

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

LAB 4  
CIRCUITOS COM FIGURA DE RUÍDO MÍNIMA

GUSTAVO SIMAS DA SILVA

FLORIANÓPOLIS  
OUTUBRO, 2020

“A ciência será sempre uma busca, jamais uma descoberta. É uma viagem, nunca uma chegada”

Karl Popper

# Sumário

<b>Sumário</b>	<b>3</b>
<b>Atividades de Laboratório</b>	<b>4</b>
Atividade 1	4
<b>Questões</b>	<b>9</b>
Questão 1	9
Questão 2	10
Questão 3	11
Questão 4	12
<b>Referências</b>	<b>13</b>

# Atividades de Laboratório

## Atividade 1

Simule todos os circuitos do PRELAB e verifique os resultados detalhadamente, sempre com ênfase na otimização da figura de ruído.

Para avaliação de ruído em circuitos RF, modela-se em pequenos sinais um diodo de junção PN partindo da equação de Shockley. Assim, tem-se:

$$I_D = I_S(e^{\frac{V_D}{N_S V_T}} - 1) + I_{SR}(e^{\frac{V_D}{N_R V_T}} - 1)$$

Onde:

$I_D$  é a corrente de polarização

$I_S$  é a corrente de saturação

$N$  é o coeficiente de emissão

$V_T$  é a tensão térmica

$V_D$  é a tensão sobre o diodo

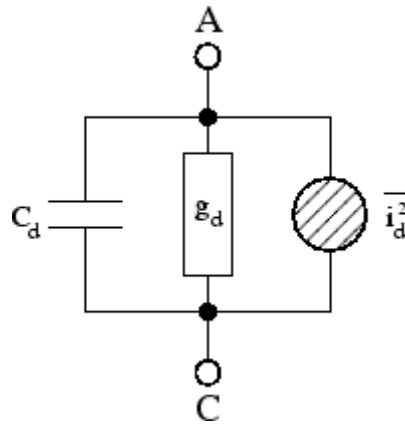
$I_{SR}$  é o parâmetro de corrente de recombinação

$N_R$  é o coeficiente de emissão para  $I_{SR}$

Com a derivação parcial da corrente de polarização em relação à tensão sobre o diodo é possível obter a condutância do diodo  $g_d$ :

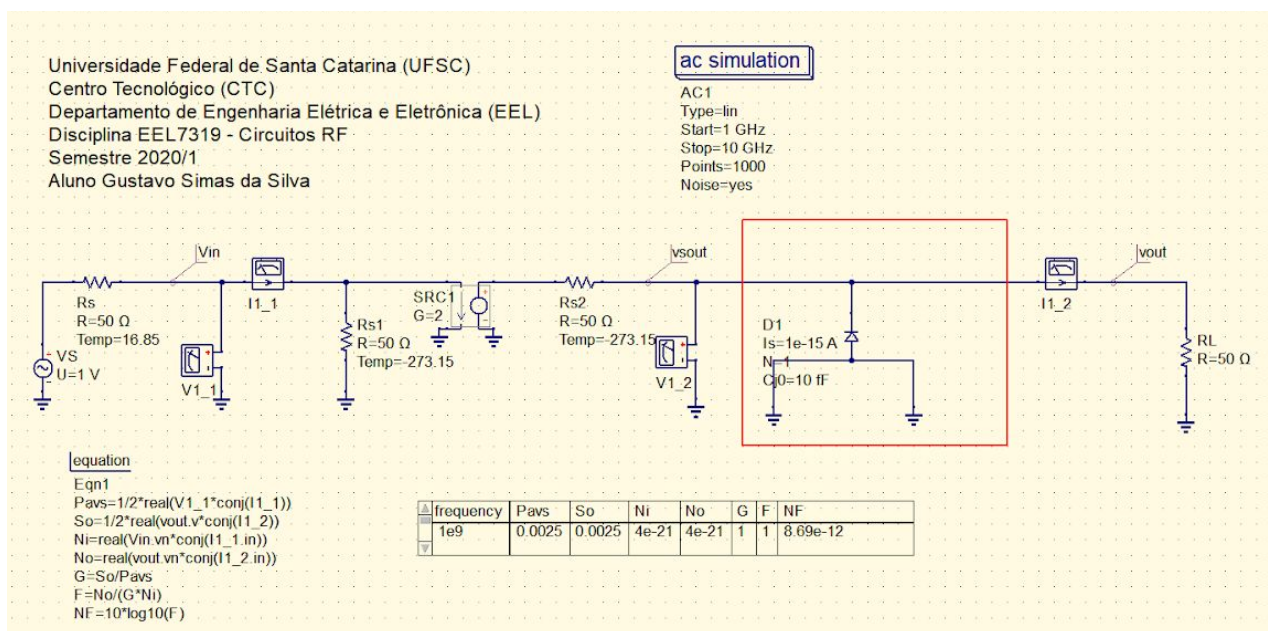
$$g_d = \frac{\partial I_D}{\partial V_D} = \frac{I_S}{N_S V_T} e^{\frac{V_D}{N_S V_T}} + \frac{I_{SR}}{N_R V_T} e^{\frac{V_D}{N_R V_T}}$$

O modelo de ruído resultante para pequenos sinais é apresentado na Figura 1. O capacitor em paralelo  $C_d$  representa uma capacitância dependente de tensão e de uma capacitância linear adicional [4].



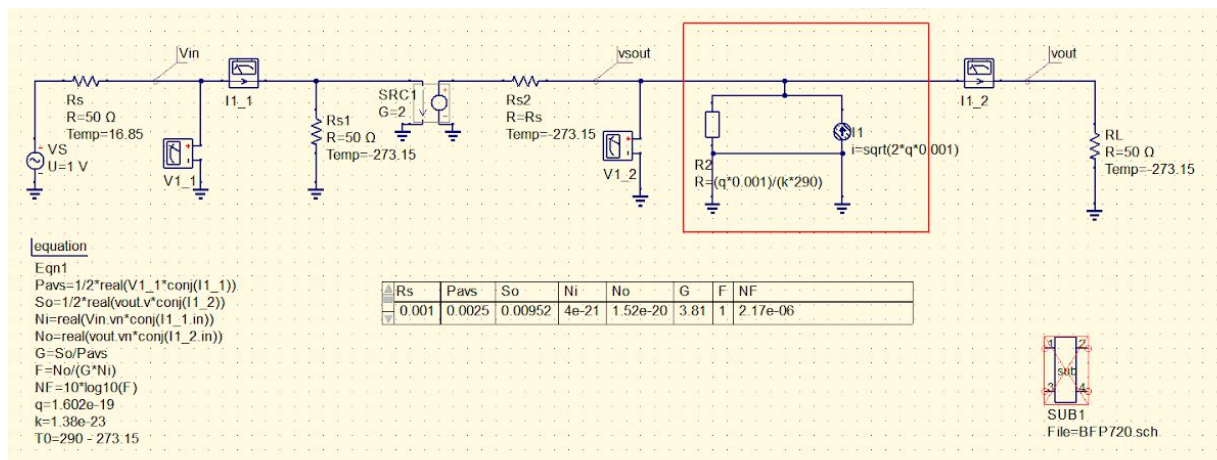
**Figura 1 - Modelo de ruído de diodo para pequenos sinais**

Para o primeiro circuito (Two-port com diodo em paralelo à entrada e saída), temos a Figura 2 apresentando a montagem no software QUCS Studio 3.3.



**Figura 2 - Primeiro circuito avaliado no software QUCS Studio**

O modelo do diodo no QUCS Studio 3.3.2, sem considerar ruído térmico associado, produz shot noise [4], no entanto inclui uma variedade de parâmetros que demonstram-se irrelevantes ou fora do escopo de avaliação de tal experimento. Assim, modelou-se o diodo baseado na Figura 1, sem o capacitor associado  $C_d$ , possuindo, então, a fonte de corrente de ruído (densidade espectral de corrente) e resistor em paralelo. A Figura 3 apresenta o circuito resultante.



**Figura 3 - Primeiro circuito com modelo de ruído shot de diodo**

Observa-se que:

$$\frac{i_{nd}^2}{B} = 2qI_D [A/\sqrt{Hz}]$$

$$g_d = \frac{qI_D}{kT_D} [S]$$

Percebe-se que utiliza-se da estrutura de circuito para verificar fator e figura de ruído de DUT (Device Under Test) proposta em experimento anterior, com fonte de tensão controlada por tensão (SRC1).

De acordo com dedução teórica realizada em pré-laboratório, tem-se:

$$F = 1 + \frac{qI_D}{kT_0G_G}$$

Onde:

F é o fator de ruído

q é a carga elementar ( $1,602\,176\,634 \times 10^{-19}$  C)

Id é a corrente de polarização

k é a constante de Boltzmann ( $1,38064852 \times 10^{-23}$  J/K)

T0 é a temperatura padrão de avaliação (290 K)

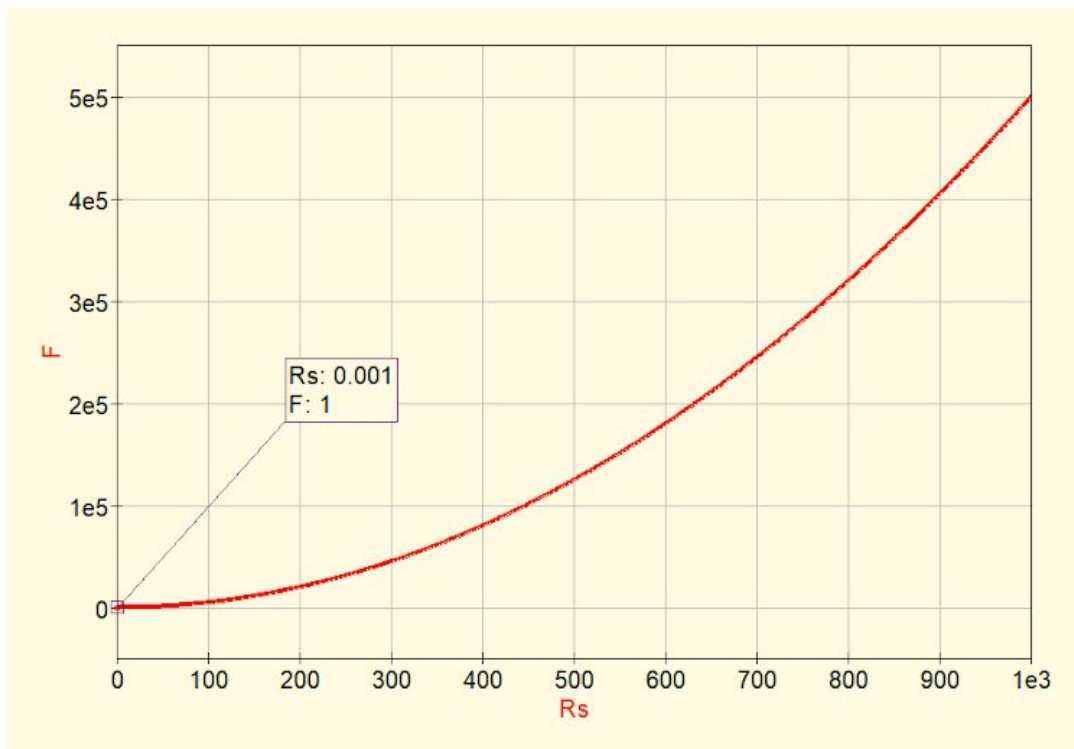
Gg é a condutância do gerador

Sendo assim, ao se desejar um valor mínimo para F, retira-se a derivada em relação a um parâmetro de mais fácil alteração, no caso a condutância/resistência do gerador (Gg ou Rg, respectivamente) e iguala a zero (mínimo local/global):

$$\frac{dF}{dG_G} = -\frac{qI_D}{kT_0 G_G^2} = 0 \Rightarrow G_G \rightarrow \infty \Rightarrow R_G \rightarrow 0$$

Logo, o fator de ruído mínimo com a resistência de gerador ótima (nula) é igual à unidade.

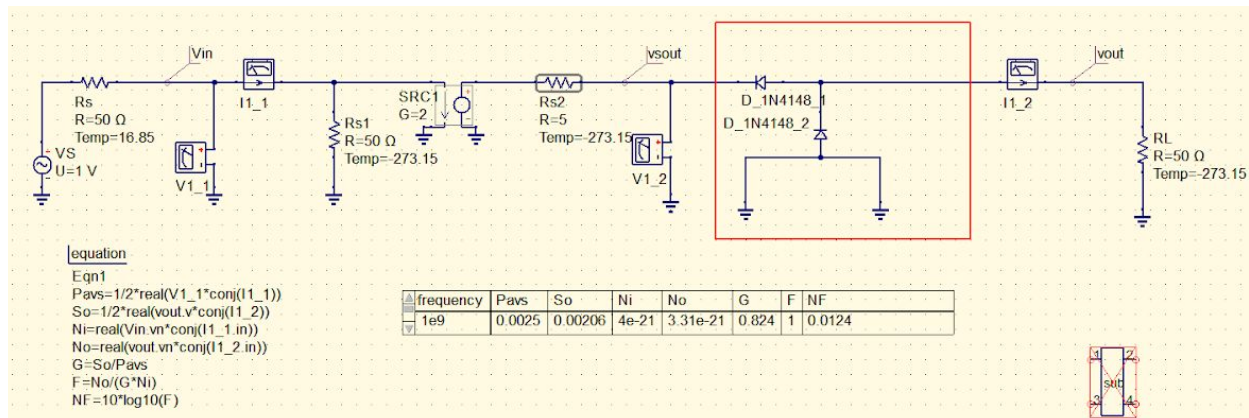
Utilizou-se como base uma corrente de polarização em 1mA. Com tais parâmetros configurados, a simulação com variação do valor de resistência do gerador (no caso, Rs2, pela Figura 3), obteve-se o gráfico do fator de ruído apresentado na Figura 4.



**Figura 4 - Fator de ruído com variação de  $R_g$  no circuito 1**

Assim, de acordo com o estimado, tem-se que o menor valor de fator de ruído (e, conseqüentemente, de figura de ruído) se localiza nos menores valores de  $R_g$  (maiores valores de  $G_g$ ) na simulação dada.

Para o segundo circuito, com dois diodos como dispositivos sob teste, apresenta-se a Figura 5 com o sistema montado no software de simulação.



**Figura 5 - Segundo circuito avaliado no software QUCS Studio**

De acordo com derivações em análise pré-laboratorial, obteve-se o seguinte fator de ruído:

$$F = 1 + \frac{T_D^2 G_G k}{q I_D T_0} + \frac{q I_D}{2 k T_0 G_G} + \frac{T_D}{T_0}$$

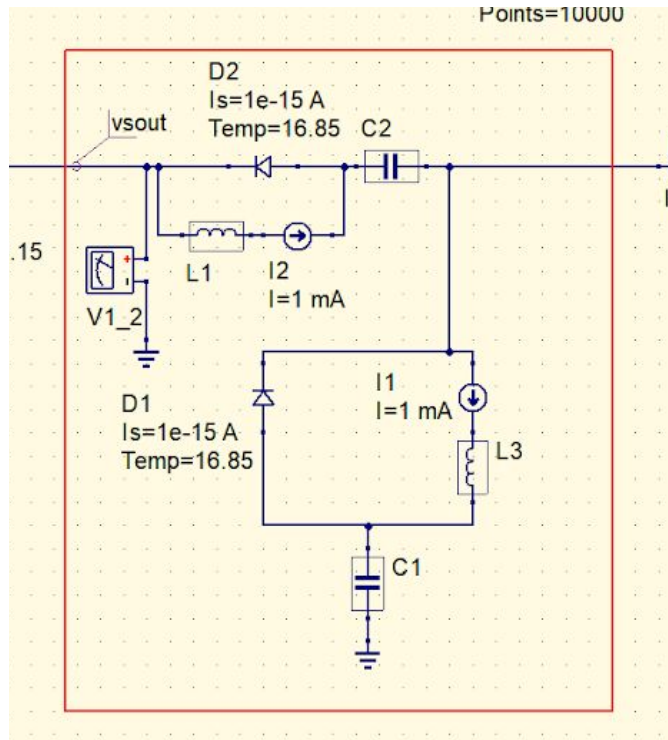
Onde  $g_{d1}$  é a condutância do diodo 1 (configurado em série com as ports 1 e 2/entrada e saída). Salienta-se que tal valor poder-se-ia ser calculado utilizando como ferramenta a fórmula de Friis para cálculo de fator de ruído [1] [2].

Assim, fazendo derivação parcial em relação à condutância da fonte/gerador ( $G_g$ ) de maneira semelhante ao primeiro circuito, obtém-se:

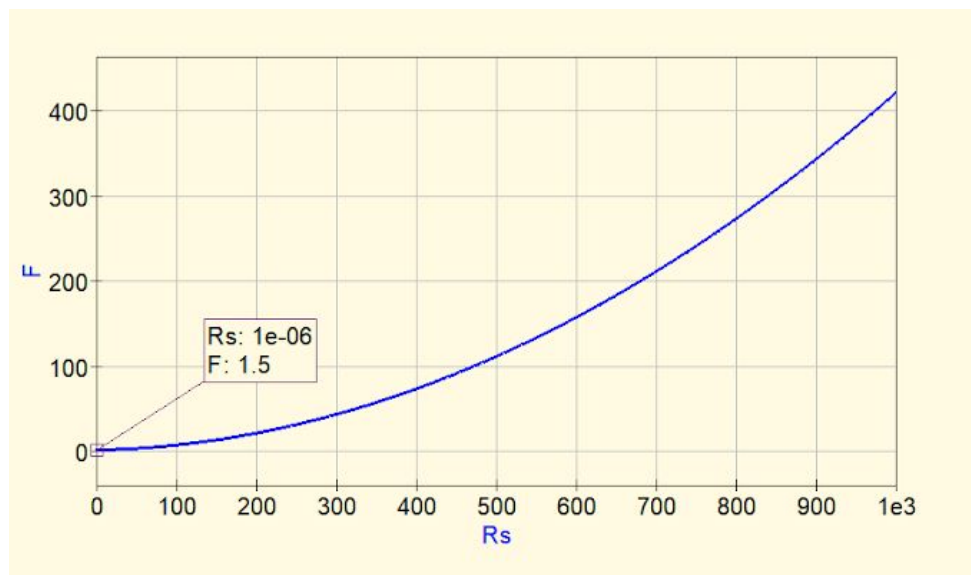
$$\frac{dF}{dG_G} = \frac{T_D^2 k}{q I_D T_0} + \frac{q I_D}{2 k T_0} \left( -\frac{1}{G_G^2} \right) \Rightarrow R_{G(opt)} = \sqrt{2} \frac{T_D k}{q I_D}$$

Para uma corrente de polarização elevada, o valor de resistência ótima do gerador tende a zero. Modelando-se o ruído no software, utiliza-se a estrutura apresentada na Figura 6. Assim, com as fontes de corrente independentes associadas em paralelo com os diodos, tão como os elementos indutor e capacitor (para alimentação e bloqueio DC, respectivamente), temos o resultado apresentado no gráfico da Figura 7.





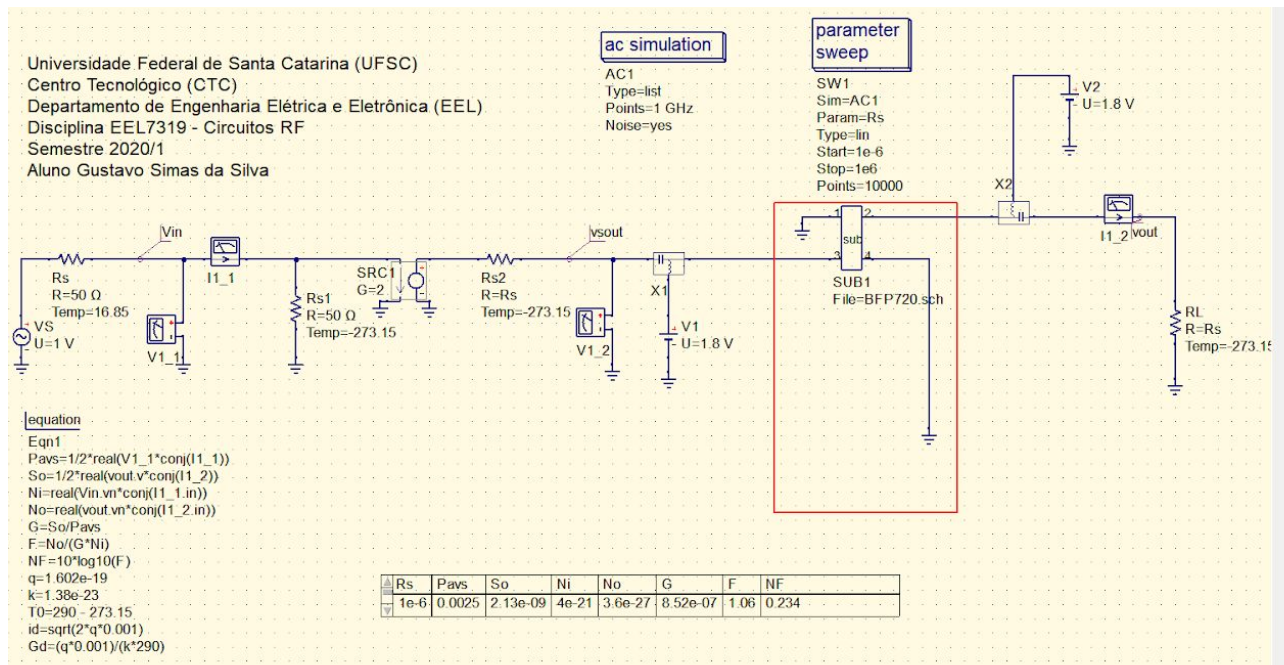
**Figura 6 - Circuito com diodos modelando polarização e ruído**



**Figura 7 - Fator de ruído com variação de  $R_g$  no circuito 2**

Para o circuito com o transistor bipolar de junção, foi utilizado um subcircuito e adicionado arquivo com o modelo do componente BFP720. Por informações obtidas a partir da folha de dados do fabricante Infineon, estruturou-se circuito de

polarização e adequação ao sistema. A Figura 7 apresenta o terceiro circuito resultante. Faz-se uso do componente Bias-T (capacitor e indutor) disponível no software de simulação como elementos de bloqueio DC e alimentação DC, respectivamente. Observa-se que, para as fontes de tensão voltadas a polarização do subcircuito, não são utilizados resistores/condutâncias associadas por razões de simplificação.



**Figura 7 - Terceiro circuito avaliado no software QUCS Studio**

Para o software QUCS Studio versão 3.3.2 o modelo apresentado de subcircuito não se adequa com o disponibilizado, resultando em falhas de simulação.

# 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

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

Pode-se, primeiramente, analisar a figura de ruído mínima do sistema, calculando-a de forma total integrada ou separadamente, particionando-o em diferentes Two-ports e aplicando fórmula de Friis para cálculo de figura de ruído, por exemplo. Com isso, ter-se-á, com derivação apropriada, uma relação de figura de ruído em função de parâmetros como resistência de gerador, corrente de polarização, entre outros fatores. Desta forma, com ajuste destes parâmetros, é possível obter um projeto de amplificador de ruído mínimo.

Observa-se que quanto mais tipos de ruídos distintos forem considerados (térmico, shot, flicker, etc.), melhor será a efetividade do projeto em relação ao propósito de reduzir o ruído. No entanto, sua complexidade será elevada consideravelmente. Assim, cabe ao projetista avaliar o balanço/tradeoff entre recursos disponíveis para a realização do sistema.

### Questão 3

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).

Foi possível identificar a relevância da análise de ruído em circuitos RF. Dentre as dificuldades, cita-se a potencial complexidade de cálculo de figura de ruído quando diferentes tipos são superpostos (térmico, shot, flicker). Isto, tão como o uso adequado de ferramentas disponíveis no software de simulação, de modo a se obter os resultados desejados.

#### Questão 4

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

O acréscimo (como formas extra opcionais de análise) de condições não-ideais, não-linearidades, diferentes tipos de ruído, modificação de valores de componentes com o tempo (parameter sweep), avaliação da relação de parâmetros-S com figura 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.

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, dentre outros recursos adaptados para o ensino remoto que possam permitir ao corpo discente a correlação entre tópicos e demais desdobramentos didáticos.

# 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] QUCS. **Pn Junction Diode.** Disponível em:  
<https://qucs.github.io/tech/node68.html>. Acesso em 25 out. 2020.