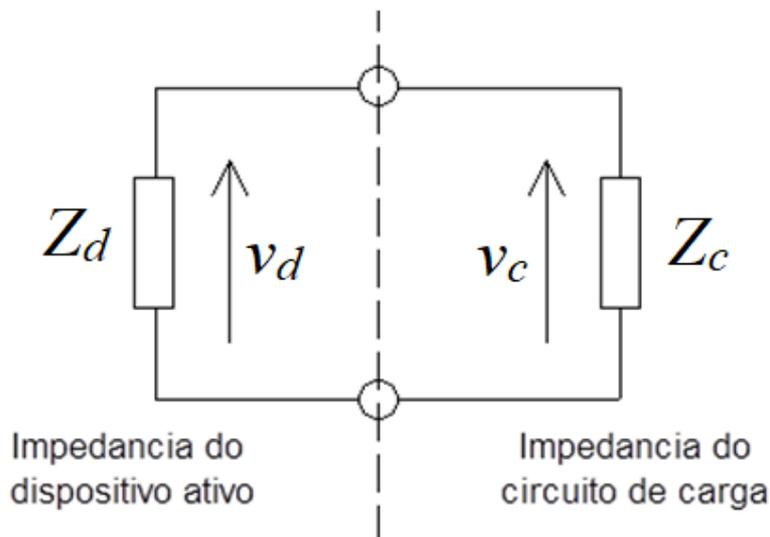
## Introdução

- Circuito passivo
  - Inclui
    - Circuitos de realimentação
    - Circuito ressonante (circuito “tanque”)
  - Cria a condição necessária à oscilação
  - Determina a frequência de oscilação
  - Emprega
    - Linhas de transmissão, como microfita
    - Ressorador dielétrico
    - Ressorador a cavidade em guia de onda ou coaxial
    - Ressorador SAW
    - Circuito supercondutor
    - Elementos de sintonia, como varactor, esfera YIG

# Osciladores de Micro-ondas

## Teoria de Osciladores a Resistência Negativa

- Proposta por Kurokawa
  - Adequada para análise de osciladores de micro-ondas
  - Compatível com outros tipos de análise de osciladores
- Representação do oscilador



$Z_c$  linear

$$Z_c = R_c + j \cdot X_c = Z(\omega)$$

$Z_d$  não-linear

$$Z_d = R_d + j \cdot X_d = Z(A, \omega)$$

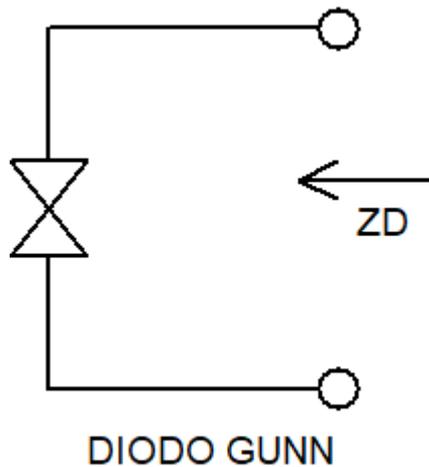
$R_d < 0$  em pequenos sinais

$\omega$ : frequência do sinal de RF  
 $A$ : amplitude do sinal de RF

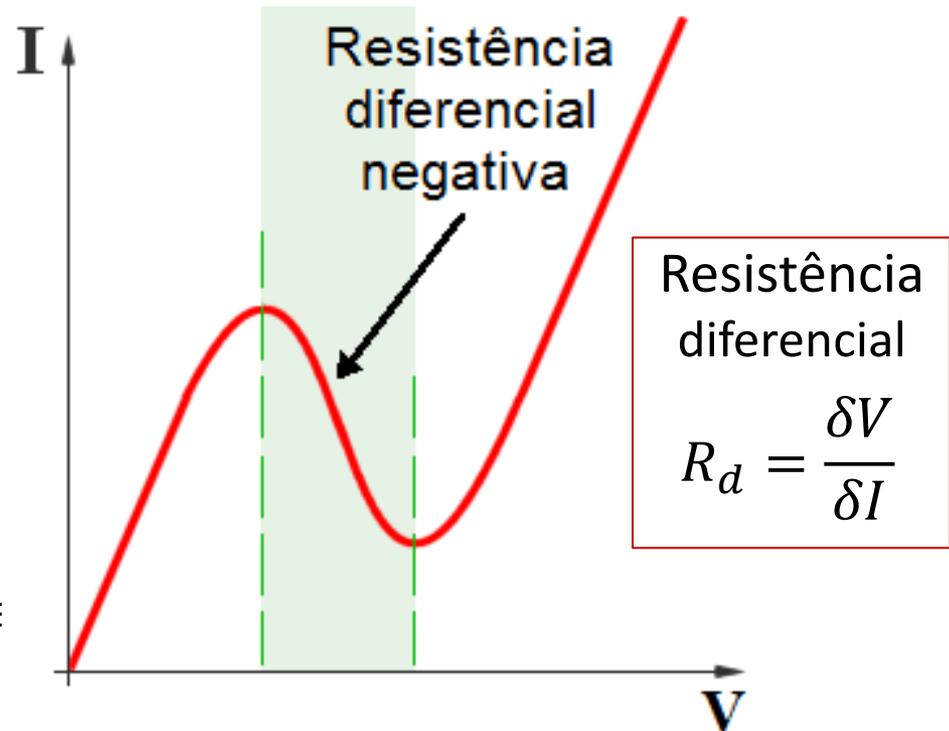
# Osciladores de Micro-ondas

## Teoria de Osciladores a Resistência Negativa

- Exemplos de dispositivos ativos com resistência negativa



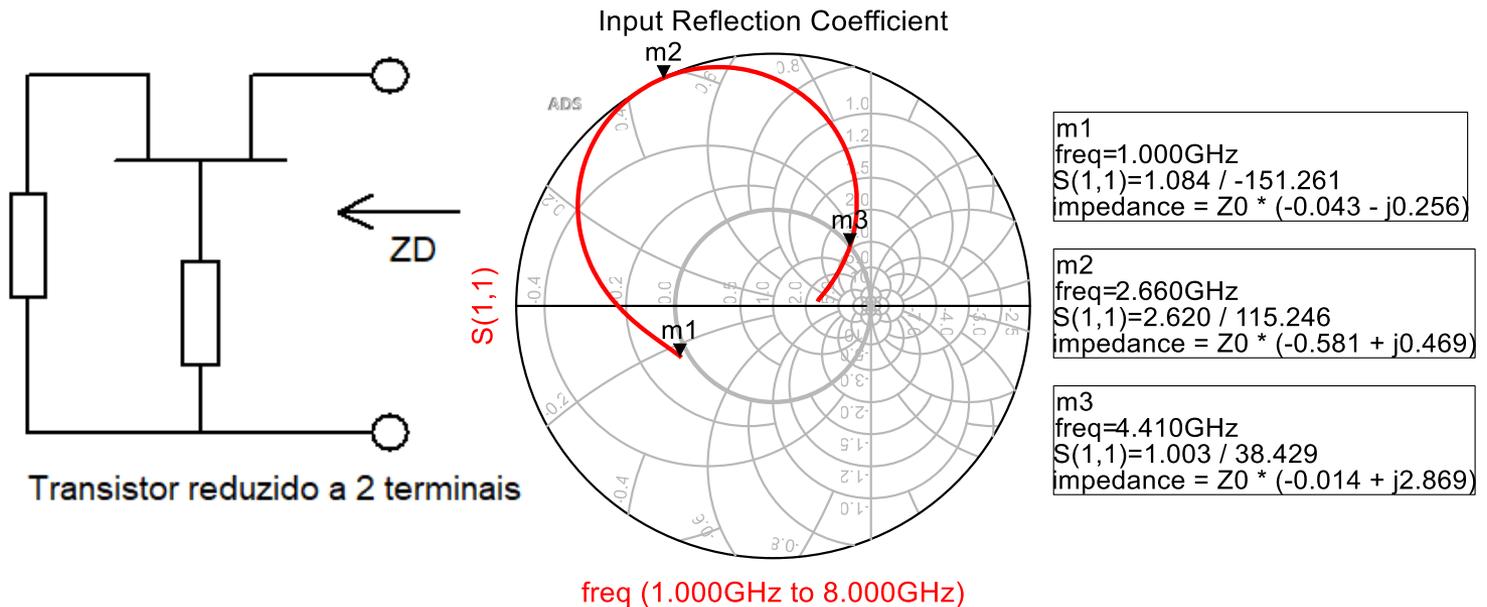
Diodo GUNN – resistência diferencial negativa depende da tensão de polarização



# Osciladores de Micro-ondas

## Teoria de Osciladores a Resistência Negativa

- Exemplos de dispositivos ativos com resistência negativa



Transistor – resistência negativa obtida usando

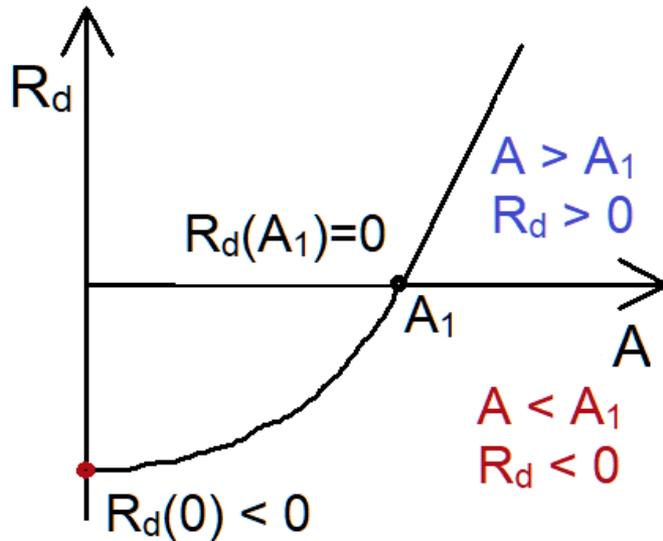
- Circuitos de realimentação. e/ou Impedâncias de terminação adequadas

# Osciladores de Micro-ondas

## Teoria de Osciladores a Resistência Negativa

- Curva típica de resistência negativa em função da **amplitude  $A$**  de corrente do dispositivo ativo

$$i(t) = A \cdot \text{sen}(\omega t + \varphi)$$

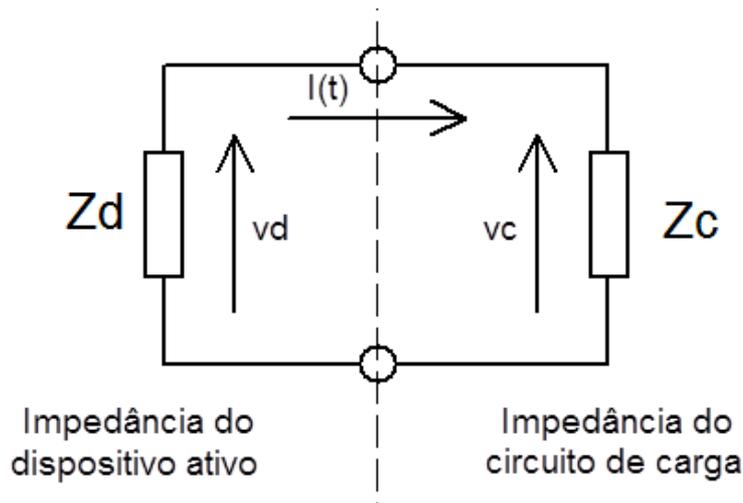


- Em pequenos sinais  $\rightarrow R_d < 0$
- Aumento da amplitude de corrente  $\rightarrow R_d$  tende a crescer
- Em  $A = A_1 \rightarrow R_d = 0$
- Amplitude de corrente  $A > A_1 \rightarrow R_d > 0$

# Osciladores de Micro-ondas

## Teoria de Osciladores a Resistência Negativa

- Causa do início da oscilação
  - Ruído do próprio dispositivo ou ruído externo
    - Pequena amplitude  $\rightarrow R_d < 0$
    - Origina a corrente  $I(t)$  na frequência  $\omega_0$  em que  $X_d = -X_c$

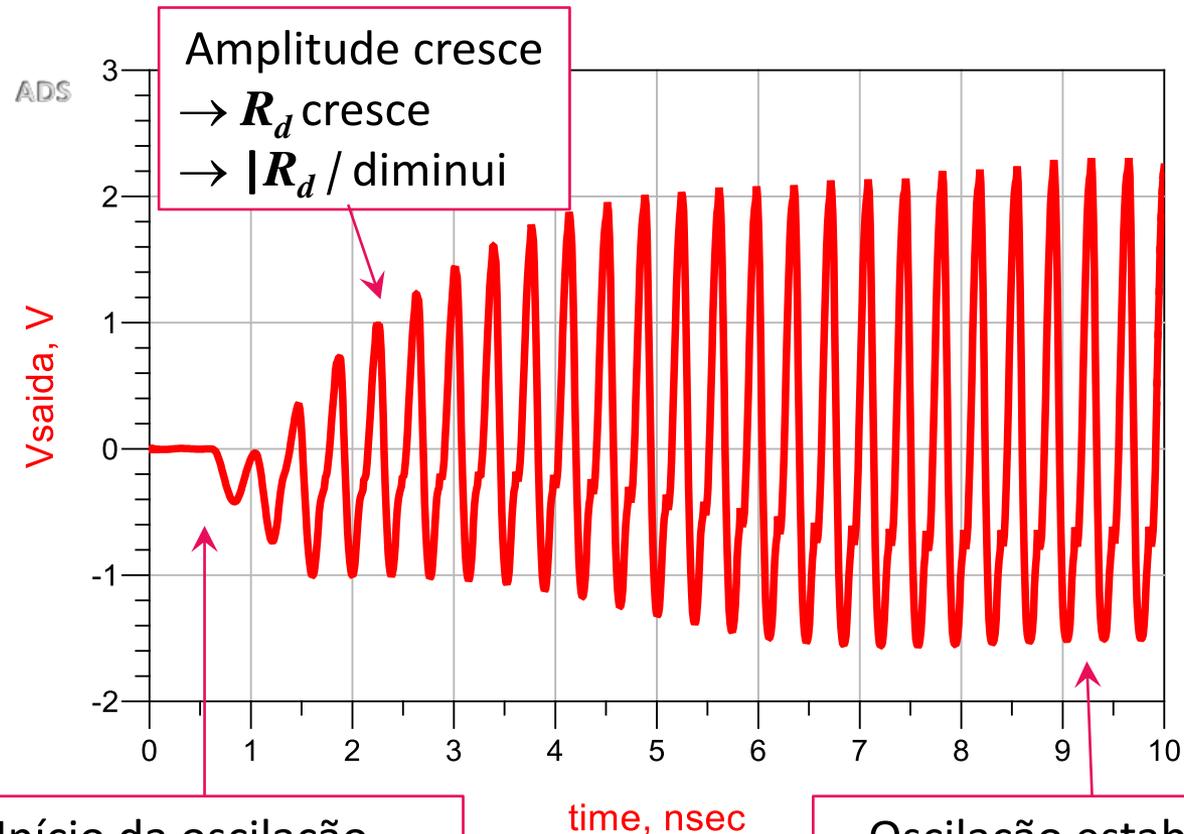


- Se a resistência total é negativa
  - $R_d + R_c < 0$
- A amplitude  $A$  de  $I(t)$  cresce
  - $\rightarrow$  resistência negativa cresce
  - $\rightarrow |R_d|$  diminui
- A oscilação estabiliza-se quando

$$R_d(A_0, \omega_0) + R_c(\omega_0) = 0$$

# Osciladores de Micro-ondas

## Exemplo de sinal gerado pelo oscilador



Início da oscilação  
Resistância total negativa

$$R_d + R_c < 0$$

Oscilação estabilizada  
Resistância total nula

$$R_d(A_0, \omega_0) + R_c(\omega_0) = 0$$

# Osciladores de Micro-ondas

## Teoria de Osciladores a Resistência Negativa

- Condição de oscilação em regime permanente
  - Se existe oscilação em regime permanente  $\rightarrow I(A_0, \omega_0) \neq 0$

$$v_d(A_0, \omega_0) + v_c(\omega_0) = 0$$

$$Z_d(A_0, \omega_0) \cdot I(A_0, \omega_0) + Z_c(\omega_0) \cdot I(A_0, \omega_0) = 0$$

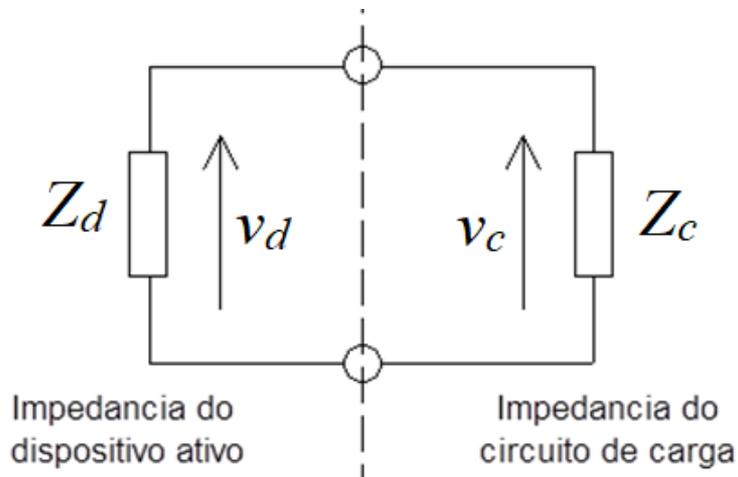
Como  $I(A_0, \omega_0) \neq 0 \rightarrow$

$$Z_d(A_0, \omega_0) + Z_c(\omega_0) = 0$$



$$R_d(A_0, \omega_0) + R_c(\omega_0) = 0$$

$$X_d(A_0, \omega_0) + X_c(\omega_0) = 0$$



# Osciladores de Micro-ondas

## Teoria de Osciladores a Resistência Negativa

- Condição em termos de coeficiente de reflexão

A : módulo da onda de potência

---

$$Z_d \rightarrow \Gamma_d(A, \omega) \rightarrow \text{não linear, } \Gamma_d = \frac{Z_d - Z_o^*}{Z_d + Z_o^*}$$

$$\text{Como } R_d < 0 \rightarrow |\Gamma_d| > 1$$

---

$$Z_c \rightarrow \Gamma_c(\omega) \rightarrow \text{linear, } \Gamma_c = \frac{Z_c - Z_o^*}{Z_c + Z_o^*}$$

$$\text{Como } R_c < 0 \rightarrow |\Gamma_c| < 1$$

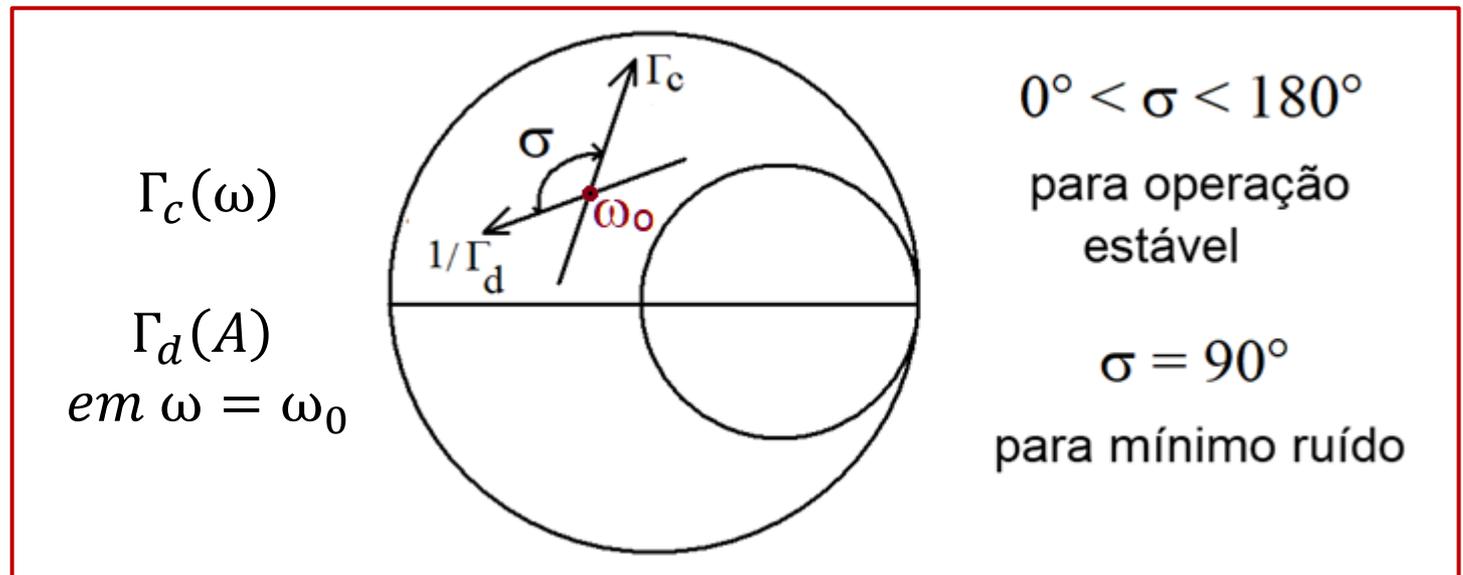
# Osciladores de Micro-ondas

## Teoria de Osciladores a Resistência Negativa

- Condição de oscilação em regime permanente

$$\Gamma_c \cdot \Gamma_d = 1 \text{ em } (A_0 \cdot \omega_0)$$

- Interpretação gráfica e condições de estabilidade e de mínimo ruído



# Osciladores de Micro-ondas

## Teoria de Osciladores a Resistência Negativa

- Condição de oscilação em pequenos sinais
  - Condição para início da oscilação

$$Z_d(A_0, \omega_0) + Z_c(\omega_0) < 0 \quad \Rightarrow \quad \left\{ \begin{array}{l} R_d(A_0, \omega_0) + R_c(\omega_0) < 0 \\ X_d(A_0, \omega_0) + X_c(\omega_0) = 0 \end{array} \right.$$

ou

$$\Gamma_d(A, \omega_0) \cdot \Gamma_c(\omega_0) > 1 \quad \Rightarrow \quad \left\{ \begin{array}{l} |\Gamma_d(A_0, \omega_0)| |\Gamma_c(\omega_0)| > 1 \\ \angle \Gamma_d(A_0, \omega_0) + \angle \Gamma_c(\omega_0) = 0 \end{array} \right.$$

# Osciladores de Micro-ondas

## Teoria de Osciladores a Resistência Negativa

- Condição de oscilação em grandes sinais
  - Oscilação em regime permanente

$$Z_d(A_0, \omega_0) + Z_c(\omega_0) = 0 \quad \Rightarrow \quad \left\{ \begin{array}{l} R_d(A_0, \omega_0) + R_c(\omega_0) = 0 \\ X_d(A_0, \omega_0) + X_c(\omega_0) = 0 \end{array} \right.$$

ou

$$\Gamma_d(A_0, \omega_0) \cdot \Gamma_c(\omega_0) = 1 \quad \Rightarrow \quad \left\{ \begin{array}{l} |\Gamma_d(A_0, \omega_0)| |\Gamma_c(\omega_0)| = 1 \\ \angle \Gamma_d(A_0, \omega_0) + \angle \Gamma_c(\omega_0) = 0 \end{array} \right.$$

# Osciladores de Micro-ondas

## Teoria de Osciladores a Resistência Negativa

Frequência de oscilação  $\omega_0$

- É obtida escolhendo um circuito capaz de ressoar a reatância do dispositivo nessa frequência

$$X_d(A_0, \omega_0) + X_c(\omega_0) = 0$$

Máxima potência de oscilação  $P_0$



Depende do comportamento de  $R_d$  com a amplitude de corrente  $A$



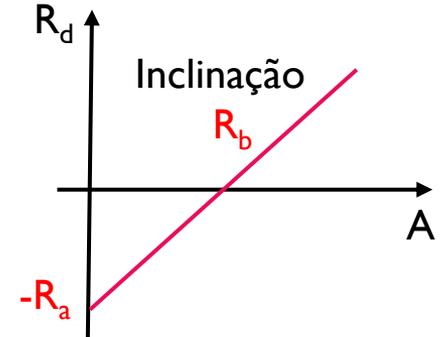
Depende de  $R_c$

# Osciladores de Micro-ondas

## Teoria de Osciladores a Resistência Negativa

- Estimativa da máxima potência de oscilação  $P_0$ 
  - Admitindo que  $R_d$  varie linearmente com a amplitude de corrente  $A$

$$R_d(A_0, \omega_0) = -R_a + R_b \cdot A$$



- Para máxima potência de oscilação, obtém-se

$$R_c = R_a/3 \quad \text{para} \quad P_0 = P_{\text{MAX}}$$

- E máxima potência de oscilação

$$P_{\text{MAX}} = (2R_a^3) / (27 \cdot R_b^2)$$

### Exemplo

- *Em pequenos sinais*  
 $R_d = -R_a = -30 \Omega$
- *Adota-se inicialmente*  
 $R_c = 10 \Omega$

# Osciladores de Micro-ondas

## Projeto de osciladores a transistor

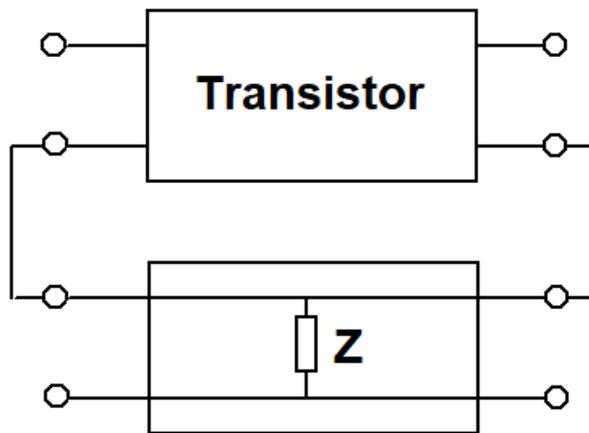
- Obtenção de resistência negativa
  - Transistor com realimentação série
  - Transistor com realimentação paralela
  - Impedância de terminação
- Procedimento de análise
  - Transistor representado como quadripolo
  - Parâmetros S → em pequenos sinais
  - Projeta-se a realimentação ou terminação tal que

$$|\Gamma_d(A, \omega_0)| > 1$$

# Osciladores de Micro-ondas

## Projeto de osciladores a transistor

- Realimentação série



**Dispositivo ativo**

matriz  $[S_d] \rightarrow$  matriz  $[Z_d]$

**Circuito de realimentação**

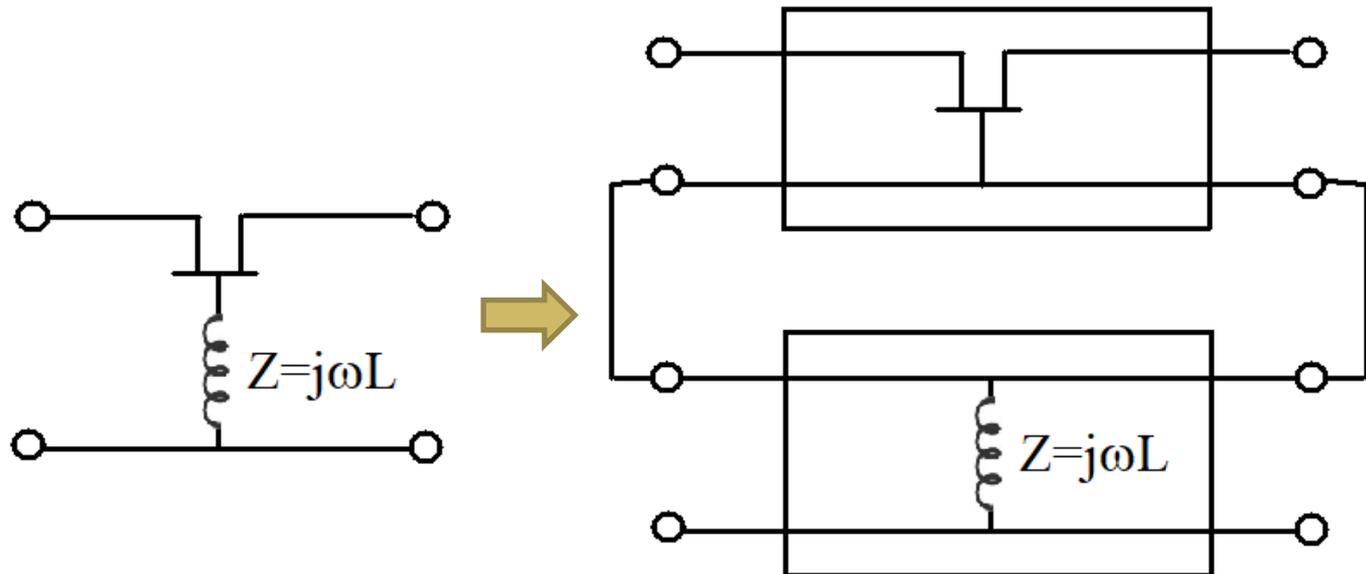
matriz  $[Z_r]$

- Dada a matriz  $S_d \rightarrow$  calcula-se a matriz  $Z_d$
- Matriz  $Z$  da associação série  $\rightarrow [Z_a] = [Z_d] + [Z_r]$
- Matriz  $S$  da associação série:  $[Z_a] \rightarrow [S_a]$

# Osciladores de Micro-ondas

## Projeto de osciladores a transistor

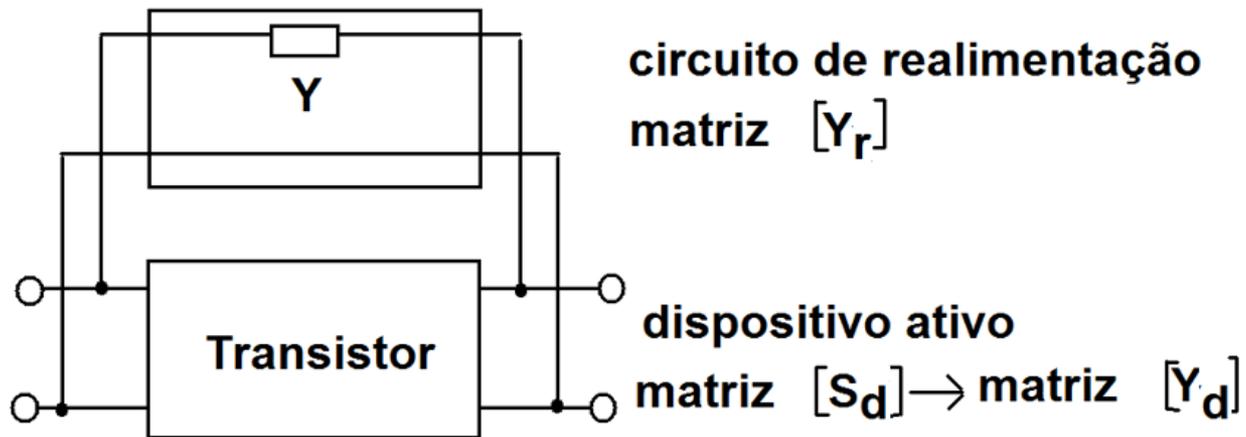
- Exemplo de realimentação série
  - Transistor em configuração porta comum
  - Realimentação série indutiva



# Osciladores de Micro-ondas

## Projeto de osciladores a transistor

- Realimentação paralela

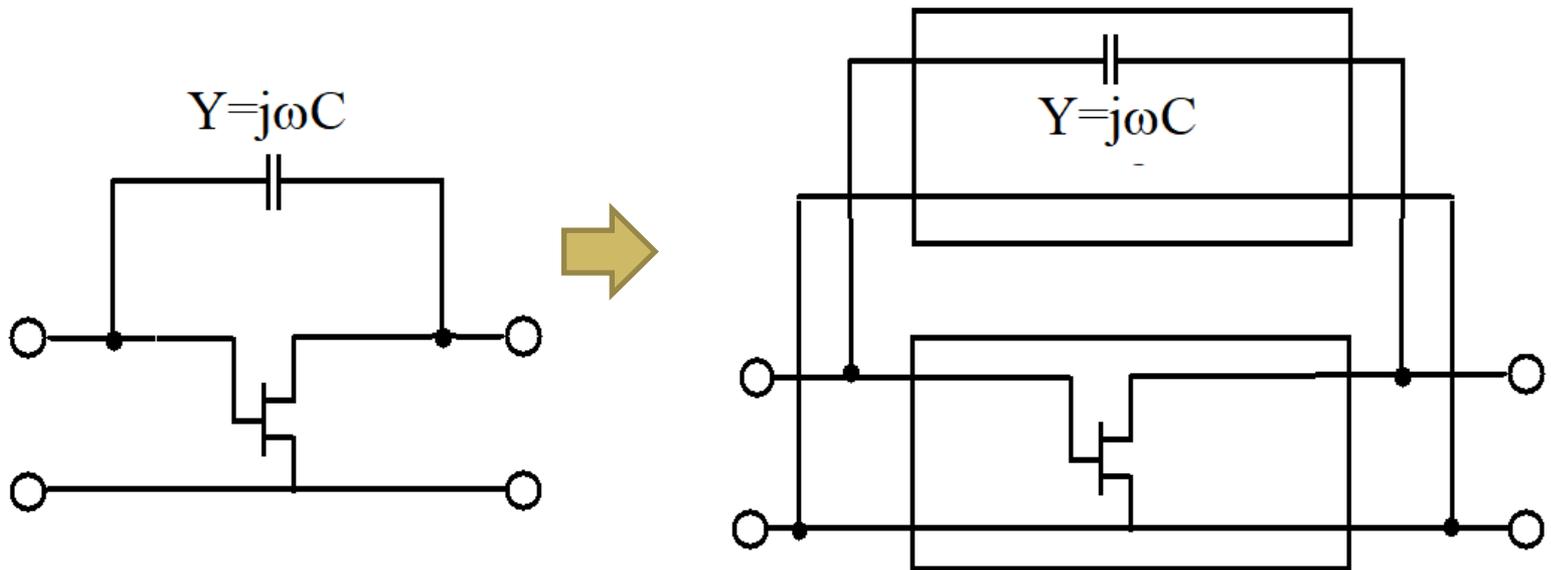


- Dada a matriz  $S_d \rightarrow$  calcula-se a matriz  $Y_d$
- Matriz Y da associação paralela  $\rightarrow [Y_a] = [Y_d] + [Y_r]$
- Matriz S da associação paralela:  $[Y_a] \rightarrow [S_a]$

# Osciladores de Micro-ondas

## Projeto de osciladores a transistor

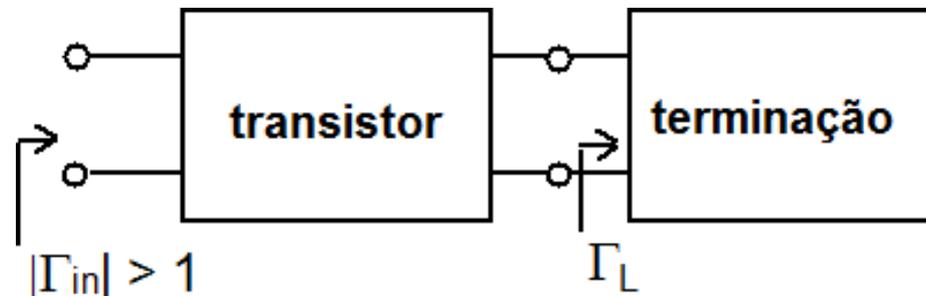
- Exemplo de realimentação paralela
  - Transistor em configuração fonte comum
  - Realimentação paralela capacitiva



# Osciladores de Micro-ondas

## Projeto de osciladores a transistor

- Efeito da impedância de terminação
  - Transistor condicionalmente estável na frequência de oscilação
  - Escolhe-se terminação de um dos acessos que cause resistência negativa no outro acesso



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

# Osciladores de Micro-ondas

## Etapas do projeto de osciladores a transistor

- **Escolha do transistor**
  - Transistores de ganho → potência de dezenas de mW
  - Transistor com  $f_{MAX}$  maior que a frequência de oscilação
  - Tipo do transistor
    - Bipolar → oscilador com menor ruído de fase  
→ ideal se atender à frequência de oscilação
    - FETs – MESFET, HEMT, PHEMET
- **Obtenção de resistência negativa**
  - Projeto do circuito de realimentação
- **Obtenção da condição de oscilação em pequenos sinais**
  - Projeto do circuito ressonante (“tanque”)

# Osciladores de Micro-ondas

## Etapas do projeto de osciladores a transistor

- **Simulação do oscilador em grandes sinais**
  - Modelo de grandes sinais do transistor
  - Fornece frequência e potência de oscilação
- Tipos de simulação
  - No domínio do tempo → “Transient”
  - Balanceamento Harmônico → “HB”
- **Otimização computacional do oscilador**
- Parâmetros a serem otimizados
  - Frequência de oscilação
  - Potência de oscilação
  - Redução de respostas espúrias
    - frequências harmônicas ou não- harmônicas

# Osciladores de Micro-ondas

## Projeto de osciladores a transistor

### Exemplo de circuito de realimentação

- Transistor bipolar em base comum
- Circuito de realimentação série indutivo
- Transistor → NE21900, em chip, modelo de grandes sinais
- Biblioteca → All Libraries → Read-Only Libraries  
→ chip BJTS (No Layout) → cb\_nec\_NE21900\_199\_307

The screenshot shows a library browser interface. On the left, a tree view shows the following structure:

- All Libraries
  - > Workspace Libraries
  - > ADS Analog/RF Libraries
  - > ADS DSP Libraries
  - Read-Only Libraries
    - Microwave\_Transistors
      - chip BJTs (No Layout)
      - chip GaAs FETs (No Layout)
      - chip HEMTs (No Layout) Packaged ...

On the right, a table displays search results for the selected component:

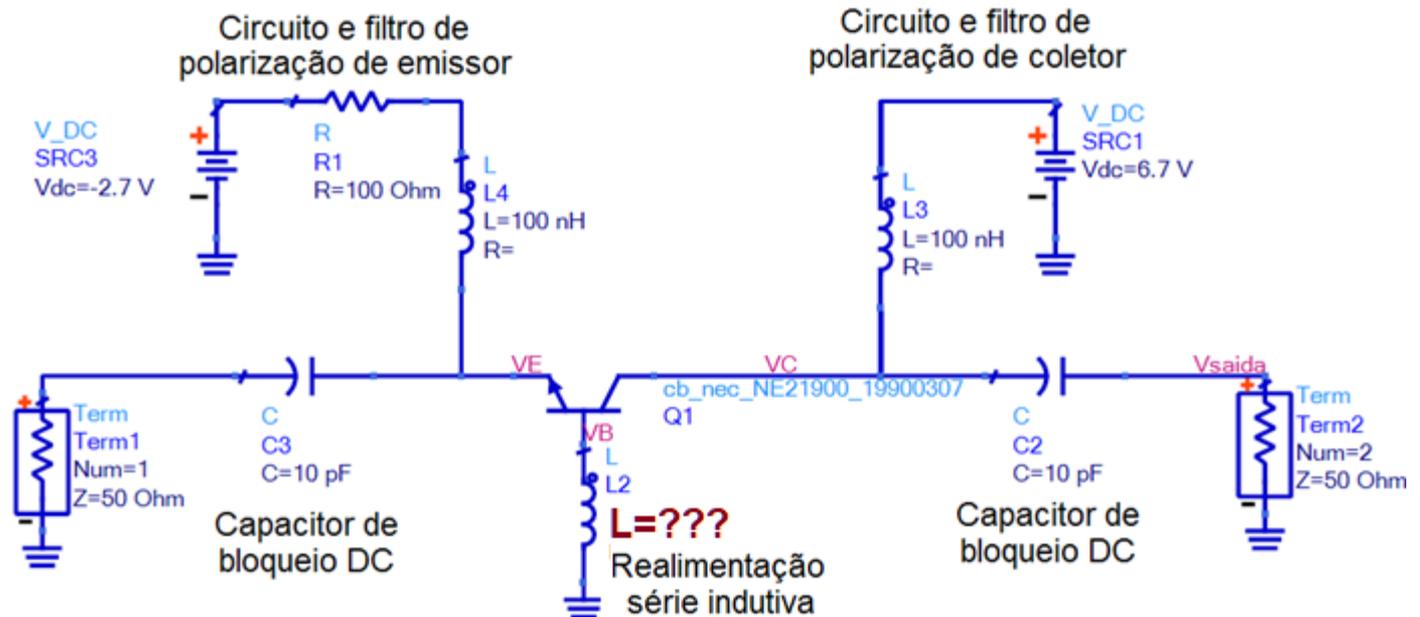
Search	Search
<b>Component</b>	
cb_nec_NE02100_19900412	NE02100 Package: [
cb_nec_NE02100_19911007	die, n/a
<b>cb_nec_NE21900_19900307</b>	NE21900 Package: [
cb_nec_NE21900_19900503	NE21900 Package: [
cb_nec_NE24300_19891121	NE24300 Package: [
cb_nec_NE24600_19900503	NE24600 Package: [

# Osciladores de Micro-ondas

## Projeto de osciladores a transistor

### Circuito esquemático a ser simulado

- Transistor, fontes de polarização, filtros de polarização LC, capacitores de desacoplamento DC
- Realimentação por indutor entre a base e o terra.



# Osciladores de Micro-ondas

## Projeto de osciladores a transistor

### Circuito esquemático a ser simulado

- **Simule parâmetros S**
  - De 1 a 8 GHz, passo de 10 MHz
  - Trace as curvas de S11 e de S22 em carta de Smith
- **Otimize o circuito de realimentação**
  - Varie o valor do indutor de realimentação
  - Para obter resistência negativa em 2,5 GHz, ou seja

$$|S_{11}| > 1 \text{ em } 2,5 \text{ GHz}$$

e/ou

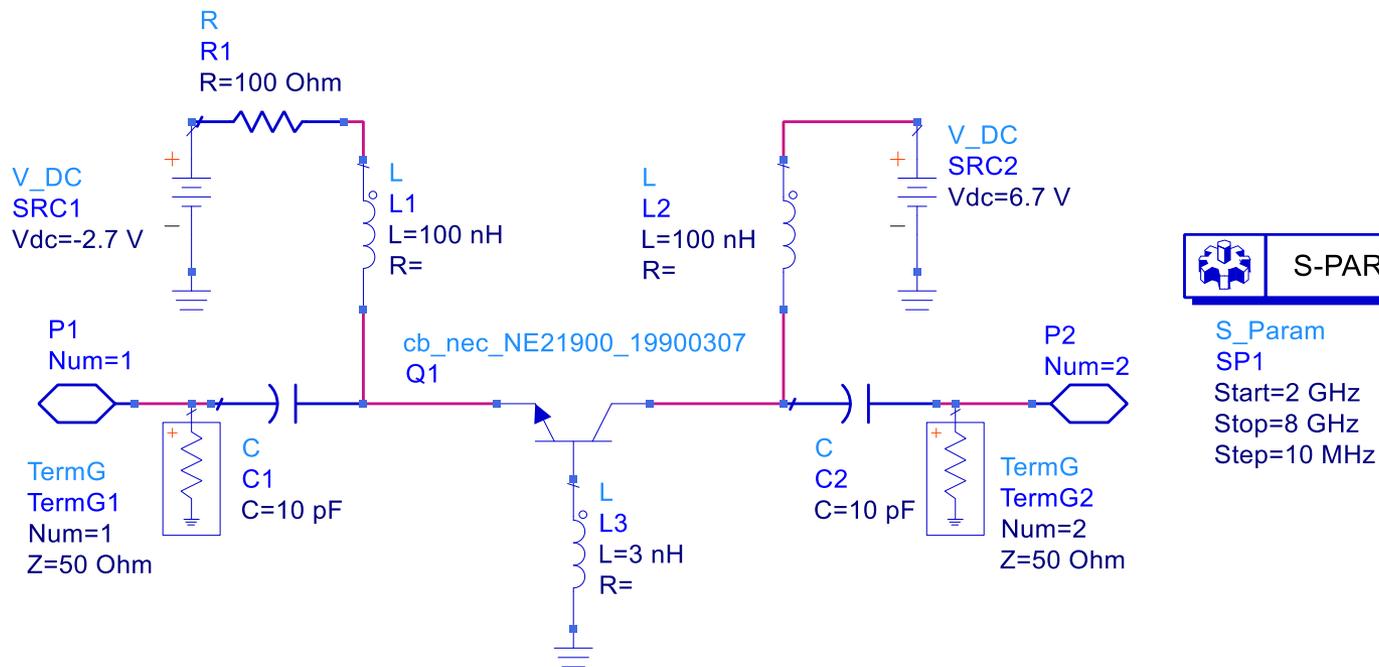
$$|S_{22}| > 1 \text{ em } 2,5 \text{ GHz}$$

# Osciladores de Micro-ondas

## Projeto de osciladores a transistor

### Circuito esquemático a ser simulado

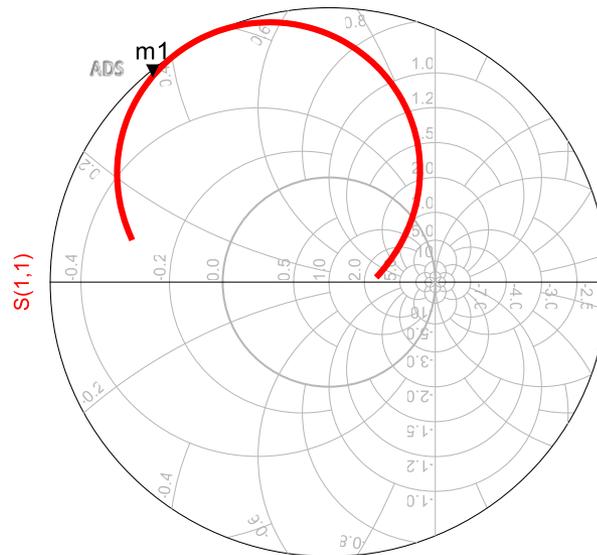
- Solução com valor de  $L = 3 \text{ nH}$



# Osciladores de Micro-ondas

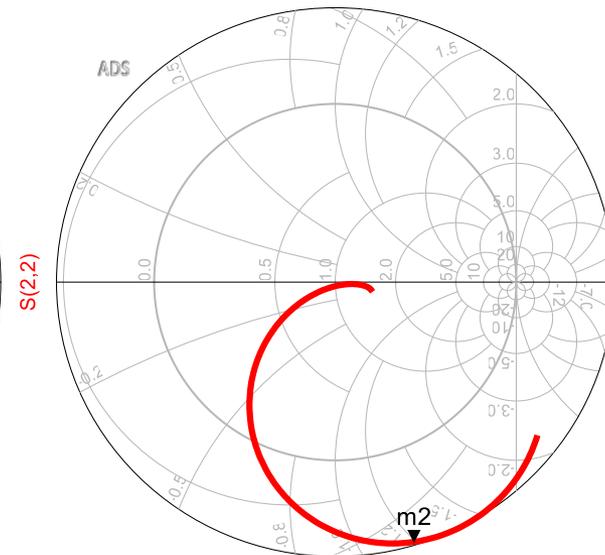
## Projeto de osciladores a transistor

Parâmetros de espalhamento obtidos da simulação  
do transistor com realimentação indutiva



freq (2.000 GHz to 8.000 GHz)

m1  
freq=2.500 GHz  
S(1,1)=2.573 / 130.133  
impedance = -25.693 + j17.986



freq (2.000 GHz to 8.000 GHz)

m2  
freq=2.500 GHz  
S(2,2)=1.521 / -73.364  
impedance = -26.882 - j59.667

# Osciladores de Micro-ondas

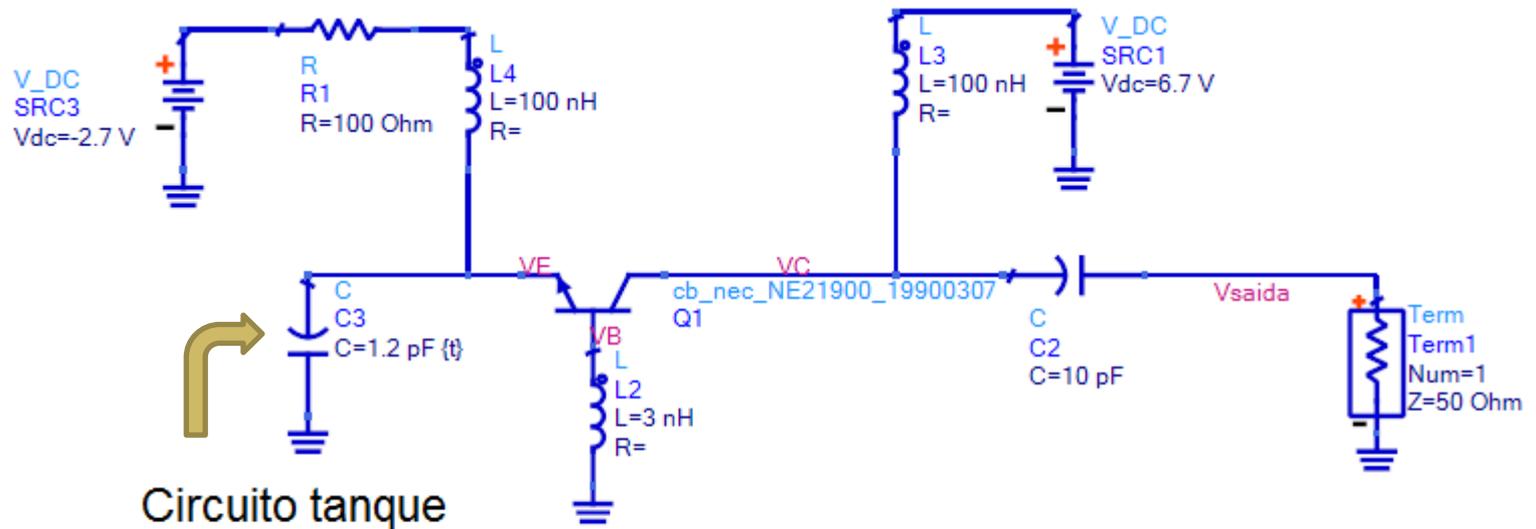
## Projeto de osciladores a transistor

- Circuito “tanque”
  - Termina uma das portas do transistor que apresente resistência negativa
  - Sua reatância deve ressoar (cancelar) a reatância da porta do transistor em que é conectado
  - Usualmente tem parte resistiva desprezível
  - Exemplos de circuito tanque
    - Indutor ou capacitor
    - Linha de transmissão terminada em circuito aberto
    - Circuito ressonante com alto índice de mérito, como ressoador dielétrico ou cavidade ressonante
  - Em osciladores controlados por tensão (VCO) é usual o circuito tanque incluir um varactor para sintonia da frequência de oscilação

# Osciladores de Micro-ondas

## Projeto de osciladores a transistor

### Exemplo de Circuito “tanque”



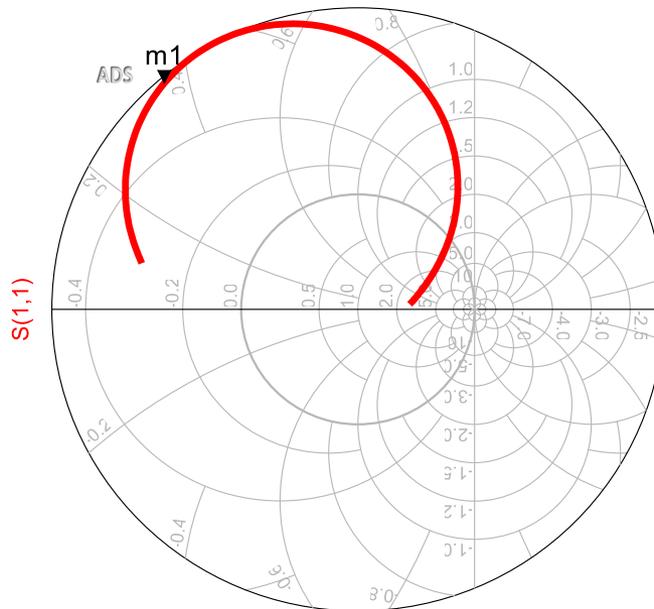
Circuito tanque

Capacitor que ressoa a reatância indutiva do acesso do emissor do transistor na frequência de oscilação

# Osciladores de Micro-ondas

## Projeto de osciladores a transistor

### Exemplo de Circuito “tanque”



freq (2.000 GHz to 8.000 GHz)

m1  
freq=2.500 GHz  
S(1,1)=2.573 / 130.133  
impedance = -25.693 + j17.986

- Impedância da porta 1 do transistor realimentado em série com  $L = 3$  nH, em  $f_0 = 2,5$  GHz

$$Z_1 = -25,7 + j.17,98 \Omega \rightarrow X_1 \approx +j.18 \Omega$$

- Opção de circuito tanque
  - Capacitor com  $X_c = -j.18 \Omega$
  - Em  $f_0 = 2,5$  GHz

$$X_c = \frac{1}{2\pi f_0 \cdot C}$$

$$C = \frac{1}{2\pi f_0 \cdot X_c} = 3,53 \text{ pF}$$

# Osciladores de Micro-ondas

## Projeto de osciladores a transistor

- Simulação do oscilador
- O projeto inicial do oscilador foi realizado usando parâmetros S  
→ operação em pequenos sinais
- Em regime permanente o oscilador opera em grandes sinais
- Simulação do oscilador em grandes sinais
  - Fornece a frequência de oscilação e frequências espúrias
  - Fornece a potência de saída do oscilador

### Métodos de simulação de grandes sinais

#### Domínio do tempo

Regimes transitório e permanente  
SPICE ou ADS, por exemplo

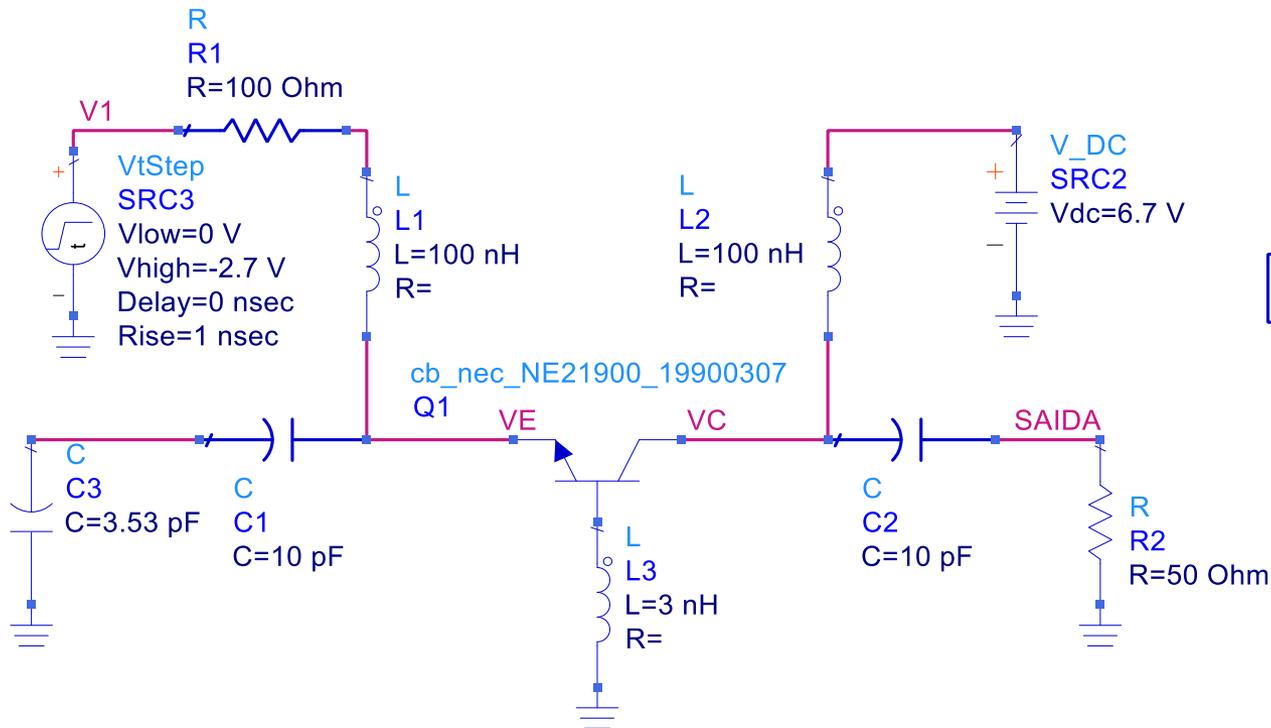
#### Balanceamento Harmônico

Regime permanente  
ADS, por exemplo

# Osciladores de Micro-ondas

## Projeto de osciladores a transistor

### Simulação de Transiente



 **TRANSIENT**

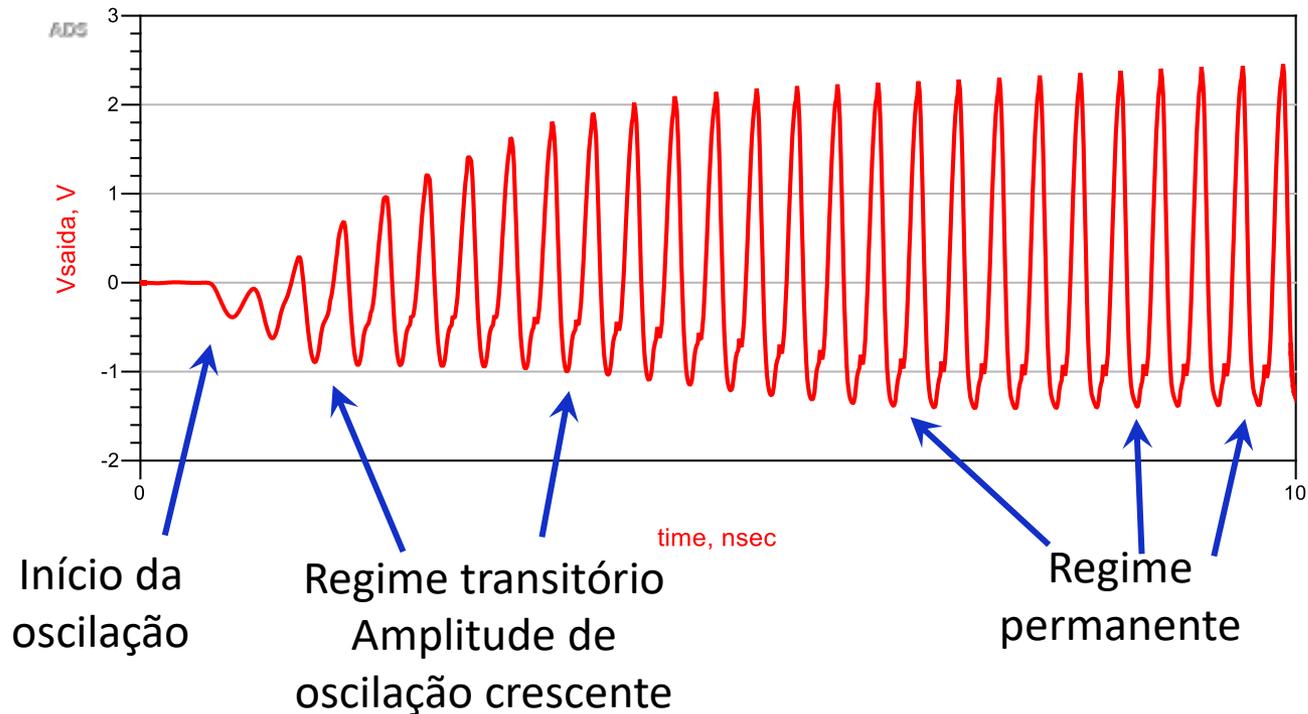
Tran  
Tran1  
StopTime=10 nsec  
MaxTimeStep=10 psec

# Osciladores de Micro-ondas

## Projeto de osciladores a transistor

### Resultados da simulação de Transiente

#### Desenvolvimento da oscilação ao longo do tempo

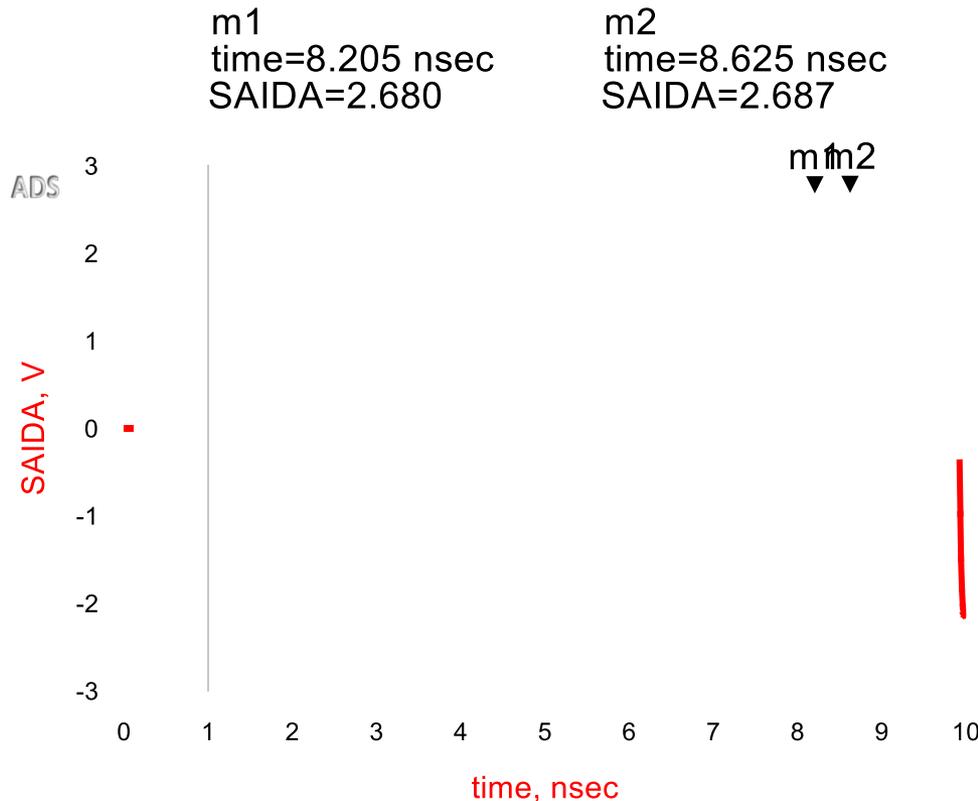


# Osciladores de Micro-ondas

## Projeto de osciladores a transistor

### Resultados da simulação de Transiente

#### Período e frequência de oscilação



#### **Período, $T$**

$$m1 \rightarrow 8,205 \text{ ns}$$

$$m2 \rightarrow 8,625 \text{ ns}$$

$$T = 8,625 \text{ ns} - 8,205 \text{ ns}$$

$$T = 0,4 \text{ ns}$$

#### **Frequência, $f_0$**

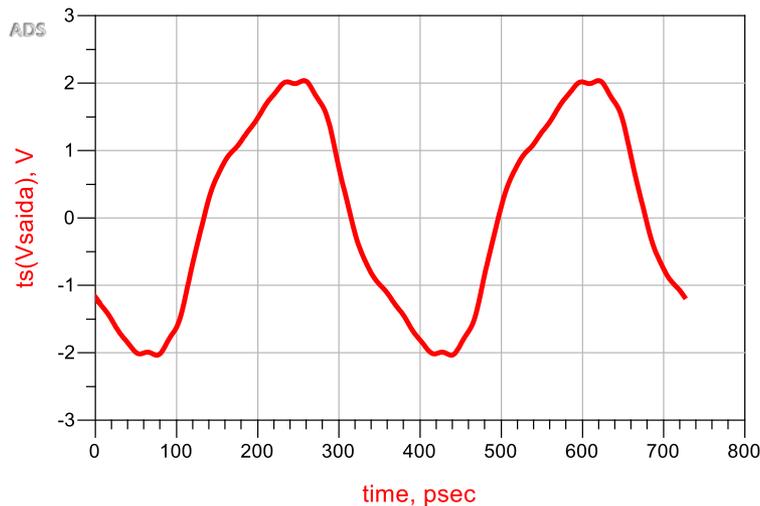
$$f_0 = \frac{1}{T} = 2,5 \text{ GHz}$$

# Osciladores de Micro-ondas

## Projeto de osciladores a transistor

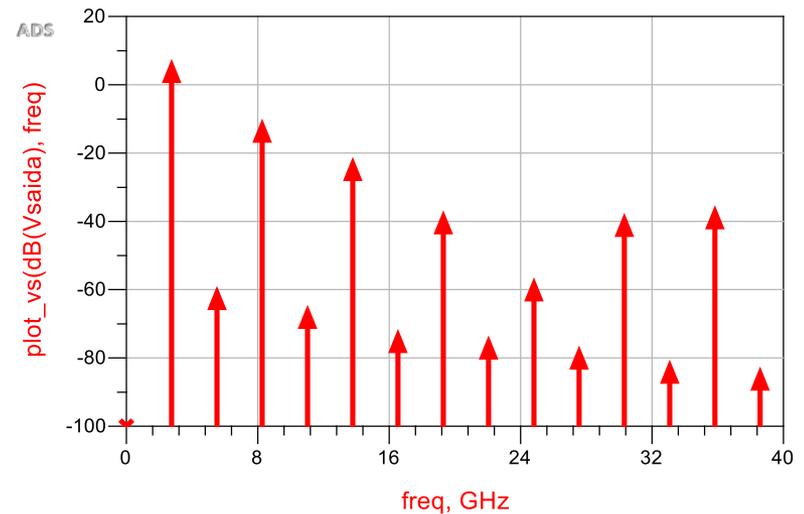
### Resultados da simulação de Balanceamento Harmônico

Sinal de saída no tempo  
em regime permanente



Não se observa o início da oscilação

Espectro de frequências  
de saída



Melhor visão de sinais harmônicos