

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA - UFSC
CENTRO TECNOLÓGICO - CTC
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA E ELETRÔNICA
CURSO DE ENGENHARIA ELETRÔNICA
EEL 7319 - CIRCUITOS RF

PATRIK LOFF PERES
20103830

Relatório 3 - Circuitos com figura de ruído mínima

FLORIANÓPOLIS
2023

Atividades

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

Para o diodo em série temos pelo primeiro método que:

Lab 3 circuito 1 método 1 ③

Atividades

①

$NF = \frac{S_g/N_g}{S_s/N_s}$, $S_g = \frac{I_G^2}{8G_G}$, $N_g = kT_0 B$

$I_{GNorton} = I_G$, $G_{Norton} = G_G + g_d$, $S_s = \frac{I_G^2}{8(G_G + g_d)}$

$i_{ng} = \sqrt{4kT_0 G_G B}$
 $i_{nd} = \sqrt{2q I_D B}$

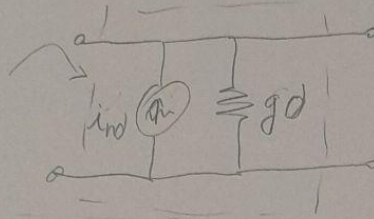
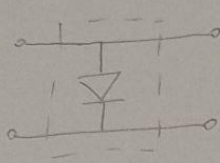
$N_s = \frac{i_{ng}^2 + i_{nd}^2}{4(G_G + g_d)}$

$NF = \frac{\frac{I_G^2}{8G_G} \cdot \frac{(i_{ng}^2 + i_{nd}^2)}{4(G_G + g_d)}}{kT_0 B \cdot \frac{I_G^2}{8(G_G + g_d)}} = \frac{4kT_0 G_G B + 2q I_D B}{4kT_0 B}$, $q I_D = g_d kT_D$

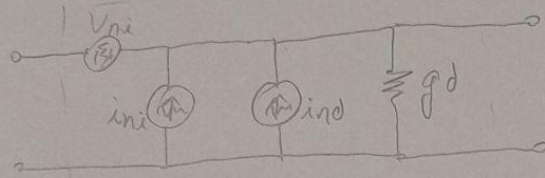
$NF = \frac{4kT_0 G_G + 2g_d kT_D}{4kT_0 G_G} = 1 + \frac{g_d T_D}{2G_G T_0}$

e para o segundo método (do ruído referido a entrada) temos:

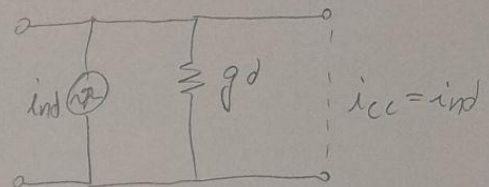
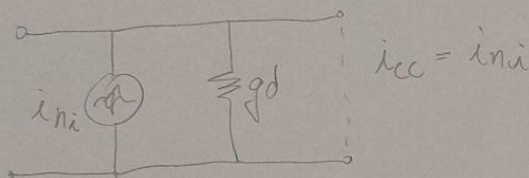
Circuitos 1 Método 2



$$NF = 1 + \frac{\overline{v_{ni}^2}}{4kT_0B} \frac{G_g + \overline{i_{ni}^2}}{4kT_0B G_g}$$

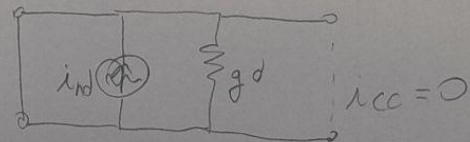
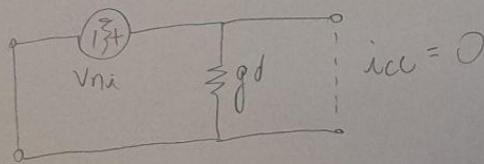


entrada em aberto:



$$i_{ni} = i_{nd} = \sqrt{2gI_D B} = \sqrt{2gd k T_d B}$$

entrada em curto:



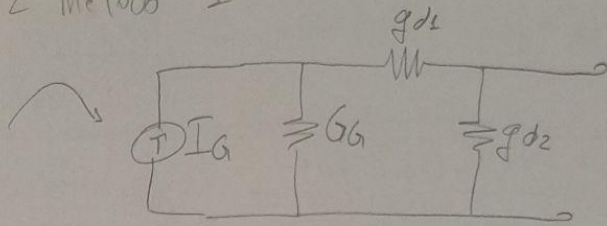
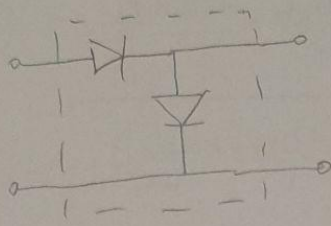
$$NF = 1 + \frac{2gd k T_d B}{4kT_0 B G_g} = 1 + \frac{1}{2} \frac{T_d}{T_0} \frac{g_d}{G_g}$$

Nota-se o mesmo resultado para ambos os métodos $NF = 1 + \frac{1}{2} \frac{T_d}{T_0} \frac{g_d}{G_g}$.

Para o circuito com um diodo em série e um diodo em paralelo obteve-se os seguintes resultados para o primeiro método:

Lab 3 circuito 2 metodo 1

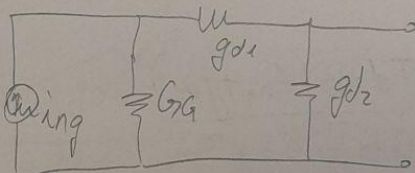
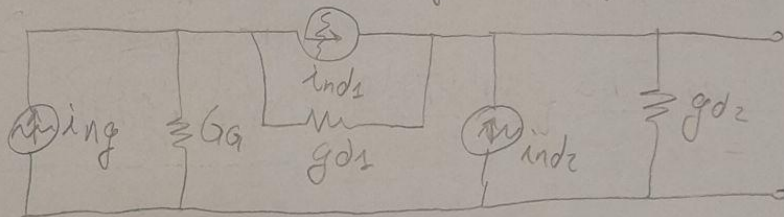
5



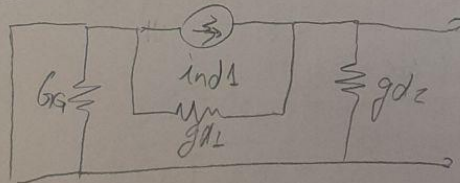
$$NF = \frac{S_g/N_g}{S_s/N_s}, \quad S_g = \frac{I_g^2}{8G_g}, \quad N_g = kT_0 B$$

$$I_{GNorton} = \frac{I_g g_{d1}}{G_g + g_{d1}}, \quad G_{Norton} = \left(\frac{g_{d1} G_g}{g_{d1} + G_g} \right) + g_{d2} = \frac{g_{d1} G_g + g_{d2} (g_{d1} + G_g)}{g_{d1} + G_g}$$

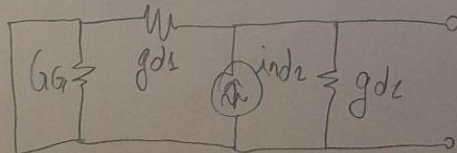
$$S_s = \frac{I_{GNorton}^2}{8 G_{Norton}} = \frac{I_g^2 g_{d1}^2}{(G_g + g_{d1})^2} \cdot \frac{g_{d1} + G_g}{8 (g_{d1} G_g + g_{d2} (g_{d1} + G_g))}$$



$$i_{n1} = \frac{i_{ng} \cdot g_{d1}}{G_g + g_{d1}}$$



$$i_{n2} = i_{n1}$$



$$i_{n3} = i_{n2}$$

$$i_{nNorton} = \sqrt{i_{n1}^2 + i_{n2}^2 + i_{n3}^2} = \sqrt{\frac{i_{ng}^2 g_{d1}^2}{(g_{d1} + G_G)^2} + i_{nd1}^2 + i_{nd2}^2}$$

$$i_{nNorton} = \sqrt{\frac{4kT_0 G_G B g_{d1}^2}{(g_{d1} + G_G)^2} + 2g_{d1} kT_{d1} B + 2g_{d2} kT_{d2} B}$$

$$G_{nNorton} = G_{Norton}$$

$$NF = \frac{\left(\frac{I_G^2}{8G_G} \left[\frac{4kT_0 G_G B g_{d1}^2}{(g_{d1} + G_G)^2} + 2g_{d1} kT_{d1} B + 2g_{d2} kT_{d2} B \right] \right)}{4 G_{Norton}}$$

$$\left(kT_0 B \cdot \frac{I_G^2 g_{d1}^2}{(G_G + g_{d1})^2} \cdot \frac{1}{8G_{Norton}} \right)$$

$$NF = \left[\frac{kT_0 B g_{d1}^2}{2(g_{d1} + G_G)^2} + \frac{g_{d1} kT_{d1} B}{2G_G} + \frac{g_{d2} kT_{d2} B}{2G_G} \right] \cdot \frac{(G_G + g_{d1})^2}{kT_0 B g_{d1}^2}$$

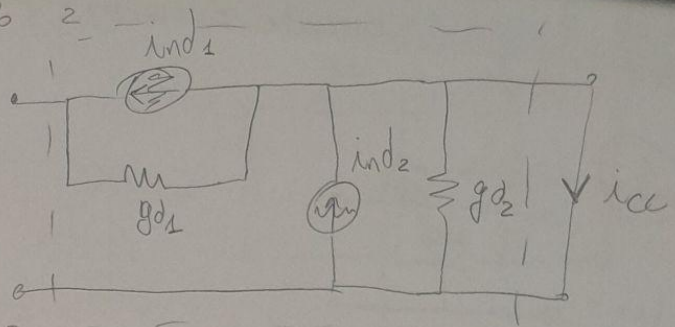
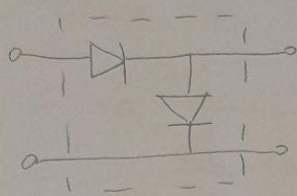
$$NF = 1 + \frac{g_{d1} kT_{d1} B (G_G + g_{d1})^2}{2G_G kT_0 B g_{d1}^2} + \frac{g_{d2} kT_{d2} B (G_G + g_{d1})^2}{2G_G kT_0 B g_{d1}^2}$$

$$NF = 1 + \frac{T_{d1} (G_G + g_{d1})^2}{2T_0 G_G g_{d1}} + \frac{T_{d2} g_{d2} (G_G + g_{d1})^2}{2T_0 G_G g_{d1}^2}$$

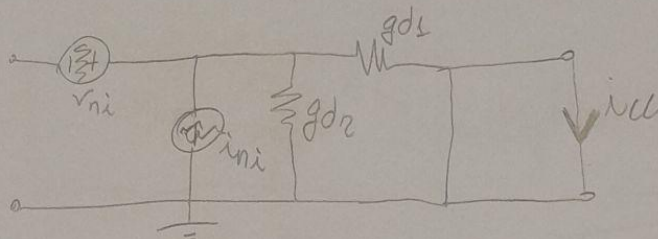
$$NF = 1 + \frac{(G_G + g_{d1})^2}{2T_0 G_G g_{d1}} \left(T_{d1} + \frac{T_{d2} g_{d2}}{g_{d1}} \right)$$

e para o segundo método (do ruído referido a entrada) temos:

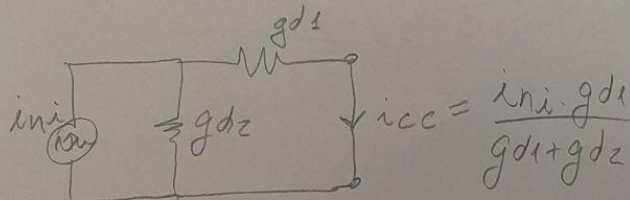
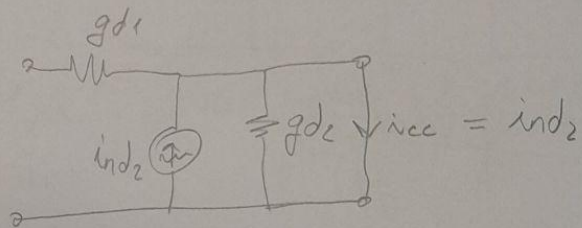
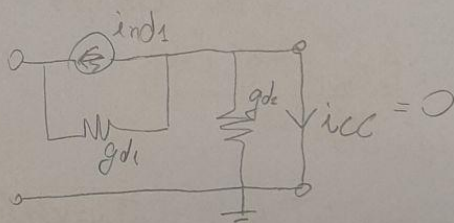
Circuitos 2 metodo 2



$$NF = 1 + \frac{v_{ni}^2}{4kT_0 B} \frac{g_{d1} + \frac{i_{ni}^2}{4kT_0 B g_{d1}}}{g_{d1}}$$

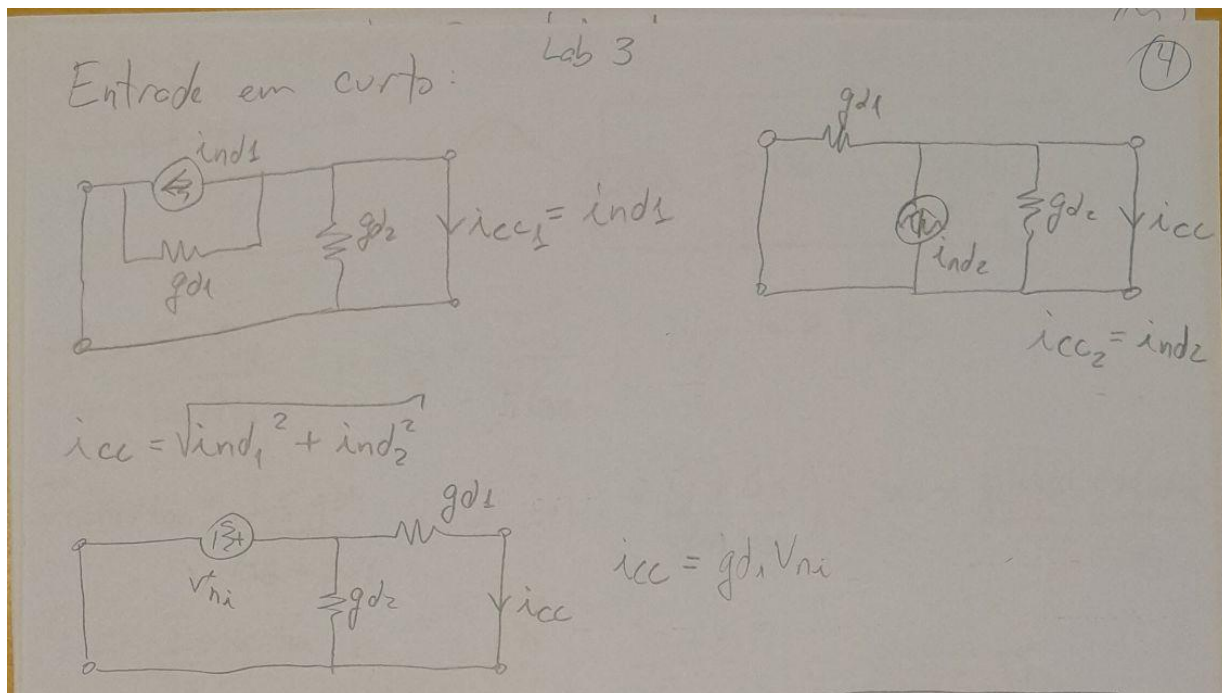


Entrada em aberto:



$$\frac{i_{ni} g_{d1}}{g_{d1} + g_{d2}} = i_{nd2} \Rightarrow i_{ni} = i_{nd2} \cdot \frac{(g_{d1} + g_{d2})}{g_{d1}} = \frac{\sqrt{2qI_0 B} (g_{d1} + g_{d2})}{g_{d1}}$$

$$i_{ni} = \frac{\sqrt{2g_{d2} k T_0 B} (g_{d1} + g_{d2})}{g_{d1}}$$



Lab 3 (6)

$$V_{ni} = \frac{\sqrt{ind_1^2 + ind_2^2}}{g_{d1}} = \frac{\sqrt{2g_{d1}kT_{d1}B + 2g_{d2}kT_{d2}B}}{g_{d1}}$$

$$NF = 1 + \left(\frac{2g_{d1}kT_{d1}B + 2g_{d2}kT_{d2}B}{g_{d1}^4kT_0B} \right) G_G + \frac{2g_{d2}kT_{d2}B(g_{d1} + g_{d2})^2}{g_{d1}^4kT_0B G_G}$$

$$NF = 1 + \frac{1}{2} \frac{T_{d1}G_G}{T_0} + \frac{1}{2} \frac{T_{d2}}{T_0} \frac{g_{d2}}{g_{d1}} G_G + \frac{1}{2} \frac{T_{d2}}{T_0} \frac{g_{d2}}{g_{d1}} (g_{d1} + g_{d2})^2$$

Nota-se que os resultados entre os métodos foi diferente.

2. Para os circuitos de questão anterior, calcular a figura de ruído mínima e a respectiva resistência do gerador ótima.

Vendo NF como uma função da resistência de entrada (neste caso, a admitância G_G), a figura de ruído mínima é NF aplicada em G_{Gopt} que pode ser obtida pela derivada de NF em relação a G_G e igualando a zero, pois o comportamento esperado é que NF seja uma parábola em função de G_G .

Sendo assim, temos:

$$NF = 1 + \frac{1}{2} \frac{T_d}{T_o} \frac{g_d}{G_G} \quad , \quad \frac{\partial NF}{\partial G_G} = \frac{1}{2} \frac{T_d}{T_o} g_d \cdot \left(\frac{-1}{G_G^2} \right) = 0$$

$$G_{G_{opt}} = \infty$$

Como a admitância é o inverso da resistência, a resistência ótima é $R_{sopt} = 0\Omega$.

Portanto a NF mínimo é 1.

Processo similar foi realizado para o circuito 2 (com um diodo em série seguido de um em paralelo)

$$NF = 1 + \frac{(G_G + g_{d1})^2}{2 T_o G_G g_{d1}} \left(T_{d1} + T_{d2} \frac{g_{d2}}{g_{d1}} \right)$$

$$\frac{\partial NF}{\partial G_G} = \frac{1}{2 T_o G_G g_{d1}} \left(T_{d1} + T_{d2} \frac{g_{d2}}{g_{d1}} \right) \cdot 2 (G_G + g_{d1}) + \frac{(G_G + g_{d1})^2}{2 T_o g_{d1}} \left(T_{d1} + T_{d2} \frac{g_{d2}}{g_{d1}} \right) \cdot \left(\frac{-1}{G_G^2} \right)$$

$$\frac{\partial NF}{\partial G_G} = 0 \Rightarrow \frac{2}{G_G} \left(T_{d1} + T_{d2} \frac{g_{d2}}{g_{d1}} \right) (G_G + g_{d1}) + \frac{(G_G + g_{d1})^2}{2 T_o g_{d1}} \left(T_{d1} + T_{d2} \frac{g_{d2}}{g_{d1}} \right) \cdot \left(\frac{-1}{G_G^2} \right) = 0$$

$$\frac{2 (G_G + g_{d1})}{G_G} - \frac{(G_G + g_{d1})^2}{G_G^2} = 0 \Rightarrow \frac{G_G + g_{d1}}{G_G} \left(2 - \frac{G_G + g_{d1}}{G_G} \right) = 0$$

$$\frac{G_G + g_{d1}}{G_G} = 2 \Rightarrow G_G = g_{d1}$$

$$NF_{min} = 1 + \frac{4 g_{d1}^2}{2 T_o g_{d1}^2} \left(T_{d1} + T_{d2} \frac{g_{d2}}{g_{d1}} \right) = 1 + \frac{2}{T_o} \left(T_{d1} + T_{d2} \frac{g_{d2}}{g_{d1}} \right)$$

Neste caso a resistência ótima é o inverso da admitância do diodo em série, e a NF mínima é:

$$NF_{min} = 1 + \frac{2}{T_o} \left(T_{d1} + T_{d2} \frac{g_{d2}}{g_{d1}} \right)$$

considerando, $g_{d1} = g_{d2}$, $T_{d1} = T_{d2}$, temos que:

$$NF_{min} = 5,14$$

3. Simule os circuitos da questão 1 e verifique os resultados detalhadamente, sempre com ênfase na otimização da figura de ruído.

Usando o testbench montado no lab 2 adaptado ao circuito que queremos obtivemos o seguinte resultado

Figura 1: circuito 1

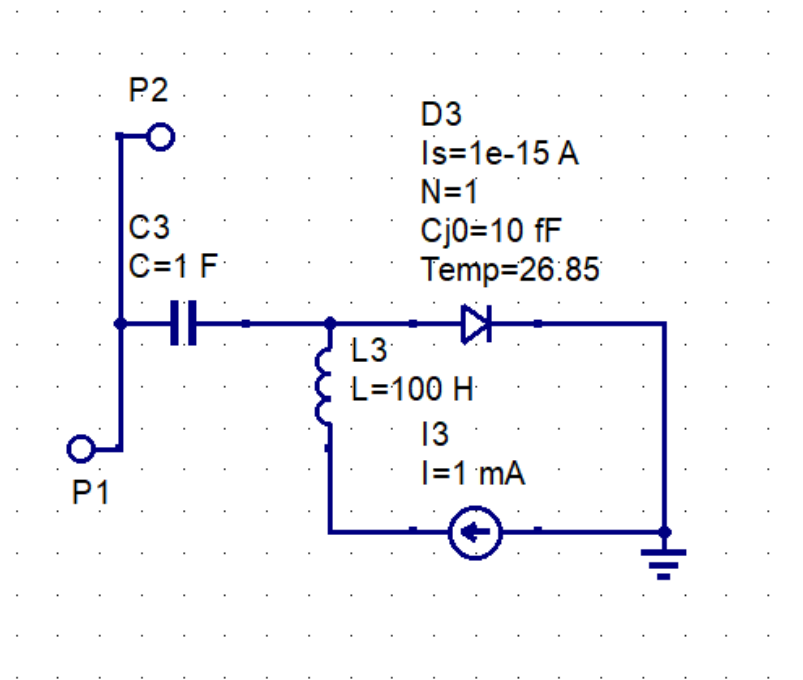
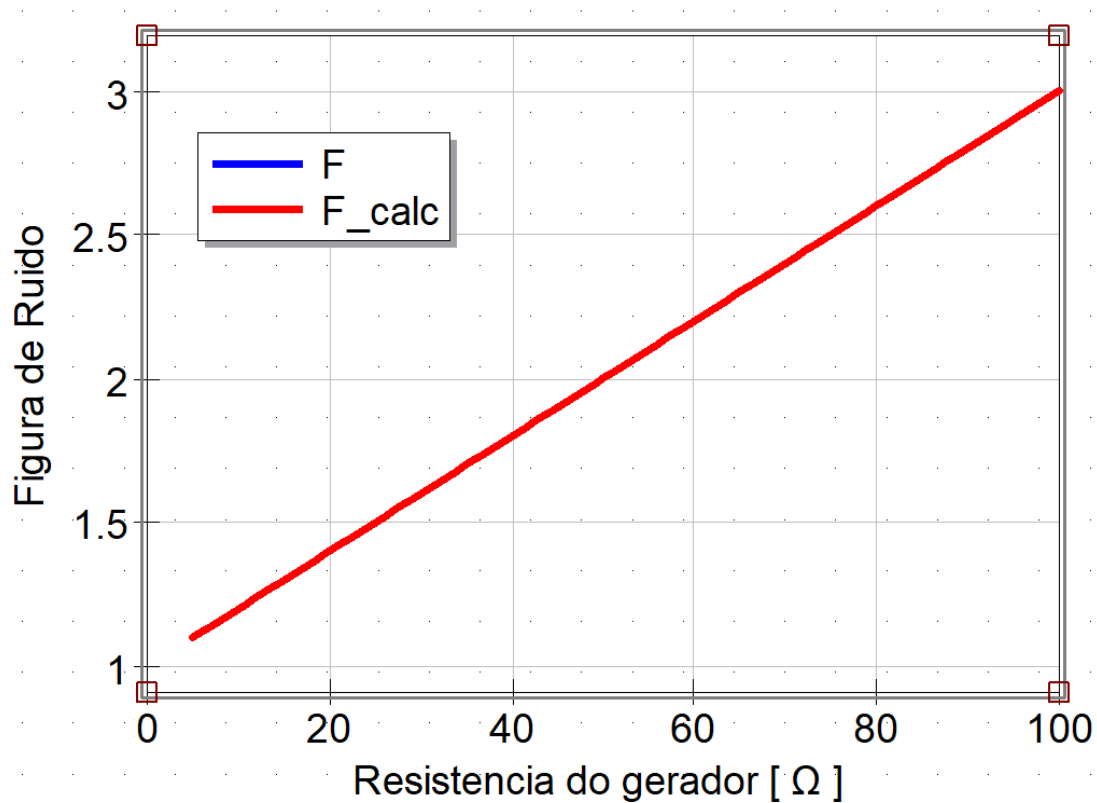


Figura 2: Simulação do circuito 1



A curva simulada (azul) coincidiu perfeitamente com a curva teórica (vermelha), claro que os resultados foram exatamente iguais por conta dos componentes usados na simulação serem ideais (não só os diodos, como os capacitores, indutores, etc), além das não idealidades consideradas nos cálculos teóricos. Porém é possível notar a forma linear da função figura de ruído, sendo possível inferir que de fato a resistência de gerador ótima é $R_{s_{opt}} = 0\Omega$.

Para o circuito 2 foi usado o mesmo testbench, mas adaptado ao novo circuito (cujo foi usado os mesmos diodos com a mesma polarização, por questão de simplicidade)

Figura 3: circuito 2

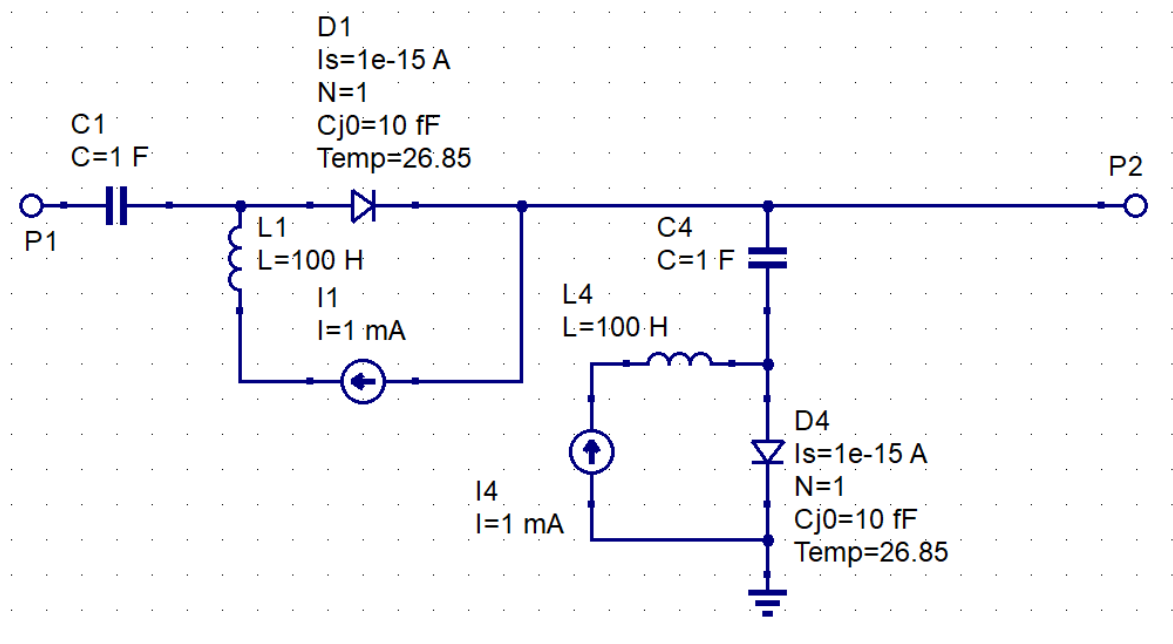
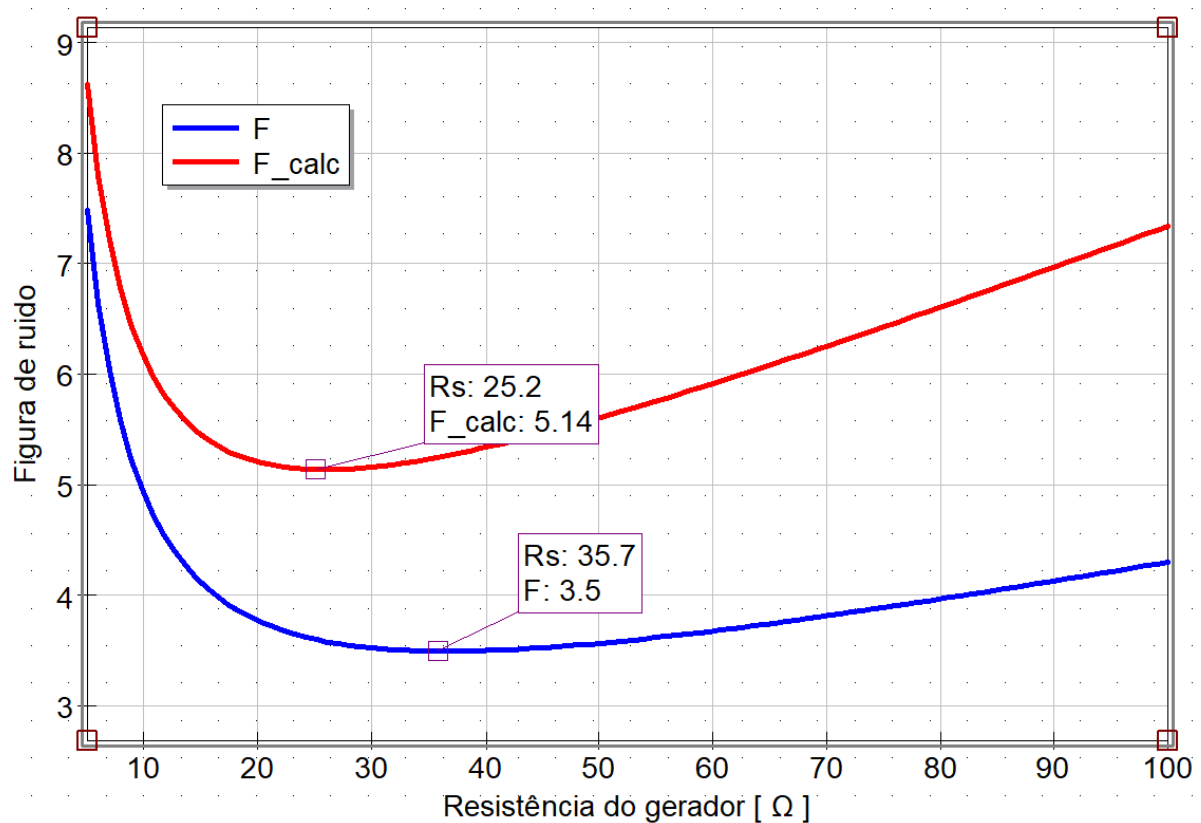


Figura 4: simulação do circuito 2



A curva vermelha é o resultado teórico e a curva azul o resultado da simulação. Dos resultados simulados podemos extrair que $NF_{min} = 3,5$ acontece quando $R_s = 35,7\Omega$.

4. Analise os resultados de simulação e compare-os com as previsões teóricas.

A simulação do circuito 1 (diodo em paralelo) corresponderam a previsão teórica em todos os resultados e parâmetros.

Já para o circuito 2 aparentemente deu tudo errado, nem os resultados teóricos entre os dois métodos bateram, sendo que a equação do método de determinar os equivalentes de Norton deu um resultado próximo do simulado tanto em questão de valores quanto de forma, por outro lado o método de ruído referido a entrada resultou em uma equação com resultados bem diferentes do simulado. Um motivo para essas diferenças, especialmente para o método do ruído referido a entrada, é o fato de as fontes do modelo terem que ser independentes (para a equação do NF ter sentido), o que não é verdade para o caso dos diodos, já que é esperado que haja correlação cruzada entre a geração de ruído dos diodos.

5. Sugira um método de projeto de amplificadores de ruído mínimo a partir do que você aprendeu com este experimento.

A partir da definição de uma topologia, que vai envolver escolher (ou desenvolver) a tecnologia adequada para a aplicação desejada, determina-se a figura de ruído. A partir daí podemos determinar a resistência de gerador ótima, para que façamos o casamento de impedâncias entre a fonte de sinal e o amplificador, caso necessário, além de poder determinar através da equação da NF os parâmetros principais que causam ruído, e tomar a decisão de quais devem ser as mudanças, caso necessário, para garantir que a NF vai baixar, tendo em vista que o mesmo parâmetro pode afetar de diversas formas o NF e que deve-se fazer um balanço entre ganho e perda no caso de troca de algum parâmetro.

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).

Consegui ter uma ideia bem melhor do que é e como calcular a figura de ruído, e as práticas de análise de circuitos necessárias para isso, como circuitos equivalentes e uso de modelos que era algo que já tinha perdido a prática de fazer esses cálculos.

Também, enxergar de forma mais clara a importância do casamento de impedância, um conceito que já havia sido me apresentado, mas vendo o NF como função da impedância de entrada e avaliando o resultado é uma forma muito interessante de ver a máxima transferência de potência.

Foi possível identificar os passos necessários para o projeto de amplificadores e a avaliação crítica dos parâmetros do amplificador a serem alterados para garantir o mínimo ruído possível.

Por fim, foi frustrante a parte de cálculos teóricos do circuito 2 (diodo em série seguido do diodo em paralelo) pelo fato de não ter batido com os resultados simulados (eu imagina que o método usando equivalente de Norton deveria ter dado resultados iguais ao simulado, sendo esse o caso, não sei o que está errado).