

**INSTITUTO
FEDERAL**
Santa Catarina

Câmpus
São José

Trabalho 3

Projetos de Filtros usando o método das janelas

Curso: Engenharia de Telecomunicações
Disciplina: PSD29007 - Processamento de Sinais Digitais
Professor: Elen Macedo Lobato

Alunos

Filipi Virgilio
João Pedro Menegali Salvan Bitencourt
Yago Castro Rosa

20 de novembro de 2023

Sumário

Introdução	2
Questão 1	2
Questão 2	5
Questão 4	9

Introdução

Neste documento, serão mostrados alguns projetos de filtros utilizando o método das janelas.

Para tal, foi utilizada a linguagem MATLAB para a demonstração das respostas em frequência e ao impulso, dado os parâmetros desejados.

Na questão final, foram criados três filtros passa-faixa para separar as componentes de frequência 770 Hz, 852 Hz e 941 Hz de um sinal composto de três componentes senoidais, nas frequências 770 Hz, 852 Hz e 941 Hz, com $\Omega_s = 8$ kHz. Para fins de comparação, foi feita a realização de todas as janelas.

Questão 1

Projete um filtro passa-faixa usando a janela de Hamming, a janela de Hanning e janela de Blackman que satisfaça a especificação a seguir.

- $M = 10, 100$ e 1000
- $\Omega_{c1} = 10$ rad/s
- $\Omega_{c2} = 35$ rad/s
- $\Omega_s = 100$ rad/s

Utilizando a linguagem MATLAB, foi criado o código abaixo, que permite visualizar a resposta em frequência do filtro passa-faixa com as especificações dadas acima:

```
1  clc; close all; clear all;
2
3  M = [10 100 1000];
4  Omega_c1 = 10;
5  Omega_c2 = 35;
6  Omega_s = 100;
7
8  wc1 = Omega_c1*2*pi/Omega_s;
9  wc2 = Omega_c2*2*pi/Omega_s;
10
11 for i=1:length(M)
12     M_atual = M(i);
13
14     n = 1:M_atual/2;
15     h0 = 1 - (wc2 - wc1)/pi;
16
17     % Resposta ao impulso do filtro passa-faixa
18     resposta_impulso = (sin(wc2.*n) - sin(wc1.*n))./(pi.*n);
19
20     h_ideal = [fliplr(resposta_impulso) h0 resposta_impulso];
21
22     % Janela da hamming
23     janela_hamming = hamming(M_atual+1);
24     h_ham = h_ideal .* janela_hamming';
25     [H_ham,w] = freqz(h_ham,1,2048,Omega_s);
26
27     figure(i);
28     subplot(3,1,1);
29     plot(w,20*log10(abs(H_ham)));
30     axis([0 Omega_s/2 -90 10]);
31     ylabel('Resposta de Módulo (dB)');
32     xlabel('Frequência (rad/s)');
33     title(['Resposta em Frequência - Janela de Hamming (M = ', ...
34           num2str(M_atual), ')']);
35
36     % Janela de hanning
37     janela_hanning=hanning(M_atual+1);
38     h_han = h_ideal.*janela_hanning';
```

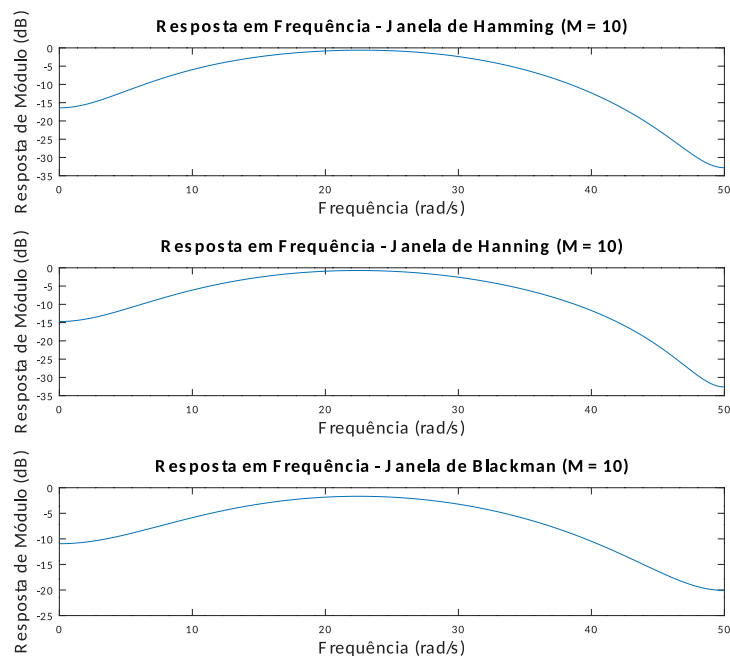
```

39 [H_han,w] = freqz(h_han,1,2048,Omega_s);
40
41 % figure(i+3);
42 subplot(3,1,2);
43 plot(w,20*log10(abs(H_han)));
44 axis([0 Omega_s/2 -150 10]);
45 ylabel('Resposta de Módulo (dB)');
46 xlabel('Frequência (rad/s)');
47 title(['Resposta em Frequência - Janela de Hanning (M = ', ...
48         num2str(M_atual), ')']);
49
50 % Janela de Blackman
51 janela_blackman = blackman(M_atual+1);
52 h_black = h_ideal.*janela_blackman';
53 [H_black,w] = freqz(h_black,1,2048,Omega_s);
54
55 % figure(i+6);
56 subplot(3,1,3);
57 plot(w,20*log10(abs(H_black)));
58 axis([0 Omega_s/2 -150 10]);
59 ylabel('Resposta de Módulo (dB)');
60 xlabel('Frequência (rad/s)');
61 title(['Resposta em Frequência - Janela de Blackman (M = ', ...
62         num2str(M_atual), ')']);
63 end

```

No código apresentado acima, é possível visualizar que foi utilizado um laço `for` para gerar os filtro com diferentes ordens. Começando pela ordem 10, a resposta em frequência para os filtros com janela de Hamming, Hanning e Blackman são mostrados abaixo respectivamente:

Figura 1: Resposta em frequência dos filtros passa-faixa realizados utilizando as janelas de Hamming, Hanning e Blackman, com ordem 10.

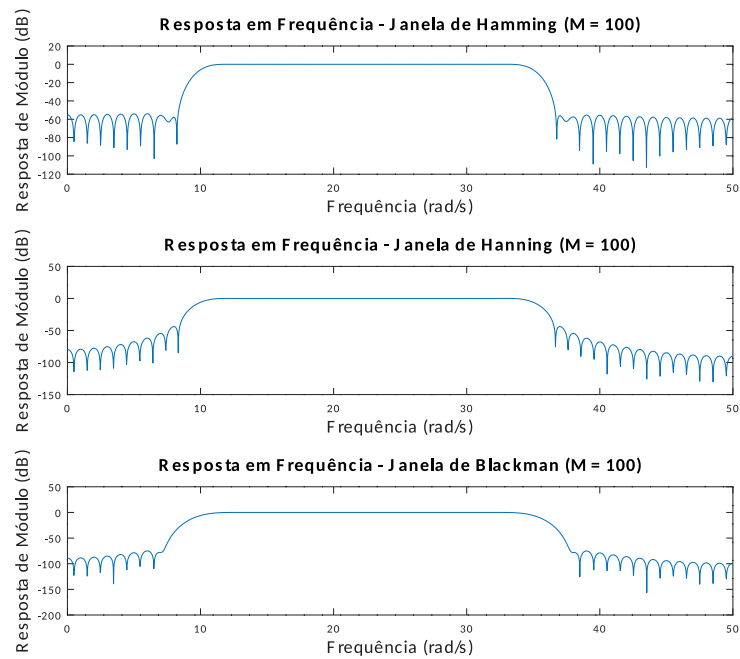


Fonte: Próprio autor.

Na Fig. 1, é possível verificar que a janela de Blackman foi a que possuiu a menor atenuação na banda de rejeição, com 20 dB de atenuação. Para as janelas de Hannig e Hamming, a atenuação foi parecida, ficando em torno de 33 dB.

Para a ordem 100, as respostas em frequência são mostradas abaixo:

Figura 2: Resposta em frequência dos filtros passa-faixa realizados utilizando as janelas de Hamming, Hanning e Blackman, com ordem 100.

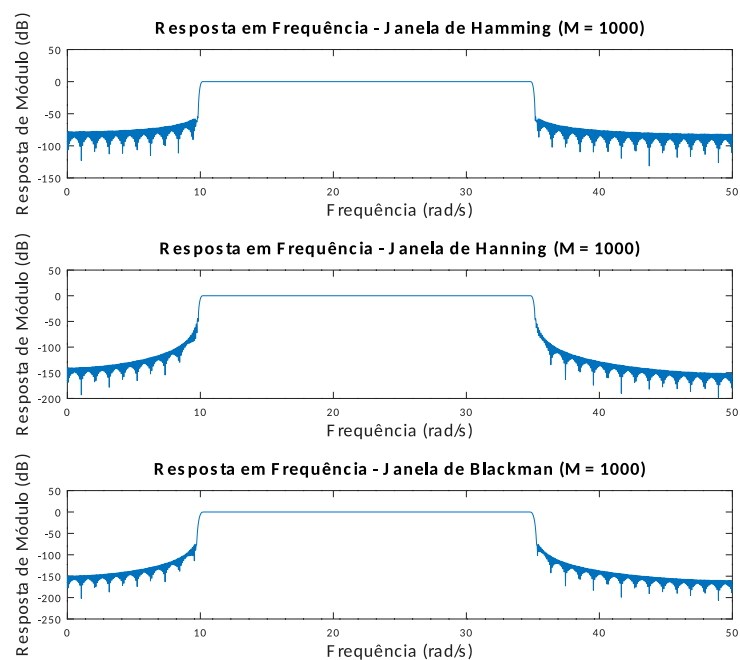


Fonte: Próprio autor.

Na Fig. 2, nota-se que a janela de Hamming possui a menor atenuação na banda de rejeição, com cerca de 60 dB de atenuação. Já a janela de Blackman foi a que teve a maior atenuação na banda de rejeição, com cerca de 100 dB de atenuação. Entretanto, a mesma é a que possui a maior banda de transição.

Por fim, para a ordem 1000, as respostas em frequência são mostradas abaixo:

Figura 3: Resposta em frequência dos filtros passa-faixa realizados utilizando as janelas de Hamming, Hanning e Blackman, com ordem 1000.



Fonte: Próprio autor.

Na Fig. 3, é possível verificar que a janela de Hamming possui a menor atenuação na banda de rejeição, em torno de 80 dB. Já as janelas de Hanning e Blackman atenuam em torno de 150 dB na banda de rejeição. Estas últimas também possuem a banda de transição maior se comparado com a janela de Hamming.

Como “n” é diferente de zero, foi utilizada a seguinte relação para o cálculo da resposta ao impulso:

$$h(n) = \frac{\text{sen}(\omega_{c_2} n) - \text{sen}(\omega_{c_1} n)}{\pi n}$$

Questão 2

Projete um filtro que satisfaça as especificações a seguir, usando a janela de Kaiser:

Para este experimento, foi utilizada a seguinte equação para o cálculo do delta de passagem:

$$\delta_p = \frac{10^{0,05A_p} - 1}{10^{0,05A_p} + 1}$$

Já para o delta de rejeição, foi utilizada a seguinte equação:

$$\delta_r = 10^{-0,05A_r}$$

- Passa-baixa
 - $A_p = 1,0$ dB
 - $A_r = 40$ dB
 - $\Omega_p = 1000$ rad/s
 - $\Omega_r = 1200$ rad/s
 - $\Omega_s = 5000$ rad/s

Abaixo, está o código na linguagem MATLAB criado para visualizar as respostas em frequência e ao impulso do filtro criado utilizando a janela de Kaiser:

```

1  clc; close all; clear all;
2
3  Ap = 1;
4  Ar = 40;
5  Omega_p = 1000;
6  Omega_r = 1200;
7  Omega_s = 5000;
8
9  % Calculando o delta (eq. 5.69)
10 delta_passagem = (10^(0.05*Ap) - 1)/(10^(0.05*Ap) + 1);
11 delta_rejeicao = 10^(-0.05*Ar);
12
13 % Montagem do filtro
14 F = [Omega_p Omega_r];
15 A = [1 0];
16
17 ripples = [delta_passagem delta_rejeicao];
18 [M,Wn,beta,FILTYPE] = kaiserord(F, A, ripples, Omega_s);
19
20 janela_kaiser = kaiser(M+1, beta);
21 h = fir1(M, Wn, FILTYPE, janela_kaiser, 'noscale');
22
23 [H,w]=freqz(h,1,2048,Omega_s);
24
25 % Plotando o filtro
26 figure(1);

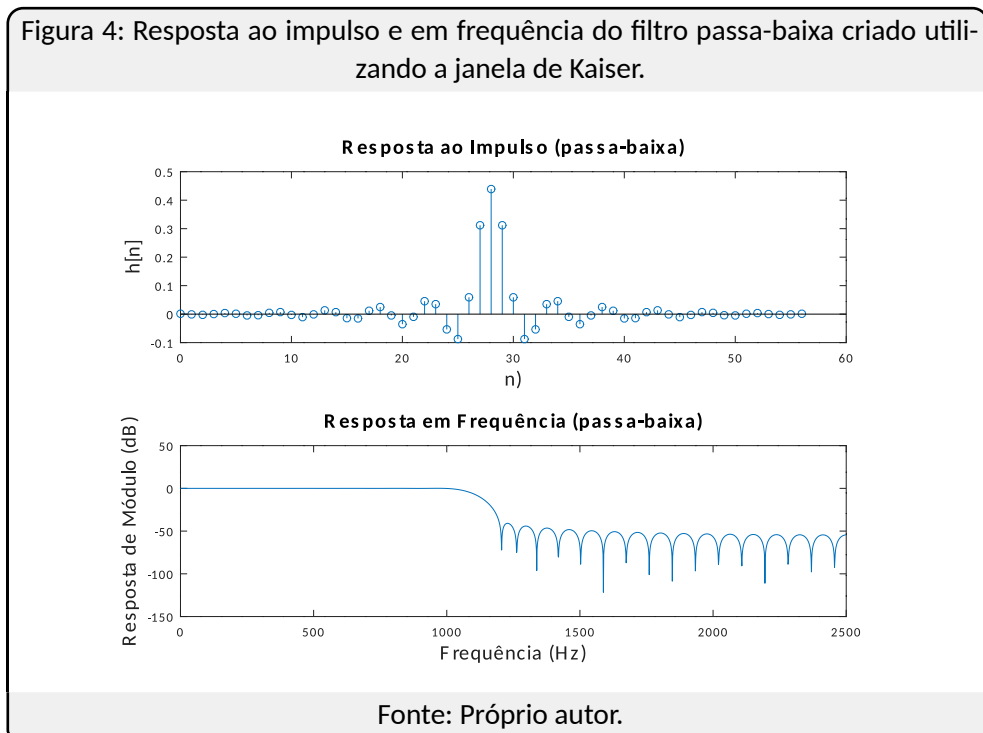
```

```

27 subplot(2,1,1);
28 stem(0:M,h);
29 ylabel('h[n]');
30 xlabel('n');
31 title('Resposta ao Impulso (passa-baixa)');
32
33 subplot(2,1,2);
34 plot(w,20*log10(abs(H)))
35 axis([0 Omega_s/2 -90 10])
36 ylabel('Resposta de Módulo (dB)');
37 xlabel('Frequência (Hz)');
38 title('Resposta em Frequência (passa-baixa)');

```

Na figura abaixo são mostradas as respostas ao impulso e frequência do filtro passa-baixa criado:



Conforme demonstrado na figura acima, a banda de passagem se manteve até a frequência de 1 kHz, sendo substituída pela banda da rejeição que esteve presente a partir de 1,2 kHz. A atenuação sofrida pelo sinal na banda de rejeição foi de, aproximadamente, 100 dB.

- Passa-alta
 - $A_p = 1,0$ dB
 - $A_r = 40$ dB
 - $\Omega_r = 1000$ rad/s
 - $\Omega_p = 1200$ rad/s
 - $\Omega_s = 5000$ rad/s

Segue, abaixo, o código na linguagem MATLAB criado:

```

1 clc; close all; clear all;
2
3 Ap = 1;
4 Ar = 40;
5 Omega_p = 1200;
6 Omega_r = 1000;
7 Omega_s = 5000;
8

```

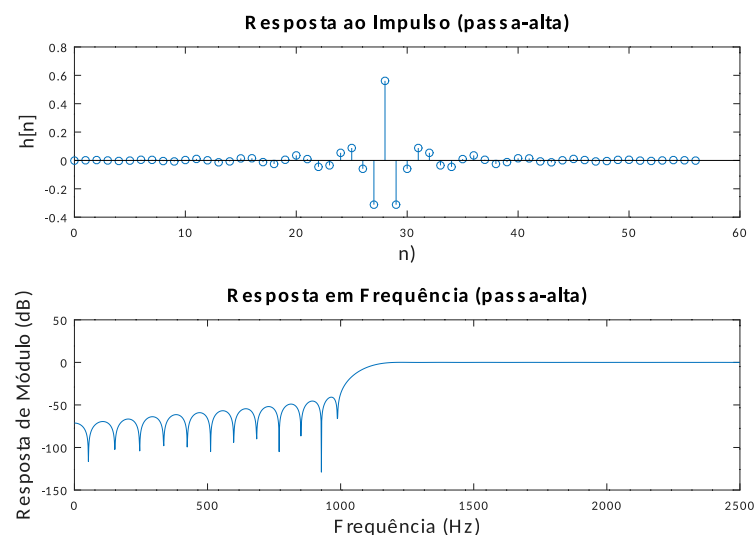
```

9 % Calculando o delta
10 delta_passagem = (10^(0.05*Ap) - 1)/(10^(0.05*Ap) + 1); % (eq. 5.69)
11 delta_rejeicao = 10^(-0.05*Ar); % (eq. 5.70)
12
13 % Montagem do filtro
14 F = [Omega_r Omega_p];
15 A = [0 1];
16
17 ripples = [delta_rejeicao delta_passagem];
18 [M,Wn,beta,FILTYPE] = kaiserord(F, A, ripples, Omega_s);
19
20 janela_kaiser = kaiser(M+1, beta);
21 h = fir1(M, Wn, FILTYPE, janela_kaiser, 'noscale');
22
23 [H,w]=freqz(h,1,2048,Omega_s);
24
25 % Plotando o filtro
26 figure(2);
27 subplot(2,1,1);
28 stem(0:M,h);
29 ylabel('h[n]');
30 xlabel('n');
31 title('Resposta ao Impulso (passa-alta)');
32
33 subplot(2,1,2);
34 plot(w,20*log10(abs(H)));
35 axis([0 Omega_s/2 -90 10]);
36 ylabel('Resposta de Módulo (dB)');
37 xlabel('Frequência (Hz)');
38 title('Resposta em Frequência (passa-alta)');

```

Na figura abaixo são mostradas as respostas ao impulso e frequência do filtro passa-alta criado:

Figura 5: Resposta ao impulso e em frequência do filtro passa-alta criado utilizando a janela de Kaiser.



Fonte: Próprio autor.

Análogo à figura anterior, a banda de rejeição se estendeu até 1 kHz, diminuindo sua atenuação até que alcançasse a frequência da banda de passagem de 1,2 kHz. Sua atenuação média foi de 100 dB.

- Passa-faixa
- $A_p = 1,0$ dB

- $A_r = 80$ dB
- $\Omega_{r1} = 800$ rad/s
- $\Omega_{p1} = 1000$ rad/s
- $\Omega_{p2} = 1400$ rad/s
- $\Omega_{r2} = 1600$ rad/s
- $\Omega_s = 10000$ rad/s

Segue, abaixo, o código na linguagem MATLAB criado:

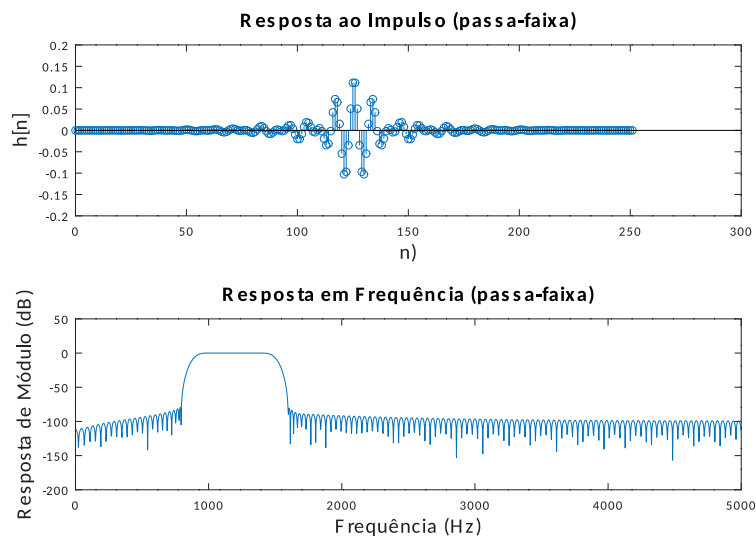
```

1  clc; close all; clear all;
2
3  Ap = 1;
4  Ar = 80;
5  Omega_p1 = 1000;
6  Omega_r1 = 800;
7  Omega_p2 = 1400;
8  Omega_r2 = 1600;
9  Omega_s = 10000;
10
11 % Calculando o delta
12 delta_passagem = (10^(0.05*Ap) - 1)/(10^(0.05*Ap) + 1); % (eq. 5.69)
13 delta_rejeicao = 10^(-0.05*Ar); % (eq. 5.70)
14
15 % Montagem do filtro
16 F = [Omega_r1 Omega_p1 Omega_p2 Omega_r2];
17 A = [0 1 0];
18
19 ripples = [delta_rejeicao delta_passagem delta_rejeicao];
20 [M,Wn,beta,FILTYPE] = kaiserord(F, A, ripples, Omega_s);
21
22 janela_kaiser = kaiser(M+1, beta);
23 h = fir1(M, Wn, FILTYPE, janela_kaiser, 'noscale');
24
25 [H,w]=freqz(h,1,2048,Omega_s);
26
27 % Plotando o filtro
28 figure(3);
29 subplot(2,1,1);
30 stem(0:M,h);
31 ylabel('h[n]');
32 xlabel('n');
33 title('Resposta ao Impulso (passa-faixa)');
34
35 subplot(2,1,2);
36 plot(w,20*log10(abs(H)));
37 axis([0 Omega_s/2 -90 10]);
38 ylabel('Resposta de Módulo (dB)');
39 xlabel('Frequência (Hz)');
40 title('Resposta em Frequência (passa-faixa)');

```

Na figura abaixo são mostradas as respostas ao impulso e frequência do filtro passa-faixa criado:

Figura 6: Resposta ao impulso e em frequência do filtro passa-faixa criado utilizando a janela de Kaiser.



Fonte: Próprio autor.

Nota-se que há a passagem do sinal apenas na faixa de 1 kHz a 1,4 kHz, ocorrendo atenuação antes e a após a frequência de rejeição. Sua atenuação média foi em torno de 125 dB.

Questão 4

Crie um sinal de entrada composto de três componentes senoidais, nas frequências 770 Hz, 852 Hz e 941 Hz, com $\Omega_s = 8$ kHz. Projete três filtros passa-faixa digitais para separar as componentes de frequência 770 Hz, 852 Hz e 941 Hz.

Nessa atividade, como forma de comparação entre os diferentes tipos de filtros de janelamento, cada filtro passa-faixa teve quatro versões: uma com janela retangular, uma com janela de Hamming, uma com janela de Hanning e uma com janela de Blackman.

Para os parâmetros do filtro, foram adotadas as seguintes especificações:

- Ordem do filtro: 300
- Filtro passa-faixa para a frequência 770 Hz
 - $\Omega_{c1} = 740$ rad/s
 - $\Omega_{c2} = 800$ rad/s
 - $\Omega_s = 8000$ rad/s
- Filtro passa-faixa para a frequência 852 Hz
 - $\Omega_{c1} = 822$ rad/s
 - $\Omega_{c2} = 882$ rad/s
 - $\Omega_s = 8000$ rad/s
- Filtro passa-faixa para a frequência 941 Hz
 - $\Omega_{c1} = 911$ rad/s
 - $\Omega_{c2} = 971$ rad/s
 - $\Omega_s = 8000$ rad/s

Dadas as informações consideradas, foi criado o código na linguagem MATLAB que faz todas as realizações.

```

1  clc; close all; clear all;
2
3  M = 301;
4  Omega_r1_770 = 740;
5  Omega_r2_770 = 800;;
6
7  Omega_r1_852 = 822;
8  Omega_r2_852 = 882;
9
10 Omega_r1_941 = 911;
11 Omega_r2_941 = 971;
12
13 Omega_s = 8000;
14
15 wr1_770 = Omega_r1_770 * 2 * pi/Omega_s;
16 wr2_770 = Omega_r2_770 * 2 * pi/Omega_s;
17
18 wr1_852 = Omega_r1_852* 2 * pi/Omega_s;
19 wr2_852 = Omega_r2_852* 2 * pi/Omega_s;
20
21 wr1_941 = Omega_r1_941 * 2 * pi/Omega_s;
22 wr2_941 = Omega_r2_941 * 2 * pi/Omega_s;
23
24 % Resposta ao impulso do filtro ideal h[n]
25 n = [-1*((M-1)/2):(M-1)/2];
26
27 %% Respostas ao impulso dos filtros %%
28 % Filtro para o sinal de 770 Hz
29 % resposta ao impulso para ≠0
30 h_n_770 = ((sin(wr2_770.*n) - sin(wr1_770.*n))./(pi.*n));
31
32 % resposta ao impulso para n=0
33 h_n_770(((M-1)/2)+1) = (wr2_770 - wr1_770)/pi;
34
35 % Filtro para o sinal de 852 Hz
36 % resposta ao impulso para ≠0
37 h_n_852 = ((sin(wr2_852.*n) - sin(wr1_852.*n))./(pi.*n));
38 % resposta ao impulso para n=0
39 h_n_852(((M-1)/2)+1) = (wr2_852 - wr1_852)/pi;
40
41 % Filtro para o sinal de 941 Hz
42 % resposta ao impulso para ≠0
43 h_n_941 = ((sin(wr2_941.*n) - sin(wr1_941.*n))./(pi.*n));
44
45 % resposta ao impulso para n=0
46 h_n_941(((M-1)/2)+1) = (wr2_941 - wr1_941)/pi;
47
48 %% Filtros %%
49 % Janela retangular %
50 h_ret_770 = h_n_770;
51 h_ret_852 = h_n_852;
52 h_ret_941 = h_n_941;
53
54 % Janela de Hamming %
55 % Sendo w_H_n = alfa + (1-alfa)cos(2*pi*n/M) %
56 alfa = 0.54;
57 w_hamming = alfa + (1-alfa)*cos(2*pi*n/M);
58
59 h_hamming_770 = h_n_770.*w_hamming; % Sinal de 770 Hz
60 h_hamming_852 = h_n_852.*w_hamming; % Sinal de 852 Hz
61 h_hamming_941 = h_n_941.*w_hamming; % Sinal de 941 Hz
62
63

```

```

64 % Janela de Hanning %
65 % Sendo  $w_{H_n} = 0.5 + 0.5\cos(2\pi n/M)$  %
66  $\alpha = 0.5$ ;
67  $w_{hanning} = \alpha + (1-\alpha)\cos(2\pi n/M)$ ;
68
69  $h_{hanning\_770} = h_{n\_770} \cdot w_{hanning}$ ; % Sinal de 770 Hz
70  $h_{hanning\_852} = h_{n\_852} \cdot w_{hanning}$ ; % Sinal de 852 Hz
71  $h_{hanning\_941} = h_{n\_941} \cdot w_{hanning}$ ; % Sinal de 941 Hz
72
73 % Janela de Blackman %
74 % Sendo  $w_{B_n} = 0.42 + 0.5\cos(2\pi n/M) + 0.08\cos(4\pi n/M)$  %
75  $w_{black} = 0.42 + 0.5\cos(2\pi n/M) + 0.08\cos(4\pi n/M)$ ;
76
77  $h_{black\_770} = h_{n\_770} \cdot w_{black}$ ; % Sinal de 770 Hz
78  $h_{black\_852} = h_{n\_852} \cdot w_{black}$ ; % Sinal de 852 Hz
79  $h_{black\_941} = h_{n\_941} \cdot w_{black}$ ; % Sinal de 941 Hz
80
81 %% Plot Filtros %%
82 % Filtro de janela retangular %
83  $[h_{fil\_ret\_770}, w_{fil\_ret\_770}] = \text{freqz}(h_{ret\_770}, 1)$ ;
84  $[h_{fil\_ret\_852}, w_{fil\_ret\_852}] = \text{freqz}(h_{ret\_852}, 1)$ ;
85  $[h_{fil\_ret\_941}, w_{fil\_ret\_941}] = \text{freqz}(h_{ret\_941}, 1)$ ;
86
87  $\text{figure}(1)$ ;
88  $\text{subplot}(3, 1, 1)$ ;
89  $\text{plot}(w_{fil\_ret\_770}/\pi, 20 \cdot \log_{10}(\text{abs}(h_{fil\_ret\_770})))$ ;
90  $\text{title}('Filtro FIR passa-faixa - Janela Retangular - 770 Hz')$ ;
91  $\text{xlabel}('Frequ\^encia (Hz)')$ ;
92  $\text{ylabel}('Magnitude (dB)')$ ;
93  $\text{ylim}([-200 \ 10])$ ;
94
95  $\text{subplot}(3, 1, 2)$ ;
96  $\text{plot}(w_{fil\_ret\_852}/\pi, 20 \cdot \log_{10}(\text{abs}(h_{fil\_ret\_852})))$ ;
97  $\text{title}('Filtro FIR passa-faixa - Janela Retangular - 852 Hz')$ ;
98  $\text{xlabel}('Frequ\^encia (Hz)')$ ;
99  $\text{ylabel}('Magnitude (dB)')$ ;
100  $\text{ylim}([-200 \ 10])$ ;
101
102  $\text{subplot}(3, 1, 3)$ ;
103  $\text{plot}(w_{fil\_ret\_941}/\pi, 20 \cdot \log_{10}(\text{abs}(h_{fil\_ret\_941})))$ ;
104  $\text{title}('Filtro FIR passa-faixa - Janela Retangular - 941 Hz')$ ;
105  $\text{xlabel}('Frequ\^encia (Hz)')$ ;
106  $\text{ylabel}('Magnitude (dB)')$ ;
107  $\text{ylim}([-200 \ 10])$ ;
108
109 % Filtro de janela de Hamming %
110  $[h_{fil\_ham\_770}, w_{fil\_ham\_770}] = \text{freqz}(h_{hamming\_770}, 1)$ ;
111  $[h_{fil\_ham\_852}, w_{fil\_ham\_852}] = \text{freqz}(h_{hamming\_852}, 1)$ ;
112  $[h_{fil\_ham\_941}, w_{fil\_ham\_941}] = \text{freqz}(h_{hamming\_941}, 1)$ ;
113
114  $\text{figure}(2)$ ;
115  $\text{subplot}(3, 1, 1)$ ;
116  $\text{plot}(w_{fil\_ham\_770}/\pi, 20 \cdot \log_{10}(\text{abs}(h_{fil\_ham\_770})))$ ;
117  $\text{title}('Filtro FIR passa-faixa - Janela de Hamming - 770 Hz')$ ;
118  $\text{xlabel}('Frequ\^encia (Hz)')$ ;
119  $\text{ylabel}('Magnitude (dB)')$ ;
120  $\text{ylim}([-200 \ 10])$ ;
121
122  $\text{subplot}(3, 1, 2)$ ;
123  $\text{plot}(w_{fil\_ham\_852}/\pi, 20 \cdot \log_{10}(\text{abs}(h_{fil\_ham\_852})))$ ;
124  $\text{title}('Filtro FIR passa-faixa - Janela de Hamming - 852 Hz')$ ;
125  $\text{xlabel}('Frequ\^encia (Hz)')$ ;
126  $\text{ylabel}('Magnitude (dB)')$ ;
127  $\text{ylim}([-200 \ 10])$ ;
128

```

```

129 subplot(3,1,3);
130 plot(w_fil_ham_941/pi,20*log10(abs(h_fil_ham_941)));
131 title('Filtro FIR passa-faixa - Janela de Hamming - 941 Hz');
132 xlabel('Frequência (Hz)');
133 ylabel('Magnitude (dB)');
134 ylim([-200 10]);
135
136
137 % Filtro de janela de Hanning %
138 [h_fil_han_770, w_fil_han_770] = freqz(h_hanning_770,1);
139 [h_fil_han_852, w_fil_han_852] = freqz(h_hanning_852,1);
140 [h_fil_han_941, w_fil_han_941] = freqz(h_hanning_941,1);
141
142 figure(3);
143 subplot(3,1,1);
144 plot(w_fil_han_770/pi,20*log10(abs(h_fil_han_770)));
145 title('Filtro FIR passa-faixa - Janela de Hanning - 770 Hz');
146 xlabel('Frequência (Hz)');
147 ylabel('Magnitude (dB)');
148 ylim([-200 10]);
149
150 subplot(3,1,2);
151 plot(w_fil_han_852/pi,20*log10(abs(h_fil_han_852)));
152 title('Filtro FIR passa-faixa - Janela de Hanning - 852 Hz');
153 xlabel('Frequência (Hz)');
154 ylabel('Magnitude (dB)');
155 ylim([-200 10]);
156
157 subplot(3,1,3);
158 plot(w_fil_han_941/pi,20*log10(abs(h_fil_han_941)));
159 title('Filtro FIR passa-faixa - Janela de Hanning - 941 Hz');
160 xlabel('Frequência (Hz)');
161 ylabel('Magnitude (dB)');
162 ylim([-200 10]);
163
164
165 % Filtro de janela de Blackman %
166 [h_fil_blk_770, w_fil_blk_770] = freqz(h_black_770,1);
167 [h_fil_blk_852, w_fil_blk_852] = freqz(h_black_852,1);
168 [h_fil_blk_941, w_fil_blk_941] = freqz(h_black_941,1);
169
170 figure(4);
171 subplot(3,1,1);
172 plot(w_fil_blk_770/pi,20*log10(abs(h_fil_blk_770)));
173 title('Filtro FIR passa-faixa - Janela de Blackman - 770 Hz');
174 xlabel('Frequência (Hz)');
175 ylabel('Magnitude (dB)');
176 ylim([-200 10]);
177
178 subplot(3,1,2);
179 plot(w_fil_blk_852/pi,20*log10(abs(h_fil_blk_852)));
180 title('Filtro FIR passa-faixa - Janela de Blackman - 852 Hz');
181 xlabel('Frequência (Hz)');
182 ylabel('Magnitude (dB)');
183 ylim([-200 10]);
184
185 subplot(3,1,3);
186 plot(w_fil_blk_941/pi,20*log10(abs(h_fil_blk_941)));
187 title('Filtro FIR passa-faixa - Janela de Blackman - 941 Hz');
188 xlabel('Frequência (Hz)');
189 ylabel('Magnitude (dB)');
190 ylim([-200 10]);
191
192 %% Sinal %%
193 tmin = 0;

```

```

194 tmax = 2;
195 Fs = Omega_s;
196 Ts = 1/Fs;
197 L = (tmax - tmin)/Ts;
198 t = 0:Ts:tmax-Ts;
199
200 % Sinal composto das três componentes senoidais %
201 s_t = sin(2*pi*770*t) + sin(2*pi*852*t) + sin(2*pi*941*t);
202 S_f = fft(s_t);
203 S_f = abs(2*S_f/L);
204 S_f = fftshift(S_f);
205 freq = Fs*(-(L/2):(L/2)-1)/L;
206
207 figure(5);
208 subplot(2,1,1);
209 plot(t,s_t);
210 title('Sinal composto de três componentes senoidais');
211 xlabel('Tempo (s)');
212 ylabel('Amplitude');
213
214 subplot(2,1,2);
215 plot(freq,S_f);
216 title('Espectro do sinal composto de três componentes senoidais');
217 xlabel('Frequência (Hz)');
218 ylabel('Amplitude');
219 xlim([-1000 1000]);
220 ylim([-0.1 1.1]);
221
222
223 %% Filtragem %%
224 % Filtro de janela retangular %
225 S_f_h_ret_770 = filter(h_ret_770,1,s_t);
226 S_f_h_ret_770 = fft(S_f_h_ret_770);
227 S_f_h_ret_770 = abs(2*S_f_h_ret_770/L);
228 S_f_h_ret_770 = fftshift(S_f_h_ret_770);
229
230 S_f_h_ret_852 = filter(h_ret_852,1,s_t);
231 S_f_h_ret_852 = fft(S_f_h_ret_852);
232 S_f_h_ret_852 = abs(2*S_f_h_ret_852/L);
233 S_f_h_ret_852 = fftshift(S_f_h_ret_852);
234
235 S_f_h_ret_941 = filter(h_ret_941,1,s_t);
236 S_f_h_ret_941 = fft(S_f_h_ret_941);
237 S_f_h_ret_941 = abs(2*S_f_h_ret_941/L);
238 S_f_h_ret_941 = fftshift(S_f_h_ret_941);
239
240
241 % Filtro de janela de Hamming %
242 S_f_h_hamming_770 = filter(h_hamming_770,1,s_t);
243 S_f_h_hamming_770 = fft(S_f_h_hamming_770);
244 S_f_h_hamming_770 = abs(2*S_f_h_hamming_770/L);
245 S_f_h_hamming_770 = fftshift(S_f_h_hamming_770);
246
247 S_f_h_hamming_852 = filter(h_hamming_852,1,s_t);
248 S_f_h_hamming_852 = fft(S_f_h_hamming_852);
249 S_f_h_hamming_852 = abs(2*S_f_h_hamming_852/L);
250 S_f_h_hamming_852 = fftshift(S_f_h_hamming_852);
251
252 S_f_h_hamming_941 = filter(h_hamming_941,1,s_t);
253 S_f_h_hamming_941 = fft(S_f_h_hamming_941);
254 S_f_h_hamming_941 = abs(2*S_f_h_hamming_941/L);
255 S_f_h_hamming_941 = fftshift(S_f_h_hamming_941);
256
257 % Filtro de janela de Hanning %
258 S_f_h_hanning_770 = filter(h_hanning_770,1,s_t);

```

```

259 S_f_h_hanning_770 = fft(S_f_h_hanning_770);
260 S_f_h_hanning_770 = abs(2*S_f_h_hanning_770/L);
261 S_f_h_hanning_770 = fftshift(S_f_h_hanning_770);
262
263 S_f_h_hanning_852 = filter(h_hanning_852,1,s_t);
264 S_f_h_hanning_852 = fft(S_f_h_hanning_852);
265 S_f_h_hanning_852 = abs(2*S_f_h_hanning_852/L);
266 S_f_h_hanning_852 = fftshift(S_f_h_hanning_852);
267
268 S_f_h_hanning_941 = filter(h_hanning_941,1,s_t);
269 S_f_h_hanning_941 = fft(S_f_h_hanning_941);
270 S_f_h_hanning_941 = abs(2*S_f_h_hanning_941/L);
271 S_f_h_hanning_941 = fftshift(S_f_h_hanning_941);
272
273 % Filtro de janela de Blackman %
274 S_f_h_black_770 = filter(h_black_770,1,s_t);
275 S_f_h_black_770 = fft(S_f_h_black_770);
276 S_f_h_black_770 = abs(2*S_f_h_black_770/L);
277 S_f_h_black_770 = fftshift(S_f_h_black_770);
278
279 S_f_h_black_852 = filter(h_black_852,1,s_t);
280 S_f_h_black_852 = fft(S_f_h_black_852);
281 S_f_h_black_852 = abs(2*S_f_h_black_852/L);
282 S_f_h_black_852 = fftshift(S_f_h_black_852);
283
284 S_f_h_black_941 = filter(h_black_941,1,s_t);
285 S_f_h_black_941 = fft(S_f_h_black_941);
286 S_f_h_black_941 = abs(2*S_f_h_black_941/L);
287 S_f_h_black_941 = fftshift(S_f_h_black_941);
288
289 %% Obter a resposta em frequência dos filtros passa-faixa %%
290 [Mod_ret_770, freq_ret_770] = freqz(h_ret_770,1, length(freq), Fs);
291 [Mod_ret_852, freq_ret_852] = freqz(h_ret_852,1, length(freq), Fs);
292 [Mod_ret_941, freq_ret_941] = freqz(h_ret_941,1, length(freq), Fs);
293
294 [Mod_hamming_770, freq_hamming_770] = freqz(h_hamming_770,1, length(freq), Fs);
295 [Mod_hamming_852, freq_hamming_852] = freqz(h_hamming_852,1, length(freq), Fs);
296 [Mod_hamming_941, freq_hamming_941] = freqz(h_hamming_941,1, length(freq), Fs);
297
298 [Mod_hanning_770, freq_hanning_770] = freqz(h_hanning_770,1, length(freq), Fs);
299 [Mod_hanning_852, freq_hanning_852] = freqz(h_hanning_852,1, length(freq), Fs);
300 [Mod_hanning_941, freq_hanning_941] = freqz(h_hanning_941,1, length(freq), Fs);
301
302 [Mod_black_770, freq_black_770] = freqz(h_black_770,1, length(freq), Fs);
303 [Mod_black_852, freq_black_852] = freqz(h_black_852,1, length(freq), Fs);
304 [Mod_black_941, freq_black_941] = freqz(h_black_941,1, length(freq), Fs);
305
306 %% Plot Sinais Filtrados %%
307 % Filtragem usando a janela retangular %
308 figure(6);
309 subplot(2,1,1);
310 plot(freq, S_f);
311 title('Sinais de 770 Hz, 852 Hz e 941 Hz multiplexados');
312 xlabel('Frequência (Hz)');
313 ylabel('Amplitude');
314 xlim([-1500 1500]);
315 ylim([-0.1 1.3]);
316 hold on;
317 plot(freq_ret_770, abs(Mod_ret_770));
318
319 subplot(2,1,2);
320 plot(freq, S_f_h_ret_770);
321 title('Sinal de 770 Hz filtrado usando a Janela Retangular');
322 xlabel('Frequência (Hz)');
323 ylabel('Amplitude');

```

```

324 xlim([-1500 1500]);
325 ylim([-0.1 1.3]);
326
327
328 figure(7);
329 subplot(2,1,1);
330 plot(freq, S_f);
331 title('Sinais de 770 Hz, 852 Hz e 941 Hz multiplexados');
332 xlabel('Frequência (Hz)');
333 ylabel('Amplitude');
334 xlim([-1500 1500]);
335 ylim([-0.1 1.3]);
336 hold on;
337 plot(freq_ret_852, abs(Mod_ret_852));
338
339 subplot(2,1,2);
340 plot(freq, S_f_h_ret_852);
341 title('Sinal de 852 Hz filtrado usando a Janela Retangular');
342 xlabel('Frequência (Hz)');
343 ylabel('Amplitude');
344 xlim([-1500 1500]);
345 ylim([-0.1 1.3]);
346
347
348 figure(8);
349 subplot(2,1,1);
350 plot(freq, S_f);
351 title('Sinais de 770 Hz, 852 Hz e 941 Hz multiplexados');
352 xlabel('Frequência (Hz)');
353 ylabel('Amplitude');
354 xlim([-1500 1500]);
355 xlim([-1500 1500]);
356 ylim([-0.1 1.3]);
357 hold on;
358 plot(freq_ret_941, abs(Mod_ret_941));
359
360 subplot(2,1,2);
361 plot(freq, S_f_h_ret_941);
362 title('Sinal de 941 Hz filtrado usando a Janela Retangular');
363 xlabel('Frequência (Hz)');
364 ylabel('Amplitude');
365 xlim([-1500 1500]);
366 ylim([-0.1 1.3]);
367
368
369 % Filtragem usando a janela de Hamming %
370 figure(9);
371 subplot(2,1,1);
372 plot(freq, S_f);
373 title('Sinais de 770 Hz, 852 Hz e 941 Hz multiplexados');
374 xlabel('Frequência (Hz)');
375 ylabel('Amplitude');
376 xlim([-1500 1500]);
377 ylim([-0.1 1.1]);
378 hold on;
379 plot(freq_hamming_770, abs(Mod_hamming_770));
380
381 subplot(2,1,2);
382 plot(freq, S_f_h_hamming_770);
383 title('Sinal de 770 Hz filtrado usando a Janela de Hamming');
384 xlabel('Frequência (Hz)');
385 ylabel('Amplitude');
386 xlim([-1500 1500]);
387 ylim([-0.1 1.1]);
388
389

```



```

390 figure(10);
391 subplot(2,1,1);
392 plot(freq, S_f);
393 title('Sinais de 770 Hz, 852 Hz e 941 Hz multiplexados');
394 xlabel('Frequência (Hz)');
395 ylabel('Amplitude');
396 xlim([-1500 1500]);
397 ylim([-0.1 1.1]);
398 hold on;
399 plot(freq_hamming_852, abs(Mod_hamming_852));
400
401 subplot(2,1,2);
402 plot(freq, S_f_h_hamming_852);
403 title('Sinal de 852 Hz filtrado usando a Janela de Hamming');
404 xlabel('Frequência (Hz)');
405 ylabel('Amplitude');
406 xlim([-1500 1500]);
407 ylim([-0.1 1.1]);
408
409
410 figure(11);
411 subplot(2,1,1);
412 plot(freq, S_f);
413 title('Sinais de 770 Hz, 852 Hz e 941 Hz multiplexados');
414 xlabel('Frequência (Hz)');
415 ylabel('Amplitude');
416 xlim([-1500 1500]);
417 ylim([-0.1 1.1]);
418 hold on;
419 plot(freq_hamming_941, abs(Mod_hamming_941));
420
421 subplot(2,1,2);
422 plot(freq, S_f_h_hamming_941);
423 title('Sinal de 941 Hz filtrado usando a Janela de Hamming');
424 xlabel('Frequência (Hz)');
425 ylabel('Amplitude');
426 xlim([-1500 1500]);
427 ylim([-0.1 1.1]);
428
429
430 % Filtragem usando a janela de Hanning %
431 figure(12);
432 subplot(2,1,1);
433 plot(freq, S_f);
434 title('Sinais de 770 Hz, 852 Hz e 941 Hz multiplexados');
435 xlabel('Frequência (Hz)');
436 ylabel('Amplitude');
437 xlim([-1500 1500]);
438 ylim([-0.1 1.1]);
439 hold on;
440 plot(freq_hanning_770, abs(Mod_hanning_770));
441
442 subplot(2,1,2);
443 plot(freq, S_f_h_hanning_770);
444 title('Sinal de 770 Hz filtrado usando a Janela de Hanning');
445 xlabel('Frequência (Hz)');
446 ylabel('Amplitude');
447 xlim([-1500 1500]);
448 ylim([-0.1 1.1]);
449
450
451 figure(13);
452 subplot(2,1,1);
453 plot(freq, S_f);
454 title('Sinais de 770 Hz, 852 Hz e 941 Hz multiplexados');
455 xlabel('Frequência (Hz)');

```

```

456 ylabel('Amplitude');
457 xlim([-1500 1500]);
458 ylim([-0.1 1.1]);
459 hold on;
460 plot(freq_hanning_852, abs(Mod_hanning_852));
461
462 subplot(2,1,2);
463 plot(freq, S_f_h_hanning_852);
464 title('Sinal de 852 Hz filtrado usando a Janela de Hanning');
465 xlabel('Frequência (Hz)');
466 ylabel('Amplitude');
467 xlim([-1500 1500]);
468 ylim([-0.1 1.1]);
469
470
471 figure(14);
472 subplot(2,1,1);
473 plot(freq, S_f);
474 title('Sinais de 770 Hz, 852 Hz e 941 Hz multiplexados');
475 xlabel('Frequência (Hz)');
476 ylabel('Amplitude');
477 xlim([-1500 1500]);
478 ylim([-0.1 1.1]);
479 hold on;
480 plot(freq_hanning_941, abs(Mod_hanning_941));
481
482 subplot(2,1,2);
483 plot(freq, S_f_h_hanning_941);
484 title('Sinal de 941 Hz filtrado usando a Janela de Hanning');
485 xlabel('Frequência (Hz)');
486 ylabel('Amplitude');
487 xlim([-1500 1500]);
488 ylim([-0.1 1.1]);
489
490
491 % Filtragem usando a janela de Blackman %
492 figure(15);
493 subplot(2,1,1);
494 plot(freq, S_f);
495 title('Sinais de 770 Hz, 852 Hz e 941 Hz multiplexados');
496 xlabel('Frequência (Hz)');
497 ylabel('Amplitude');
498 xlim([-1500 1500]);
499 ylim([-0.1 1.1]);
500 hold on;
501 plot(freq_black_770, abs(Mod_black_770));
502
503 subplot(2,1,2);
504 plot(freq, S_f_h_black_770);
505 title('Sinal de 770 Hz filtrado usando a Janela de Blackman');
506 xlabel('Frequência (Hz)');
507 ylabel('Amplitude');
508 xlim([-1500 1500]);
509 ylim([-0.1 1.1]);
510
511
512 figure(16);
513 subplot(2,1,1);
514 plot(freq, S_f);
515 title('Sinais de 770 Hz, 852 Hz e 941 Hz multiplexados');
516 xlabel('Frequência (Hz)');
517 ylabel('Amplitude');
518 xlim([-1500 1500]);
519 ylim([-0.1 1.1]);
520 hold on;
521 plot(freq_black_852, abs(Mod_black_852));

```

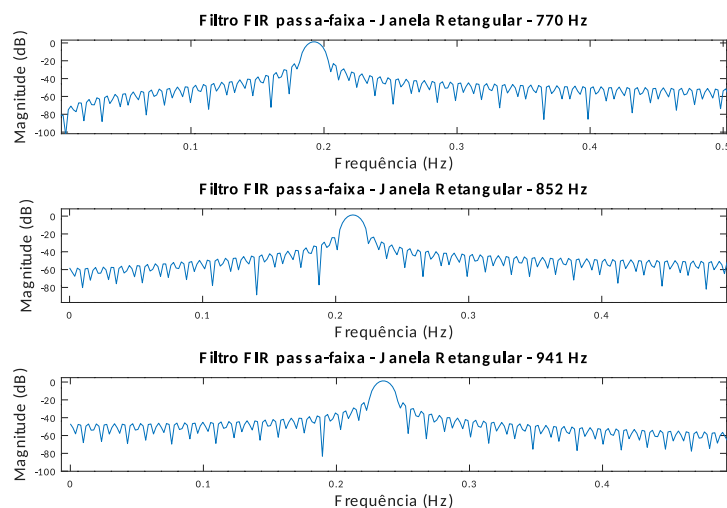
```

522
523 subplot(2,1,2);
524 plot(freq, S_f_h_black_852);
525 title('Sinal de 852 Hz filtrado usando a Janela de Blackman');
526 xlabel('Frequência (Hz)');
527 ylabel('Amplitude');
528 xlim([-1500 1500]);
529 ylim([-0.1 1.1]);
530
531
532 figure(17);
533 subplot(2,1,1);
534 plot(freq, S_f);
535 title('Sinais de 770 Hz, 852 Hz e 941 Hz multiplexados');
536 xlabel('Frequência (Hz)');
537 ylabel('Amplitude');
538 xlim([-1500 1500]);
539 ylim([-0.1 1.1]);
540 hold on;
541 plot(freq_black_941, abs(Mod_black_941));
542
543 subplot(2,1,2);
544 plot(freq, S_f_h_black_941);
545 title('Sinal de 941 Hz filtrado usando a Janela de Blackman');
546 xlabel('Frequência (Hz)');
547 ylabel('Amplitude');
548 xlim([-1500 1500]);
549 ylim([-0.1 1.1]);

```

Na figura abaixo, são mostradas as respostas em frequência para cada um dos filtros passa-faixa, usando o método da janela retangular:

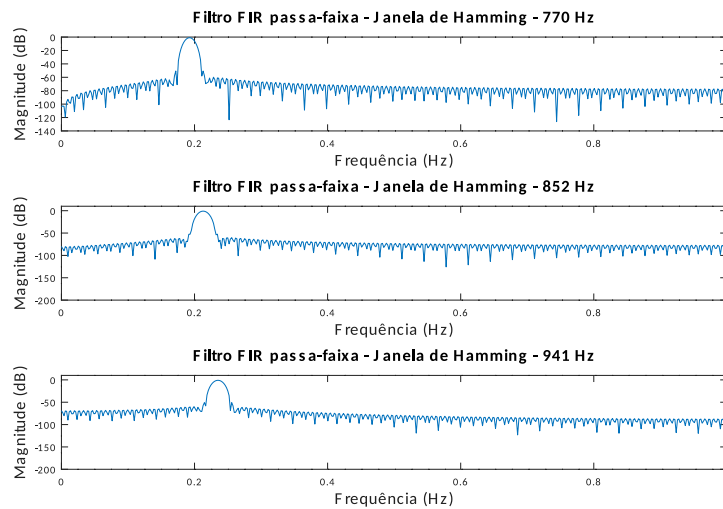
Figura 7: Respostas em frequência dos filtros passa-faixa para as frequências de 770 Hz, 852 Hz e 941 Hz, usando a janela retangular.



Fonte: Próprio autor.

Já na figura abaixo, são mostradas as respostas em frequência para cada um dos filtros passa-faixa, usando o método da janela de Hamming:

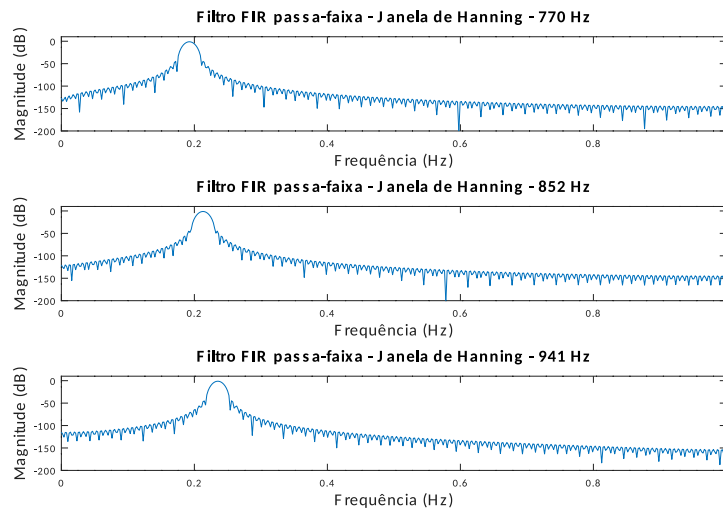
Figura 8: Respostas em frequência dos filtros passa-faixa para as frequências de 770 Hz, 852 Hz e 941 Hz, usando a janela de Hamming.



Fonte: Próprio autor.

Na sequência, são mostradas as respostas em frequência para cada um dos filtros passa-faixa, usando o método da janela de Hanning:

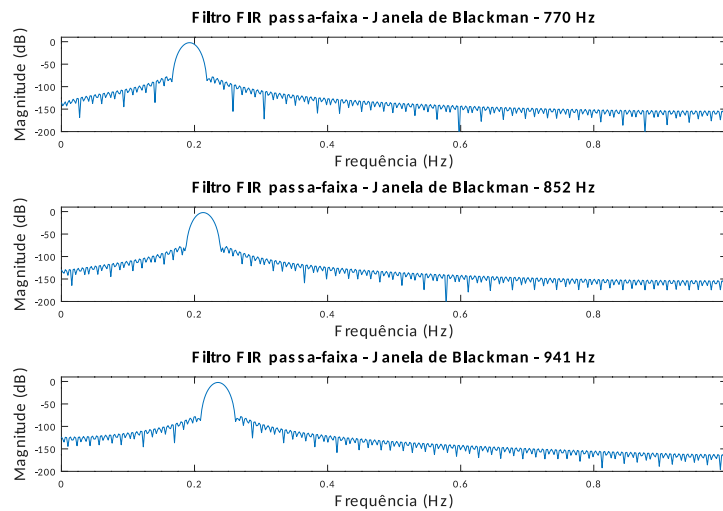
Figura 9: Respostas em frequência dos filtros passa-faixa para as frequências de 770 Hz, 852 Hz e 941 Hz, usando a janela de Hanning.



Fonte: Próprio autor.

Por fim, são mostradas as respostas em frequência para cada um dos filtros passa-faixa, usando o método da janela de Blackman:

Figura 10: Respostas em frequência dos filtros passa-faixa para as frequências de 770 Hz, 852 Hz e 941 Hz, usando a janela de Blackman.

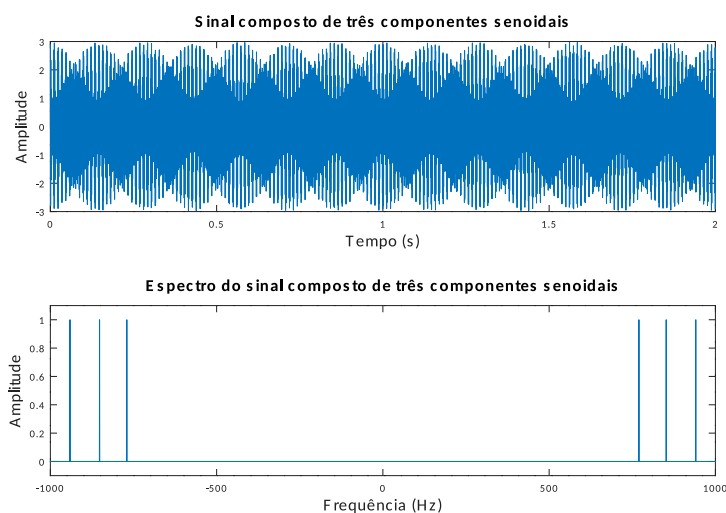


Fonte: Próprio autor.

Comparando os 4 métodos de filtragem, é possível atestar que a relação entre a largura de transição e a atenuação na faixa de rejeição respeitam os conceitos teóricos aprendidos na disciplina de PSD. Em ordem crescente destes parâmetros, temos: Janela Retangular -> Hanning -> Hamming -> Blackman.

Na próxima etapa do experimento, foi criado um sinal $s(t)$ composto de três componentes senoidais, nas frequências 770 Hz, 852 Hz e 941 Hz multiplexados. Abaixo, é mostrado o sinal no domínio do tempo e também o espectro de frequências desse sinal:

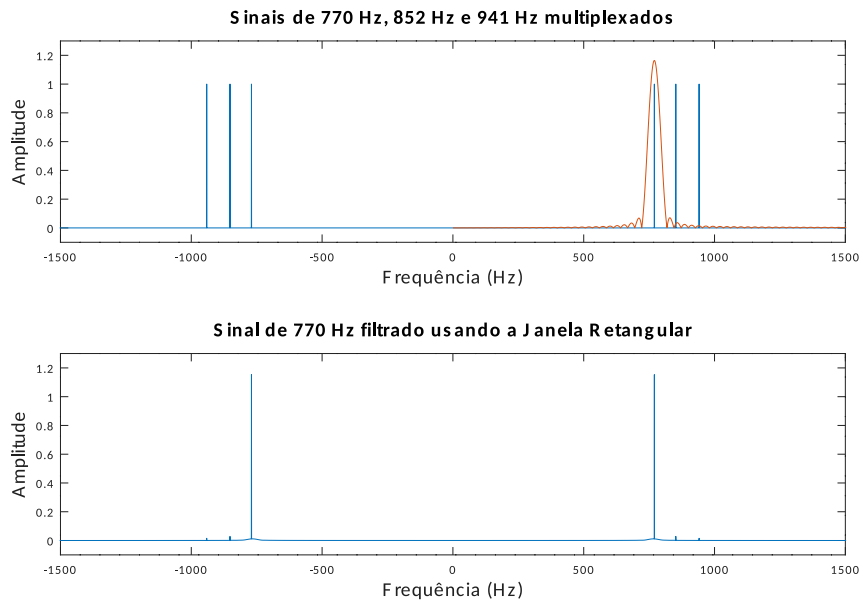
Figura 11: Sinal multiplexado composto de três componentes senoidais, nas frequências 770 Hz, 852 Hz e 941 Hz e representado nos domínios do tempo e da frequência.



Fonte: Próprio autor.

Na sequência, cada uma dessas componentes de frequência foi filtrada utilizando um filtro passa-faixa para cada uma. Além disso, cada filtro de cada frequência foi realizado quatro vezes, uma para cada tipo de janela. Abaixo, é mostrada a representação no domínio da frequência da filtragem do sinal de 770 Hz utilizando a janela retangular:

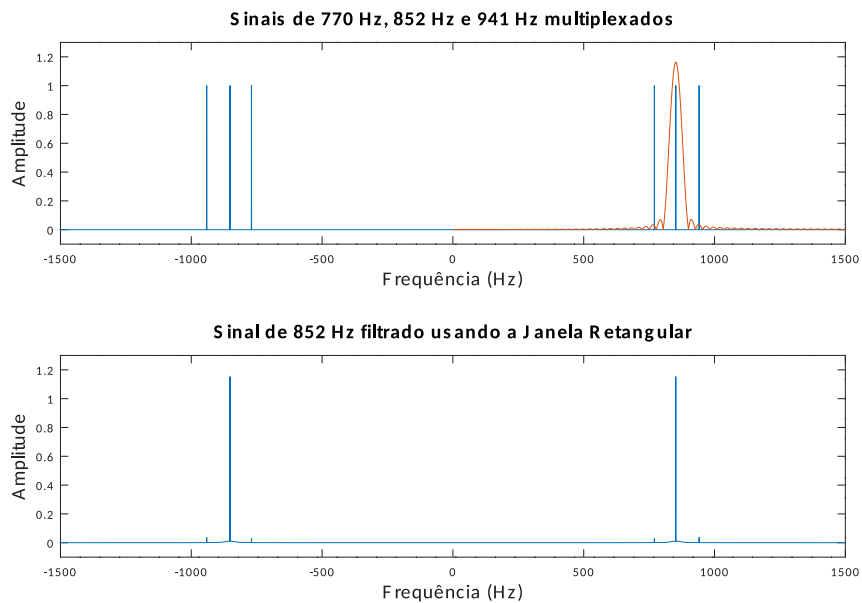
Figura 12: Representação no domínio da frequência do sinal de 770 Hz filtrado usando a janela retangular. A curva em vermelho mostra a resposta em frequência do filtro passa-faixa criado utilizando a janela retangular.



Fonte: Próprio autor.

A seguir, o mesmo tipo de filtro é utilizado para filtrar o sinal de 852 Hz:

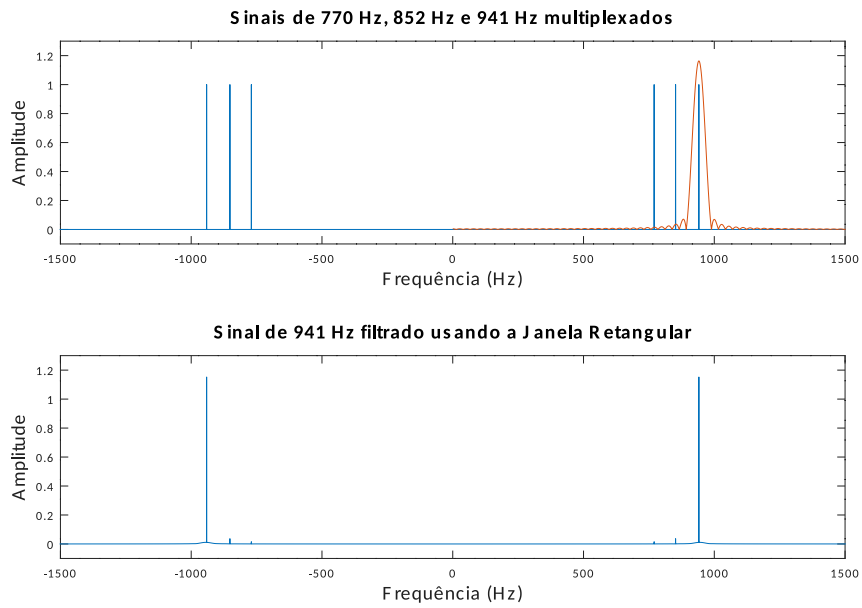
Figura 13: Representação no domínio da frequência do sinal de 852 Hz filtrado usando a janela retangular. A curva em vermelho mostra a resposta em frequência do filtro passa-faixa criado utilizando a janela retangular.



Fonte: Próprio autor.

Por fim, o mesmo tipo de filtro é utilizado para filtrar o sinal de 941 Hz:

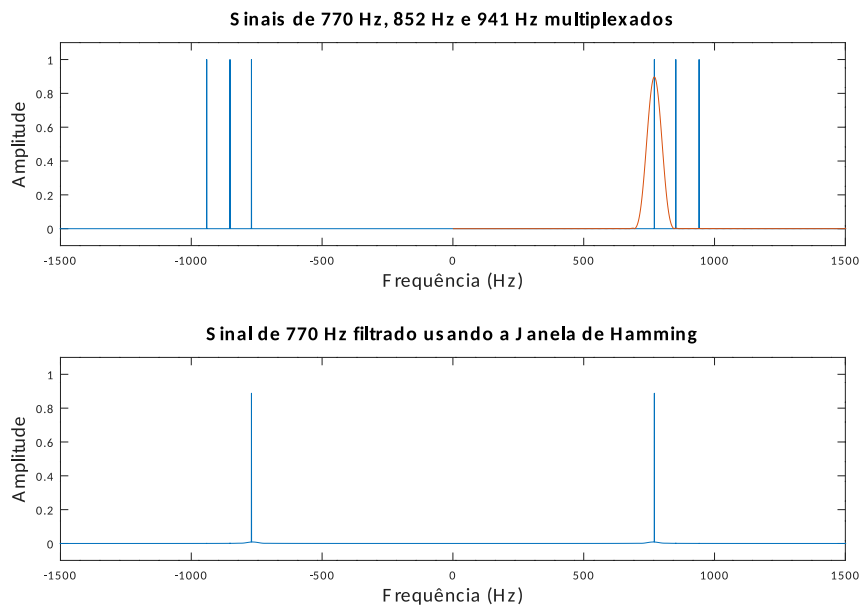
Figura 14: Representação no domínio da frequência do sinal de 941 Hz filtrado usando a janela retangular. A curva em vermelho mostra a resposta em frequência do filtro passa-faixa criado utilizando a janela retangular.



Fonte: Próprio autor.

O próximo filtro utilizado utiliza a janela de Hamming. Abaixo, é mostrada a representação no domínio da frequência da filtragem do sinal de 770 Hz utilizando a janela de Hamming:

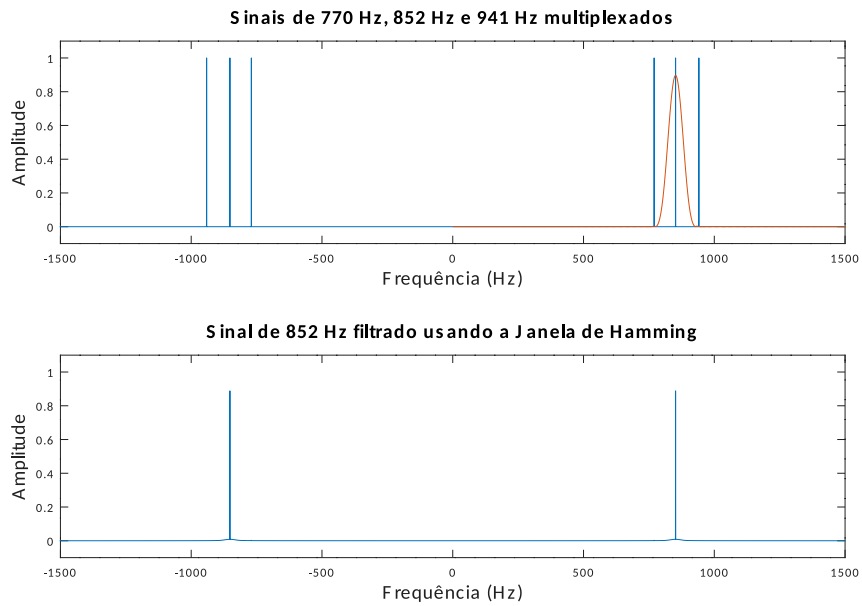
Figura 15: Representação no domínio da frequência do sinal de 770 Hz filtrado usando a janela de Hamming. A curva em vermelho mostra a resposta em frequência do filtro passa-faixa criado utilizando a janela de Hamming.



Fonte: Próprio autor.

A seguir, o mesmo tipo de filtro é utilizado para filtrar o sinal de 852 Hz:

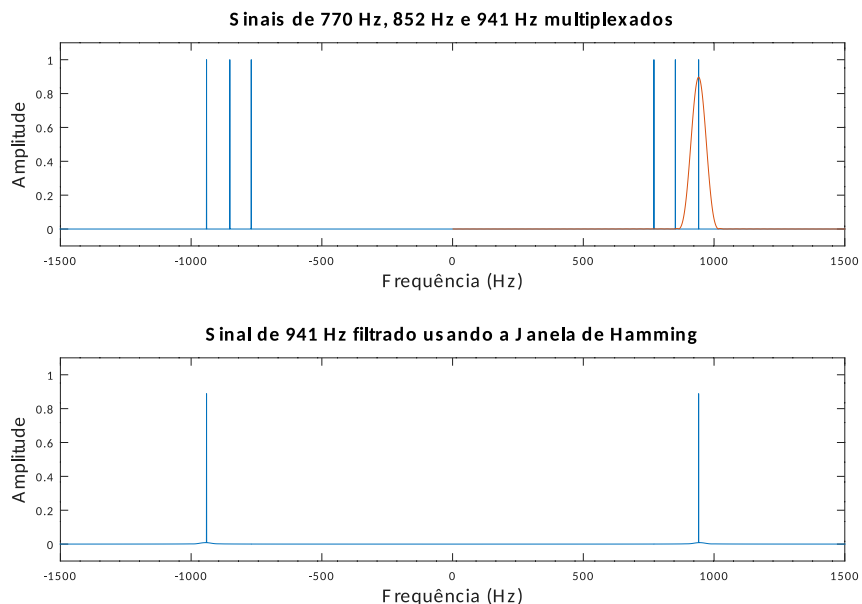
Figura 16: Representação no domínio da frequência do sinal de 852 Hz filtrado usando a janela de Hamming. A curva em vermelho mostra a resposta em frequência do filtro passa-faixa criado utilizando a janela de Hamming.



Fonte: Próprio autor.

Por fim, o mesmo tipo de filtro é utilizado para filtrar o sinal de 941 Hz:

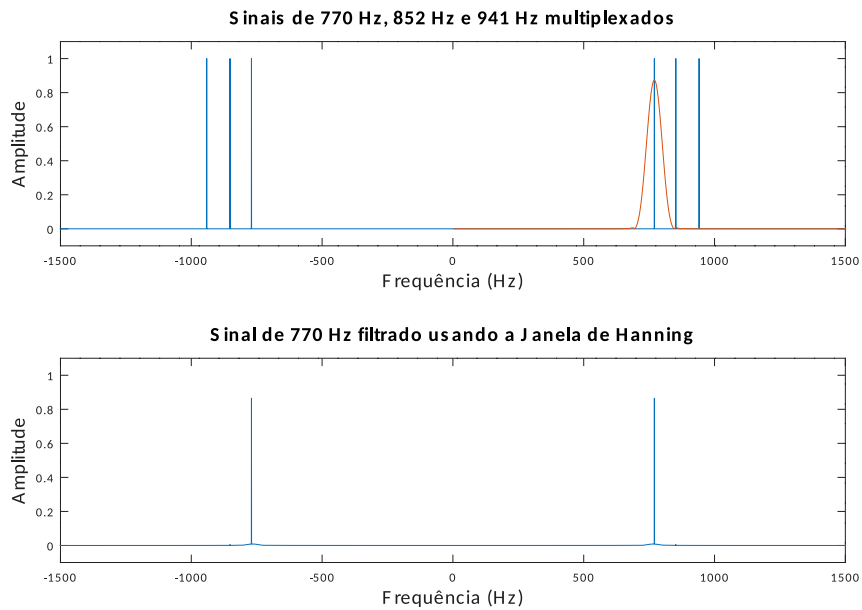
Figura 17: Representação no domínio da frequência do sinal de 941 Hz filtrado usando a janela de Hamming. A curva em vermelho mostra a resposta em frequência do filtro passa-faixa criado utilizando a janela de Hamming.



Fonte: Próprio autor.

O próximo filtro utilizado utiliza a janela de Hanning. Abaixo, é mostrada a representação no domínio da frequência da filtragem do sinal de 770 Hz utilizando a janela de Hanning:

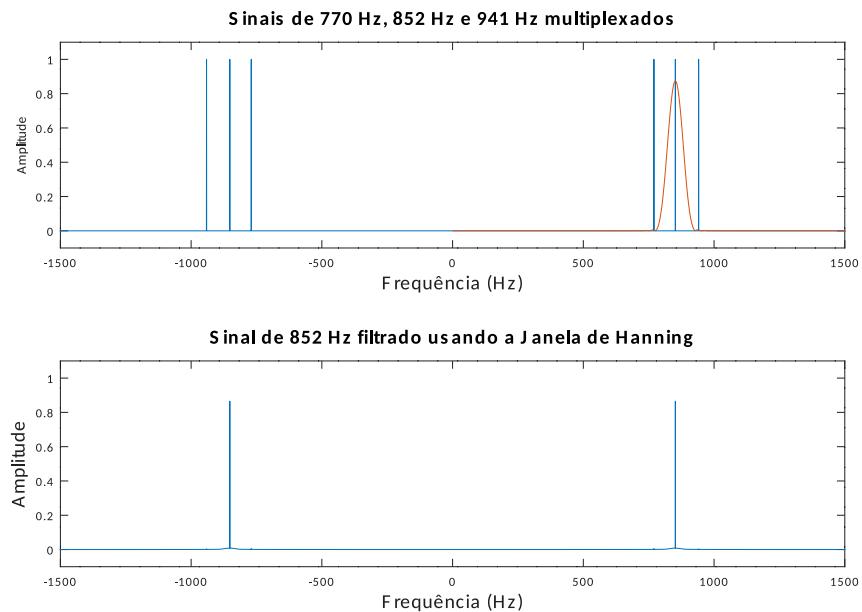
Figura 18: Representação no domínio da frequência do sinal de 770 Hz filtrado usando a janela de Hanning. A curva em vermelho mostra a resposta em frequência do filtro passa-faixa criado utilizando a janela de Hanning.



Fonte: Próprio autor.

A seguir, o mesmo tipo de filtro é utilizado para filtrar o sinal de 852 Hz:

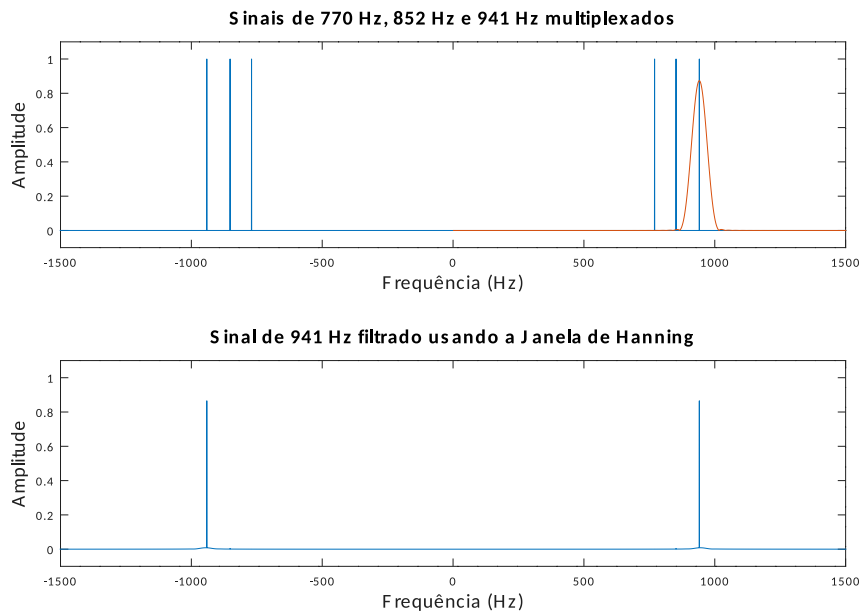
Figura 19: Representação no domínio da frequência do sinal de 852 Hz filtrado usando a janela de Hanning. A curva em vermelho mostra a resposta em frequência do filtro passa-faixa criado utilizando a janela de Hanning.



Fonte: Próprio autor.

Por fim, o mesmo tipo de filtro é utilizado para filtrar o sinal de 941 Hz:

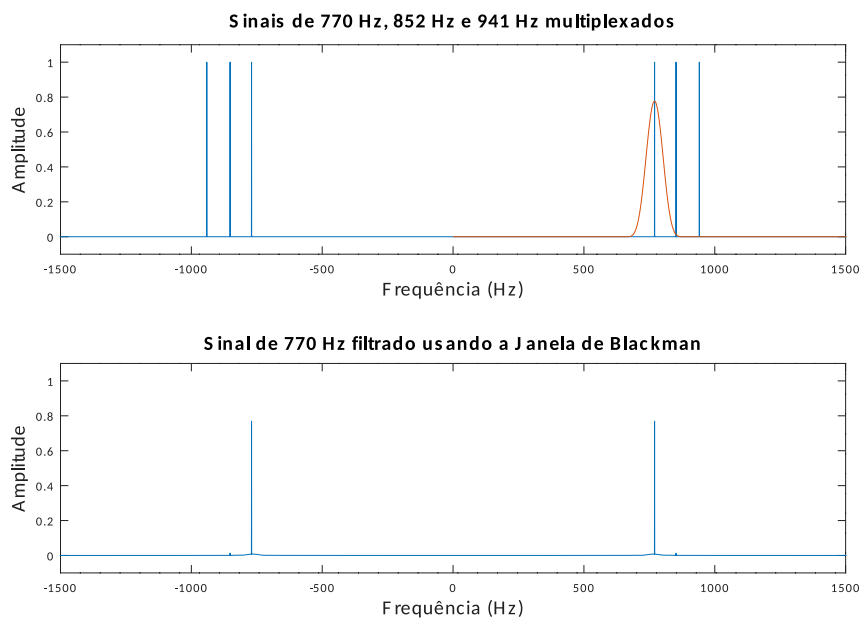
Figura 20: Representação no domínio da frequência do sinal de 941 Hz filtrado usando a janela de Hanning. A curva em vermelho mostra a resposta em frequência do filtro passa-faixa criado utilizando a janela de Hanning.



Fonte: Próprio autor.

O próximo filtro utilizado utiliza a janela de Blackman. Abaixo, é mostrada a representação no domínio da frequência da filtragem do sinal de 770 Hz utilizando a janela de Blackman:

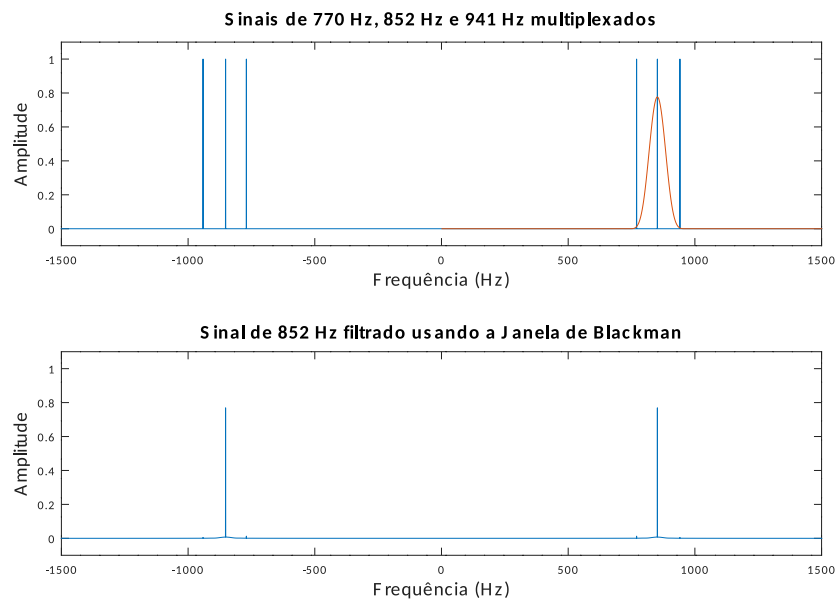
Figura 21: Representação no domínio da frequência do sinal de 770 Hz filtrado usando a janela de Blackman. A curva em vermelho mostra a resposta em frequência do filtro passa-faixa criado utilizando a janela de Blackman.



Fonte: Próprio autor.

A seguir, o mesmo tipo de filtro é utilizado para filtrar o sinal de 852 Hz:

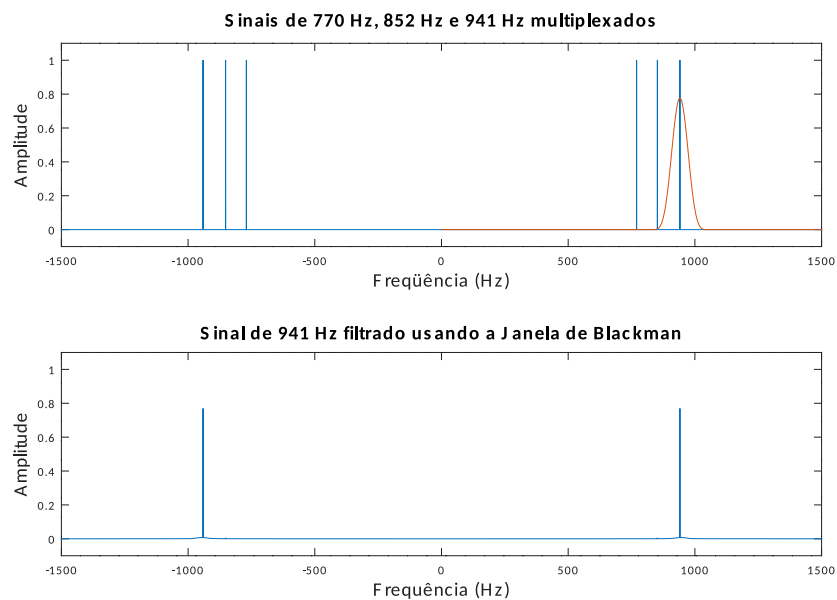
Figura 22: Representação no domínio da frequência do sinal de 852 Hz filtrado usando a janela de Blackman. A curva em vermelho mostra a resposta em frequência do filtro passa-faixa criado utilizando a janela de Blackman.



Fonte: Próprio autor.

Por fim, o mesmo tipo de filtro é utilizado para filtrar o sinal de 941 Hz:

Figura 23: Representação no domínio da frequência do sinal de 941 Hz filtrado usando a janela de Blackman. A curva em vermelho mostra a resposta em frequência do filtro passa-faixa criado utilizando a janela de Blackman.



Fonte: Próprio autor.

Analisando todos os métodos de filtragem utilizados nesta etapa, conclui-se que o filtro Blackman possui a maior largura de transição entre eles. Para garantir que todas as componentes de frequência fossem obtidas corretamente, aumentou-se a ordem do filtro até que não houvessem outras componentes interferindo na obtenção de cada frequência. Como a faixa de rejeição e de passagem são fixas neste projeto, o único parâmetro que pôde ser alterado foi a ordem do filtro.