

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO – USP
ESCOLA DE ENGENHARIA DE SÃO CARLOS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA E DE
COMPUTAÇÃO

SEL-369: MICRO-ONDAS

AMPLIFICADOR EM MICRO-ONDAS

Prof. Prof. Amílcar Careli César
Eduardo de Almeida - 8066631

São Carlos
2019

Lista de ilustrações

Figura 1 – Ilustração de microfita.	3
Figura 2 – Rede amplificador	4
Figura 3 – Parâmetros datasheet para frequências de operação.	5
Figura 4 – Parâmetros S do componente.	6
Figura 5 – Carta de Smith.	8
Figura 6 – Desenhos dos círculos de estabilidade do transistor.	8
Figura 7 – Determinação das impedâncias ótimas.	9
Figura 8 – Simulação dos parâmetros S do transistor	10

Sumário

1	Resumo e objetivos	1
2	Especificações e Exigências	2
3	Introdução	3
3.1	<i>Microfitas</i>	3
3.2	<i>Amplificador</i>	3
4	Projeto	5
4.1	<i>Função do Matlab</i>	11
5	Conclusão	17
	Referências Bibliográficas	18

1 Resumo e objetivos

O conteúdo de SEL0369 - Micro-Ondas visa a estudar o comportamento de circuitos em altas frequências, bem como suas características de propagação. Dessa forma, a análise de circuitos por parâmetros de espalhamento se mostra como uma ferramenta importante. Apresentando aplicações em filtros, amplificadores e circuitos integrados de micro-ondas, além de acopladores direcionais e híbridos.

O Objetivo do projeto é implementar um amplificador em microfitas. Ora, a escolha da microfita justifica-se pela maior versatilidade e facilidade de fabricação sobre outros tipos de linha de transmissão de sinais em altas frequências, a microfita consiste em um tipo de linha de transmissão elétrica cuja fabricação envolve tecnologia de confecção de placa de circuito impresso [1].

Utiliza-se o software *Ansoft Designer* juntamente com o *MATLAB* para projetar o amplificador em questão com os parâmetros requisitados.

2 Especificações e Exigências

Tabela 1 – Especificação do amplificador.

Técnica de fabricação	Microfita
Impedância da fonte (Ω)	50
Impedância da carga (Ω)	50
Conectores do tipo SMA	7.5mm

Além disso, é feita uma lista de exigências pela empresa com os requerimentos abaixo:

Tabela 2 – Exigências de projeto dos filtro passa-baixas.

Exigência	Especificação
Calcular	Redes de adaptação de impedância de entrada e saída, rede de polarização, condições de estabilidade, círculos de estabilidade (se necessário), ganho.
Projeto do amplificador	Amplificador protótipo, amplificador em microfita, com todos os detalhes de cálculo
Apresentação final	Desenho em escala do amplificador em microfita com todas as dimensões em milímetros; simulações de todos os parâmetros S; círculos de estabilidade de entrada e saída
Prazo de entrega	15 dias
Qualidade do projeto	Todas as exigências devem estar reunidas em apresentação digitada em Microsoft Word. Devem ser anexadas todas as informações importantes que forem necessárias

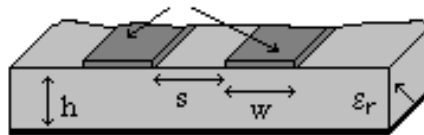
3 Introdução

3.1 Microfitas

Microfitas são linhas de transmissão que podem ser fabricadas utilizando técnicas de placa de circuito impresso (*PCB – printed circuit board*) e são usadas para circuitos em alta frequência, nos quais a utilização de elementos discretos poderia ser problemática, seja pelo tamanho dos componentes, seja pelos seus efeitos parasitas.

Uma microfita consiste de uma camada de dielétrico (C), conhecida como substrato, separando um condutor (A) e um plano terra (D), conforme a figura. Ora, dessa forma é possível implementar antenas, filtros, acopladores, etc. Na figura abaixo destaca-se em corte transversal a microfita sob um substrato sendo utilizada para um acoplador.

Figura 1 – Ilustração de microfita.



3.2 Amplificador

Amplificadores são circuitos projetados para a partir de um dado sinal de entrada, produzir um sinal de saída com maior amplitude. Ora, diferentes tipos de amplificadores resultam em diferentes tipos de ganho ao sinal, como por exemplo ganho de tensão corrente ou potencia.

Os amplificadores em micro-ondas são elementos importantes de um sistema de comunicação, uma vez que é necessário um ganho para que os sinais recebidos, normalmente com pequenas amplitudes, possam efetivamente acionar circuitos de recepção como misturadores demoduladores e etc.

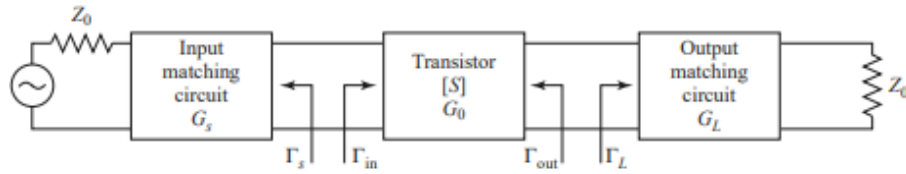
Amplificadores de transistor podem ser usados em frequências superiores a 100 GHz com uma ampla faixa de aplicações cujo requerimento incluem tamanho reduzido, baixo ruído, largura de banda larga entre outras [2].

O projeto do amplificador de transistor depende principalmente das características do terminal do transistor, cuja representação se dá por parâmetros de espalhamento. Ora, os parâmetros de espalhamento caracterizam um circuito de micro-ondas linear utilizando relações entre as ondas de tensão incidentes e refletidas nas portas do circuito, tais relações são chamadas de parâmetro de espalhamento e agrupadas em uma matriz. Normalmente os

parâmetros de espalhamento são obtidos através de medições com aparelhos adequados. Além disso, conceitos relacionados ao ganhos de potência de duas portas são úteis para o projeto do amplificador bem como o conceito de estabilidade[1].

Dessa forma, um amplificador de transistor de micro-ondas pode ser modelado pelo circuito da Figura 2, onde as redes correspondentes são usadas em ambos os lados do modelagem do transistor para transformar a entrada impedância de saída Z_0 para a fonte e impedâncias de carga Z_S e Z_L . O ganho mais útil na definição do projeto do amplificador é o ganho de potência do transdutor[2].

Figura 2 – Rede amplificador



4 Projeto

Inicialmente, foi utilizado o transistor NE696M01 da NEC, uma junção PNP de silício projetado para atuar em alta frequência, o transistor (NE685) encapsulado em um pacote SOT363 de 6 pinos ultra pequeno. A escolha do dispositivo se justifica pelos quatro pinos de emissor, responsável por diminuir a indutância do emissor resultando em 3 dB a mais de ganho comparado a outros dispositivos convencionais. O NE696M01 é ideal para LNA e aplicações onde o baixo custo, alto ganho, baixa tensão e baixa corrente são necessários. As especificações mostradas na tabela exigem uma frequência de operação de 3GHz, dessa forma obtém-se os parâmetros associados por meio do datasheet do componente a uma temperatura de $T = 25$, como mostrado abaixo:[3].

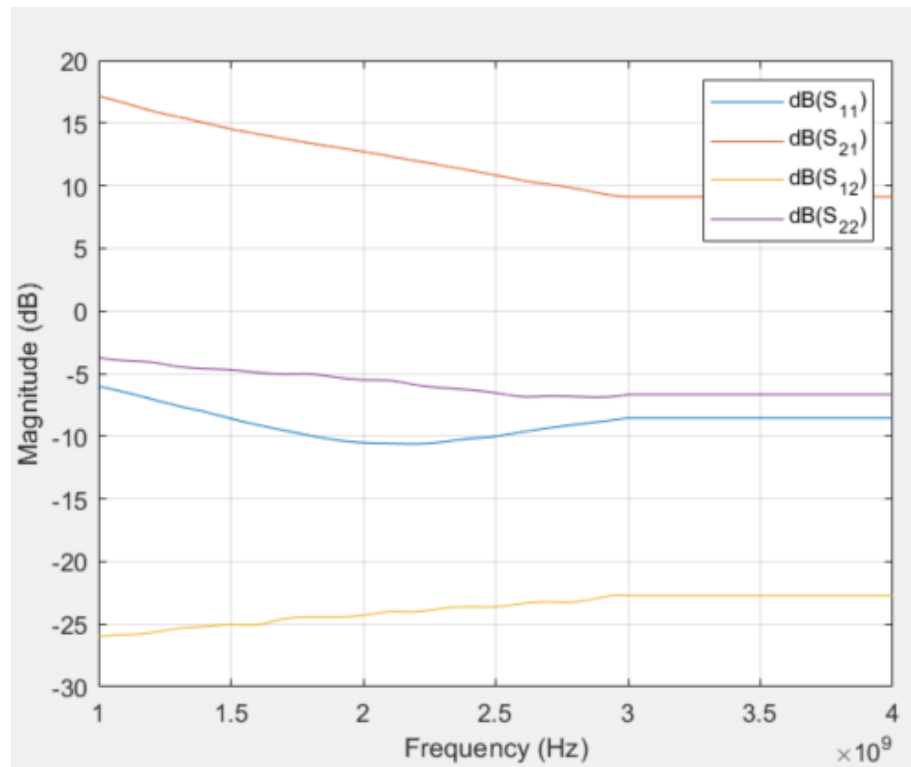
Figura 3 – Parâmetros datasheet para frequências de operação.

FREQ. (GHz)	NF _{OPT} (dB)	GA (dB)	Γ _{OPT}		Rn/50
			MAG	ANG	
/CE = 2 V, IC = 5 mA					
0.5	1.2	23.0	0.49	37	0.38
0.8	1.32	20.3	0.44	62	0.27
1.0	1.47	18.8	0.42	76	0.30
1.5	1.63	15.8	0.39	98	0.23
2.0	1.82	13.0	0.33	126	0.18
3.0	2.17	9.8	0.25	173	0.10

O projeto foi realizado considerando uma frequência de operação $f = 3GHz$, com corrente e tensão no transistor respectivamente $V_{CE} = 2V$ e $I_C = 5mA$. Dessa forma, por meio da figura 3 obtém-se os parâmetros teóricos de operação.

Para o projeto desse amplificador, foi utilizado o Matlab, obtendo-se os parâmetros S do transistor interpolado na frequência de operação, o resultado é mostrado abaixo na figura 4.

Figura 4 – Parâmetros S do componente.



O primeiro passo, ao se iniciar o projeto, é inserir o tipo de substrato que se deseja utilizar. Optou-se pela escolha do Duroid, com $\epsilon_r = 1.9$. Escolhido o substrato, substitui-se os dados no código de modo a determinar projeto das redes de casamento de entrada e saída, calcular as dimensões em milímetros na frequência central de operação, bem como determinar a simulação dos parâmetros S do transistor em faixa de frequências que inclui a frequência de operação;

Obtido os parâmetros S, efetua-se o teste de estabilidade, que consiste na determinação da condição auxiliar, isto é o delta, bem como a condição de Roullet, o K. Verificando-se seus valores são menor do que 1 e maior do que um respectivamente.

As equações para estabilidade incondicional são explicitadas abaixo na equação 1 Considerando-se a condição auxiliar $\Delta = |S_{(11)}S_{(22)} - S_{(12)}S_{(21)}|$:

$$K = \frac{1 - |S_{(11)}|^2 - |S_{(22)}|^2 + |\Delta|^2}{2|S_{(12)}||S_{(21)}|} \quad (1)$$

De acordo com o código, os valores obtidos na faixa de operação especificadas pela tabela 1 para a condição K-Del Roullet é $K = 1.556273$, enquanto a condição auxiliar $|\Delta| = 0.069154$ concluindo-se que o transistor é incondicionalmente estável na frequência de operação.

Uma vez que as condições são explicitadas, é possível plotar o desenhos dos círculos de estabilidade do transistor e as impedâncias ótimas qualquer que seja as condições de estabilidade, respectivamente na figura 6 e figura 7.

Figura 5 – Carta de Smith.

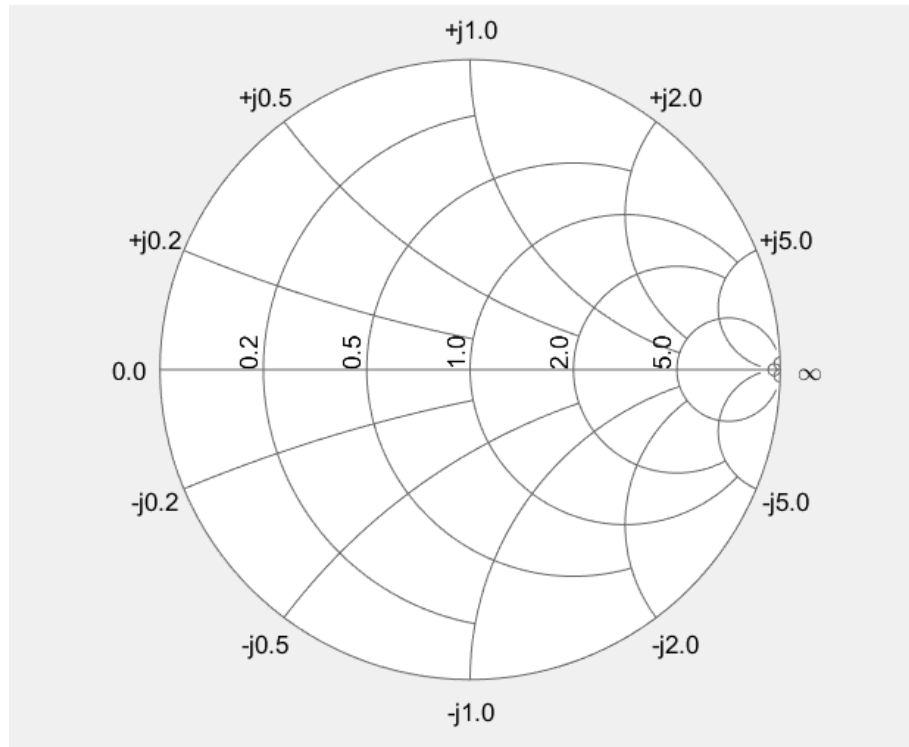


Figura 6 – Desenhos dos círculos de estabilidade do transistor.

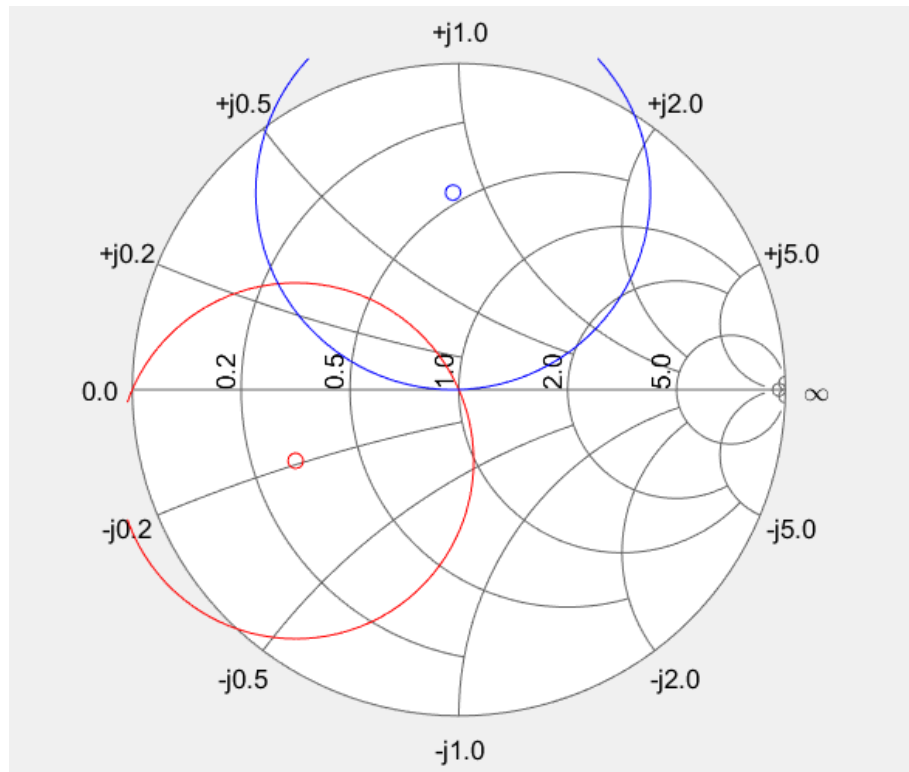
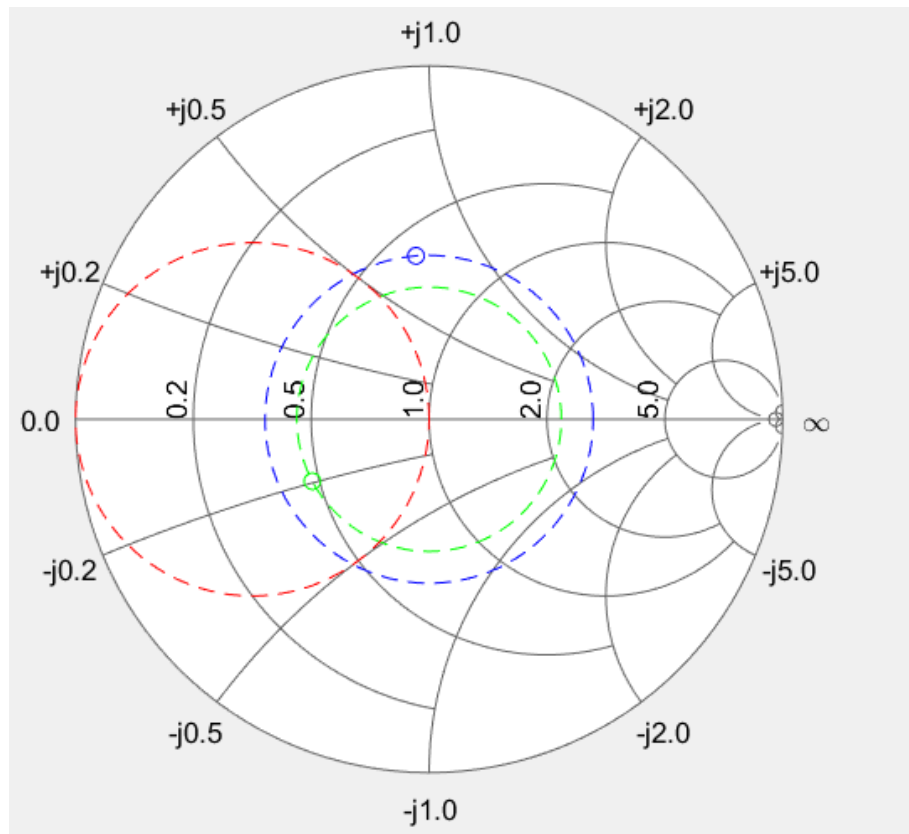
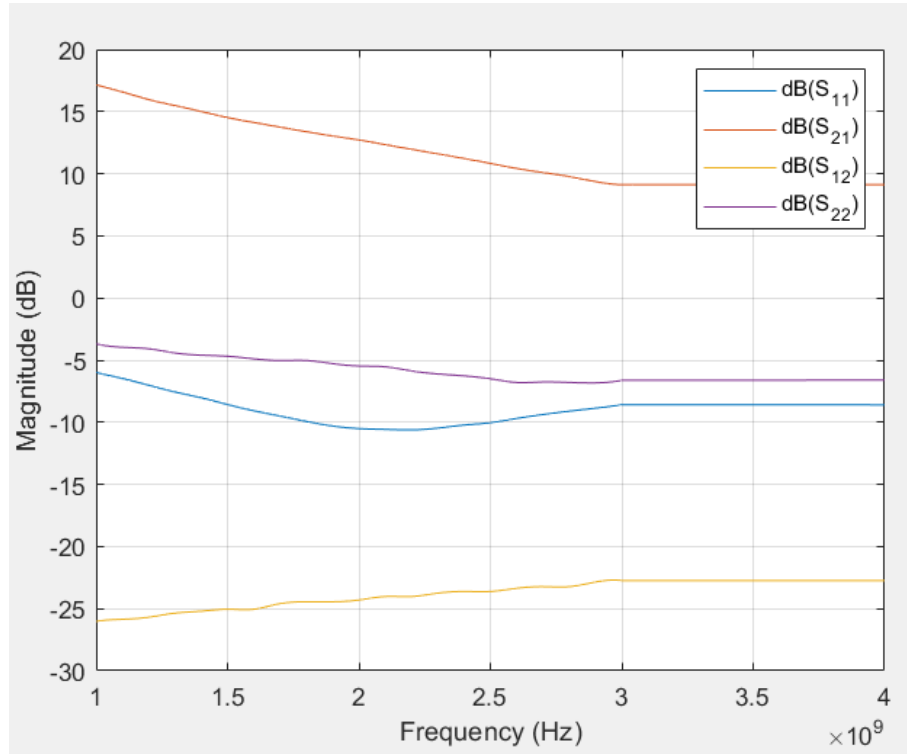


Figura 7 – Determinação das impedâncias ótimas.



Para o Projeto das redes de casamento de entrada e saída, apresenta-se as dimensões em milímetros na frequência central de operação, obtidas por meio do código computacional: $W_{in} = 1.681124mm$, $W_{out} = 1.683816mm$, $\epsilon_{eff} = 1.712831$. Considerando-se o comprimento da linha de transmissão obteve-se os comprimentos elétricos $Lin_{stube} = 0.075131mm$, $Lin_{line} = 0.096220mm$, $L_{out_{stube}} = 0.072697mm$, $L_{out_{line}} = 0.064474mm$. Além disso, a partir da simulação dos parâmetros S do transistor em faixa de frequências que inclui a frequência de operação, obteve-se a figura abaixo 8 Finalmente, obteve-se o ganho

Figura 8 – Simulação dos parâmetros S do transistor



associada a rede casa com microfitas, lembrando-se do ganho máximo explicitado pela figura 4, o ganho máximo teórico obtido é de 11.537570 dB: $G_s = 1.423948$, $G_0 = 8.173881$ e $G_l = 1.224150$

4.1 Função do Matlab

```

close all;
%% 1. Escolhas do transistor e substrato; apresenta o das especifica
%%Especifica es do projeto
Fop = 3e9;
Z0 = 50;
Zs = 50;
Zl = 50;

%%Condi es de opera o (da escolha do NEC do transistor)
V = 2;%V
A = 5;%mA
R0 = 50;%Omhs
frange = 1e9:5E4:4E9; % or frange = linspace(1,3E9,10000);

%%Escolha do transistor
%Montagem do nome do arquivo.
path = 'S-parameter\BJT\Spara\';
filename = 'NE696M01v1_p1-';
filename2 = '3_2_5'; % Significado: at 3.0 GHz, 2 Volts, 5 miliamperes
ext = '.s2p';
fullfilename = [path filename filename2 ext];

noise = 4;
transistor = read(rfckt.amplifier('IntpType', 'Spline', 'NoiseData', noise),
analyze(transistor, frange);

freqs = transistor.AnalyzedResult.Freq;
t_s = transistor.AnalyzedResult.S_Parameters;
t_s_obj = sparameters(t_s, freqs);

index = find(frange==Fop); %Define o

t_s_op = t_s(:, :, index); %Par metro S na faixa de 2.45GHz
figure;
rfplot(t_s_obj);
%Renomeando as vari veis para nomes mais simples:

```

```

S = t_s_op;
S11 = S(1,1);
S12 = S(1,2);
S21 = S(2,1);
S22 = S(2,2);

```

```

%%Escolha do substrato

```

```

epsilon = 1.96;
%epsilon = 4.4;
hs = [0.256 0.508 0.625 0.762 1.026 1.270 2.54];
h = hs(2); %em mm (milímetros)
h = h/1000; %em metros (metros)

```

```

%% 2. Determina o das condições de estabilidade;

```

```

%Teste de Estabilidade: Condição K-Del Roullet

```

```

[k,b1,b2,delta] = stabilityk(S);
%k = (1 - abs(S11)^2 - abs(S22)^2 + del^2)/(2*abs(S12*S21));
fprintf('K = %f, |delta| = %f\n',k, abs(delta));
if( k>1 && abs(delta)<1)
fprintf('Teste K-Del: Incondicionalmente Estável\n');
end

```

```

%% 3. Desenhos dos círculos de estabilidade do transistor qualquer que

```

```

centrei = conj(S11 - delta*conj(S22))/(abs(S11)^2 - abs(delta)^2);
radiusi = abs(S12*S21/(abs(S11)^2 - abs(delta)^2));
centreo = conj(S22 - delta*conj(S11))/(abs(S22)^2 - abs(delta)^2);
radiuso = abs(S12*S21/(abs(S22)^2 - abs(delta)^2));
figure;smithchart; hold on;
smithchart_drawcircle(centrei, radiusi, 'r',false);
smithchart_drawcircle(centreo, radiuso, 'r',false);
%Aqui tem um problema, quando incondicionalmente estável o
%círculo de estabilidade está fora da carta e não é desenhado :(
%Encontrem outro jeito de plotar.

```

```

%% 4. Determina o das impedâncias características, gammaS e gammaL. Apresenta

```

```

g_S = gammams(t_s_op);
g_L = gammaml(t_s_op);

```

```
%OR Orfanidis function: [g_S,g_L] = smatch(S);
```

```
g_in = gammain(t_s_op,Z0,Zl);
g_out = gammaout(t_s_op,Z0,Zs);
%Obtenção das impedâncias
Z_in = gamma2z(g_in,Zs);
Z_out = gamma2z(g_out,Zl);
Z_s = gamma2z(g_S,Zs);
Z_l = gamma2z(g_L,Zl);
```

```
figure; smithchart; hold on;
smithchart_drawcomplex(g_S, 'r', true);
smithchart_drawcomplex(g_L, 'b', true);
```

```
%Exemplo de plot – suponha gamma_in*
figure; smithchart; hold on;
%Lugar geométrico
smithchart_drawcircle(0,abs(conj(g_in)), '--g', false);
smithchart_drawcircle(0,abs(conj(g_out)), '--b', false);
smithchart_drawcircle(-0.5,0.5,'--r', false);
%Plot do Nmero complexo
smithchart_drawcenter(conj(g_in), 'g');
smithchart_drawcenter(conj(g_out), 'b');
```

%% 5. Projeto das redes de casamento de entrada e saída. Apresentar as

%Utilizando as funções do Orfanidis

% – mstripr igual mstrips (microstrip synthesis) with refinement

% – mstripa a microstrip analysis

% – stub1_v2 versão modificada de stub1 que calcula os comprimentos de

% uma linha de transmissão casada

```
%Cálculo do w/h e W;
```

```
[wh_in,N] = mstripr(epsilon,Zs,0.005);
wh_in = mstrips(epsilon,Zs);
w_in = wh_in*h;
[wh_out,N] = mstripr(epsilon,Zl,0.005);
wh_in = mstrips(epsilon,Zl);
```



```

w_out = wh_out*h;
[eff,Z] = mstripa(epsilon,wh_in);
fprintf('Win: %f mm, Wout: %f mm, Eff %f\n',w_in*1000,w_out*1000,eff);

%Calculo dos comprimentos l;
c = 299792458;
B = (2*pi*Fop)*sqrt(eff)/c;
%%Or
lambda_m = c/(Fop*sqrt(eff)); %Lambda na microfita;
beta = 2*pi/lambda_m; %Constante de fase
%Comprimento el trico teta beta* comprimento f sico;
%teta = beta*l, portanto: l= teta/beta;

%Obten o dos comprimentos el tricos.
n = 0; %para estender as linhas com comprimentos multiplos de lambda (se
dlin = stub1_v2(g_S,'po');
%Soluto 1;
din1 = dlin(1,1);
lin1 = dlin(1,2);
%Soluto 2;
din2 = dlin(2,1);
lin2 = dlin(2,2);

win = w_in;
win_stub = win;
lin = (lin1*pi/180)/beta + n*lambda_m/beta;
lin_stub = (din1*pi/180)/beta + n*lambda_m/beta;

dlout = stub1_v2(g_L,'po');
%Soluto 1;
dout1 = dlout(1,1);
lout1 = dlout(1,2);
%Soluto 2;
dout2 = dlout(2,1);
lout2 = dlout(2,2);

wout = w_out;

```

```

wout_stub = wout;
lout = (lout1*pi/180)/beta + n*lambda_m/beta;
lout_stub = (dout1*pi/180)/beta + n*lambda_m/beta;
fprintf('Lin_stub: %f mm, Lin_line: %f mm\nLout_stub: %f mm, Lout_line: %f mm\n',
lin_stub, lin_line, lout_stub, lout_line);

%% 6. Apresentar a simulacao dos parametros S do transistor em faixa de frequencia
% 6.1 – Configurar a cascata {InputMatching + Amplifier + %OutputMatching}
%Input Matching Network
ms_line_in = rfckt.microstrip('Width', win, 'LineLength', lin, 'EpsilonR', e);
ms_stub_in = rfckt.microstrip('Width', win_stub, 'LineLength', lin_stub, 'EpsilonR', e);
input_matching = rfckt.cascade('Ckts', {ms_stub_in, ms_line_in}); %Verificar a cascata
analyze(input_matching, frange);
SIN = input_matching.AnalyzedResult.S_Parameters(:, :, index);
g_Sin = gammams(SIN);
%Output Matching Network
ms_line_out = rfckt.microstrip('Width', wout, 'LineLength', lout, 'EpsilonR', e);
ms_stub_out = rfckt.microstrip('Width', wout_stub, 'LineLength', lout_stub, 'EpsilonR', e);
output_matching = rfckt.cascade('Ckts', {ms_line_out, ms_stub_out}); %Verificar a cascata
analyze(output_matching, frange);
SOUT = output_matching.AnalyzedResult.S_Parameters(:, :, index);
g_Sout = gammams(SOUT);
%Maximum Gain Amplifier
maxgain_amp = rfckt.cascade('Ckts', {input_matching, transistor, output_matching});
analyze(maxgain_amp, frange);
maxgainamp_sobj = sparameters(maxgain_amp.AnalyzedResult.S_Parameters, maxgain_amp);
SAMP = maxgain_amp.AnalyzedResult.S_Parameters(:, :, index);

% 6.2 – Calcular potencias
%Maneira 1;
Gmax = (abs(S21)/abs(S12))*(k-sqrt(k^2-1));
Gmax_dB = 10*log10(Gmax);
fprintf('Ganho maximo teorico %f dB\n', Gmax_dB);
%Maneira 2:
Gs = (1-abs(g_S)^2)/(abs(1-g_S*conj(g_S))^2);
Gl = (1-abs(g_L)^2)/(abs(1-S22*g_L)^2);
G0 = abs(S21)^2;
Gmax2_dB = 10*log10(Gs*G0*Gl);

```

```

fprintf('Gs=%fx Gs=%f dB\n',Gs,10*log10(Gs));
fprintf('G0=%fx G0=%f dB\n',G0,10*log10(G0));
fprintf('G1=%fx G1=%f dB\n',G1,10*log10(G1));
fprintf('Ganho m ximo te rico com rede de casamento %f dB\n',Gmax2_dB);
% Gr ficos de S21 e S11 (rede casada com microfita)
figure; rfplot(maxgainamp_spobj);
%figure; hold on; rfplot(maxgainamp_spobj,2,1);rfplot(maxgainamp_spobj,1,
%Fa a o c lculo do ganho obtido pela rede casada com microfita

```

5 Conclusão

Por meio deste projeto foi possível abordar conceitos importantes na implementação prática do amplificador em microfitas, desde da escolha do transistor e substrato, calculo teórico por meio de equações explicitadas em sala de cada trecho, a visualização das condições de estabilidade pela carte de smith até a utilização de ferramentas computacionais para determinação dos parâmetros pedido. Observado pelo âmbito de um tratado um projeto físico implementável efetivamente no mundo corporativista contemporâneo.

Referências Bibliográficas

- [1] Material auxiliar disciplina EESC SEL USP - SEL-369, 2019.
- [2] POZAR, M. DAVID. Microwave Engineering. 3^a Edição.
- [3] Datasheet NE696 Disponível em: <<https://datasheet.octopart.com/NE696M01-T1-NEC-datasheet-94429.pdf>>. Acesso em: 8 de junho. de 2019