

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

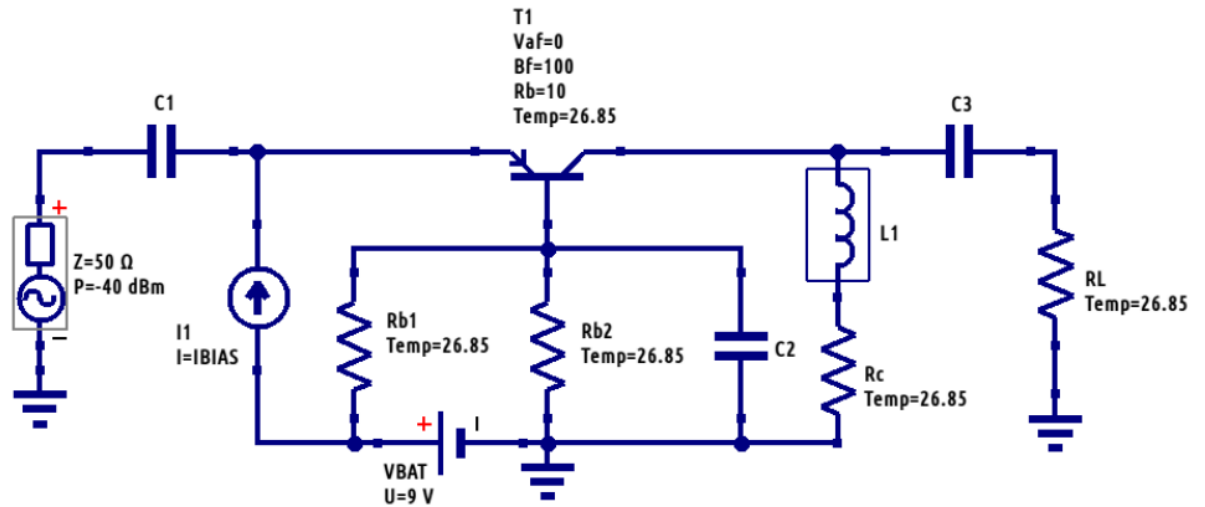
**PATRIK LOFF PERES**  
20103830

**Relatório 4 - Amplificador de Baixo Ruído**

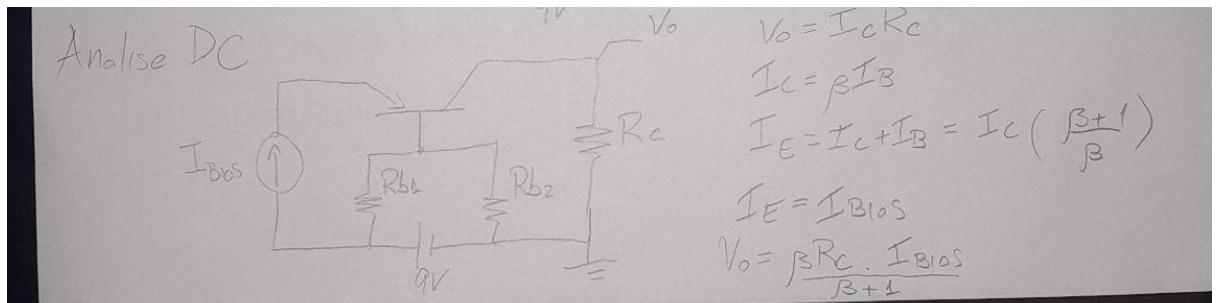
**FLORIANÓPOLIS**  
**2023**

Será projetado um amplificador de baixo ruído, conforme o circuito da figura 1

Figura 1 - Topologia



As especificações deste amplificador são:  $R_{in} = 50\Omega$  e ganho de tensão  $A_v = 50\text{dB} = 316$ . Inicialmente, para garantir as especificações será feita a análise DC do circuito.

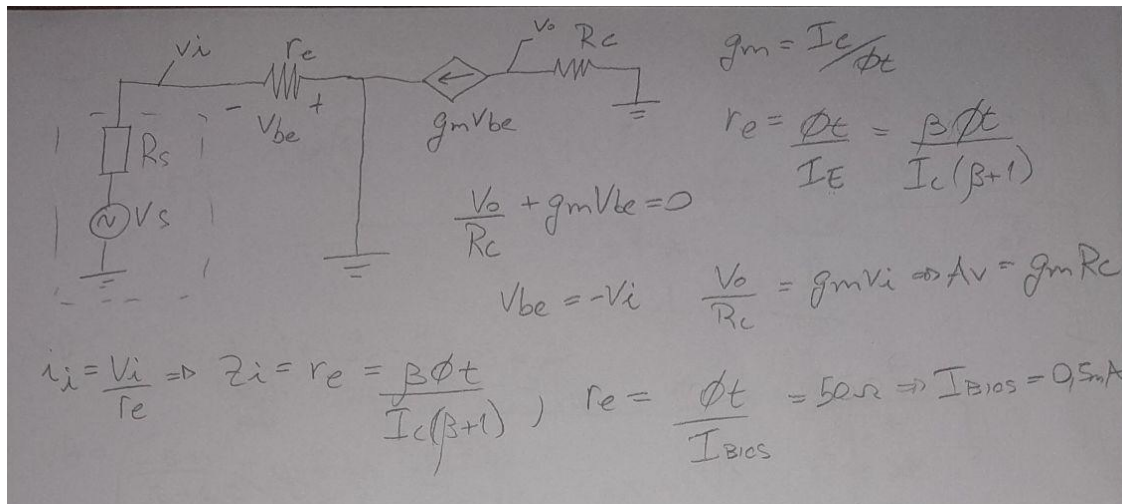


Para fins de análise, foi considerado operações em baixas frequências, de forma que podemos desconsiderar a capacitância parasita do transistor, além de considerar capacitores e indutores ideais com capacidade e indutância infinitas.

Tal simplificação é tomada por que os capacitores e indutores, neste circuito, estão sendo usados para isolar o circuito de polarização do circuito de sinal.

Nota-se por inspeção no circuito que os resistores da base estão operando como divisor de tensão da bateria, para garantir nível de tensão DC na base do transistor, também o resistor  $R_c$  define (juntamente com  $I_{bias}$  que será mencionada em breve) a tensão de coletor, que tem que ser tal que  $V_{ce} < V_{sat}$  para garantir que o transistor irá funcionar na região ativa.

Realizando a análise AC do circuito,



Para garantir os parâmetros de projeto, podemos definir  $I_{bias} = 0,5 \text{mA}$  e  $R_L = 16350 \Omega$

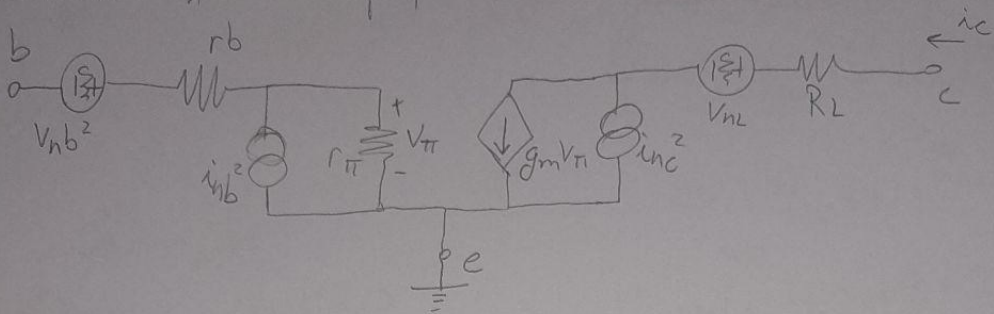
Sendo assim, podemos definir de forma arbitrária os resistores da base e o resistor do coletor  $R_c$ , para garantir os níveis de tensão mencionados,  $R_{b1} = R_{b2} = 1 \text{k}\Omega$  e  $R_c = 10 \text{k}\Omega$ .

Definido o circuito do amplificador, vamos calcular  $NF$ ,  $NF_{min}$  e  $R_{sopt}$ .

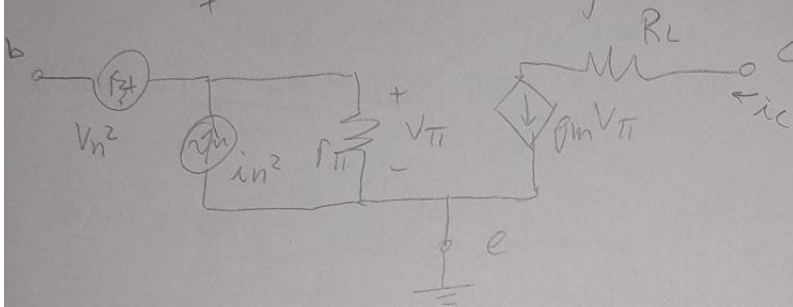
Lab 4

(3)

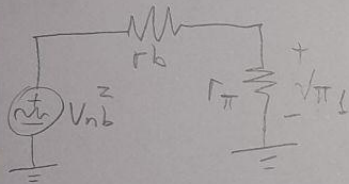
Circuitos equivalente (pequenos sinais) com ruído



Circuitos equivalente com ruído referido a entrada



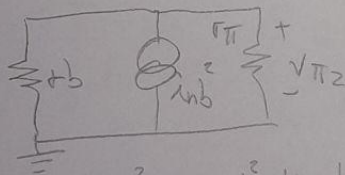
Considerando entrada em curto circuito



$$|V_{\pi 1}|^2 = |V_{nb}|^2 \left| \frac{r_{\pi}}{r_{\pi} + r_b} \right|^2$$

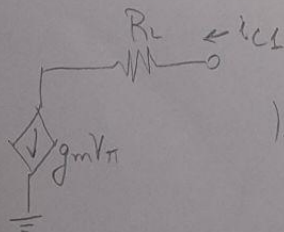
$$|V_{nb}|^2 = 4kT r_b B$$

$$|i_{nb}|^2 = 2q I_B B$$

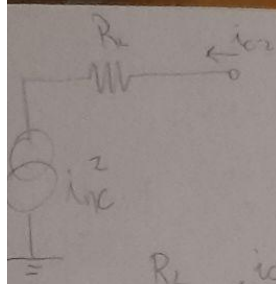


$$|V_{\pi 2}|^2 = |i_{nb}|^2 \left| \frac{r_{\pi} r_b}{r_{\pi} + r_b} \right|^2$$

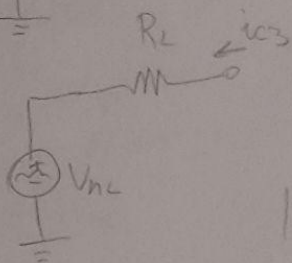
$$|V_{\pi}|^2 = |V_{\pi 1}|^2 + |V_{\pi 2}|^2 = |V_{nb}|^2 \left| \frac{r_{\pi}}{r_{\pi} + r_b} \right|^2 + |i_{nb}|^2 \left| \frac{r_{\pi} r_b}{r_{\pi} + r_b} \right|^2$$



$$|i_{c1}|^2 = g_m^2 \left[ 4kT r_b B \left| \frac{r_{\pi}}{r_{\pi} + r_b} \right|^2 + 2q I_B B \left| \frac{r_{\pi} r_b}{r_{\pi} + r_b} \right|^2 \right]$$



$$|i_{c2}|^2 = |i_{nc}|^2 = 2qI_C B$$

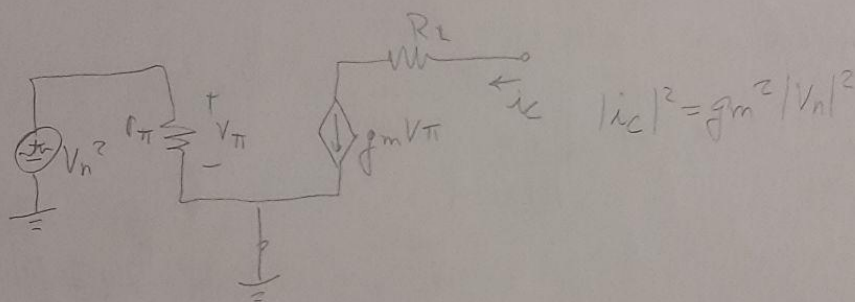


$$|i_{c3}|^2 = 0$$

$$|i_{c3}|^2 = \frac{|V_{nl}|^2}{R_L^2}$$

$$|i_c|^2 = |i_{c1}|^2 + |i_{c2}|^2 + |i_{c3}|^2 = 4kT r_b B \left| \frac{g_m r_\pi}{r_\pi + r_b} \right|^2 + 2qI_C B \left| \frac{g_m r_\pi r_b}{r_\pi + r_b} \right|^2 + 2qI_C B$$

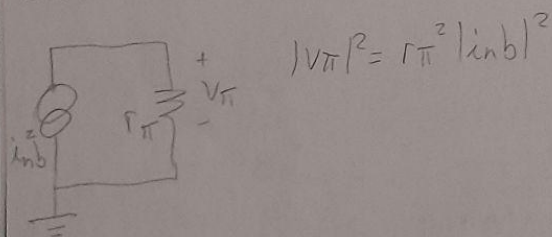
$$|i_c|^2 = 4kT r_b B \left| \frac{g_m r_\pi}{r_\pi + r_b} \right|^2 + 2qI_C B \left| \frac{g_m r_\pi r_b}{r_\pi + r_b} \right|^2 + 2qI_C B + \frac{4kT R_L B}{R_L^2}$$



$$|i_c|^2 = g_m^2 |V_n|^2$$

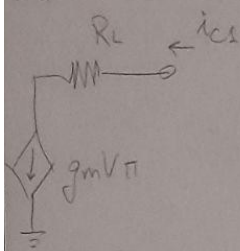
$$|V_n|^2 = 4kT r_b B \left| \frac{r_\pi}{r_\pi + r_b} \right|^2 + 2qI_C B \left| \frac{r_\pi r_b}{r_\pi + r_b} \right|^2 + 2q \frac{I_C}{g_m^2} B + \frac{4kT B}{R_L g_m^2}$$

Considerando entrada em aberto:

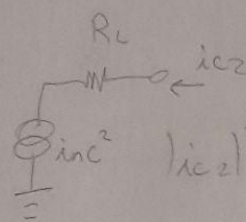


$$|V_\pi|^2 = r_\pi^2 |i_{nb}|^2$$

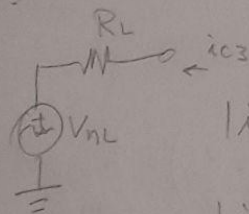
Lab 4



$$|i_{c1}|^2 = g_m^2 r_{\pi}^2 |i_{nb}|^2$$



$$|i_{c2}|^2 = |i_{nc}|^2$$

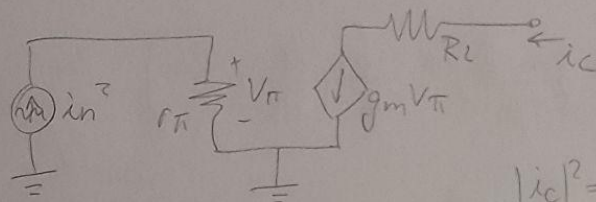


$$|i_{c3}|^2 = 0$$

$$|i_{c3}|^2 = \frac{|V_{NL}|^2}{R_L^2}$$

$$|i_c|^2 = g_m^2 r_{\pi}^2 2qI_{BB} + 2qI_{cB}$$

$$|i_c|^2 = g_m^2 r_{\pi}^2 2qI_{BB} + 2qI_{cB} + \frac{4kTB}{R_L}$$



$$|V_{\pi}|^2 = |i_{n\pi}|^2 r_{\pi}^2$$

$$|i_c|^2 = g_m^2 r_{\pi}^2 |i_{n\pi}|^2$$

$$|i_{n\pi}|^2 = 2qI_{BB} + 2q\frac{I_c}{g_m^2 r_{\pi}^2} + \frac{4kTB}{R_L g_m^2 r_{\pi}^2}$$



Lab 4

$$|V_n|^2 = 4kT_{rb}B \left| \frac{r_\pi}{r_\pi + r_b} \right|^2 + 2qI_B B \left| \frac{r_\pi r_b}{r_\pi + r_b} \right|^2 + 2q \frac{I_c}{g_m^2} B$$

$$|i_n|^2 = 2qI_B B + 2q \frac{I_c}{g_m^2 r_\pi^2} B$$

$$NF = 1 + \frac{V_n^2}{4kT_0 B R_s} + \frac{i_n^2 R_s}{4kT_0 B}$$

$$g_m r_\pi = \beta$$

$$\left| \frac{r_\pi}{r_\pi + r_b} \right|^2 \approx 1$$

$$I_c = I_B \beta$$

$$|V_n|^2 = 4kT_{rb}B + \frac{2qI_c B}{\beta} \left| \frac{r_\pi r_b}{r_\pi + r_b} \right|^2 + 2q \frac{I_c}{g_m^2} B$$

$$\frac{qI_c}{kT} \approx g_m$$

$$|i_n|^2 = \frac{2qI_c B}{\beta} + \frac{2qI_c B}{\beta^2} \approx \frac{2qI_c B}{\beta}$$

$$NF = 1 + \frac{4kT_{rb}B}{4kT_0 R_s B} + \frac{2qI_c B}{\beta 4kT_0 B R_s} \left| \frac{r_\pi r_b}{r_\pi + r_b} \right|^2 + \frac{2qI_c B}{g_m^2 4kT_0 B R_s} + \frac{2qI_c B R_s}{4kT_0 B \beta}$$

$$NF = 1 + \frac{T_{rb}}{T_0 R_s} + \frac{g_m}{2\beta R_s} \left| \frac{r_\pi r_b}{r_\pi + r_b} \right|^2 + \frac{1}{2g_m R_s} + \frac{g_m R_s}{2\beta}$$

$$NF = 1 + \frac{V_n^2}{4kT_0 B R_s} + \frac{i_n^2 R_s}{4kT_0 B}, \quad \frac{\partial NF}{\partial R_s} = \frac{V_n^2}{4kT_0 B} \left( \frac{-1}{R_s^2} \right) + \frac{i_n^2}{4kT_0 B} = 0$$

$$R_{s_{opt}} = \sqrt{\frac{V_n^2}{I_{in}^2}} = \sqrt{\frac{4kT r_b B + \frac{2g I_c B}{\beta} \left| \frac{r_{\pi} r_b}{r_{\pi} + r_b} \right|^2 + \frac{2g I_c B}{g_m^2}}{\frac{2g I_c B}{\beta}}}$$

$$R_{s_{opt}} = \sqrt{\frac{\cancel{4kT} r_b B \cdot \cancel{\beta} + \frac{2g I_c B \cdot \cancel{\beta}}{\cancel{\beta}} \left| \frac{r_{\pi} r_b}{r_{\pi} + r_b} \right|^2 + \frac{\cancel{2g I_c B} \cdot \cancel{\beta}}{\cancel{2g I_c B} \cdot g_m^2}}{\frac{2g I_c B}{\beta}}}$$

$$R_{s_{opt}} = \sqrt{\frac{2 r_b \beta}{g_m} + \left| \frac{r_{\pi} r_b}{r_{\pi} + r_b} \right|^2 + \frac{\beta}{g_m^2}}$$

$$R_{s_{opt}} = \sqrt{\frac{V_n^2}{I_{in}^2}}, NF_{min} = NF \Big|_{R_S = R_{s_{opt}}}$$

$$NF_{min} = 1 + \frac{V_n^2}{4kT_o B \cdot \sqrt{\frac{V_n^2}{I_{in}^2}}} + \frac{I_{in}^2}{4kT_o B} \cdot \sqrt{\frac{V_n^2}{I_{in}^2}} = 1 + \frac{1}{4kT_o B} \left( \sqrt{V_n^2 I_{in}^2} + \sqrt{V_n^2 I_{in}^2} \right)$$

$$NF_{min} = 1 + \frac{1}{2kT_o B} \sqrt{V_n^2 I_{in}^2}$$

$$NF_{min} = 1 + \frac{1}{2kT_o B} \left( \left| \frac{4kT r_b B}{\beta + r_b g_m} \right|^2 + \frac{2g I_c B}{\beta} \left| \frac{\beta r_b}{\beta + r_b g_m} \right|^2 + \frac{2g I_c B}{g_m^2} \left( \frac{2g I_c B}{\beta} + \frac{2g I_c B}{g_m^2 r_{\pi}^2} \right) \right)$$

abrindo os termos dentro do raíz quadrada

$$\frac{8kT r_b g I_c \beta}{(\beta + r_b g_m)^2} + \frac{4g^2 I_c^2 r_b^2}{(\beta + r_b g_m)^2} + \frac{4g^2 I_c^2}{\beta g_m^2} + \frac{8kT r_b g I_c}{(\beta + r_b g_m)^2} + \frac{4g^2 I_c^2 r_b^2}{\beta (\beta + r_b g_m)^2} + \frac{4g^2 I_c^2}{g_m^2 \beta^2}$$

$$\frac{8kT r_b g I_c}{(\beta + r_b g_m)^2} \left( \beta + 1 \right) + \frac{4g^2 I_c^2 r_b^2}{(\beta + r_b g_m)^2} \left( 1 + \frac{1}{\beta} \right) + \frac{4g^2 I_c^2}{g_m^2 \beta} \left( 1 + \frac{1}{\beta} \right)$$



$$NF_{min} = 1 + \frac{1}{2kT_0} \sqrt{\frac{2kT_0 r_b g I_c \beta}{(\beta + r_b g m)^2} + \frac{4g^2 I_c^2 r_b^2}{(\beta + r_b g m)^2} + \frac{4g^2 I_c^2}{g m^2 \beta}}$$

$$NF_{min} = 1 + \frac{1}{2kT_0} \sqrt{\frac{2g I_c r_b}{(\beta + r_b g m)^2} (kT_0 \beta + 2g I_c r_b)} + \frac{4g^2 I_c^2}{g m^2 \beta}$$

Resolvendo numericamente NF, Rsopt e NFmin, temos que:

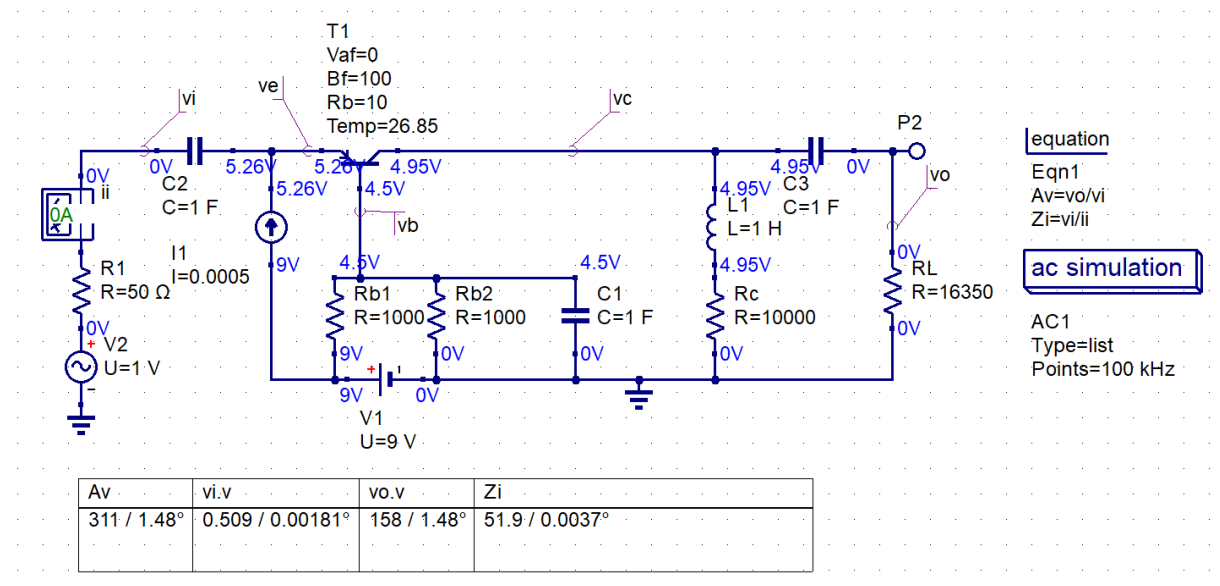
$$NF_{Rs=50} = 1,728964373879718$$

$$NF_{min} = 1,108334794551803$$

$$R_{sopt} = 608,9646177570338\Omega$$

Simulando o circuito no QUCS:

Figura 2 - Simulação polarização e parâmetros



Nota-se que a impedância de entrada foi de aproximadamente 50Ω e o ganho de tensão de aproximadamente 310, como esperado. Com base na simulação do circuito da figura 2 submetido ao testbench de figura de ruído desenvolvido no lab 2 da figura 3, e na solução numérica das equações de NFmin e Rsopt, podemos exprimir os resultados na figura 4.

Figura 3 - testbench

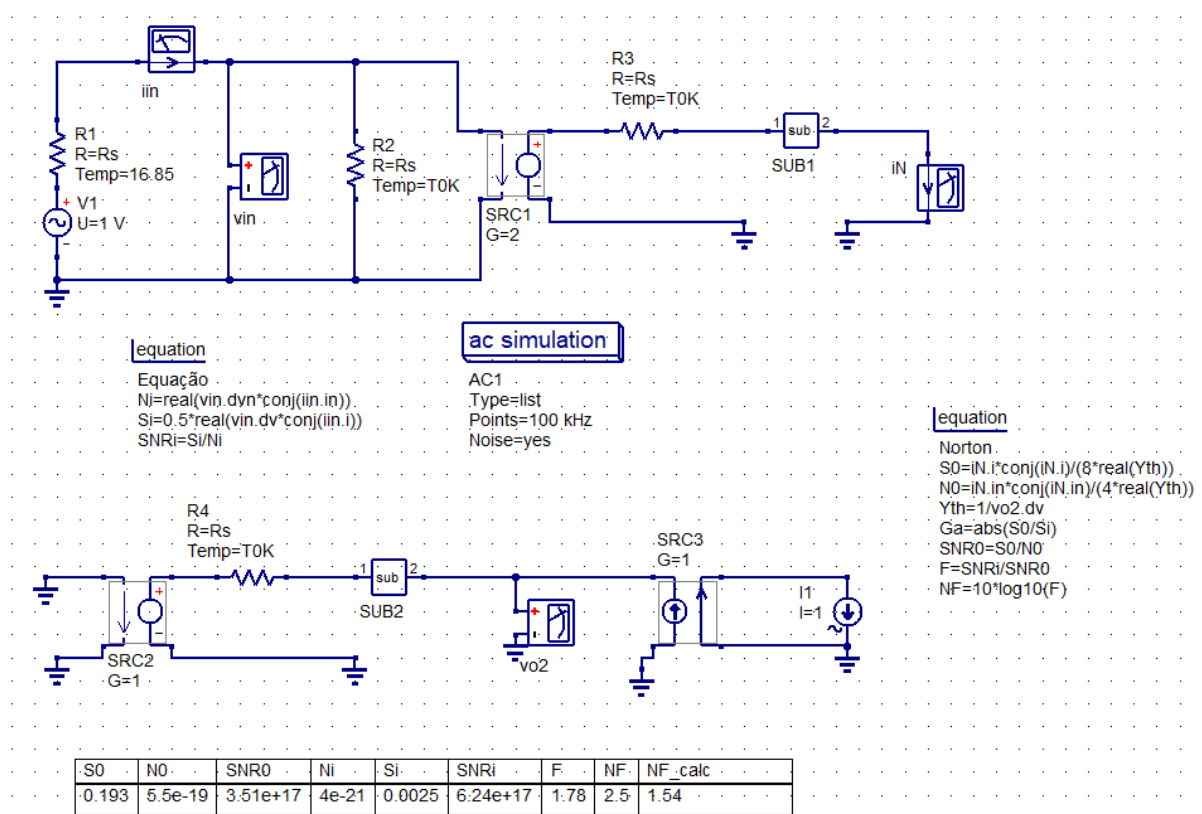
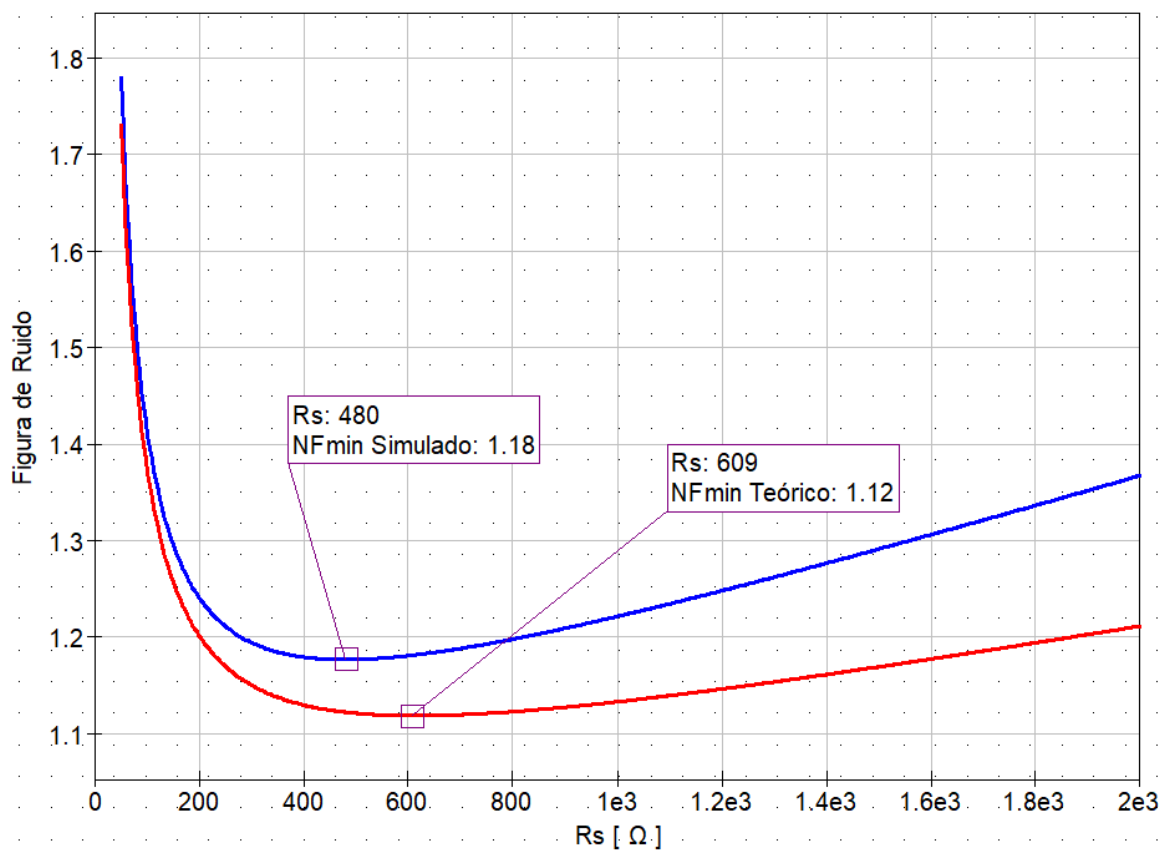


Figura 4 - Gráfico dos resultados



Nota-se que para  $R_s=50\Omega$  a figura de ruído foi de 1,78, valor próximo ao teórico, porém o resultado simulado divergiu do resultado teórico à medida que  $R_s$  aumenta, além de que o ponto de figura de ruído mínimo foi diferente.

Substituindo o transistor ideal do circuito da figura 1 pelo modelo do BC857A e mudando apenas  $R_c$  para  $8k\Omega$  para garantir que ele não sature, podemos usar as mesmas equações do caso anterior

$$NF_{R_s=50} = 1,577630787099623$$

$$NF_{min} = 1,056706701818477$$

$$R_{s_{opt}} = 1007,682109703788\Omega$$

Simulando no QUCS:

Figura 5 - Simulação

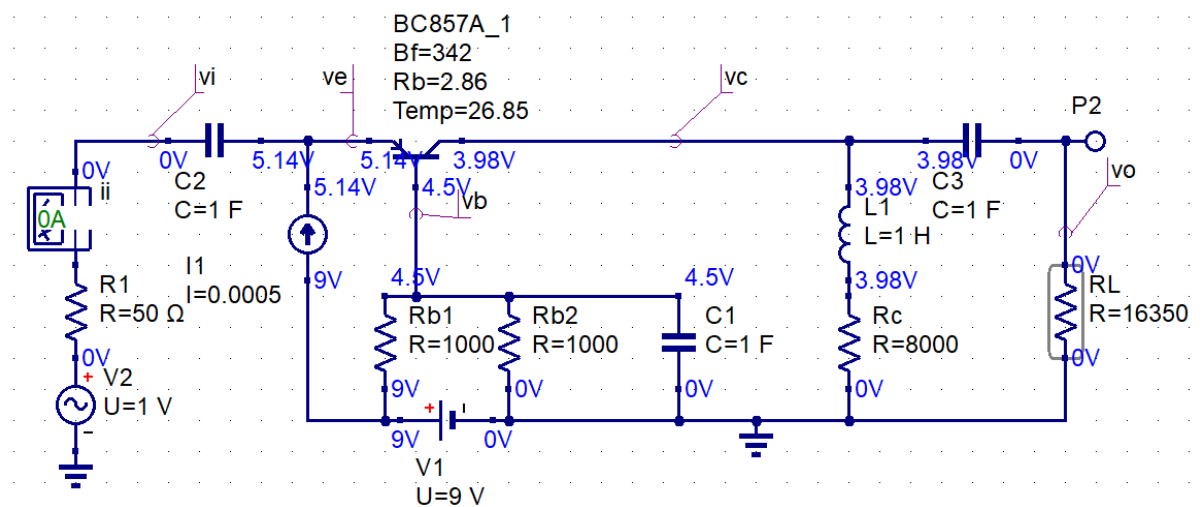
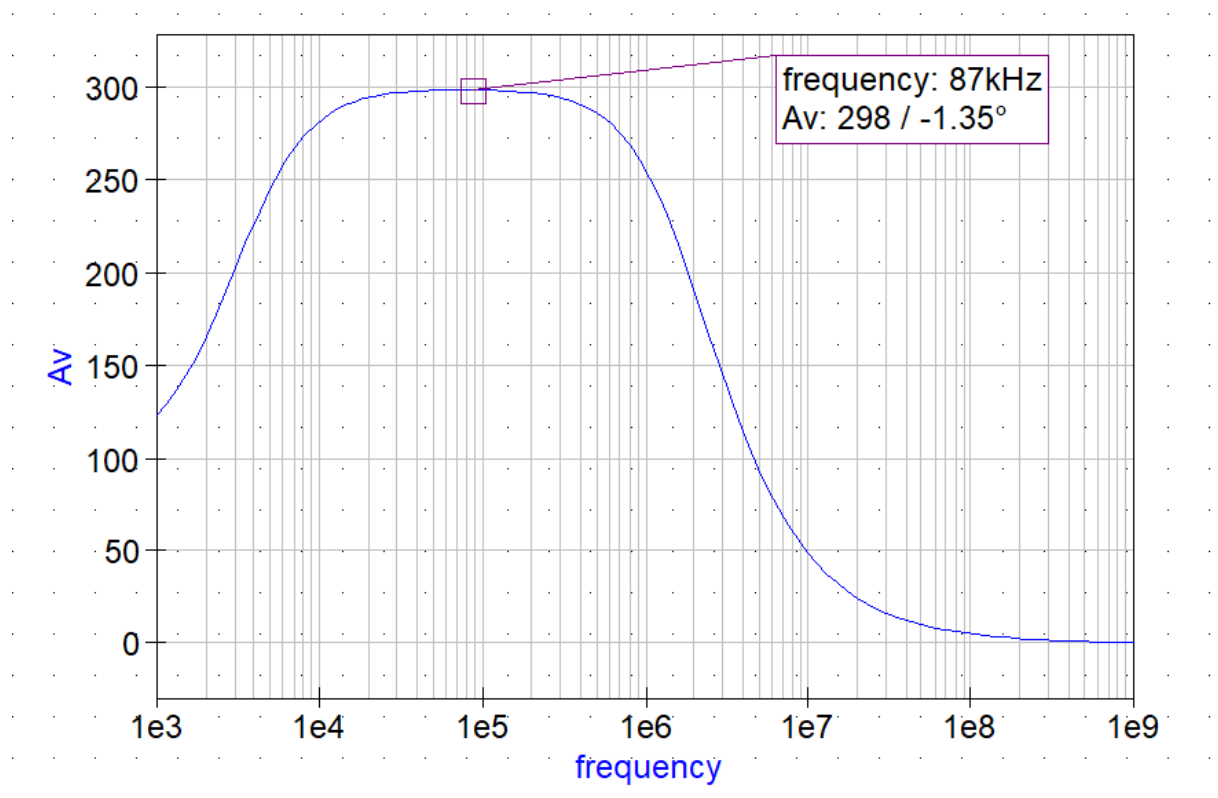
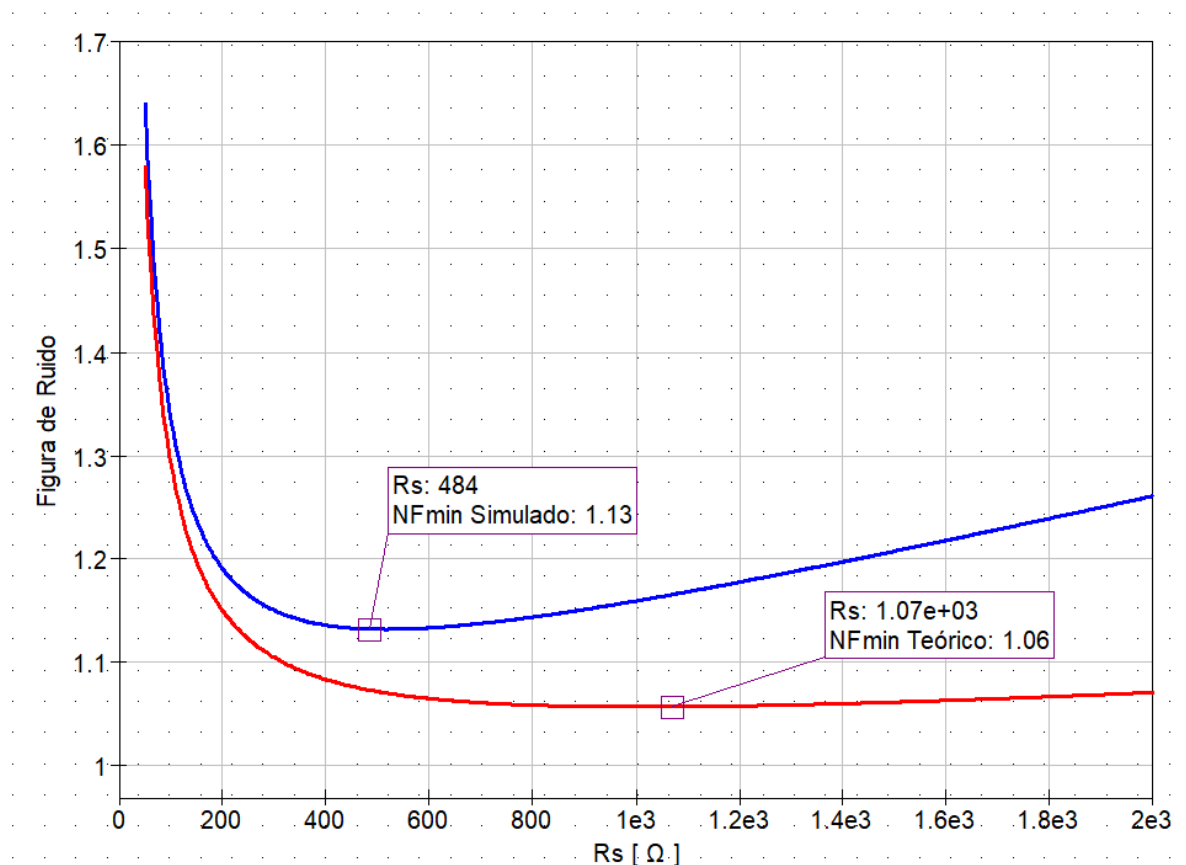


Figura 6 - Ganho



Nota-se do gráfico que o ganho do amplificador tem forte dependência da frequência e sai da zona de operação na faixa dos megahertz, além de que, mesmo na faixa de frequência onde o transistor está na região ativa, o ganho foi menor do que os  $\sim 310$  esperado.

Figura 7 - Gráfico dos resultados BC857A



Os resultados da simulação mostra que para  $R_s = 50\Omega$  a figura de ruído teórica e simulada deram resultados próximos, mas como no caso do transistor ideal, a medida que  $R_s$  aumenta os resultados começam a divergir, além de que o ponto de NFmin não é o mesmo.

Questões:

**1) O que você aprendeu com este experimento?**

Como entender melhor como polarizar um transistor, e a ideia de isolar a polarização do circuito em si com o uso de capacitores e indutores que até então passavam batido quando fazia exercícios com elementos não lineares.

Também, solidificar os conhecimentos sobre figura de ruído e principalmente como determiná-la analiticamente pelo método de ruído referido a entrada.

**2) Quais foram as suas dificuldades?**

Tive que fazer e refazer algumas vezes até encontrar os erros o que demandou muito tempo, os resultados teóricos dificilmente batem com os simulados e eu não sei se eu errei algo na álgebra ou na análise, ou se é por conta de alguma não idealidade ou premissa como por exemplo assumir que as fontes  $v_n$  e  $i_n$  são independentes no cálculo da figura de ruído pelo método de ruído referido a entrada.

Além disso, não consegui fazer a parte do amplificador cascode por falta de tempo e principalmente porque não tinha muito claro quais eram os passos para conseguir analisar aquele circuito.

**3) O que fez e/ou fará para superá-las?**

Estudar mais