



PSI 3581 - Circuitos de Micro-ondas

Osciladores de Micro-ondas

Profa. Fatima Salete Correra

Osciladores de Micro-ondas

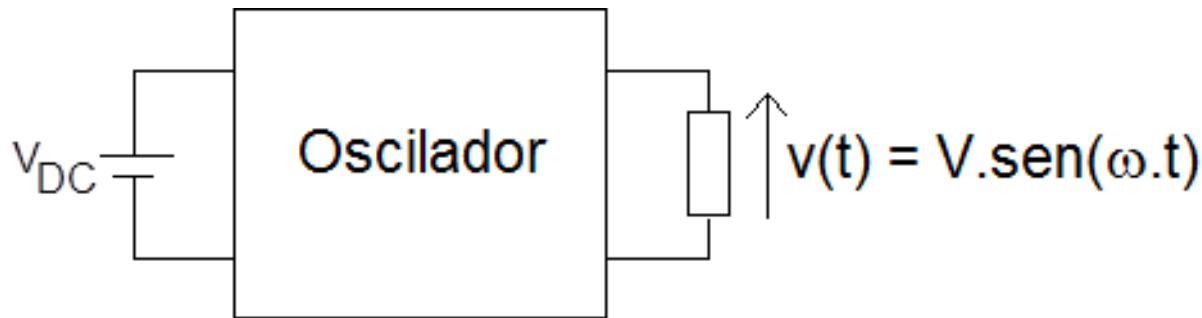
Sumário

- 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



- Aplicações
 - Sistemas de telecomunicações (terrestre e via satélite)
 - Telemetria (radiômetros, radares, pedágio, etc)
 - Defesa e guerra eletrônica (comunicações militares, mísseis teleguiados)
 - Industrial (fornos de secagem, fornos domésticos)

Osciladores de Micro-ondas

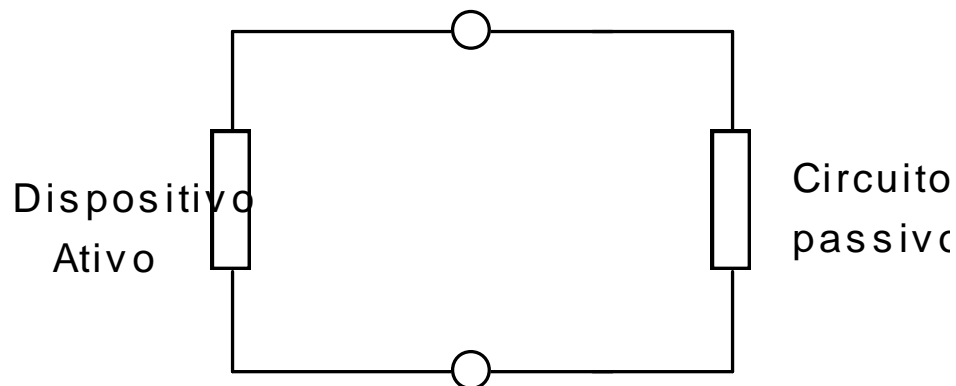
Introdução

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

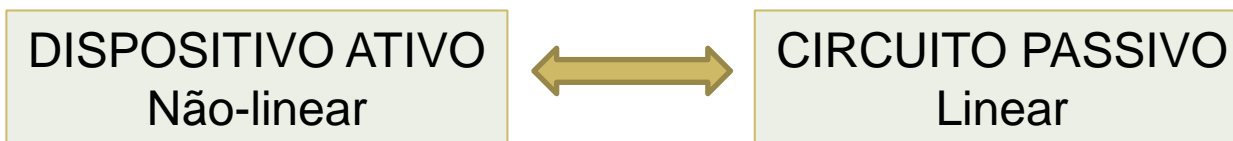
Osciladores de Micro-ondas

Introdução

- Diagrama de blocos do oscilador



- Princípio de funcionamento
 - Interação não-linear



Osciladores de Micro-ondas

Introdução

- Dispositivo ativo
 - Válvulas
 - Kystron, TWT, magnetron
 - Osciladores de média e alta potência
 - Centenas de Watts a Megawatts
 - Dispositivos a estado sólidos
 - Diodos GUNN e IMPATT
 - Transistores Bipolar, MESFET, HEMT e HBT
 - Osciladores de baixa potência
 - Miliwatts a dezenas de Watts

Osciladores de Micro-ondas

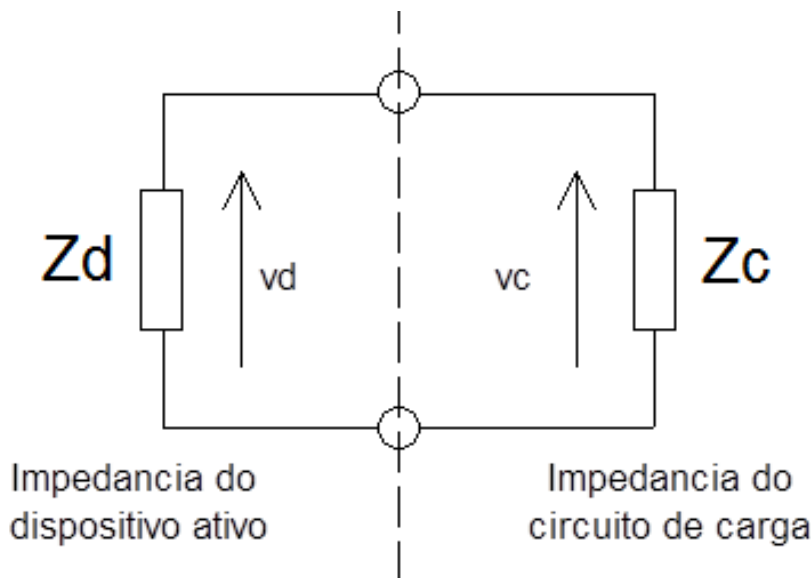
Introdução

- Circuito passivo
 - Inclui
 - Circuitos de realimentação
 - Circuito ressonante
 - 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

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

$$R_d < 0 \text{ em pequenos sinais}$$

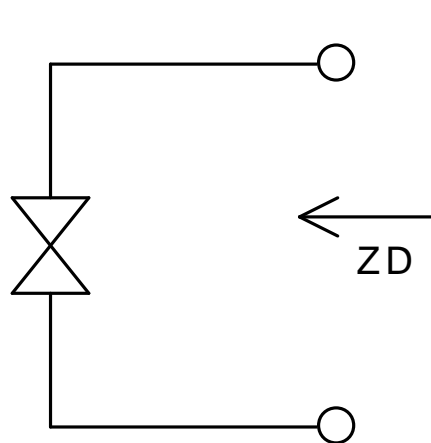
ω : frequência do sinal de RF

A : amplitude do sinal de RF

Osciladores de Micro-ondas

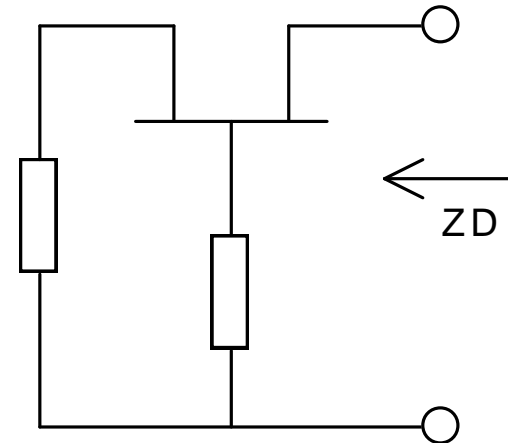
Teoria de Osciladores a Resistência Negativa

- Exemplos de dispositivos ativos com resistência negativa



DIODO GUNN

Diodo GUNN – resistência negativa depende da tensão de polarização



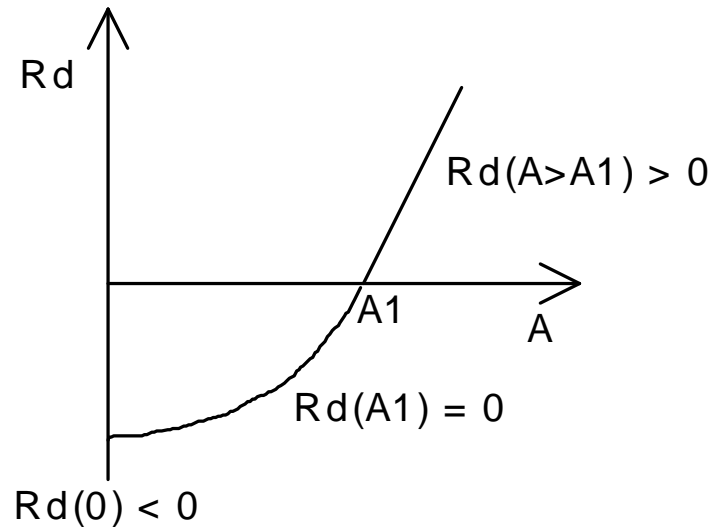
Transistor reduzido a 2 term

Transistor – resistência negativa obtida usando circuitos de realimentação

Osciladores de Micro-ondas

Teoria de Osciladores a Resistência Negativa

- Curva típica de resistência negativa em função da amplitude de corrente de sinal – A

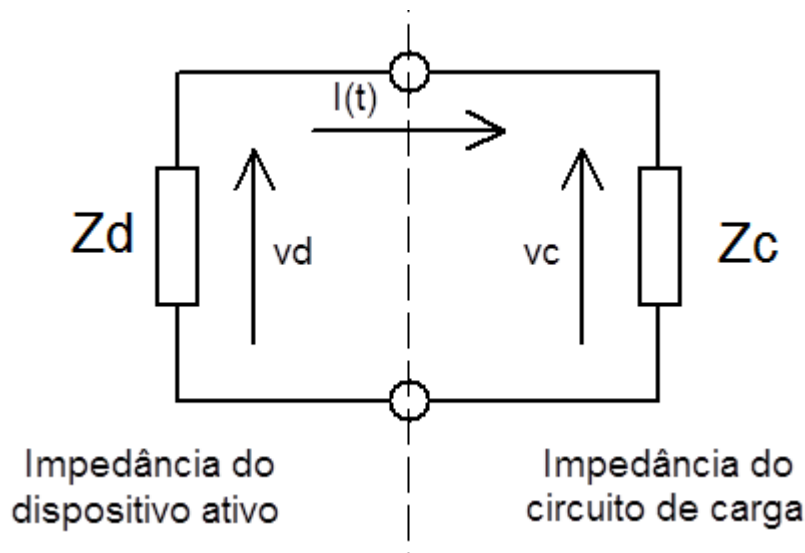


- Em pequenos sinais $\rightarrow R_d < 0$
- Aumento da amplitude de corrente $\rightarrow R_d$ tende a crescer
- Amplitude de corrente maior que $A_1 \rightarrow R_d > 0$

Osciladores de Micro-ondas

Teoria de Osciladores a Resistência Negativa

- Início da oscilação
 - Ruído do próprio dispositivo ou ruído externo
 - Pequena amplitude $\rightarrow R_d < 0$
 - Origina a corrente $I(t)$ na frequência ω_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

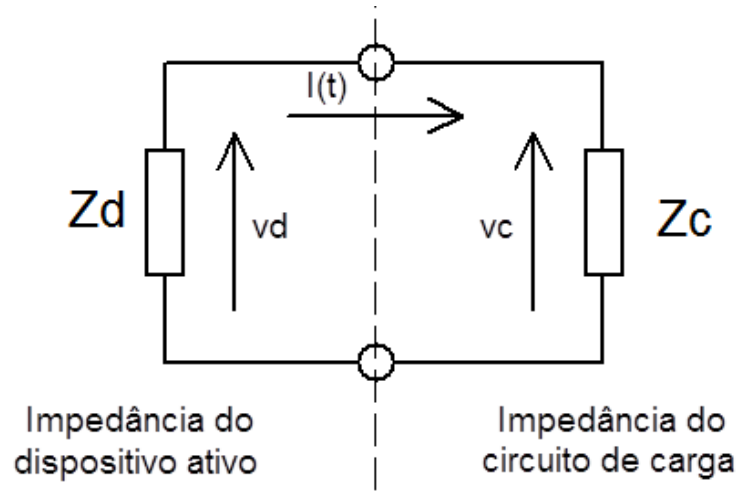
Teoria de Osciladores a Resistência Negativa

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

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

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

$$\text{Como } I(A_0, \omega_0) \neq 0 \rightarrow Z_d(A_0, \omega_0) + Z_c(\omega_0) = 0$$

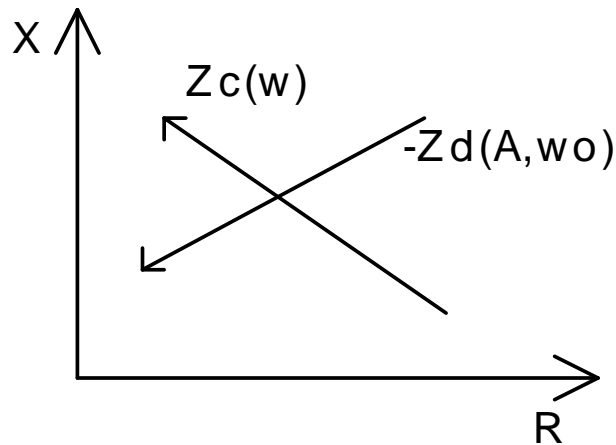


$$\begin{cases} R_d(A_0, \omega_0) + R_c(\omega_0) = 0 \\ X_d(A_0, \omega_0) + X_c(\omega_0) = 0 \end{cases}$$

Osciladores de Micro-ondas

Teoria de Osciladores a Resistência Negativa

- Interpretação gráfica da condição de oscilação



$Z_c(\omega)$: linha de carga – função da frequência angular

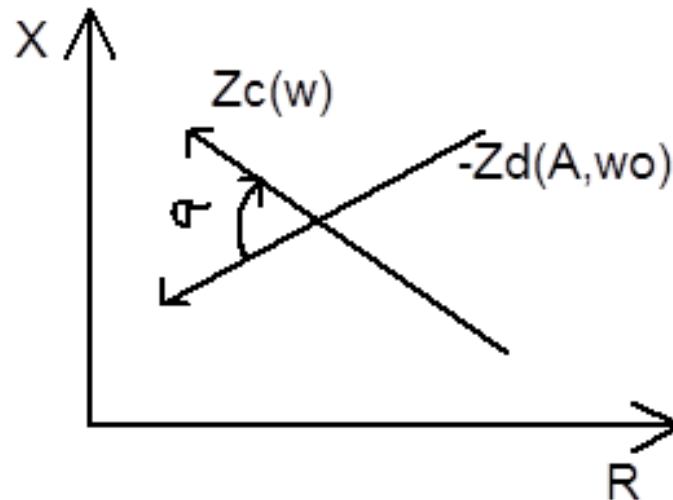
$Z_d(A, \omega_0)$: linha do dispositivo em ω_0 , em função da amplitude A da corrente

Para haver oscilação, $Z_d(A, \omega_0)$ deve interceptar $Z_c(\omega)$ em ω_0

Osciladores de Micro-ondas

Teoria de Osciladores a Resistência Negativa

- Condição para oscilação estável



$$0^\circ < \sigma < 180^\circ$$

σ medido no sentido
horário de $-Z_d$ para Z_c

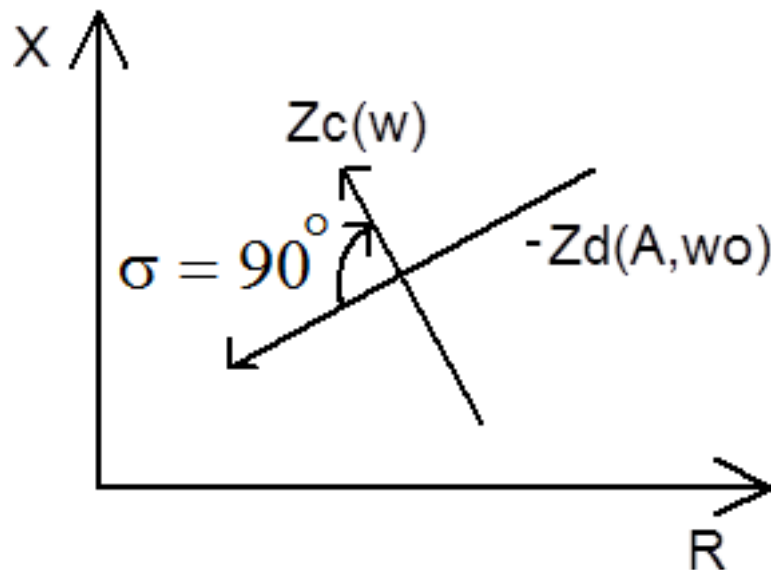
- Critério de estabilidade de Edison

$$\text{Se } \frac{\partial X_d}{\partial A} = 0 \text{ e } \frac{\partial R_d}{\partial A} > 0 \Rightarrow \text{oscilação estável se } \frac{\partial X_c}{\partial \omega} > 0$$

Osciladores de Micro-ondas

Teoria de Osciladores a Resistência Negativa

- Condição para oscilação com mínimo ruído



$$\sigma < 90^\circ$$

σ medido no sentido
horário de $-Z_d$ para Z_c

Osciladores de Micro-ondas

Teoria de Osciladores a Resistência Negativa

- Condição em termos de coeficiente de reflexão

$Z_d \rightarrow \Gamma_d(A, \omega) \rightarrow$ não linear, A : módulo da onda de potência

$$\Gamma_d = \frac{Z_d - Z_o^*}{Z_d + Z_o^*}$$

Como $R_d < 0 \rightarrow |\Gamma_d| > 1$

$Z_c \rightarrow \Gamma_c(\omega) \rightarrow$ linear

$$\Gamma_c = \frac{Z_c - Z_o^*}{Z_c + Z_o^*}$$

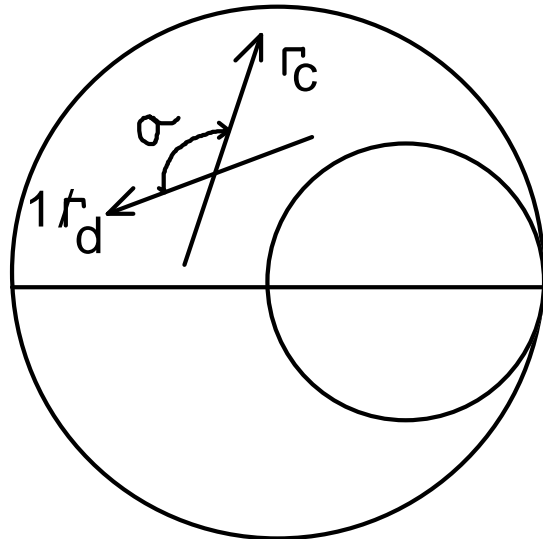
Osciladores de Micro-ondas

Teoria de Osciladores a Resistência Negativa

- Condição de oscilação em regime permanente

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

- Interpretação gráfica e condições de estabilidade e de mínimo ruído



$0^\circ < \sigma < 180^\circ$
para operação
estável

$\sigma = 90^\circ$
para mínimo ruído

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

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

Osciladores de Micro-ondas

Teoria de Osciladores a Resistência Negativa

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

$$Zd(A_0, \omega_0) + Zc(\omega_0) < 0 \quad \Rightarrow \quad \left\{ \begin{array}{l} Rd(A_0, \omega_0) + Rc(\omega_0) < 0 \\ Xd(A_0, \omega_0) + Xc(\omega_0) = 0 \end{array} \right.$$

ou

$$\Gamma d(A, \omega_0) \cdot \Gamma c(\omega_0) > 1 \quad \Rightarrow \quad \left\{ \begin{array}{l} |\Gamma d(A, \omega_0)| > 1 \\ fase(\Gamma d(A, \omega_0)) + fase(\Gamma c(\omega_0)) = 0 \end{array} \right.$$

Osciladores de Micro-ondas

Teoria de Osciladores a Resistência Negativa

- Frequência de oscilação ω_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

- Máxima potência de oscilação P_0
 - Admitindo que Rd varie linearmente com a amplitude de corrente A

$$Rd(A_0, \omega_0) = -Ra + Rb \cdot A$$

- Para máxima potência de oscilação, obtém-se

$$Rc = Ra/3 \quad \text{para} \quad P_0 = P_{MAX}$$

- E máxima potência de oscilação

$$P_{MAX} = (2Ra^3) / (27.Rb^2)$$

Osciladores de Micro-ondas

Projeto de osciladores a transistor

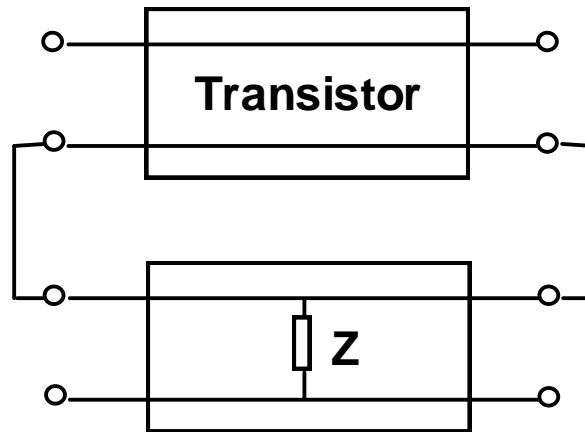
- Obtenção de resistência negativa
 - Transistor com realimentação série
 - Transistor com realimentação paralela
 - Impedância de terminação
- Procedimento de análise
 - Transistor representado como quadripolo
 - Parâmetros S \rightarrow em pequenos sinais
 - Projeta-se a realimentação ou terminação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

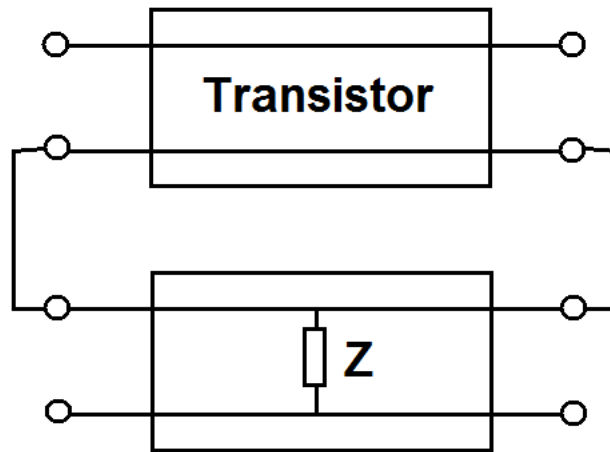
matriz $[Z_r]$

- 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 paralela: $[Z_a] \rightarrow [S_a]$

Osciladores de Micro-ondas

Projeto de osciladores a transistor

- Realimentação série



Dispositivo ativo

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

Circuito de realimentação

matriz $[Z_r]$

$$[Z_a] = [Z_d] + [Z_r]$$

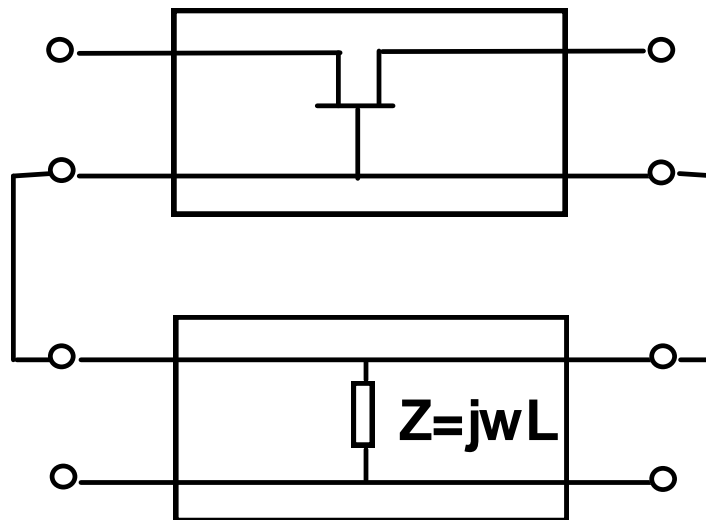
$$[Z_a] = \begin{bmatrix} Z_{11d} + Z & Z_{12d} + Z \\ Z_{21d} + Z & Z_{22d} + Z \end{bmatrix}$$

$$[Z_a] \rightarrow [S_a]$$

Osciladores de Micro-ondas

Projeto de osciladores a transistor

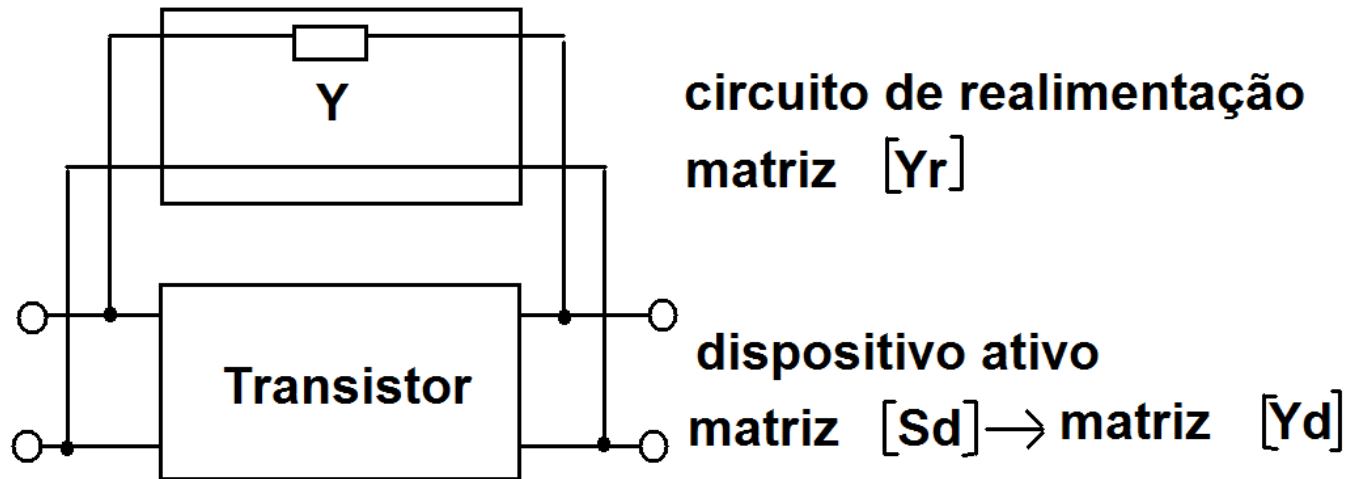
- Exemplo de realimentação série
 - Transistor em configuração porta comum
 - Realimentação série indutiva



Osciladores de Micro-ondas

Projeto de osciladores a transistor

- Realimentação paralela

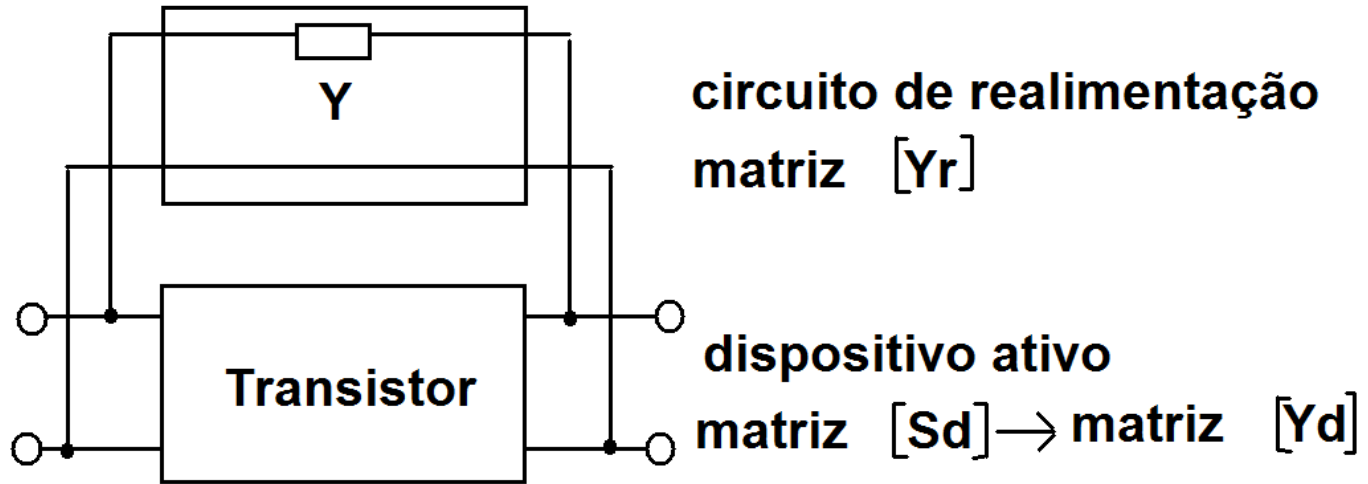


- Dada a matriz $S_d \rightarrow$ calcula-se a matriz Y_d
- Matriz Y da associação paralela $\rightarrow [Y_a] = [Y_d] + [Y_r]$
- Matriz S da associação paralela: $[Y_a] \rightarrow [S_a]$

Osciladores de Micro-ondas

Projeto de osciladores a transistor

- Realimentação paralela



$$[Y_a] = [Y_d] + [Y_r]$$

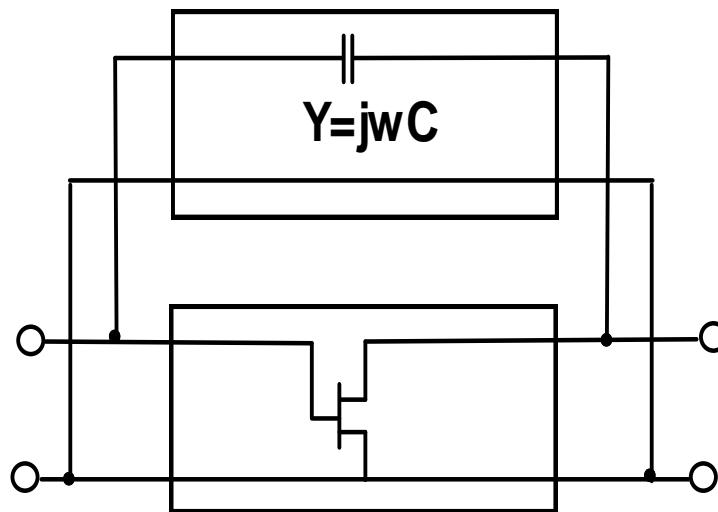
$$[Y_a] = \begin{bmatrix} Y_{11d} + Y & Y_{12d} + Y \\ Y_{21d} + Y & Y_{22d} + Y \end{bmatrix}$$

$$[Y_a] \rightarrow [S_a]$$

Osciladores de Micro-ondas

Projeto de osciladores a transistor

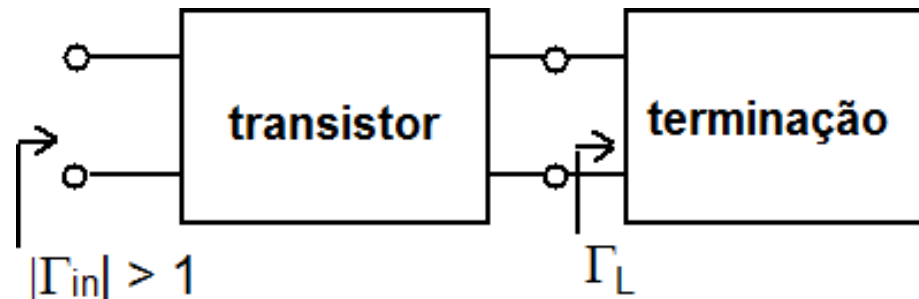
- Exemplo de realimentação paralela
 - Transistor em configuração fonte comum
 - Realimentação paralela capacitiva



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

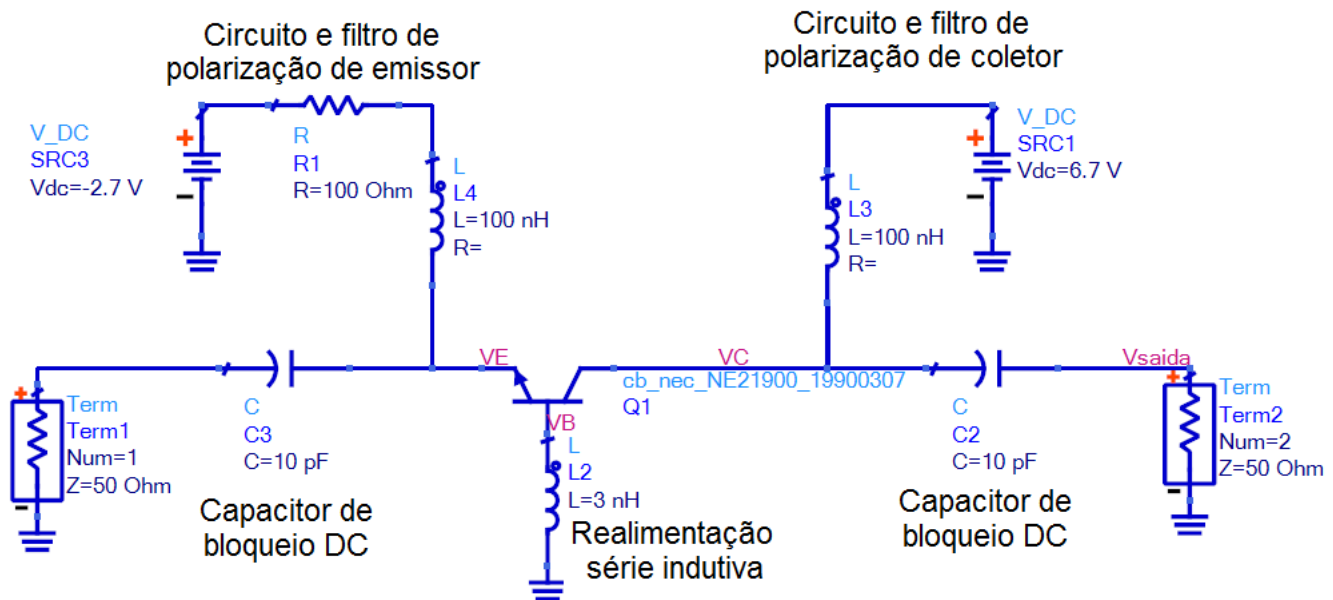


$$\Gamma_{in} = S_{11} + \frac{S_{12}S_{21}\Gamma_L}{1 - S_{11}\Gamma_L}$$

Osciladores de Micro-ondas

Projeto de osciladores a transistor

- Exemplo de circuito de realimentação (simulação de parâmetros S)
 - Transistor representado por modelo de grandes sinais
 - Circuitos e filtros de polarização do transistor
 - Capacitores de bloqueio DC
 - Circuito de realimentação série indutivo

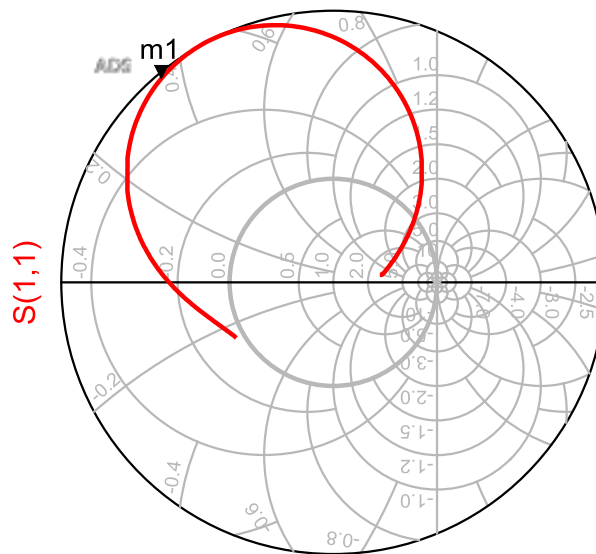


Osciladores de Micro-ondas

Projeto de osciladores a transistor

Parâmetros de espalhamento obtidos da simulação
do transistor com realimentação indutiva

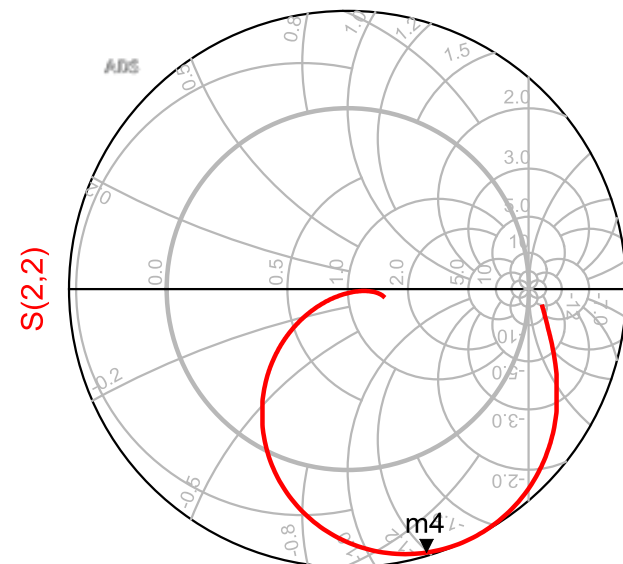
Input Reflection Coefficient



freq (1.000GHz to 8.000GHz)

m1
freq=2.500GHz
S(1,1)=2.573 / 130.133
impedance = Z0 * (-0.514 + j0.360)

Output Reflection Coefficient



freq (1.000GHz to 8.000GHz)

m4
freq=2.500GHz
S(2,2)=1.521 / -73.364
impedance = Z0 * (-0.538 - j1.193)

Osciladores de Micro-ondas

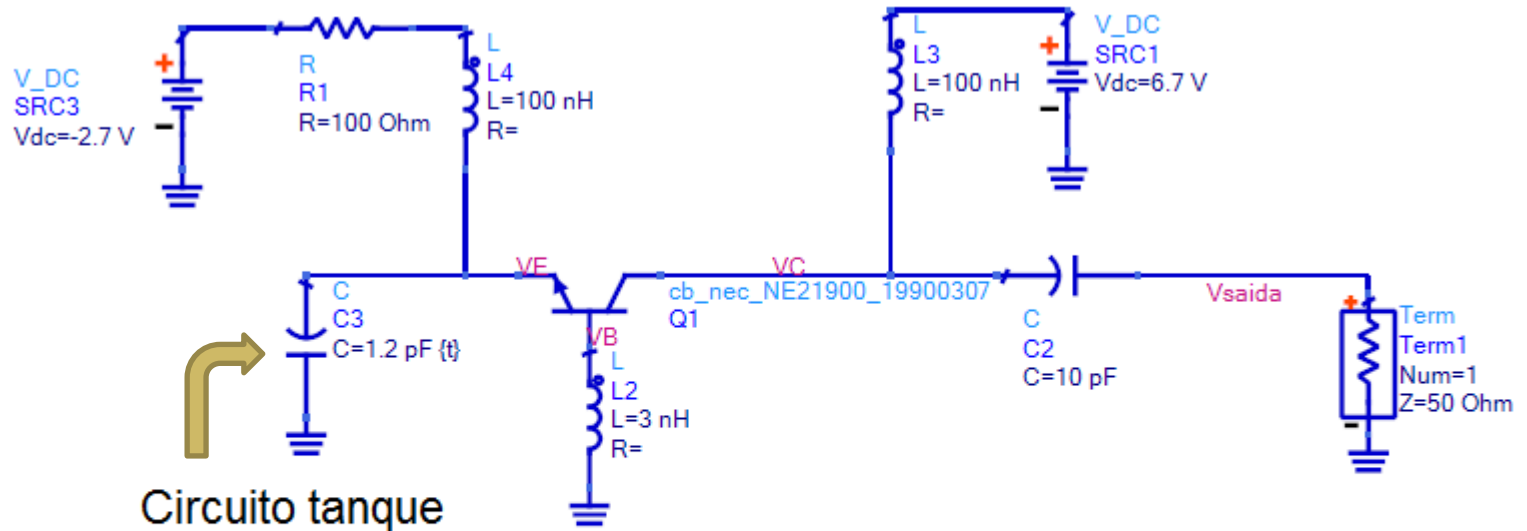
Projeto de osciladores a transistor

- 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

- 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

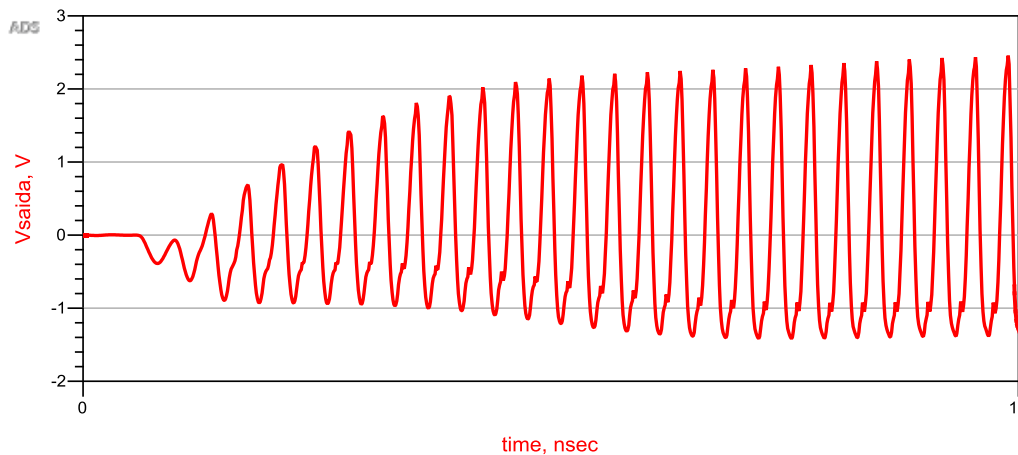
Regime permanente

ADS, por exemplo

Osciladores de Micro-ondas

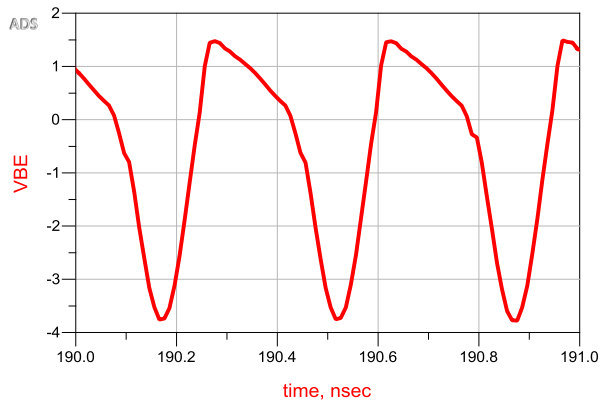
Projeto de osciladores a transistor

Resultados da simulação de Transiente

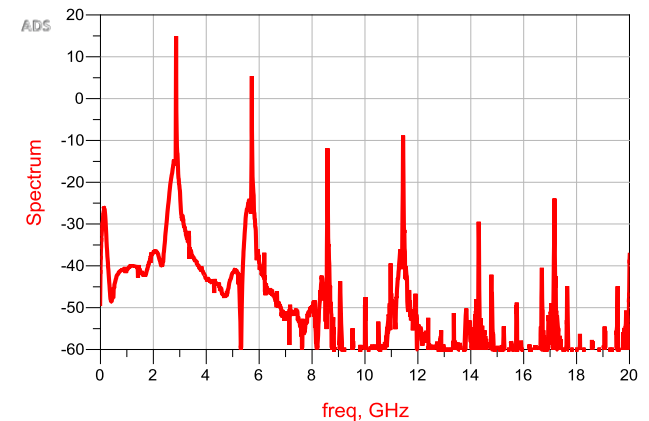


Regime transitório mostrando o início da oscilação

Sinal de saída no tempo



Espectro de frequências de saída

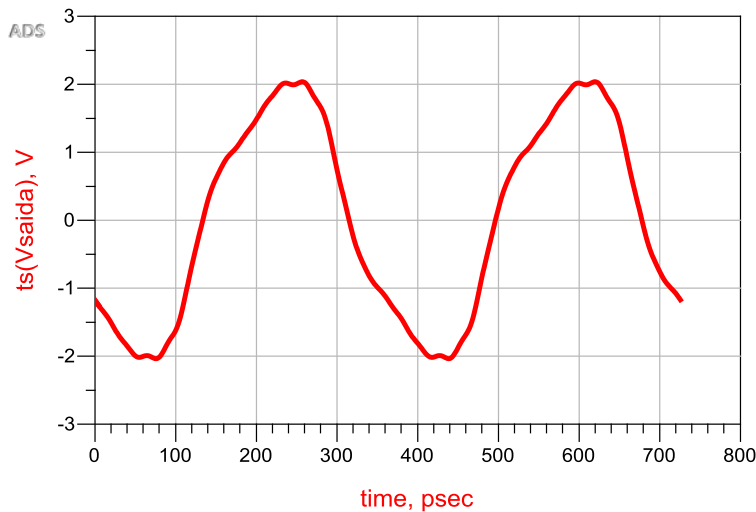


Osciladores de Micro-ondas

Projeto de osciladores a transistor

Resultados da simulação de Balanceamento Harmônico

Sinal de saída no tempo



Espectro de frequências de saída

