

Lab02: Figura de ruído em circuitos RF

Bruno Alexandre Fraga

September 27, 2024

1 Revisão

A densidade espectral de potência (PSD) da potência de ruído disponível por um resistor de qualquer valor é dado por [2]

$$S_t(f) = kT \quad (1)$$

em que k é a constante de Boltzmann e T é a temperatura em kelvin. As unidades SI de S_t são watts por hertz, mas é mais comumente expresso como dBm por hertz. A potência de ruído disponível em uma largura de banda B é (em unidades de watts), ou seja,

$$P_t(f) = kTB \quad (2)$$

A constante de Boltzmann, por sua vez, é dada por

$$k = 1,381 \cdot 10^{-23} \text{ J/K}$$

A conversão de watt para dBm é realizada utilizando a seguinte expressão

$$P_{dBm} = 10 \cdot \log_{10} \left(\frac{P_W}{1 \text{ mW}} \right) \quad (3)$$

A equação para calcular a potência por meio da tensão rms é dada a seguir

$$P = \frac{V_{rms}^2}{R} \quad (4)$$

Como a tensão de pico $V_p = V_{rms}\sqrt{2}$, a potência obtida por meio da tensão de pico é dada por

$$P = \frac{V_p^2}{2R}$$

E, para a tensão de pico-a-pico, V_{pp} , calcula-se a potência pela equação

$$P = \frac{V_{pp}^2}{8R}$$

2 Pré-lab

Como é apresentado pela Eq. 1, a PSD da potência de ruído disponível para um resistor de 50Ω à temperatura de $4,5 \text{ K}$ independe do valor de R e é obtido por

$$\begin{aligned} S_t(f) &= 1,381 \cdot 10^{-23} \cdot 4,5 \implies \\ &= 62,145 \cdot 10^{-24} = -192,1 \text{ dBm/Hz} \end{aligned}$$

Agora, se a intenção é obter a densidade espectral da tensão de ruído do resistor R à temperatura T , a equação a ser utilizada é [2]

$$S_{vn}(f) = \frac{v_n^2}{B} = 4kTR$$

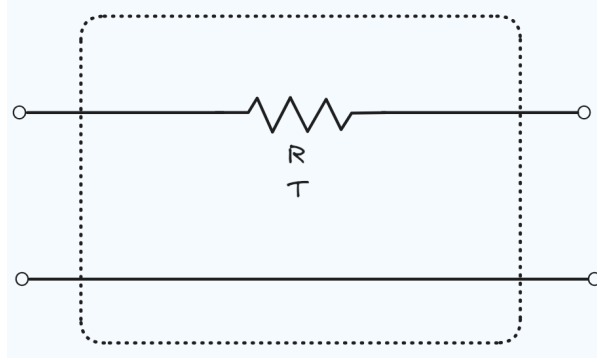


Figure 1: Circuito original

e a tensão média quadrática, v_n^2 , é dada por

$$v_n^2 = 4kTRB$$

Aplicando os valores,

$$S_{vn}(f) = 4 \cdot 1,381 \cdot 10^{-23} \cdot 4,5 \cdot 50 \approx -398,11 \text{ dBV}^2/\text{Hz}$$

se for levada em consideração uma largura de banda $B = 1 \text{ Hz}$, a tensão média quadrática é dada por

$$v_n^2 \approx -400 \text{ dBV}^2$$

Segundo [1], a relação sinal-ruído (SNR) é definida como a potência do sinal transmitido após a propagação por um meio dividida pela potência do ruído adicionada por esse meio.

Uma potência de -154 dBm pode ser convertida para watts utilizando uma variação da Eq. 3

$$P = 10 \cdot \log_{10} \left(\frac{P_W}{1 \text{ mW}} \right) \Rightarrow$$

$$P_W = 1 \cdot 10^{-3} \cdot e^{P/10}$$

Substituindo o valor de $P = -154 \text{ dBm}$, obtém-se

$$P_W = 1 \cdot 10^{-3} \cdot e^{-154/10} \Rightarrow$$

$$= 205,1 \cdot 10^{-12} \text{ W} = 205,1 \text{ pW}$$

Se um resistor de 50Ω dissipar uma potência de -165 dBm , a tensão rms será calculada utilizando a equação 4, isto é

$$68,26 \cdot 10^{-12} = \frac{V_{\text{rms}}^2}{50} \Rightarrow$$

$$V_{\text{rms}} = \sqrt{68,26 \cdot 10^{-12} \cdot 50} \Rightarrow$$

$$= 58,42 \mu\text{V}$$

3 Exercício resolvido

A Fig. 1 apresenta o circuito no qual se deseja determinar a figura de ruído NF.

Para analisar o circuito, é realizada a conexão de uma fonte de sinal com tensão pico-a-pico v_s , em série com uma resistência R_s ao circuito. O circuito resultante pode ser verificado na Fig. 2.

Relembra-se, agora, que a definição de NF é

$$\text{NF} = \frac{\text{SNR}_i}{\text{SNR}_o}$$

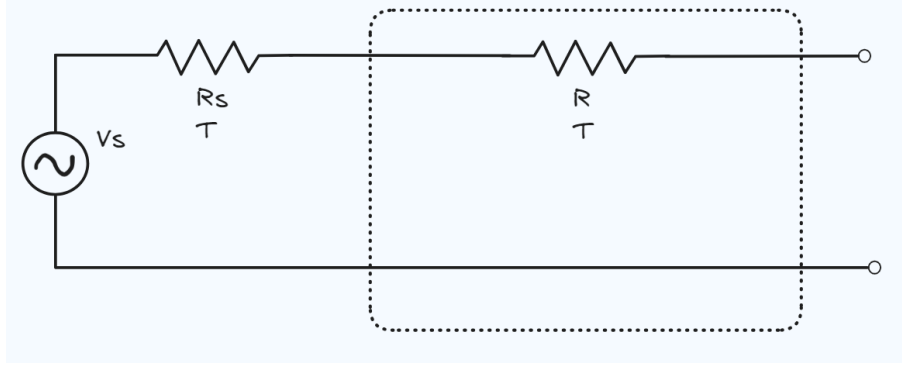


Figure 2: Circuito com fonte de sinal

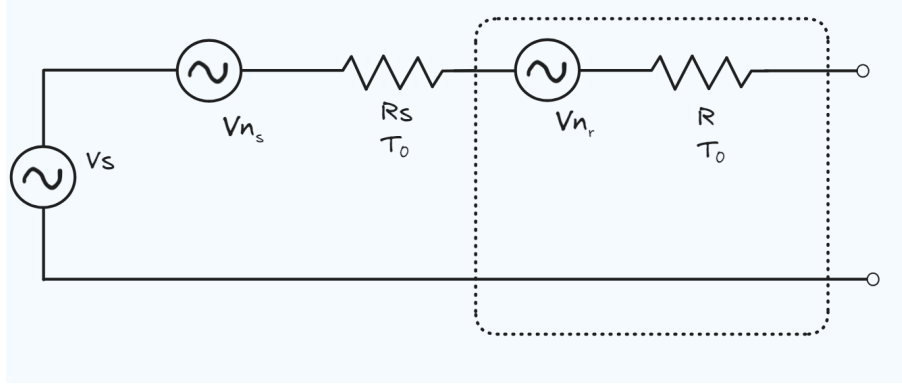


Figure 3: Circuito com fontes de ruído

Seguindo a definição de SNR, tem-se que

$$NF = \frac{S_i/N_i}{S_o/N_o}$$

Em que S_i é a potência do sinal de entrada, calculada por

$$S_i = \frac{v_s^2}{8R_s}$$

N_i é a potência de ruído disponível de entrada, dada por

$$N_i = kT_B$$

S_o é a potência do sinal de saída, obtida pela equação

$$S_o = \frac{V_{TH}^2}{8R_{TH}}$$

Em que V_{TH} é a tensão de Thévenin (pico-a-pico) e a resistência de Thévenin do ponto de vista da saída do circuito.

Finalmente, N_o é a potência do ruído de saída.

$$N_o = \frac{v_n^2}{4R_{TH}}$$

em que v_n é a tensão total do ruído do ponto de vista da saída do circuito.

Dado que tanto o resistor do circuito analisado, R , quanto a resistência da fonte, R_s , são passíveis de ruído e que ambos estão a uma temperatura T , o circuito pode ser rerepresentado conforme a Fig. 3

em que v_{ns} é a tensão do ruído devido à resistência da fonte e v_{nr} é a tensão do ruído devido à resistência do circuito analisado.

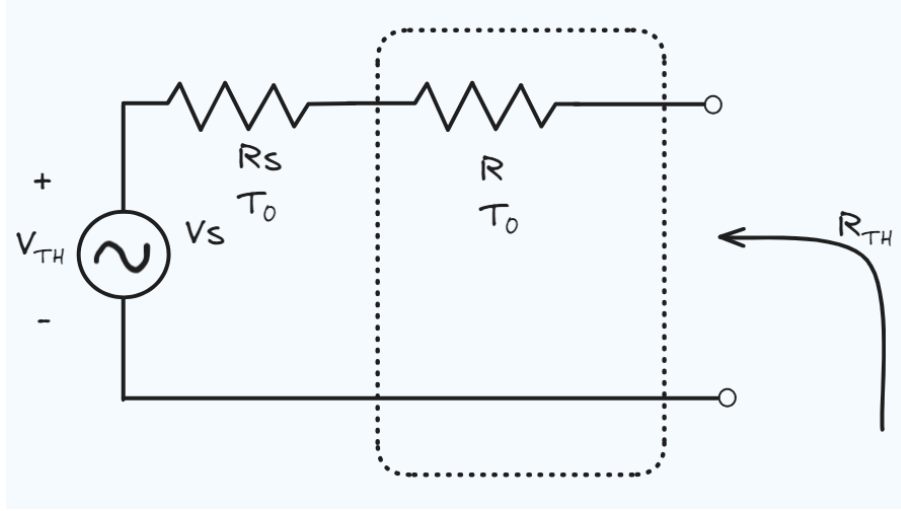


Figure 4: Circuito sem fontes de ruído

Para o cálculo da figura de ruído, NF , as potências de entrada de sinal e do ruído já estão bem definidas. Entretanto, as potências de saída do sinal e do ruído precisam ser obtidas.

Para obter a potência de saída de sinal do circuito, deve-se anular as fontes de ruído e obter o equivalente Thévenin do circuito. O circuito a ser com as fontes de ruído anuladas pode ser visualizado na Fig. 4.

Por meio dessa análise, é possível determinar que $R_{TH} = R_s + R$ e que a $V_{TH} = V_s$. A seguir, anulam-se as fontes de sinal e deseja-se determinar a tensão total do ruído, v_n .

Duas fontes de tensão v_{n1} e v_{n2} quando conectadas, podem ser substituídas por uma única fonte v_n , em que

$$v_n^2 = v_{n1}^2 + v_{n2}^2 + 2Cv_{n1}v_{n2}$$

onde C é o coeficiente de correlação das duas fontes. Como as duas fontes tratam do ruído de um resistor, $C = 0$, resultando em

$$v_n^2 = v_{n1}^2 + v_{n2}^2$$

Fazendo $v_{n1} = v_{ns}$ e $v_{n2} = v_{nr}$, a equação da tensão total do ruído do circuito é dada por

$$v_n^2 = v_{ns}^2 + v_{nr}^2$$

Com essas informações, já é possível obter a potência de sinal para a saída

$$S_o = \frac{V_s^2}{8(R_s + R)}$$

enquanto que a potência de ruído para a saída é dada por

$$N_o = \frac{v_{ns}^2 + v_{nr}^2}{4(R_s + R)}$$

Dessa forma, SNR de entrada resulta em

$$\text{SNR}_i = \frac{V_s^2}{8R_s kT_0 B}$$

e o SNR de saída resulta

$$\begin{aligned} \text{SNR}_o &= \frac{V_{TH}^2}{8R_{TH}} \cdot \frac{4R_{TH}}{v_n^2} \Rightarrow \\ &= \frac{V_s^2}{2(v_{ns}^2 + v_{nr}^2)} \end{aligned}$$

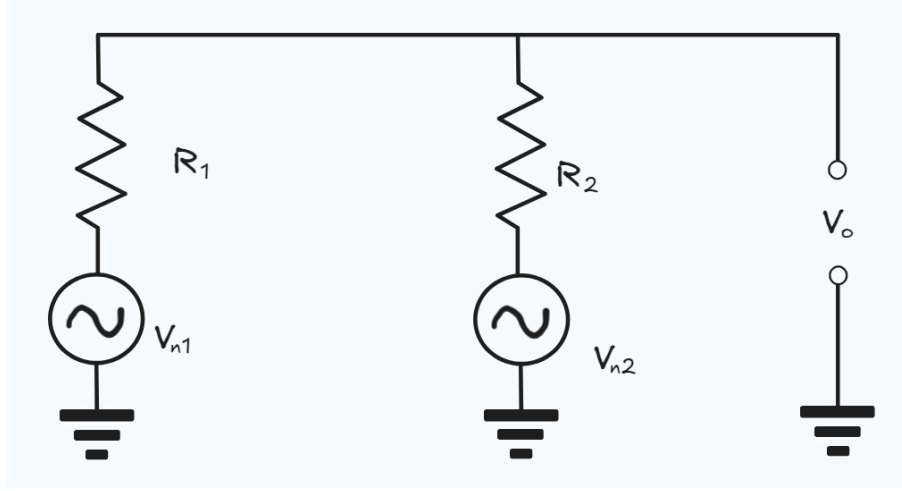


Figure 5: Circuito com modelos de ruído

Calcula-se, agora, o fator de ruído, F

$$\begin{aligned}
 F &= \frac{\text{SNR}_i}{\text{SNR}_o} \Rightarrow \\
 &= \frac{V_s^2}{8R_s k T_0 B} \cdot \frac{2(v_{ns}^2 + v_{nr}^2)}{V_s^2} \Rightarrow \\
 &= \frac{v_{ns}^2 + v_{nr}^2}{4R_s k T_0 B}
 \end{aligned}$$

Substituindo a definição da densidade espectral da tensão de ruído de um resistor R a uma temperatura T para uma largura de banda B ,

$$\begin{aligned}
 F &= \frac{4kTBR_s + 4kTBR}{4R_s k T_0 B} \Rightarrow \\
 &= 1 + \frac{T}{T_0} \frac{R}{R_s}
 \end{aligned}$$

E, finalmente, define-se a figura de ruído como

$$\text{NF} = 10 \log \left(1 + \frac{T}{T_0} \frac{R}{R_s} \right) \quad (5)$$

4 Atividade 1

Considerando que o resistor R_1 opera na temperatura $T = 16,85^\circ\text{C} = 290\text{ K}$, e o resistor R_2 está em $T_{0K} = -273,15^\circ\text{C} = 0\text{ K}$, pode-se considerar dois resistores ruidosos. Substituindo o modelo de resistor ruidoso, é possível obter o circuito equivalente apresentado na Fig. 5.

Como $v_n^2 = 4kTBR$, tem-se que

$$v_{n2}^2 = 4kT_{0K}BR_1 = 0$$

Assim, a fonte de tensão v_{n2} pode ser anulada do circuito, resultando na representação apresentada em 6

Dessa forma, a tensão $V_o = v_{\text{out}}$ é dada por

$$V_o = v_{n1} \frac{R_2}{R_1 + R_2}$$

substituindo $v_{n1} = 4kTBR_1$,

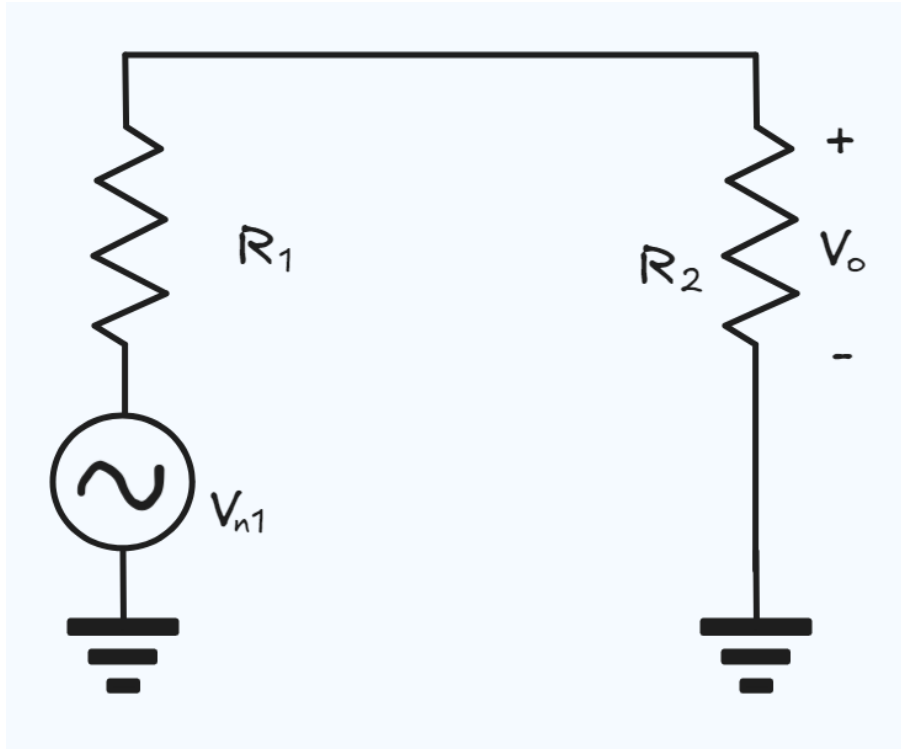


Figure 6: Circuito equivalente com fonte de ruído

$$V_o = \sqrt{4kTB R_1} \cdot \frac{R_2}{R_1 + R_2} \quad (6)$$

Assumindo que o cálculo deva ser feito para uma largura de banda, $B = 1$ Hz, e substituindo os valores,

$$V_o = \sqrt{4 \cdot 1,381 \cdot 10^{-23} \cdot 290 \cdot 1 \cdot 50} \cdot \frac{50}{50 + 50} \Rightarrow \approx 447,34 \text{ pV}$$

Por meio da simulação, é possível perceber que o valor foi basicamente o mesmo. O circuito e o resultado da simulação é apresentado na Fig. 7.

A seguir, são realizados os mesmos cálculos, entretanto, para a temperatura $T = 19,3^\circ\text{C} = 292,45$ K, conforme é apresentado na 8. A medição de temperatura foi obtida por meio de um aplicativo de celular.

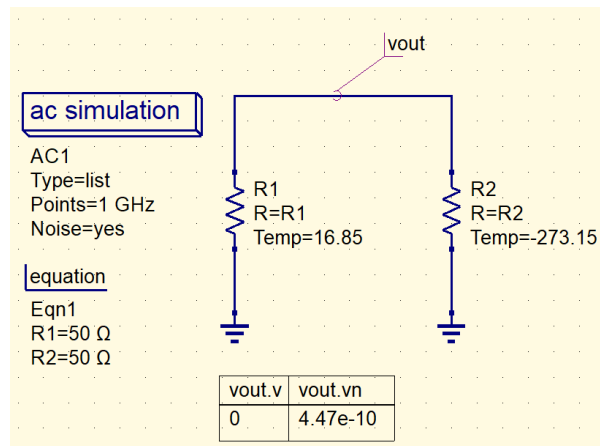


Figure 7: Simulação de resistor ruidoso a 290 K

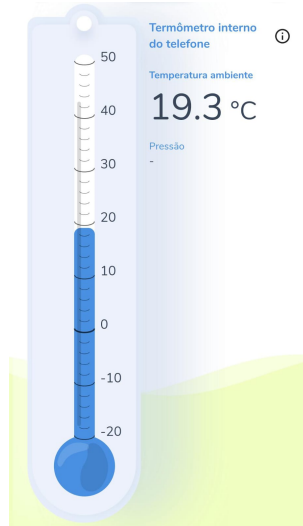


Figure 8: Temperatura atual no ambiente

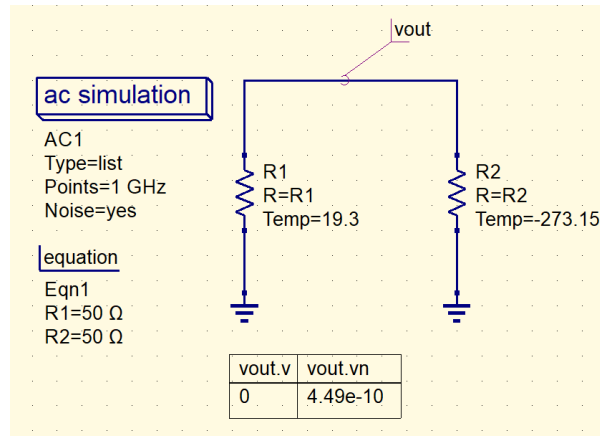


Figure 9: Simulação de resistor ruidoso a 19,3°C

Com substituindo a temperatura na Eq. 6, obtém-se

$$V_o = \sqrt{4 \cdot 1,381 \cdot 10^{-23} \cdot 292,45 \cdot 1 \cdot 50} \cdot \frac{50}{50 + 50} \Rightarrow \approx 449,32 \text{ pV}$$

Esse valor pode ser verificado também na simulação, apresentada na Fig. 9.

Como já foi apresentado na a densidade espectral de potência (PSD) de ruído disponível é calculada por

$$S_t(f) = kT$$

Sendo assim, a PSD de ruído disponível para $T = 290 \text{ K}$ é $S_t = 4 \cdot 10^{-21} \text{ J}$. Enquanto que para $T = 292,45 \text{ K}$, a PSD de ruído disponível será $S_t \approx -173,94 \text{ dBm/Hz}$.

A potência de ruído disponível para a condição de temperatura ambiente (290 K), para uma banda de 10 MHz é dada por

$$P_t(f) = kTB \Rightarrow = -103,98 \text{ dBm}$$

Para a temperatura $T = 292,45 \text{ K}$, a potência de ruído disponível é

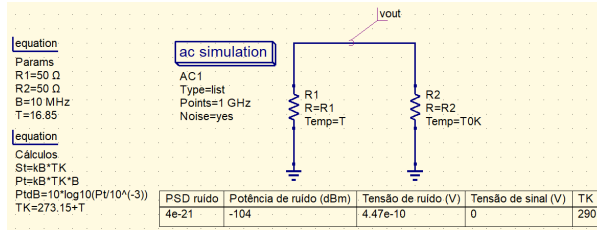


Figure 10: Resultados para temperatura ambiente

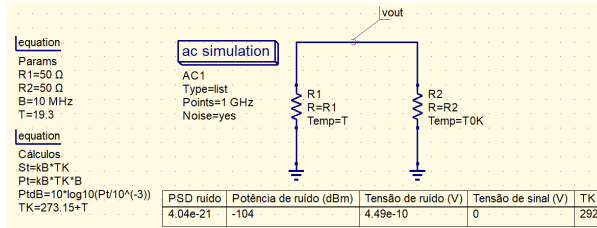


Figure 11: Resultados para temperatura ambiente igual a 19,3°C

$$P_t(f) = -103,94 \text{ dBm}$$

Comparando com os resultados obtidos experimentalmente, a Fig. 10 apresenta os resultados para o caso da temperatura ambiente e a Fig. 11 apresenta para a temperatura de 19,3°C.

Para a temperatura de $T = 4,5 \text{ K} = -268,65^\circ\text{C}$ e considerando $R_1 = 2 \cdot R_2$, os resultados são apresentados para a simulação, na Fig. 12.

A densidade espectral de potência de ruído disponível é dada por

$$\begin{aligned} S_t &= kT \implies \\ &= 1,38 \cdot 10^{-23} \cdot 4,5 \implies \\ &= -192,07 \text{ dBm/Hz} \end{aligned}$$

A potência de ruído disponível é

$$P_t = 1,38 \cdot 10^{-23} \cdot 4,5 \cdot 1 = -192,07 \text{ dBm}$$

Para analisar a tensão obtida em v_o , visualiza-se o circuito como o que é apresentado na Fig. 13.

A análise desse circuito será realizada utilizando o princípio da superposição, ou seja, somando as contribuições de cada fonte, individualmente, dessa forma,

$$v_o^2 = v_{o1}^2 + v_{o2}^2$$

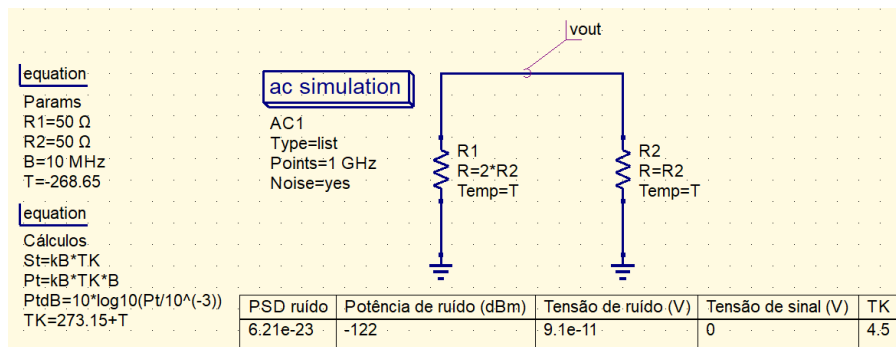


Figure 12: Resultados para $T = 4,5 \text{ K}$ e $R_1 = 2 \cdot R_2$

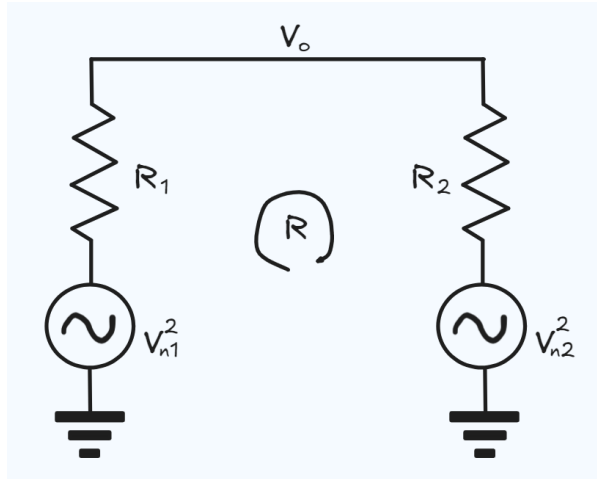


Figure 13: Circuito com duas fontes de ruído

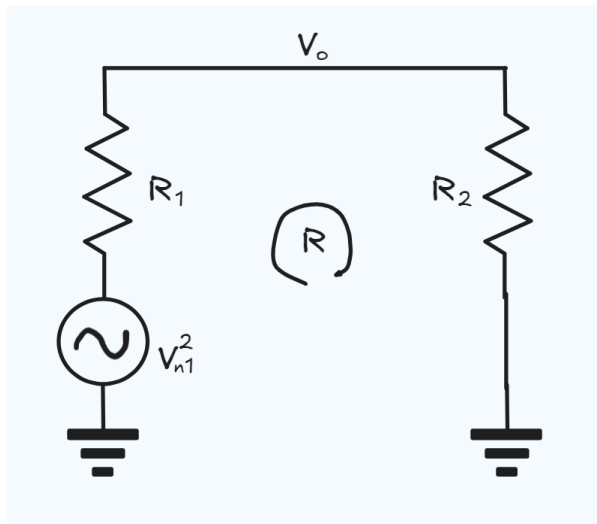


Figure 14: Curto na fonte v_{n2}

Inicialmente, é realizado um curto-circuito na fonte v_{n2} , conforme exibido na Fig. 14. Assim, obtém-se a seguinte equação

$$v_{o1} = v_{n1} \frac{R_2}{R_1 + R_2} \quad (7)$$

Semelhantemente para v_{n2} , o curto é realizado em v_{n1} , como é exibido na Fig. 15. Assim, obtém-se

$$v_{o2} = v_{n2} \frac{R_1}{R_1 + R_2} \quad (8)$$

Já é sabido que $R_1 = 2R_2$. Assim, é realizada uma substituição nas equações 7 e 8, resultando em

$$\begin{aligned} v_{o1} &= v_{n1} \frac{R_2}{2R_2 + R_2} \Rightarrow \\ &= v_{n1} \frac{1}{3} \end{aligned} \quad (9)$$

e

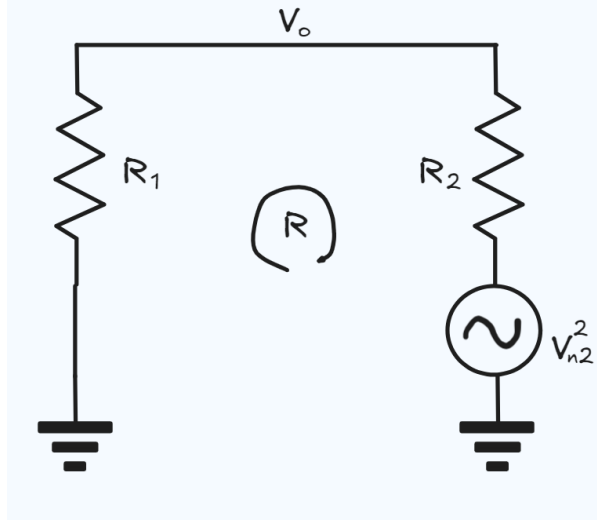


Figure 15: Curto na fonte v_{n1}

$$\begin{aligned} v_{o2} &= v_{n2} \frac{2R_2}{2R_2 + R_2} \Rightarrow \\ &= v_{n2} \frac{2}{3} \end{aligned} \quad (10)$$

respectivamente. Além disso, sabe-se das relações $v_{n1}^2 = 4kTB R_1 = 4kTB 2R_2 = 8kTB R_2$ e $v_{n2}^2 = 4kTB R_2$. Substituindo nas equações Eq. 9 e Eq. 10, obtém-se

$$\begin{aligned} v_{o1}^2 &= 8kTB R_2 \left(\frac{1}{3}\right)^2 \Rightarrow \\ &= kTB R_2 \frac{8}{9} \end{aligned}$$

e

$$\begin{aligned} v_{o2}^2 &= 4kTB R_2 \left(\frac{2}{3}\right)^2 \Rightarrow \\ &= kTB R_2 \frac{16}{9} \end{aligned}$$

respectivamente. As equações acima resultam em

$$\begin{aligned} v_o^2 &= kTB R_2 \frac{8}{9} + kTB R_2 \frac{16}{9} \Rightarrow \\ &= kTB R_2 \frac{8}{3} \Rightarrow \\ v_o &= \sqrt{\frac{8}{3} kTB R_2} \end{aligned}$$

Aplicando os valores,

$$\begin{aligned} v_o &= \sqrt{\frac{8}{3} 1,38 \cdot 10^{-23} \cdot 4,5 \cdot 1 \cdot 50} \Rightarrow \\ &= 91,02 \text{ pV} \end{aligned}$$

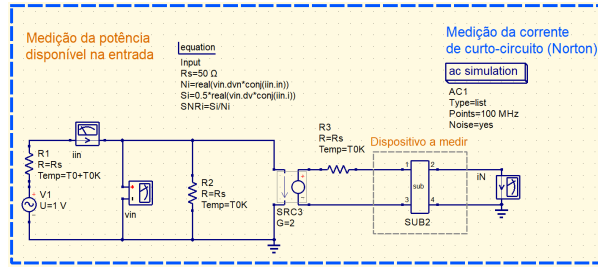


Figure 16: Medição da corrente de curto-circuito e potência de entrada

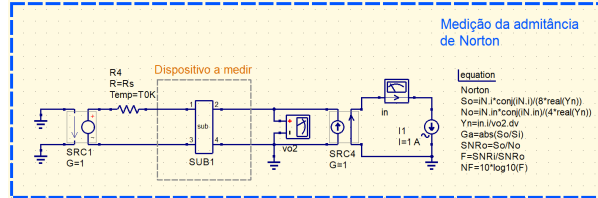


Figure 17: Cálculo da admitância de Norton

5 Atividade 2

Na Fig. 16 é apresentado o modelo utilizado para realizar a medição da potência disponível de sinal na entrada e a corrente de curto-circuito de Norton.

A Fig. 17 exibe o modelo utilizado para o cálculo da admitância de Norton, bem como o cálculo de todos os valores até a obtenção da figura de ruído, NF .

O modelo apresentado nesta seção será utilizado na atividade terceira parte dessa atividade.

6 Atividade 3

Para a primeira parte desta última seção, é possível utilizar os resultados obtidos no exercício resolvido, isto é, a Eq. 5. Aplicando os valores informados pelo problema, ou seja, $R_s = 50 \Omega$ e $T = 30^\circ C = 303,15 K$, obtém-se

$$F = 1 + \frac{303,15}{290} \cdot \frac{50}{50} \Rightarrow$$

$$= 2,05$$

Assim, a figura de ruído é dado por

$$NF = 3,11 \text{ dB}$$

Utilizando o modelo apresentado na seção anterior, os resultados são apresentados na seguinte Tab. 1

S_i (mW)	S_o (mW)	G	N_i (dBm)	N_o (dBm)	F	NF (dB)
2,5	1,25	0,5	-203,98	-203,88	2.05	3.11

Table 1: Resultados de simulação para $R = 50 \Omega$ série

A Fig. 18 apresenta o circuito original.

Para resolver o problema do resistor $R_p = 100 \Omega$ em paralelo, necessita-se adicionar uma fonte para alimentar e analisar o circuito. Para esse problema, faz muito sentido incluir uma fonte de corrente com um resistor R_s em paralelo. Na Fig. 19 pode-se verificar o circuito após a inclusão dessa fonte.

Como já foi discutido anteriormente, os resistores são modelados como fontes de ruído e resistências, uma vez que estão a uma temperatura em que a passível de geração de ruído. A Fig. 20 apresenta a substituição dos resistores pelo par fonte de corrente com resistores sem ruído em paralelo.

Por meio da Fig. 20, é possível verificar que foi evidenciado a resistência de Norton, R_N . Essa resistência é a mesma de Thévenin e o processo de obtenção é apresentado abaixo

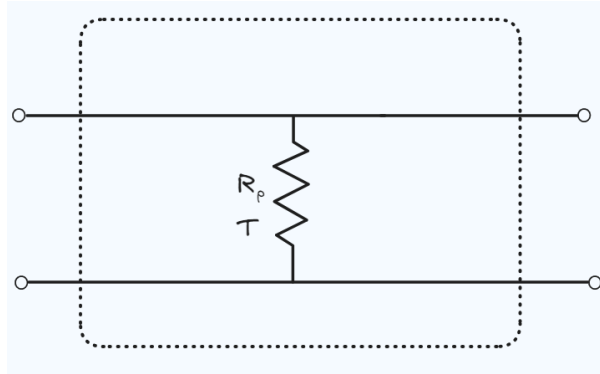


Figure 18: Circuito original do resistor em paralelo

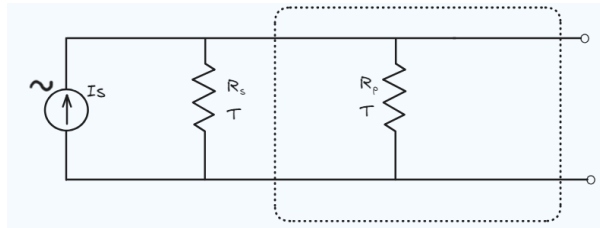


Figure 19: Circuito alimentado por fonte e resistor em paralelo

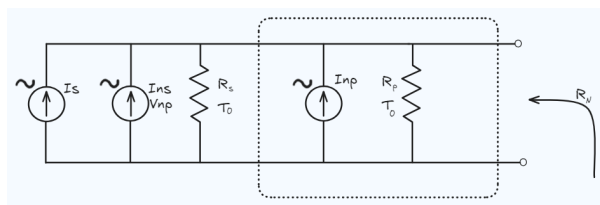


Figure 20: Circuito com fontes de ruído

$$R_N = \frac{R_s R_p}{R_s + R_p} \Rightarrow$$

$$Y_N = \frac{R_s + R_p}{R_s R_p}$$

Enquanto isso, a corrente de Norton, I_N é obtida anulando as fontes de ruído, ou seja, $I_N = I_s$. E a fonte de corrente de ruído, i_n é dada por

$$i_n^2 = i_{ns}^2 + i_{np}^2$$

sendo i_n^2 a corrente média quadrática da corrente de ruído.

Além disso, é necessário que seja conhecida o espectro de corrente de ruído de um resistor R a uma temperatura T . Essa expressão deriva da seguinte expressão [2]

$$S_{vn}(f) = R^2 S_{in}(f) \Rightarrow$$

$$S_{vn}(f) = \frac{v_n^2}{B} = 4kTR = R^2 S_{in}(f) \Rightarrow$$

$$v_n^2 = 4kTBR = BR^2 S_{in}(f) \Rightarrow$$

$$v_n^2 = 4kTBR = BR^2 \frac{i_n^2}{B} \Rightarrow$$

$$v_n^2 = 4kTBR = R^2 i_n^2$$

Resultando em

$$i_n^2 = \frac{4kTB}{R} \quad (11)$$

Com esses parâmetros, é possível calcular as potências de entrada e saída, para o sinal e o ruído. Para a potência de sinal disponível na entrada, obtém-se a seguinte relação

$$S_i = \frac{I_s^2 R_s}{8}$$

Para a potência do ruído de entrada,

$$N_i = kT_0 B$$

Para a potência no sinal de saída,

$$S_o = \frac{I_N^2}{8Y_N} = \frac{I_s^2}{8} \frac{R_s R_p}{R_s + R_p}$$

E, finalmente, a potência do ruído de saída,

$$N_o = \frac{I_{ns}^2 + I_{np}^2}{4} \frac{R_s R_p}{R_s + R_p} \quad (12)$$

Pela Eq. 11, tem-se que a densidade espectral da corrente de ruído do resistor R_s é

$$I_{ns}^2 = \frac{4kTB}{R_s} \quad (13)$$

E, para o resistor R_p

$$I_{np}^2 = \frac{4kTB}{R_p} \quad (14)$$

Substituindo 13 e 14 em 12, obtém-se

$$N_o = kTB$$

O cálculo da SNR de entrada, SNR_i é apresentado a seguir

$$\text{SNR}_i = \frac{S_i}{N_i} = \frac{I_s^2 R_s}{8} \frac{1}{kT_0 B}$$

O SNR de saída, por sua vez, é apresentado abaixo

$$\text{SNR}_o = \frac{S_o}{N_o} = \frac{I_s^2}{8} \frac{R_s R_p}{R_s + R_p} \frac{1}{kTB}$$

Assim, o fator de ruído, F é dado por

$$\begin{aligned} F &= \frac{\text{SNR}_i}{\text{SNR}_o} \Rightarrow \\ &= \frac{I_s^2 R_s}{8kT_0 B} \frac{8(R_s + R_p)kTB}{I_s^2 R_s R_p} \Rightarrow \\ &= \frac{(R_s + R_p)T}{T_0 R_p} \end{aligned}$$

Assim, a figura de ruído é dada por

$$\text{NF} = 10 \log \left[\frac{(R_s + R_p)T}{T_0 R_p} \right]$$

Aplicando os valores impostos pelo problema, ou seja, $R_p = 100 \, \Omega$ e $T = 290 \, \text{K}$,

$$\begin{aligned} F &= \frac{(50 + 100)300,15}{100 \cdot 290} \Rightarrow \\ &= 1,55 \end{aligned}$$

Consequentemente, obtém-se uma figura de ruído de

$$\text{NF} = 1,91 \, \text{dB}$$

Os resultados experimentais são apresentados na 2

S_i (mW)	S_o (mW)	G	N_i (dBm)	N_o (dBm)	F	NF (dB)
2,5	1,25	0,667	-203,98	-203,92	1,52	1,81

Table 2: Resultados de simulação para $R = 100 \, \Omega$ paralelo

7 Discussão

7.1 Figura de ruído de um atenuador

O Ex. 4.3 de [2] apresenta o entendimento de um atenuador de 20 dB em um sistema de 20 Ω . O desenvolvimento apresentado pelo autor pode ser estendido para um atenuador de L dB para um sistema de uma impedância qualquer. As premissas para que o sistema tenha um comportamento semelhante ao que foi analisado, sem a perda de generalidade é que o sistema esteja operando de forma que as impedâncias estejam casadas, levando à máxima transferência de potência. Além disso, o autor assume que o atenuador tem mesma impedância de entrada e saída. Dessa forma, o ruído oriundo da fonte é um ruído térmico gerado pela impedância e, por hipótese, é o mesmo ruído entregue à carga. Assim, pode-se estabelecer que

$$N_o = N_i$$

O sinal, por sua vez, é atenuado por um L dB, então

$$S_i - S_o = L \, \text{dB}$$

e a figura de ruído é dada por

$$\begin{aligned} \text{NF} &= S_i + N_o - N_i - S_o \implies \\ &= S_i + N_i - N_i - S_o = S_i - S_o \implies \\ &= L \text{ dB} \end{aligned}$$

□

em que N_i , N_o , S_i e S_o estão expressos em dBm.

Baseado nos resultados apresentados anteriormente, pode-se concluir que os elementos conectados na entrada dos dispositivos degradam o sinal de entrada, aumentando o o nível da figura de ruído e podendo degradar a sensibilidade do dispositivo. Dessa forma, os dispositivos na entrada do circuito devem ser selecionados de forma a diminuir a atenuação, diminuindo, assim, a figura de ruído. Além disso, especificamente falando em relação aos filtros, estes devem ser selecionados mantendo um compromisso entre uma filtragem adequada e uma atenuação máxima estabelecida na banda-passante, permitindo que o sistema opere adequadamente. Além disso, os dispositivos devem ser adequados à impedância do dispositivo, para que a máxima potência seja transferida à carga.

7.2 Aprendizado

Este não é a primeira vez que eu ouço falar sobre amplificadores de baixo ruído (LNAs) e esse termo sempre soou muito natural para mim. Entretanto, foi a partir deste estudo que eu pude perceber que, por mais que eu soubesse do que se trata um LNA, não detinha nem o conhecimento do seu fundamento, ou seja, a definição de ruído e formas de medi-lo. Finalizo esta atividade com o sentimento de dever cumprido, de ter conseguido entender o básico de como o ruído é modelado em um circuito.

Para finalizar esta atividade, a minha maior dificuldade foi a gerência do tempo para finalizá-la. Tenho um péssimo hábito de tentar entender tudo ao máximo antes de "pôr a mão na massa". Porém, para que esta entrega fosse possível, por conta do pouco tempo que disponho, tive que deixar a leitura das bibliografias em segundo plano (já voltei a lê-las) e me concentrar totalmente na finalização da atividade. Em relação a isso, acredito que tive grande sucesso, culminando em uma nova abordagem de estudo. Digo isto, pois hoje me sinto muito mais confiante em ler a bibliografia sugerida, percebendo que estou entendendo os termos com mais facilidade, uma vez que tive que me esforçar bastante para conseguir fazê-la.

A seguir, pretendo preencher as lacunas do meu conhecimento, pois durante o desenvolvimento deste trabalho, uma ou outra dúvida vieram a tona e certamente essas serão sanadas por meio do estudo do livro texto do curso.

References

- [1] Andrea Goldsmith. *Wireless Communications*. Cambridge University Press, Mar. 2020.
- [2] Michael Steer. *Microwave and RF Design*. Third. NC State University, 2019.