

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA - UFSC  
CENTRO TECNOLÓGICO - CTC  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA E ELETRÔNICA - EEL  
EEL7319 - CIRCUITOS RF

LAB 3  
FIGURA DE RUÍDO EM CIRCUITOS RF

GUSTAVO SIMAS DA SILVA

FLORIANÓPOLIS  
OUTUBRO, 2020

“A inteligência é o que você usa  
quando não sabe o que fazer”

Jean Piaget

# **Sumário**

<b>Atividades de Laboratório</b>	<b>4</b>
Atividade 1	4
Atividade 2	12
Atividade 3	13
Atividade 4	15
Atividade 5	17
<b>Questões</b>	<b>21</b>
Questão 1	21
Questão 2	22
Questão 3	23
Questão 4	24
Questão 5	25
<b>Referências</b>	<b>27</b>

# Atividades de Laboratório

## Atividade 1

Considere o circuito da figura abaixo, que oferece uma forma de extração da potência de ruído disponível de um resistor. Nele,  $R_1=R_2=50 \Omega$ . (Atenção à temperatura dos resistores!). Em seguida, com o auxílio do simulador QUCS.

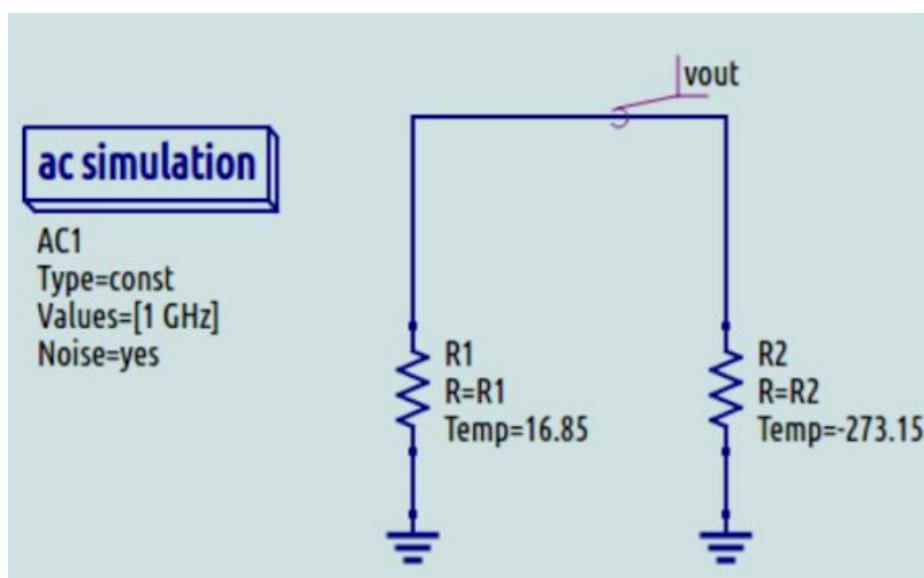


Figura 1 - Circuito para extração da Figura de Ruído

(a) observe a tensão de ruído em "vout" para

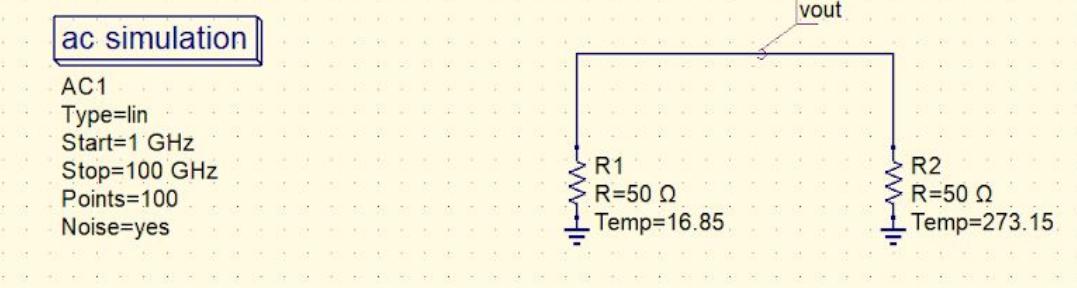
- i)  $T(R1)=290 \text{ K}$ ;

Montou-se o circuito com os dois resistores em temperaturas diferentes, conforme indicado pelo enunciado, sendo apresentado na Figura 2. Observa-se que a temperatura no label/descrição dos resistores se dá em graus celsius havendo a relação:

$$T_{\circ C} = T_K - 273,15$$

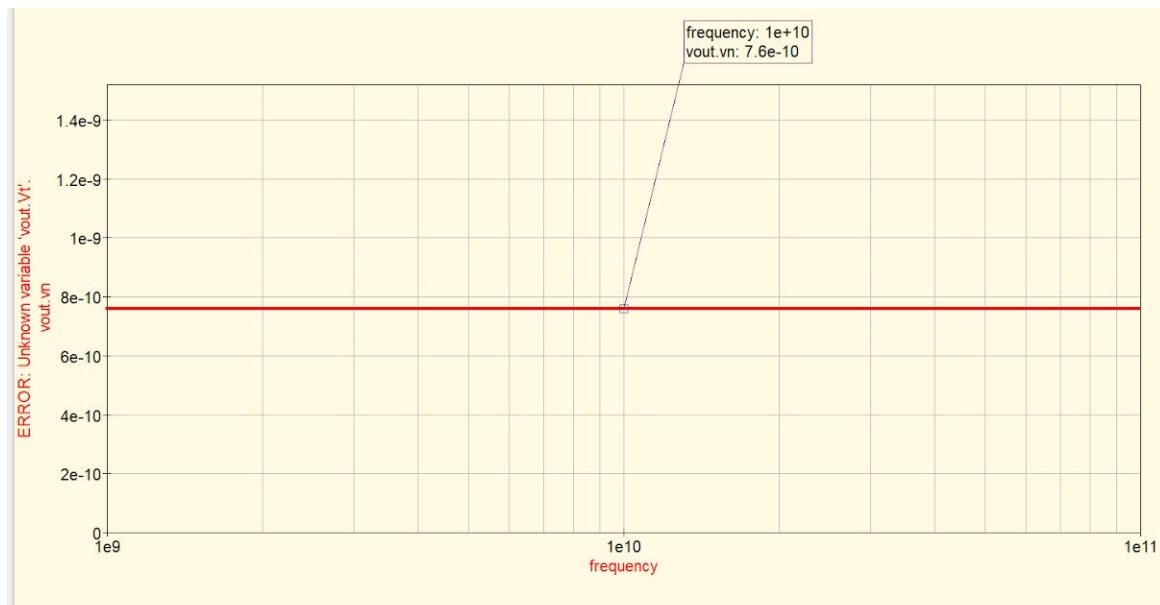
Onde  $T^{\circ C}$  é a temperatura em graus celsius,  $T_K$  a temperatura em kelvin.

Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC)  
 Centro Tecnológico (CTC)  
 Departamento de Engenharia Elétrica e Eletrônica (EEL)  
 Disciplina EEL7319 - Circuitos RF  
 Semestre 2020/1  
 Aluno Gustavo Simas da Silva



*Figura 2 - Circuito para extração de Figura de Ruído com R1 em 290K*

O resultado de simulação AC é apresentado na Figura 3. Percebe-se linearidade e constância da tensão de ruído (devido ao ruído térmico) em vout (em função da frequência) como sendo  $7,6 \times 10^{-10} \text{ V}/\sqrt{\text{Hz}}$ .



*Figura 3 - Resultado simulação AC de circuito com R1 em 290 K*

Este valor de tensão de saída vout é dado pelo cálculo da raiz quadrada das contribuições de cada um dos resistores, utilizando superposição, ou seja,

primeiramente considera-se a contribuição de R1, tratando R1 como resistor sem ruído associado em série com uma fonte de tensão representando o ruído relativo a este resistor (com R2 como sendo resistor sem ruído) e vice-versa [1]. Há a relação quadrática do ganho por estarmos lidando com tensão quadrática (volt ao quadrado). É dado pela seguinte derivação:<sup>1</sup>

$$v_{out} = \sqrt{v_{n1}^2 + v_{n2}^2}$$

$$v_{n1}^2 = v_{nR1}^2 * \left(\frac{R2}{R1+R2}\right)^2 = 4kTR1 * \left(\frac{R2}{R1+R2}\right)^2$$

$$v_{n1}^2 = 4 * 1,38 * 10^{-23} * 290 * 50 * \frac{1}{4} = 0,2aV^2/Hz^2$$

$$v_{n2}^2 = 4 * 1,38 * 10^{-23} * 546,3 * 50 * \frac{1}{4} = 0,377aV^2/Hz$$

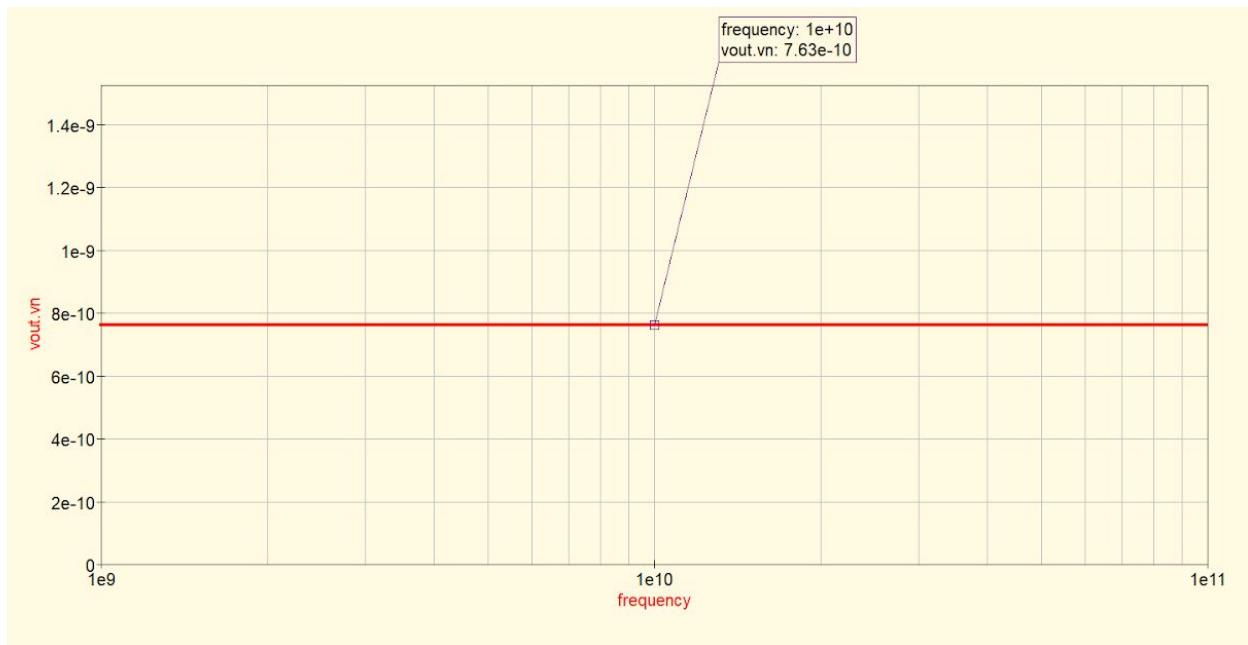
$$v_{out} = \sqrt{(0,2 + 0,377) * 10^{-18}} = 7,6 * 10^{-10} V/\sqrt{Hz}$$

ii) T(R1)=(temperatura aproximada do ambiente em que você se encontra).

Estimou-se temperatura aproximada de 23,15°C, configurando R1 para tal valor respectivo em unidade kelvin. A Figura 4 apresenta o gráfico para a tensão de ruído equivalente, resultando em  $7,63*10^{-10}$  V/ $\sqrt{Hz}$ .

<sup>1</sup> Utiliza-se aqui o símbolo “\*” como multiplicação (e não como convolução, como pode-se identificar o uso de tal simbologia em diferentes literaturas)

<sup>2</sup> prefixo “a” de “atto” do Sistema Internacional de unidades, denominando fator  $10^{-18}$  (ou e-18)



**Figura 4 - Resultado de simulação AC de circuito com R1 em 296,3 K**

Calcula-se da mesma forma, seguindo as equações apresentadas no item anterior:

$$v_{n1}^2 = 4 * 1,38 * 10^{-23} * (23,15 + 273,15) * 50 * \frac{1}{4} = 0,204aV^2/Hz$$

$$v_{n2}^2 = 4 * 1,38 * 10^{-23} * 546,3 * 50 * \frac{1}{4} = 0,377aV^2/Hz$$

$$v_{out} = \sqrt{(0,204 + 0,377) * 10^{-18}} = 7,63 * 10^{-10} V/\sqrt{Hz}$$

(b) calcule a densidade espectral de potência de ruído disponível para as condições do item acima;

Com R1 em 290 K temos:

$$\overline{v_{nR1}^2} = 4kTR_1 = 4 * 1,38 * 10^{-23} * 290 * 50 \approx 0,80 \text{ aV}^2/\text{Hz}$$

Para R2:

$$\overline{v_{nR2}^2} = 4kTR_2 = 4 * 1,38 * 10^{-23} * 546,3 * 50 \approx 1,51 \text{ aV}^2/\text{Hz}$$

Assim, a soma dos efeitos:

$$\overline{v_n^2} = 0,8 * 10^{-18} + 1,51 * 10^{-18} \approx 2,31 \text{ aV}^2/\text{Hz}$$

Com R1 em 296,3 K temos:

$$\overline{v_{nR1}^2} = 4kTR_1 = 4 * 1,38 * 10^{-23} * 296,3 * 50 \approx 0,82 \text{ aV}^2/\text{Hz}$$

Assim, a soma dos efeitos:

$$\overline{v_n^2} = 0,82 * 10^{-18} + 1,51 * 10^{-18} \approx 2,33 \text{ aV}^2/\text{Hz}$$

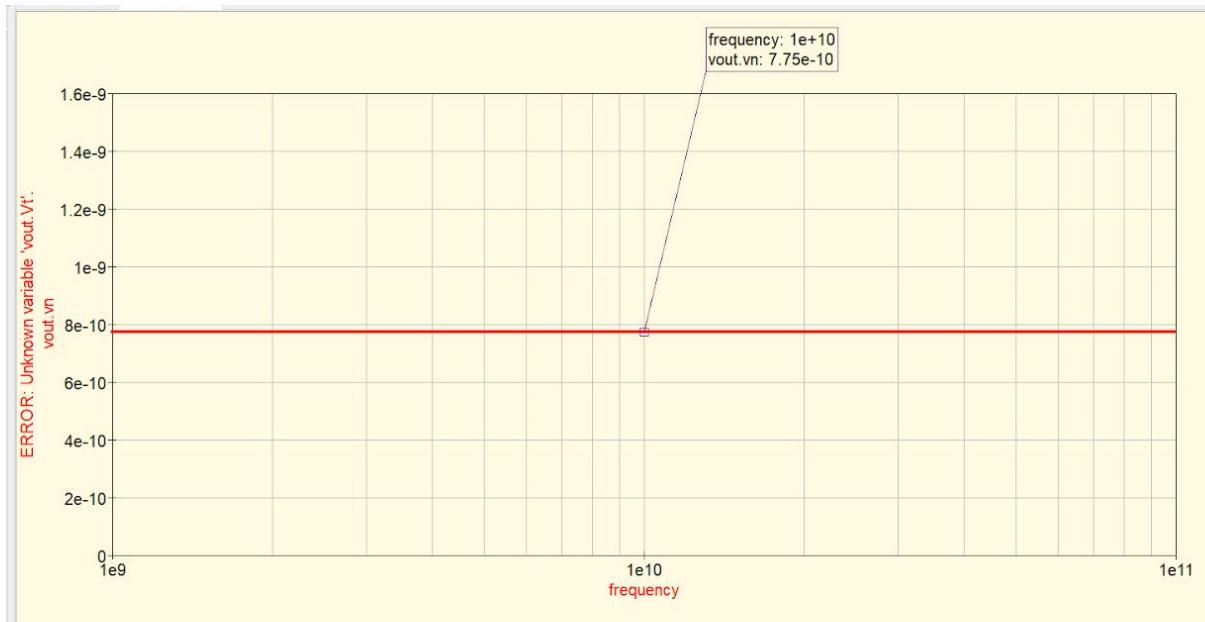
(c) considere o resultado do item anterior e calcule a potência de potência de ruído disponível observada em uma banda de 10 MHz;

Considerando temperatura 290K, para uma banda de frequência de 10 MHz, e com o valor de resistor do circuito referido anteriormente (R1 como RS), temos a potência de ruído disponível (máxima possível de ser entregue a uma carga com valor de impedância igual ao conjugado complexo, R2):

$$P_n = \frac{\overline{v_{nR1}^2} * B}{4 * R_s} = kTB = 1,38 * 10^{-23} * 290 * 10^7 \approx 40 fW$$

(d) repita o item a) considerando  $R_1=3R_2$  e  $T(R_1)=T(R_2)=290$  K;

Alterou-se o circuito para as configurações referidas. Havendo gráfico resultante apresentado na Figura 5.



**Figura 5 - Resultado de simulação AC de circuito com  $R_1=3R_2$  em 290 K**

$$v_{n1}^2 = 4 * 1,38 * 10^{-23} * 290 * 150 * \left(\frac{50}{50+150}\right)^2 = 0,150 aV^2/Hz$$

$$v_{n2}^2 = 4 * 1,38 * 10^{-23} * 290 * 50 * \left(\frac{150}{150+50}\right)^2 = 0,450 aV^2/Hz$$

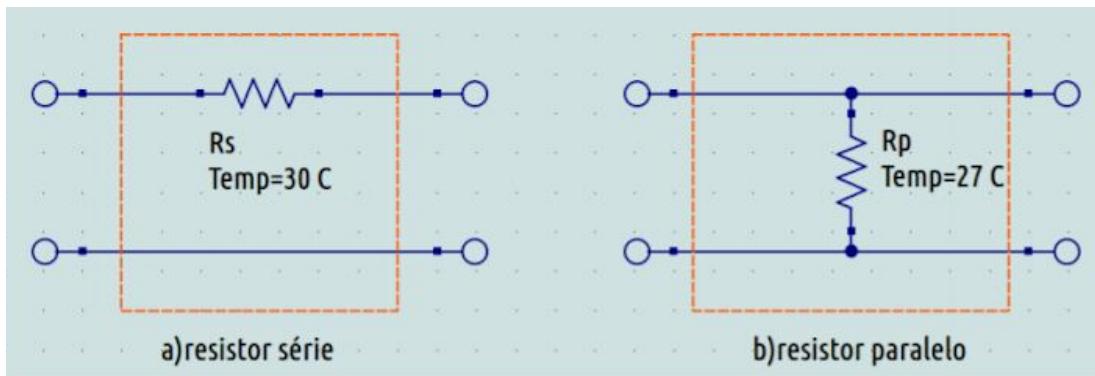
$$v_{out} = \sqrt{(0,150 + 0,450) * 10^{-18}} = 7,75 * 10^{-10} V/\sqrt{Hz}$$

(e) confira todos os resultados com previsões teóricas.

Resultados conferidos ao longo do relatório.

## Atividade 2

Considere os circuitos da figura abaixo e descreva um experimento que permita medir a figura de ruído de cada um e que possa ser implementado no QUCS.



*Figura 6 - Circuitos para caracterização da figura de ruído*

A implementação de um circuito com duas partes ou etapas, de forma tal que isole as contribuições externas de ruído, considerando o DUT (Device Under Test) como uma rede two-port, a partir da verificação de tensão e corrente de sinais de entrada e saída é possível identificar a figura de ruído dos circuitos referidos para caracterização. Desta forma, com eliminação de efeitos externos, por meio de certas idealidades (componentes externos lineares, invariantes no tempo e ideais) pode-se obter estes dados. Como será verificado em tópicos posteriores, lança-se mão de fonte de tensão controlada, assim como resistores sem ruído (em temperatura 0 K).

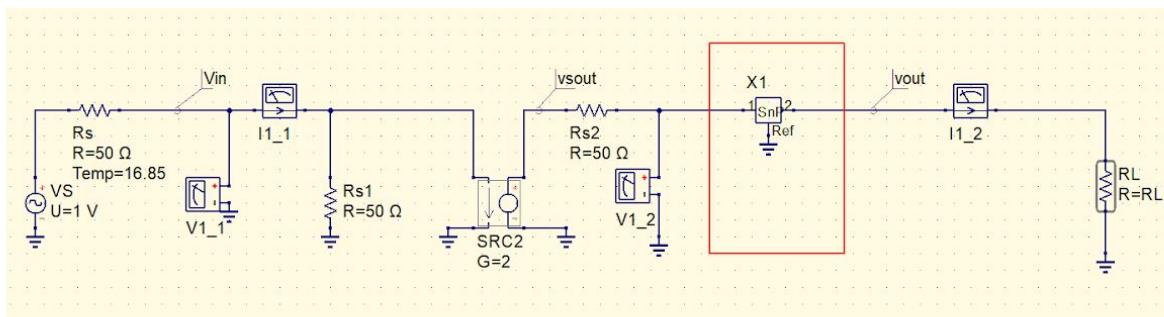
Por forma prática, analizadores de rede (VNA - Vector Network Analyzers e Figure Noise analyzers) são dispositivos para obtenção de dados de interesse.

### Atividade 3

Conceba e implemente do QUCS um experimento capaz de fornecer as seguintes informações quando conectado a um bloco do qual se deseja conhecer a figura de ruído:

- (a) potência disponível da fonte;
- (b) potência disponível do circuito;
- (c) potência de ruído disponível na entrada;
- (d) potência de ruído disponível na saída;
- (e) ganho de potência disponível.

Para tal, tendo como base a análise em questão anterior, montou-se um sistema com fonte de entrada  $V_s$  e resistência interna  $R_S$  disponibilizando máxima potência para uma carga associada casada ( $R_s1 = R_S$ ). Nesta parte, há uma fonte de tensão controlada por tensão (com ganho 2 para igualar tensão originária da fonte  $V_s$ ) de forma a se entregar ao segundo estágio do sistema, o qual contém impedância igual à  $R_s$ , o bloco DUT a ser avaliado e uma carga com impedância equivalente de Thévenin (ou Norton) para a saída do sistema. Assim, há isolamento de ambas as partes para análise separada e obtenção dos dados em itens listados. A Figura 7 apresenta o sistema montado.



**Figura 7 - Sistema para medição de potências de sinal e de ruído**

Assim, o elemento X1 é dado como uma two-port generalizada, podendo ser um subcircuito ou dispositivo com arquivo .s2p associado (arquivo Touchstone com

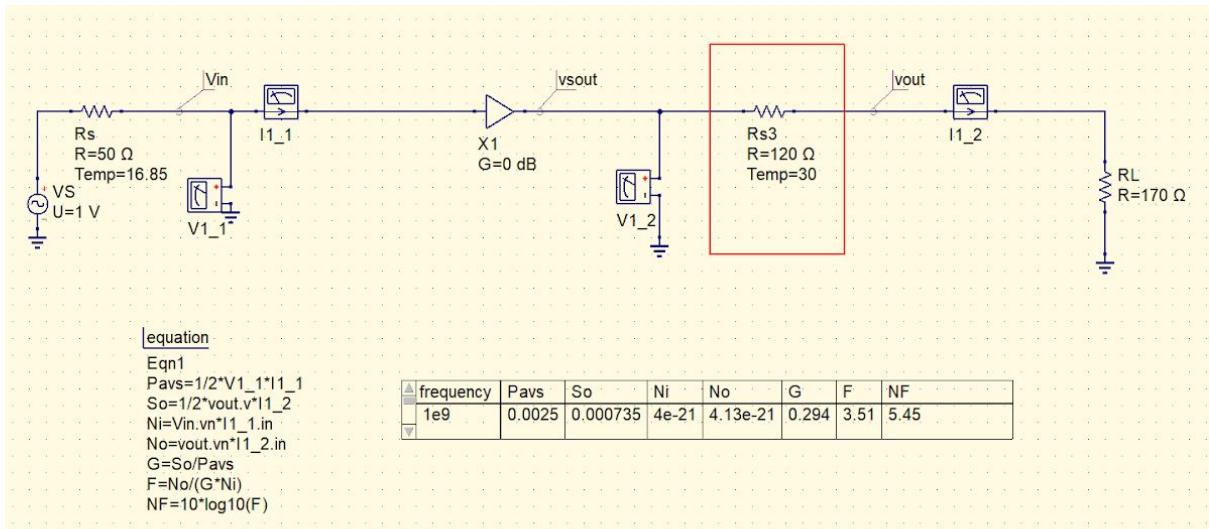
dados obtidos em medição prévia). Apenas o resistor da fonte Vs ( $R_s$ ) e os resistores do subcircuito X1 possuem ruído térmico considerado, as demais resistências são sem ruído, configurando-se temperatura a 0 K.

De modo geral, poder-se-ia utilizar qualquer fonte controlada (transistorizada ou “trancitorizada” [8]), desde que atendendo às condições supracitadas.

## Atividade 4

Com base nas duas questões anteriores, determine a figura de ruído dos circuitos da Figura 6. Para tanto, faça  $R_s=120 \Omega$  e  $R_p=60 \Omega$ . Compare os resultados com as previsões teóricas.

Seguindo as informações apresentadas anteriormente, temos na Figura 8 o circuito resultante para o bloco com o resistor em série  $R_s$ . Optou-se pelo uso de um amplificador X1 como elemento substituidor da fonte controlada apresentada na Figura 7. Configura-se impedância de referência das ports de entrada e de saída do amplificador igual a  $R_s$  ( $50 \Omega$ ), com ganho em 0 dB (buffer).



**Figura 8 - Circuito de medição para  $R_s$**

Tem-se na tabela da Figura 8 os valores de potência disponível da fonte ( $P_{avs} = S_i$ ), potência disponível do circuito ( $S_o$ ), potência de ruído disponível na entrada ( $N_i$ ), potência de ruído disponível na saída ( $N_o$ ), ganho de potência disponível ( $G$ ). Além disso, se expressa o fator de ruído ( $F$ ) e figura de ruído ( $NF$ ).

Para os dados supracitados, tem-se as relações [1]:

$$P_{avs} = S_i = \frac{V_s^2}{8R_s} = \frac{1}{8*50} = 0,0025W$$

$$S_o = \frac{V_o^2}{8R_o} = \frac{1}{8*170} = 0,000735W$$

$$N_i = kT = 1,38 * 10^{-23} * 290 = 4 * 10^{-21} J [V^2/Hz]$$

$$N_o = k \frac{(R_s * T + R_{s3} * T_{s3})}{R_s + R_{s3}} = 1,38 * 10^{-23} \frac{50*290+120*303,15}{50+120} = 4,13 * 10^{-21} J [V^2/Hz]$$

$$G = \frac{S_o}{S_i} = \frac{0,000735}{0,0025} = 0,294$$

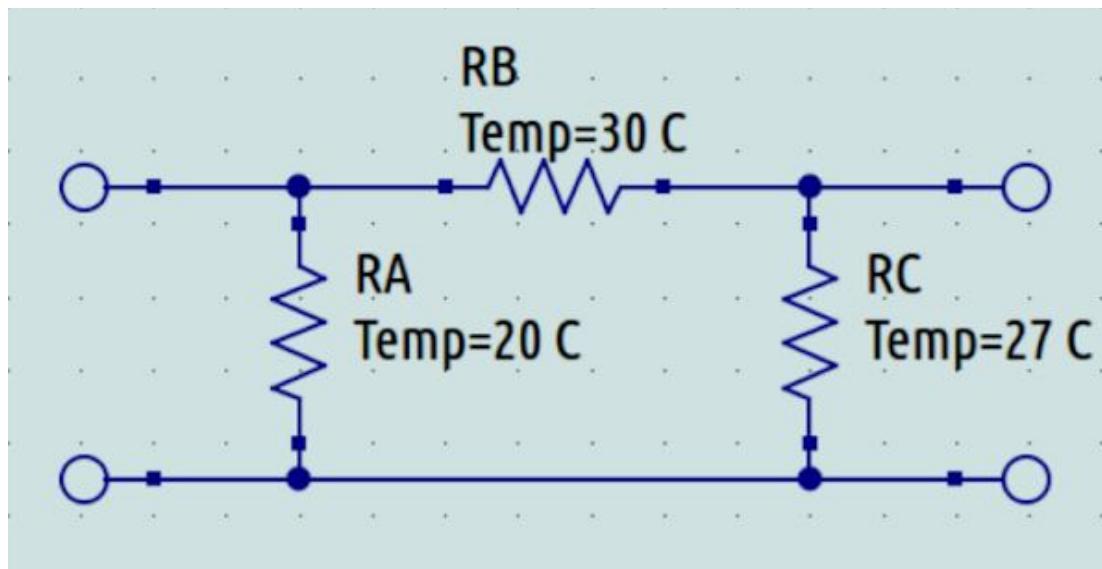
$$F = \frac{N_o}{N_i * G} = \frac{4,13 * 10^{-21}}{4 * 10^{-21} * 0,294} = 3,51$$

$$NF = 10 \log_{10}(F) = 10 \log_{10}(3,51) = 5,45 dB$$

Portanto, verifica-se que todos os valores teóricos correspondem aos simulados.

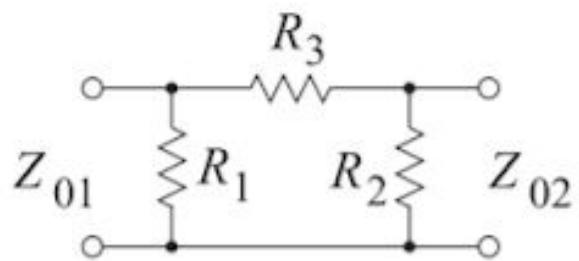
## Atividade 5

Considerando os resultados da questão 04 e a fórmula de Friis para a figura de ruído de blocos em cascata, encontre a figura de ruído do circuito abaixo. Antes de realizar as simulações, projete o circuito (encontrar RA, RB e RC) de modo que sua atenuação seja 10 dB e que possa ser conectado a uma fonte e a uma carga, ambos com impedância de  $75 \Omega$ , sem reflexões. Compare os resultados com as previsões teóricas.



*Figura 9 - Circuito para caracterização da Figura de Ruído*

Implementa-se um circuito atenuador em rede-Pi pela referência [5] baseado na Figura 10. Com isso, como é verificado na Questão 2 em tópico adiante, se tem que um atenuador de L dB possui figura de ruído L dB.



*Figura 10 - Rede de resistores atenuadora [5]*

Pela Figura 10 e referência [5], para um atenuador-Pi deriva-se a relação:

$$Z_0 = \sqrt{\frac{R_1^2 R_3}{2R_1 + R_3}}$$

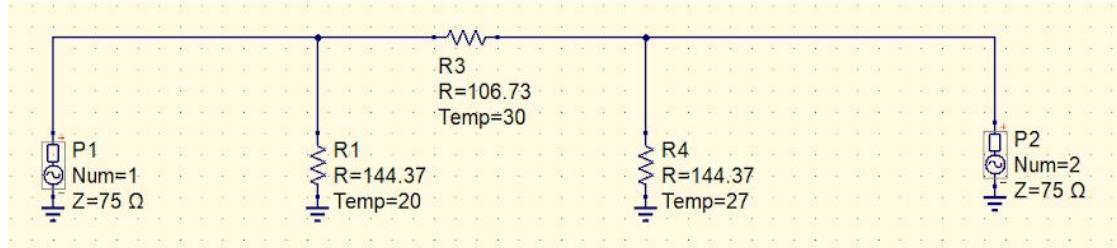
$$K = \left( \frac{R_1 + Z_0}{R_1 - Z_0} \right)^2$$

Para atenuação de 10dB,  $K = 10^{(10/10)} = 10$ ,  $Z_{01} = Z_{02} = Z_0 = 75\Omega$  temos:

$$R_3 = \frac{Z_0(K-1)}{2\sqrt{K}} = \frac{75(10-1)}{2\sqrt{10}} = 106,73\Omega$$

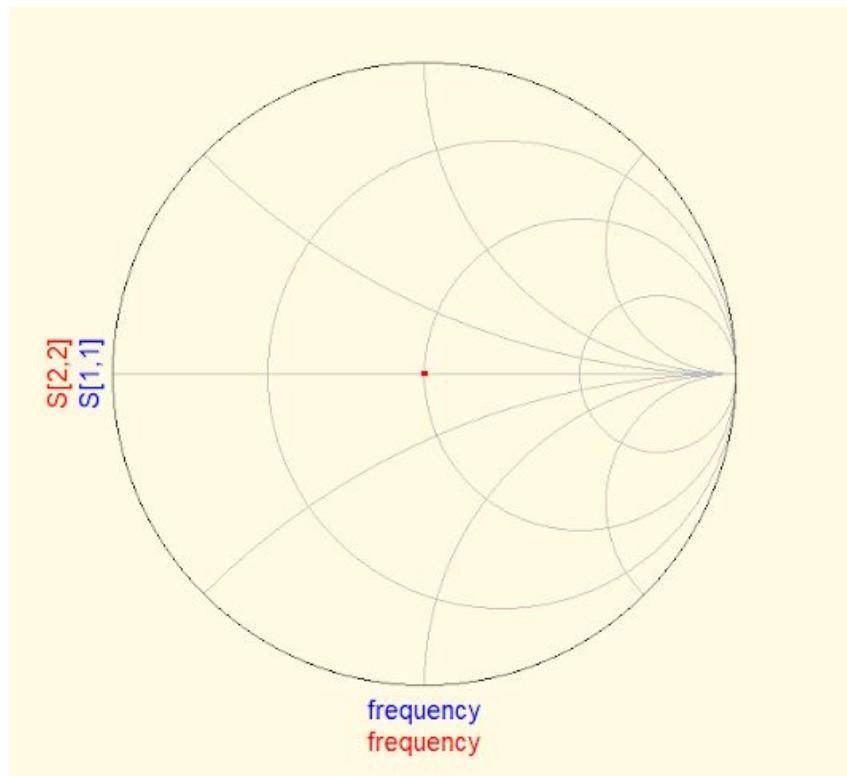
$$R_1 = R_2 = Z_0 \left( \frac{\sqrt{K}+1}{\sqrt{K}-1} \right) = 144,37\Omega$$

O circuito montado no software QUCS é apresentado na Figura 11:



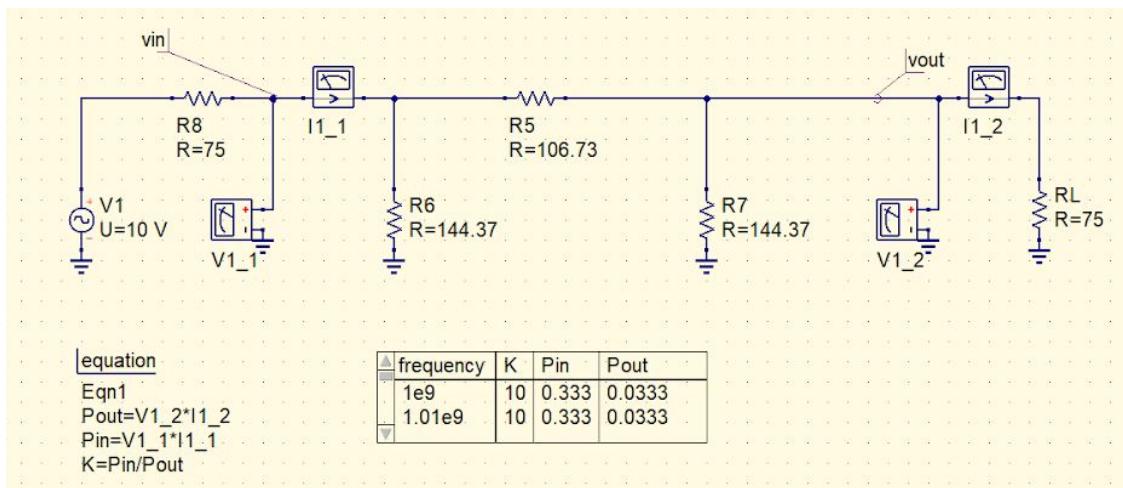
**Figura 11 - Circuito atenuador**

O resultado de simulação S-parameters é dado pela Carta de Smith apresentada na Figura 12, mostrando  $S_{11}$  e  $S_{22}$  sobrepostos no ponto em vermelho central, demonstrando não haver reflexão, conforme requisitado.



**Figura 12 - Carta de Smith para circuito atenuador projetado**

O circuito para medição de fator de atenuação (de potência) K, considerando ruído térmico, é apresentado a seguir na Figura 13, tendo as equações no diagrama.



**Figura 13 - Circuito para medição de fator de atenuação K**

Como se vê na tabela presente no circuito montado no software QUCS na Figura 13, temos as potências de entrada (Pin) e de saída (Pout), havendo a respectiva relação para obtenção de  $K = 10$ .

# **Questões**

## **Questão 1**

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

Análise e comparação realizadas ao longo do relatório.

## Questão 2

Demonstre que a figura de ruído de um atenuador de L dB é igual a L dB.

Seja “l” o valor linear de atenuação L (dB), ou seja:

$$l = 10^{\frac{L}{10}} \Rightarrow L = 10\log_{10}(l)$$

Temos que a potência de ruído na entrada do atenuador é:

$$N_i = kTB$$

Logo, a densidade espectral de potência de ruído pode ser dada por:

$$\frac{N_0}{B} = \frac{N_i}{lB} = \frac{KT}{lB}$$

A densidade espectral de potência em excesso ( $N_e$ ) é dada pela relação:

$$\begin{aligned}\frac{N_e}{B} &= \frac{N_i}{B} - \frac{N_o}{B} \\ &= \frac{N_i}{B} - \frac{N_i}{lB} \\ &= \frac{N_i}{B} \left(1 - \frac{1}{l}\right) \\ &= kT \left(1 - \frac{1}{l}\right)\end{aligned}$$

O fator de ruído do atenuador:

$$\begin{aligned}F &= 1 + \frac{N_e}{GN_i} = 1 + \frac{N_e}{GkTB} \\ &= 1 + \frac{1}{GkT} kT \left(1 - \frac{1}{l}\right) \\ &= 1 + \frac{1}{G} \left(1 - \frac{1}{l}\right)\end{aligned}$$

Como o ganho linear (G) é o inverso da atenuação linear (l), temos:

$$= 1 + l \left(1 - \frac{1}{l}\right) = l$$

Pelo fato da figura de ruído ser a transformação logarítmica (valor em dB) do fator de ruído (linear) [3], temos:

$$NF = 10\log_{10}(F) = 10\log_{10}(l) = L$$

### **Questão 3**

Quais as consequências do resultado da questão 2 na escolha de filtros ou conexões a colocar na entrada de receptores de RF? (a resposta deve ser adequadamente fundamentada)

Tendo a relação direta entre figura de ruído (NF) e fator de atenuação (L) de um circuito (two-port, por exemplo), pode-se chegar à consideração de atenção aos filtros e conexões aplicados na entrada de receptores de RF. Isto por conta da ação de decréscimo da relação sinal-ruído (SNR) [2], propagando ao longo do sistema (e de seus estágios interligados, caso se aplique) esta característica, a qual pode comprometer significativamente o processamento do sinal de entrada.

Sendo assim, não recomenda-se o uso de atenuadores com valores elevados de L logo na entrada do sistema, por alterar também condições relativas ao mínimo sinal detectável (MDS - Minimum Detectable Signal), dependente, de mesma forma, da SNR requerida do sistema, conceito assaz relevante para sistemas de telecomunicação. Portanto, comumente utiliza-se de LNAs (Low Noise Amplifiers) como dispositivo frontend de receptores RF.

#### **Questão 4**

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).

Com a análise de figura de ruído de circuitos RF foi possível identificar pontos relevantes no projeto de sistemas (sobretudo sistemas de telecomunicação), de forma tal que se comportem adequadamente em face de condições moderadoras da performance do circuito, como a temperatura, banda de frequência e variação de valores de impedância. A compreensão acerca de ruídos (principalmente ruído térmico ou Johnson-Nyquist) é mister para implementações apropriadas, tentando minimizar o efeito destes componentes dentro da faixa de operação indicada do sistema.

Dentre as dificuldades a serem consideradas cita-se o desafio de projetar circuitos em simulação refletindo, de mesma forma, a aplicação prática, com valores reais possíveis de resistores, por exemplo, devido a dificuldade de fabricação de resistores de alta precisão e valores exatos (144,37 ohms, como verificado na Atividade 5). Somam-se os potenciais fatores que podem ser encontrados em implementação física quando em comparação com a virtual (interferência, não-linearidade, processos não isotérmicos ou isobáricos, etc.)

## Questão 5

Que sugestões você oferece para tornar esta atividade mais interessante? (Por que não as implementou voluntariamente?)

O acréscimo de condições não-ideais, não-linearidades, diferentes tipos de ruído (como questões extra), modificação de valores de componentes com o tempo (parameter sweep), relação de parâmetros-S com figura de ruído, parâmetros de ruído, entre outros fatores relacionados, podem incrementar a atividade experimental e ampliar o espectro de conhecimento, superpondo efeitos e aproximando implementação virtual da física. Tais pontos não foram implementados voluntariamente por questões de limitação de tempo.

Algumas adições não originalmente presentes nos enunciados de experimento foram realizadas, como cálculo e verificação por simulação de fator e figura de ruído de circuitos propostos (Atividade 4).

Além disso, cabe a sugestão sobre a adição de referências que possibilitem o contato mais intuitivo com o conteúdo apresentado, como artigos/papers relacionados, projetos acadêmicos e industriais/comerciais que abordam os conceitos estudados, valores de aprendizagem baseada em problemas/projetos (PBL) [6], aspectos da taxonomia educacional de Bloom [9], dentre outros recursos adaptados para o ensino remoto [7] que possam permitir ao corpo discente a correlação entre tópicos e demais desdobramentos didáticos.

“O professor infunde conhecimento no aluno não no sentido de que o mesmo conhecimento que está no mestre passe para o aluno, mas porque neste, pelo ensino, se produz passando de potência para ato um conhecimento semelhante ao que há no mestre.” [4]

São Tomás de Aquino

Observação/sugestão de correção: item ( c ) de atividade 1 de laboratório apresenta a palavra “potência” repetida em “calcule a potência de potência”.

# Referências

- [1] Notas de Aula EEL7319 - Circuitos RF
- [2] STEER, Michael. **MICROWAVE AND RF DESIGN NETWORKS Vol. 4.** NC State University, 2019
- [3] W. Alan Davis, **Radio Frequency Circuit Design**, Second Edition, Wiley, 2010
- [4] CUSTÓDIO, Diane Ângela Cunha; SIQUEIRA, Teresa Cristina Barbo. O SENTIDO DE ENSINAR EM TOMÁS DE AQUINO. EDUCAÇÃO, TRANSFORMAÇÃO E INCLUSÃO NA PRÁTICA DOCENTE, p. 111.
- [5] STEER, Michael. **MICROWAVE AND RF DESIGN NETWORKS Vol. 3.** NC State University, 2019
- [6] SIMAS, Gustavo; PINTO, Wayne Pereira Albuquerque Cavalcanti; **A Aprendizagem Baseada em Problemas por meio de Projetos em Robótica.** COBENGE, 2017. ISSN 2175 - 957X.
- [7] SIMAS, Gustavo. **O que o Ensino Remoto pode aprender com as Plataformas de Ensino Online?** Disponível em <https://medium.com/@gustavosimassilva/o-que-o-ensino-remoto-pode-aprender-com-as-plataformas-de-ensino-online-91aeff0a0fb9>. Acesso em 11 out. 2020.
- [8] S. Lee, "A Missing Active Device-Trancitor for a New Paradigm of Electronics," in IEEE Access, vol. 6, pp. 46962-46967, 2018, doi: 10.1109/ACCESS.2018.2866883.
- [9] BLOOM, Benjamin S. et al. **Taxonomy of educational objectives.** Vol. 1: Cognitive domain. New York: McKay, v. 20, p. 24, 1956.