

Circuitos com figura de ruído mínima

Objetivo: Consolidação dos fundamentos sobre a degradação da relação sinal-ruído em circuitos RF; Projeto de circuitos visando a minimização da figura de ruído; Projeto de LNA.

Introdução Teórica

Figura de ruído

A Figura de ruído de um quadripolo pode ser calculada usando-se a seguinte expressão:

$$NF = \frac{SNR_e}{SNR_s} = \frac{S_g/N_g}{S_s/N_s}, \quad (1)$$

na qual:

- SNR_e : Relação sinal-ruído na entrada
- SNR_s : Relação sinal-ruído na saída
- S_g : Potência de sinal disponível na entrada (gerador)
- N_g : Potência do ruído térmico disponível na entrada, na temperatura $T_0 = 290K$
- S_s : Potência do sinal disponível na saída
- N_s : Potência do ruído disponível na saída

Potência disponível

O circuito abaixo ilustra a interação entre um gerador com impedância interna Z_g e um carga Z_L .

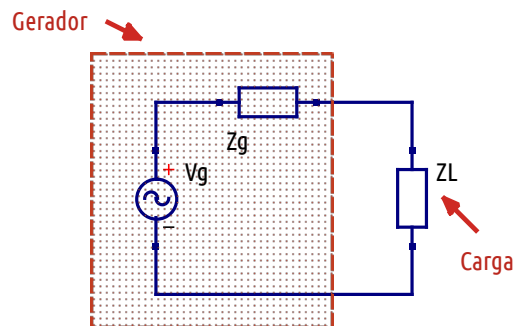


Figura 1: Circuito para cálculo da potência disponível

A potência disponível $P_{g_{disp}}$ é definida como sendo a máxima potência extraída do gerador e dissipada pela carga. Matematicamente pode ser expressada da seguinte maneira:

$$P_{g_{disp}} = P_L|_{Z_L=Z_g^*}, \quad (2)$$

sendo P_L a potência média dissipada na carga.

Quadripolo com ruído referido à entrada

A figura de ruído de um quadripolo também pode ser calculada a partir da expressão seguinte:

$$NF = 1 + \frac{\overline{v_{ni}^2}}{4kT_0B}G_G + \frac{\overline{i_{ni}^2}}{4kT_0B} \frac{1}{G_G}, \quad (3)$$

na qual $\overline{v_{ni}^2}$ e $\overline{i_{ni}^2}$ representam o ruído do quadripolo referido à entrada, conforme pode ser visto na Figura 2.

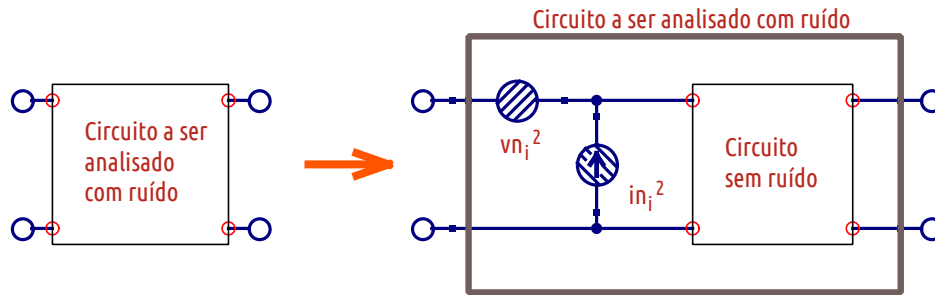


Figura 2: Modelo de quadripolo com ruído referido à entrada

Para encontrar v_{ni} e i_{ni} , pode-se analisar a corrente ou a tensão de saída do quadripolo para dois casos distintos: i) entrada em aberto e ii) entrada em curto circuito. Como pode ser visto na Figura 3, ao deixar a entrada em aberto, a fonte de ruído modelada por tensão em série com a entrada não exercerá influência no ruído observado na saída. Igualmente, quando a entrada do quadripolo estiver em curto-circuito, o ruído associado a i_{ni} não repercutirá na saída. Este procedimento deve ser feito tanto para o quadripolo com ruído, quanto para o quadripolo com o ruído referido à entrada, sempre observando uma grandeza na saída. Ao final, faz-se a equivalência entre as observações e encontram-se os valores das fontes do modelo com ruído referido à entrada.

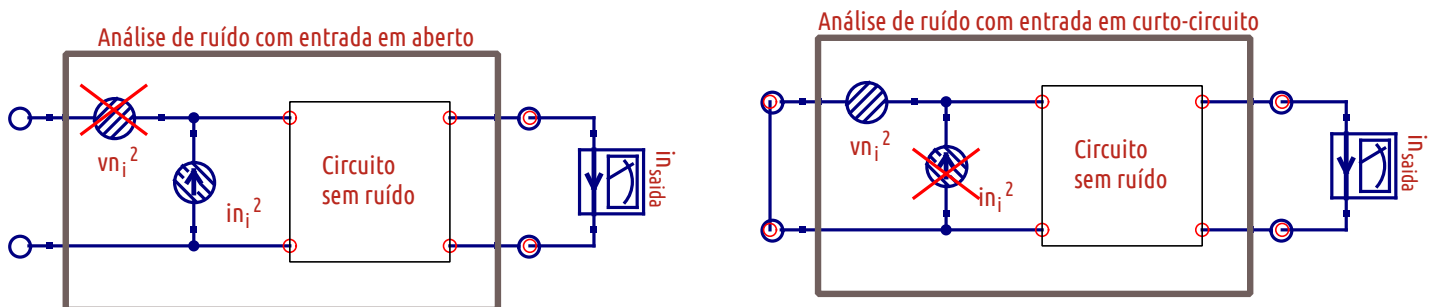


Figura 3: Condições de análise do quadripolo com fontes referidas à entrada.

Exemplo1: Cálculo da figura de ruído de um diodo

Tomemos um diodo configurado em série conforme ilustra a figura ao lado e calculemos a sua figura de ruído. Para tanto, é necessário identificar a(s) fonte(s) de ruído associada(s) ao diodo. Duas são particularmente importantes: o ruído $1/f$ (ou ruído flicker) e o ruído Shot. Consideraremos apenas o ruído Shot, uma vez que o ruído $1/f$ é menos importante para frequências elevadas.

Para um diodo polarizado, a corrente quadrática média de ruído Shot é calculada por $\overline{i_{nd}^2} = 2qI_D B$, na qual $q = 1,602 \times 10^{-19}$ C é a carga do elétron, B é a banda passante e I_D é a corrente de polarização.

O modelo AC do diodo (sinais pequenos) incluindo ruído está representado na figura 5, na qual percebe-se a fonte de ruído Shot i_{nd} e a condutância do diodo no ponto de operação $g_d = \frac{qI_D}{kT_d}$. $k = 1,38 \times 10^{-23}$ J/K é a constante de Boltzman e T_d é a temperatura do diodo em Kelvin.

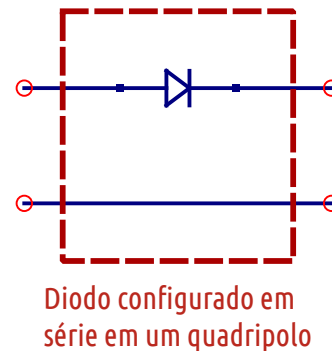


Figura 4: Quadripolo contendo um diodo configurado em série

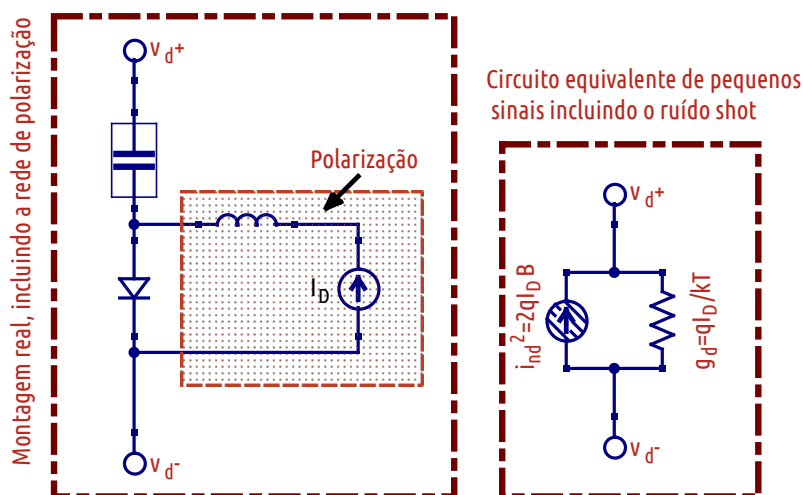


Figura 5: Modelo AC do diodo incluindo ruído

Das quatro grandezas necessárias ao cálculo de NF (S_g, N_g, S_s, N_s), duas são conhecidas de antemão:

$$S_g = \frac{I_G^2}{8G_G} \quad (4)$$

$$N_g = kT_0 B \quad (5)$$

As duas grandezas restantes são encontradas com o auxílio dos circuitos da Figura 6:

$$S_s = \frac{IG_{NRT}^2}{8G_{NRT}} \quad (6)$$

$$N_s = \frac{\overline{in_{NRT}^2}}{4G_{NRT}} \quad (7)$$

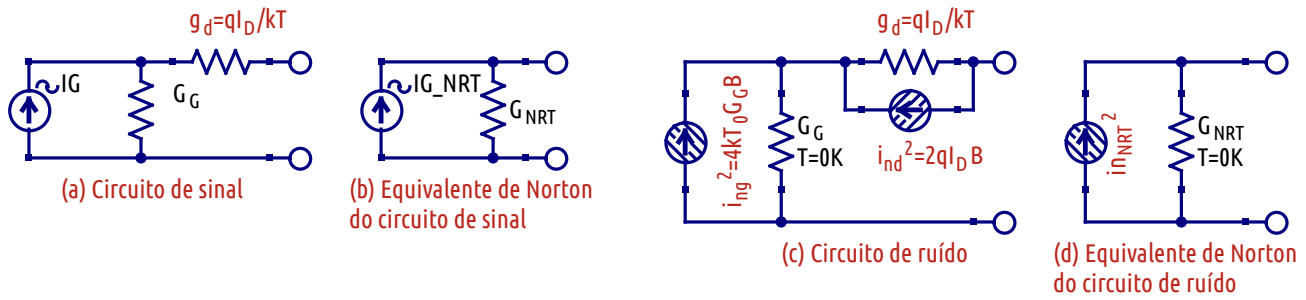


Figura 6: Circuitos para cálculo da SNR na saída

Substituindo, $I_{G_{NRT}} = \frac{g_d}{g_d + G_G} I_G$, $G_{NRT} = \frac{g_d G_G}{g_d + G_G}$, $\overline{i_{n_{NRT}}^2} = \left(\frac{g_d}{g_d + G_G} \right)^2 \overline{i_{ng}^2} + \left(\frac{G_G}{g_d + G_G} \right)^2 \overline{i_{nd}^2}$, nas equações acima, tem-se:

$$S_s = \frac{\left(\frac{g_d}{g_d + G_G} \right)^2 I_G^2}{8 \left(\frac{g_d G_G}{g_d + G_G} \right)} \quad (8)$$

$$N_s = \frac{\frac{g_d^2 \overline{i_{ng}^2} + G_G^2 \overline{i_{nd}^2}}{(g_d + G_G)^2}}{4 \left(\frac{g_d G_G}{g_d + G_G} \right)}. \quad (9)$$

Aplicando (4), (5), (8) e (9) na equação da figura de ruído, tem-se:

$$NF = 1 + \frac{1}{2} \frac{G_G}{g_d} \frac{T_d}{T_0} \quad (10)$$

Exemplo2: Cálculo da figura de ruído de um diodo com o ruído referido à entrada

Para encontrar a figura de ruído do diodo configurado em série, procederemos conforme a Figura 8. Nela percebe-se que o diodo foi substituído pelo modelo AC utilizado no exemplo anterior.

Para cada modelo observa-se a corrente de curto-circuito na saída quando a entrada é deixada em aberto e para quando nela aplica-se um curto-circuito.

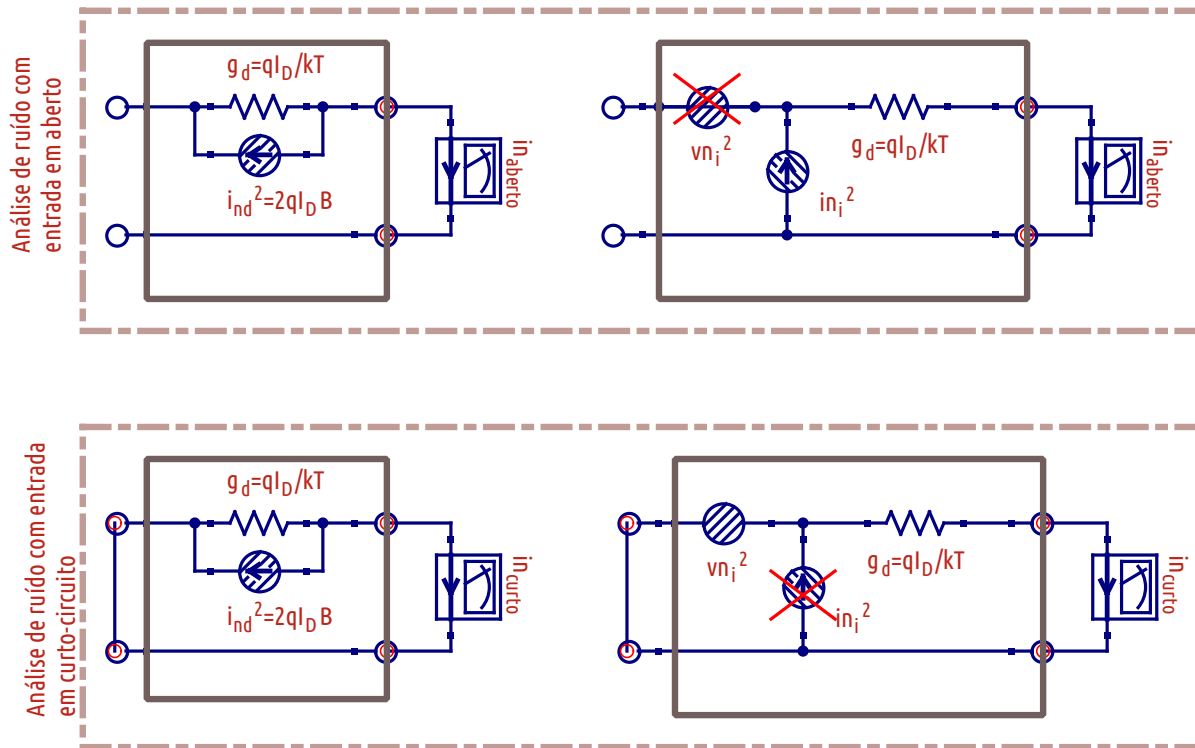


Figura 7: Circuitos para cálculo de NF

Para o caso da entrada em aberto, tem-se $i_{n_{aberto}} = 0$ e $i_{n_{aberto}} = i_{n_i}$. Como os circuitos são equivalentes, conclui-se que $i_{n_i} = 0$.

Aplicando-se um curto na entrada, tem-se que $i_{n_{curto}} = i_{n_d}$ e $i_{n_{curto}} = g_d v_{n_i}$. Por equivalência entre os circuitos, deduz-se que $v_{n_i} = i_{n_d} / g_d$.

Em seguida, substitui-se v_{n_i} e i_{n_i} em (3), resultando em:

$$NF = 1 + \frac{\overline{i_{nd}^2}}{4kT_0 B g_d^2} G_G, \quad (11)$$

que pode ser manipulada de forma a resultar em:

$$NF = 1 + \frac{2g_d k T_d B}{4kT_0 B g_d^2} G_G = 1 + \frac{1}{2} \frac{G_G}{g_d} \frac{T_d}{T_0}, \quad (12)$$

que é o mesmo resultado obtido no exemplo anterior.

Atividades:

1. Refaça os exemplos 1 e 2 considerando os circuitos da figura abaixo.

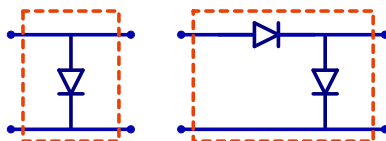


Figura 8: Circuitos para cálculo de NF

2. Para os circuitos de questão anterior, calcular a figura de ruído mínima e a respectiva resistência do gerador ótima.
3. Simule os circuitos da questão 1 e verifique os resultados detalhadamente, sempre com ênfase na otimização da figura de ruído.
4. Analise os resultados de simulação e compare-os com as previsões teóricas.
5. Sugira um método de projeto de amplificadores de ruído mínimo a partir do que você aprendeu com este experimento.
6. Disserte sobre o que aprendeu nesta atividade, procurando identificar os pontos que foram acrescentados ao seu repertório de conhecimento e suas dificuldades. Seja o mais sincero possível (sobretudo consigo).

Bibliografia

1. Notas de Aula
2. Material disponibilizado na plataforma moodle.