

Instituto Nokia de Tecnologia - INdT  
Fundação Centro de Análise, Pesquisa e Inovação Tecnológica - FUCAPI  
Curso de Comunicações Móveis

Loide Mara Verdes de Jesus

**Densidade Espectral de Potência e Filtro Lineares**

Manaus/AM

2014

Instituto Nokia de Tecnologia - INdT  
Fundação Centro de Análise, Pesquisa e Inovação Tecnológica - FUCAPI  
Curso de Comunicações Móveis

Loide Mara Verdes de Jesus

**Densidade Espectral de Potência e Filtro Lineares**

Relatório apresentado  
ao Prof. André Noll  
como avaliação parcial  
do Curso de  
Comunicações Móveis.

Manaus/AM

2014

## Sumário

<b>1. Introdução .....</b>	<b>4</b>
<b>2. Objetivo .....</b>	<b>4</b>
<b>3. Requisitos .....</b>	<b>4</b>
<b>4. Simulação de Densidade Espectral de Potência e Filtros Lineares .....</b>	<b>4</b>
4.1. Importar, no Matlab, duas amostras quaisquer de voz.....	4
4.2. Plotar os sinais resultantes como função do tempo.....	4
4.3. Estimar e plotar sua autocorrelação (com 512 amostras).....	6
4.4. A partir da autocorrelação, e usando a FFT, estimar e plotar suas Densidades Espectrais de Potência (DEP) em dB e em Linear. ....	7
4.5. Estimar a largura de banda essencial dos dois sinais (95% de potência).....	9
4.6. Filtrar o sinal em um passa-baixa de frequência de corte 1kHz e plotar seu espectro filtrado. .	10
4.7. Para cada um dos dois sinais de voz, acrescente ruído branco Gaussiano com Relação Sinal-Ruído de 3 e 10 dB.....	11
4.8. Implementar um filtro de Weiner e plotar o sinal filtrado na frequência do filtro e a Densidade Espectral de Potência na saída do filtro. ....	14
<b>5. Conclusões .....</b>	<b>15</b>
<b>6. Referências Bibliográficas .....</b>	<b>15</b>
<b>7. Anexo .....</b>	<b>16</b>

## 1. Introdução

Sinais são conceitos associados à diferentes áreas da ciência e tecnologia, tais como comunicações, aeronáutica e astronáutica, projeto de circuitos, acústica, processamento de voz e imagens, entre outros. Embora a natureza física dos sinais varie conforme a área de estudo, todos eles são definidos como funções de uma ou mais variáveis independentes com informações comportamentais do sistema em questão.

Neste relatório, abordamos o processamento de sinais através de simulações utilizando o ambiente de programação MATLAB (*MATrix LABoratory*). MATLAB foi desenvolvido pela MathWorks e permite manipulação de matrizes, criação de gráficos de funções e dados, e cálculos numéricos de maneira geral.

Este relatório está organizado seguindo a seguinte divisão: apresentação dos objetivos na Seção 2; descrição dos recursos utilizados na Seção 3; a Seção 4 descreve as simulações desenvolvidas e executadas assim como os resultados observados; as conclusões são apresentadas na Seção 5 e, por fim, as referências bibliográficas na Seção 6. Como bônus, o simulador implementado está em anexo ao fim deste documento.

## 2. Objetivo

Implementar e executar simulações de processamento de sinais de voz em formato .wav e analisar os resultados obtidos durante a execução. O objetivo destas simulações é fixar conceitos aprendidos em sala de aula sobre densidade espectral de potência e filtros lineares.

## 3. Requisitos

Esta experimentação foi desenvolvida utilizando as seguintes ferramentas:

- ✓ Sistema operacional Windows 8.1
- ✓ MATLAB R2013b
- ✓ Notebook com Intel® Core™ i7-4600U CPU @2.10GHz 2.69GHz com 12GB de RAM

## 4. Simulação de Densidade Espectral de Potência e Filtros Lineares

### 4.1. Importar, no Matlab, duas amostras quaisquer de voz.

Duas amostras de voz, uma de homem e outra de mulher, foram importadas do site da ITU-T [1]. As amostras escolhidas foram as com idioma Português brasileiro e possuem duração de 10 segundos cada uma. Foi utilizado o segundo arquivo de voz masculina, *Port\_m2.wav*, e o segundo arquivo de voz feminina, *Port\_f2.wav*. Cada uma das amostras possui uma taxa de amostragem de 16kHz com 256kbps (16 bits por amostra).

### 4.2. Plotar os sinais resultantes como função do tempo.

A Figura 1 e Figura 2 apresentam a representação do sinal de voz masculino e feminino, respectivamente, na linha do tempo.

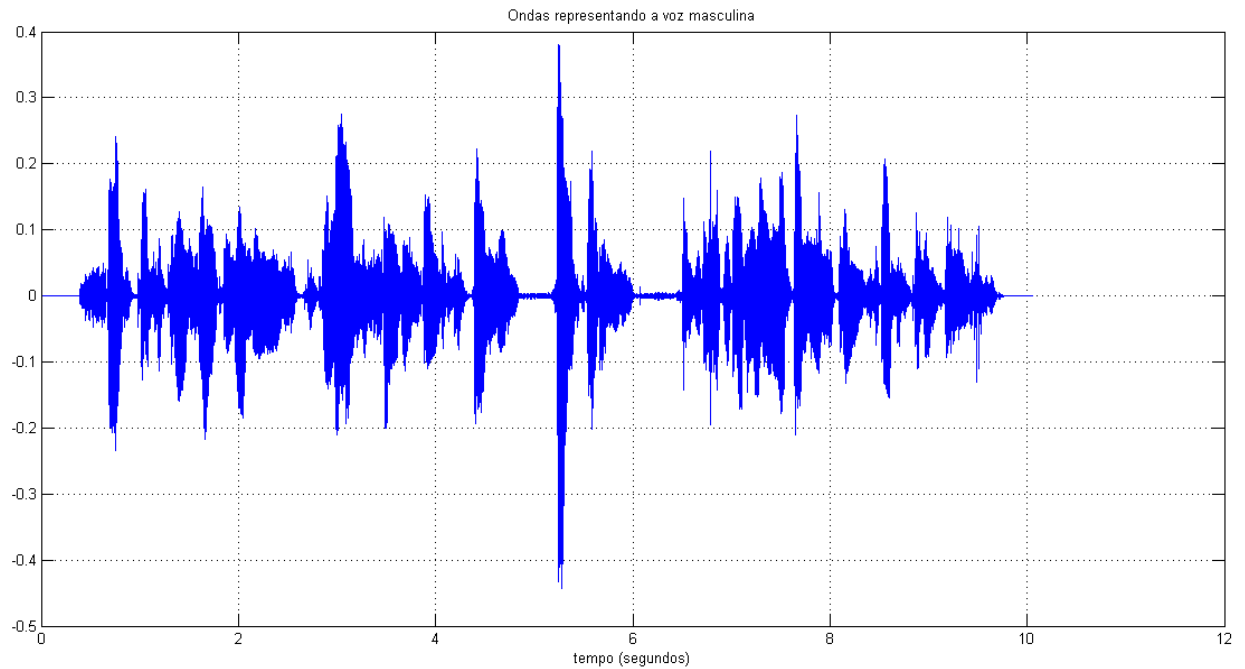


FIGURA 1: ONDA DE VOZ MASCULINA

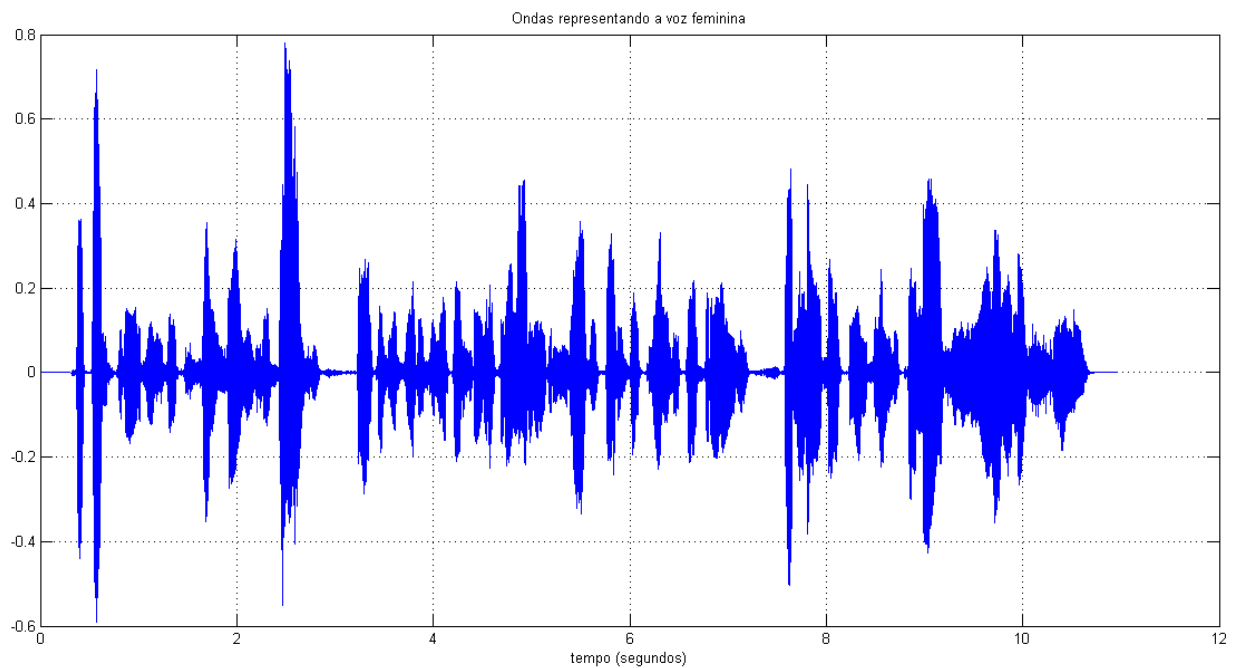


FIGURA 2: ONDA DE VOZ FEMININA

É possível observar que o sinal varia em amplitude em torno do eixo zero. Não foi possível fazer observações significativas usando a representação de um sinal de voz na linha do tempo uma vez que as frequências não são facilmente identificadas.

#### 4.3. Estimar e plotar sua autocorrelação (com 512 amostras).

A autocorrelação é usada para encontrar similaridade entre as amostras de um sinal, ou seja, identificar padrões. A autocorrelação dos sinais de voz foi estimada utilizando a função *xcorr* e passando como parâmetro a opção *coeff* para obter a autocorrelação normalizada. O resultado é um gráfico espelhado em torno do eixo 0.

A Figura 3 e Figura 4 apresentam a autocorrelação no domínio de amostragem (lags).

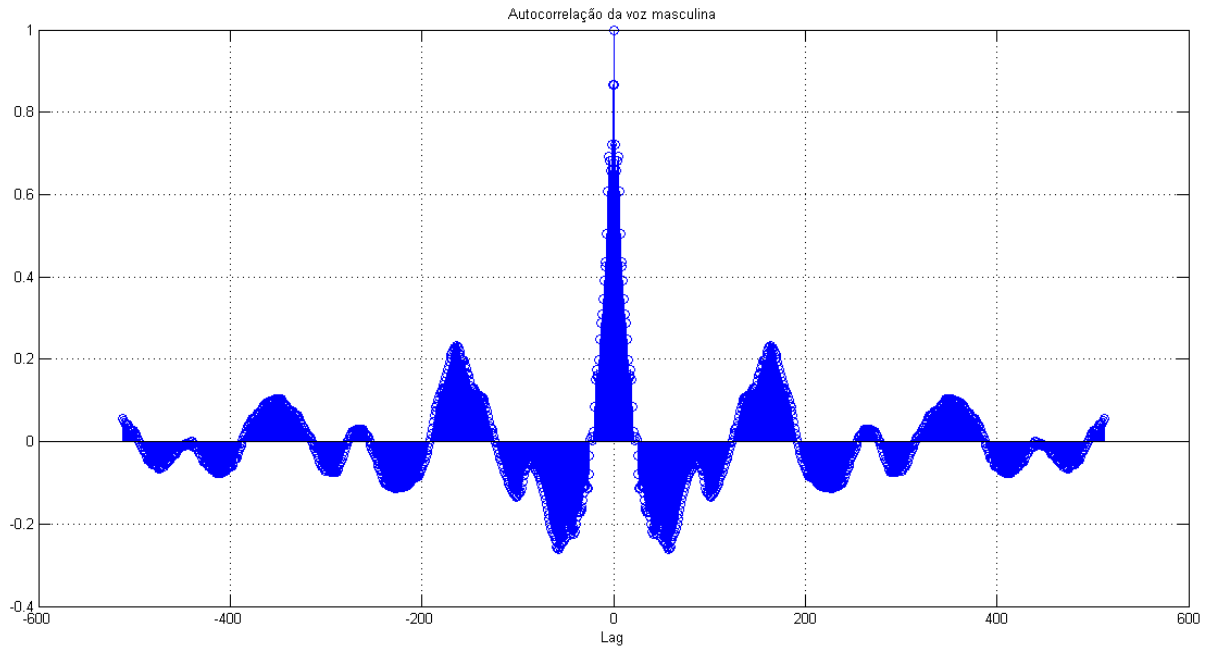


FIGURA 3: AUTOCORRELAÇÃO DA VOZ MASCULINA

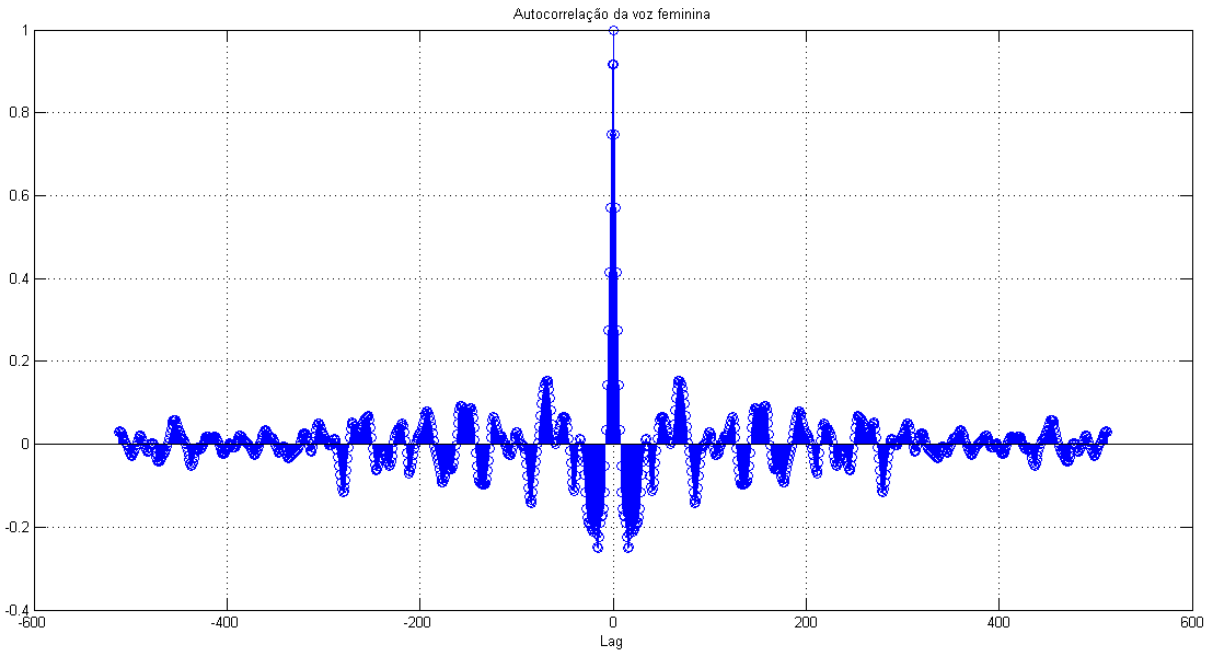


FIGURA 4: AUTOCORRELAÇÃO DA VOZ FEMININA

#### 4.4. A partir da autocorrelação, e usando a FFT, estimar e plotar suas Densidades Espectrais de Potência (DEP) em dB e em Linear.

A Densidade Espectral de Potência (DEP) tem por objetivo apresentar a potência do sinal sobre o domínio da frequência. Uma das vantagens em obter esta apresentação é a visualização das faixas de frequências do canal ocupadas pelo sinal e facilitar a identificação de uma frequência de corte em caso de uso de um filtro. A DEP foi calculada aplicando a *Transformada de Fourier*, usando a função *fft*, sobre a autocorrelação.

A Figura 5 e a Figura 6 apresentam a Densidade Espectral de Potência da voz masculina, em dB e em Watts respectivamente, sobre o domínio da frequência.

A Figura 7 e a Figura 8 apresentam a Densidade Espectral de Potência da voz feminina, em dB e em Watts respectivamente, sobre o domínio da frequência.

Foi possível observar que a voz feminina utiliza uma faixa de frequências maior em relação a voz masculina para representar o tom de voz mais agudo.

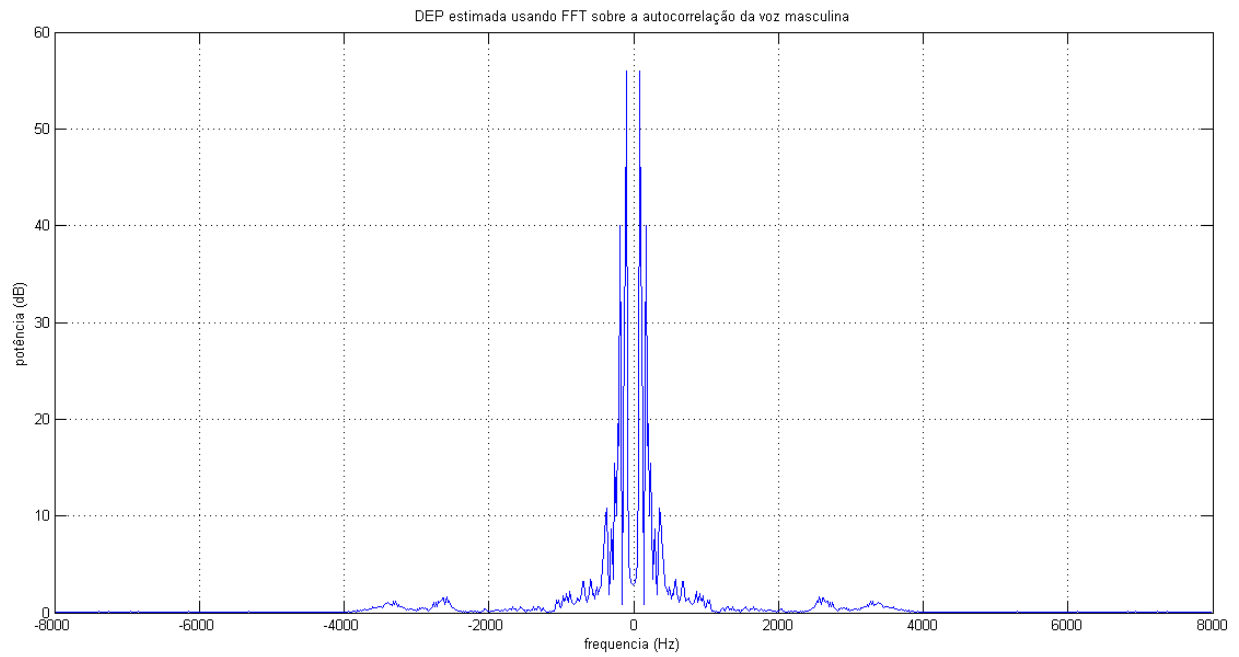


FIGURA 5: DEP DA VOZ MASCULINA EM DB

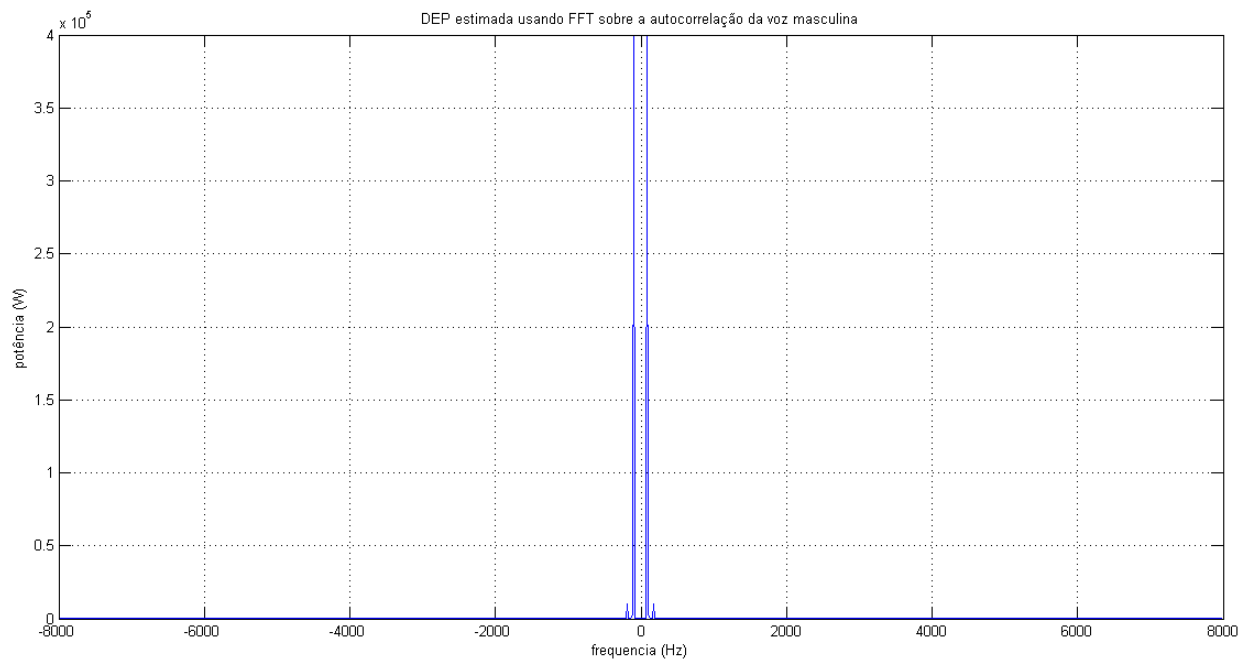


FIGURA 6: DEP DA VOZ MASCULINA EM WATTS



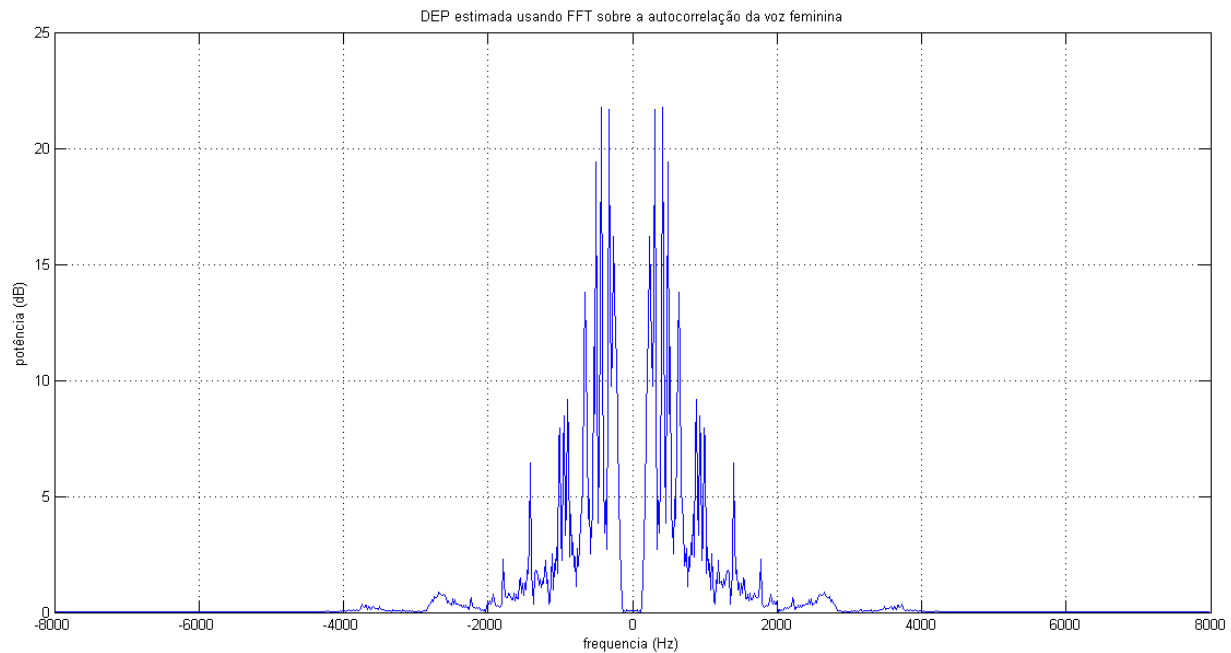


FIGURA 7: DEP DA VOZ FEMININA EM DB

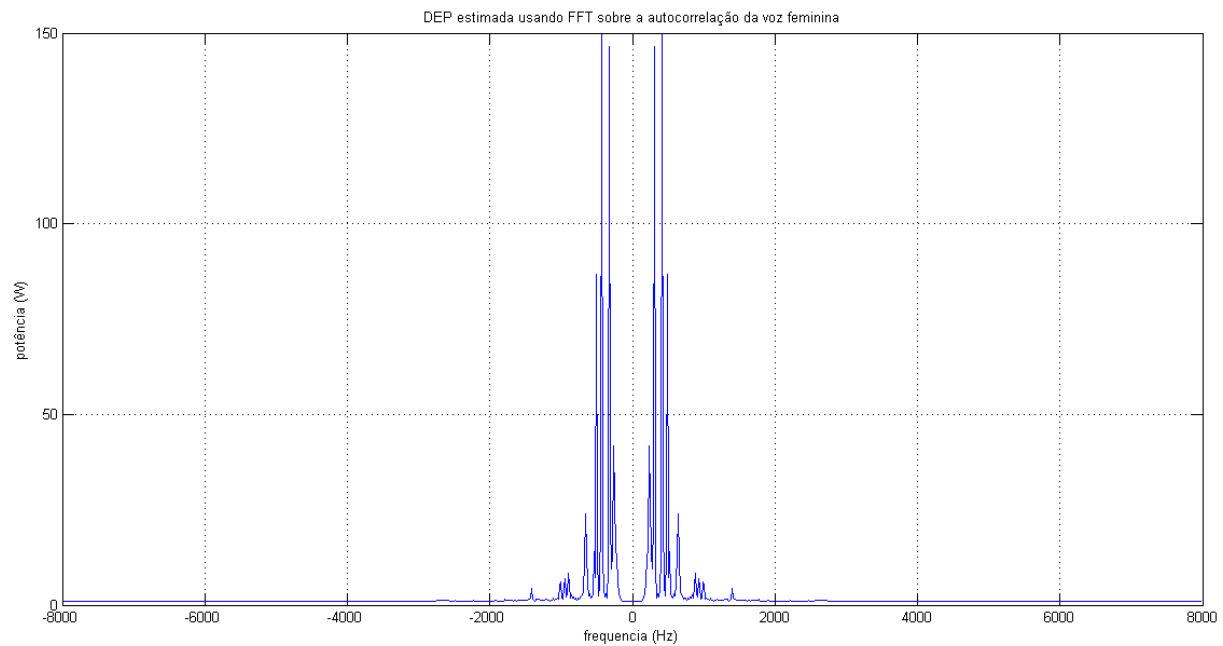


FIGURA 8: DEP DA VOZ FEMININA EM WATTS

#### 4.5. Estimar a largura de banda essencial dos dois sinais (95% de potência).

O espectro da maioria dos sinais se estende até o infinito. Porém, como a energia em geral é finita, o espectro de amplitude tende a zero conforme a frequência tende ao infinito.

A largura de banda essencial é a faixa de frequências que contém uma certa porcentagem, 95% neste caso específico, da energia total do sinal. Essa largura de banda essencial contém os componentes espectrais relevantes de um dado sinal. Os demais componentes fora da faixa essencial podem ser suprimidos com impacto desprezível ou tolerável na qualidade do sinal. Conforme o Teorema de Parseval, a energia total corresponde a soma das energias do sinal.

Foi observado que a largura de banda essencial do sinal de voz masculina foi de 739Hz e a largura de banda essencial do sinal de voz feminina foi de 778Hz. Uma das características do sinal de voz é que seu espectro varia de 20Hz a 20kHz logo estes valores estão dentro da faixa esperada. Outro ponto observado é que este resultado se encaixa no Teorema de Nyquist que diz que a frequência de amostragem deve ser igual ou duas vezes a maior a frequência do sinal. A frequência de amostragem para ambos os sinais é de 16kHz e a maior frequência destes sinais de voz é de 121Hz.

#### 4.6. Filtrar o sinal em um passa-baixa de frequência de corte 1kHz e plotar seu espectro filtrado.

Um filtro serve para suprimir uma certa faixa de frequência de um sinal sem distorção. Foi criado um filtro passa-baixa com frequência de corte de 1kHz. A Figura 9 e a Figura 10 apresentam o espectro do sinal, masculino e feminino respectivamente, filtrado neste filtro passa-baixa.

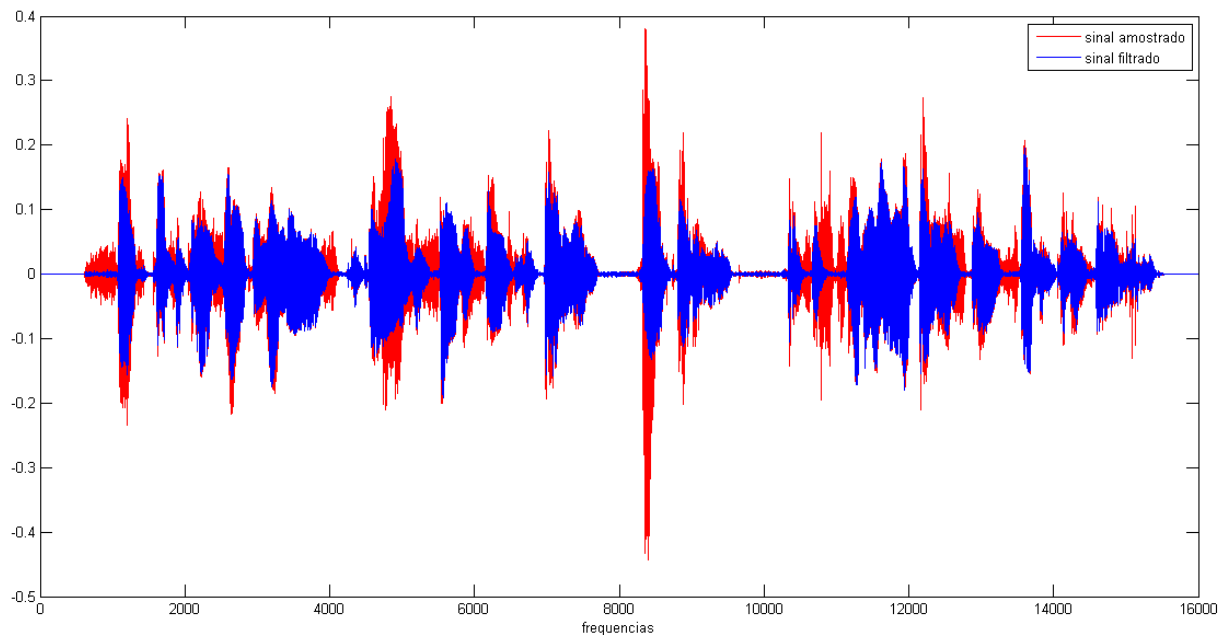


FIGURA 9: SINAL DE VOZ MASCULINA FILTRADO EM UM PASSA-BAIXA COM 1kHz DE CORTE

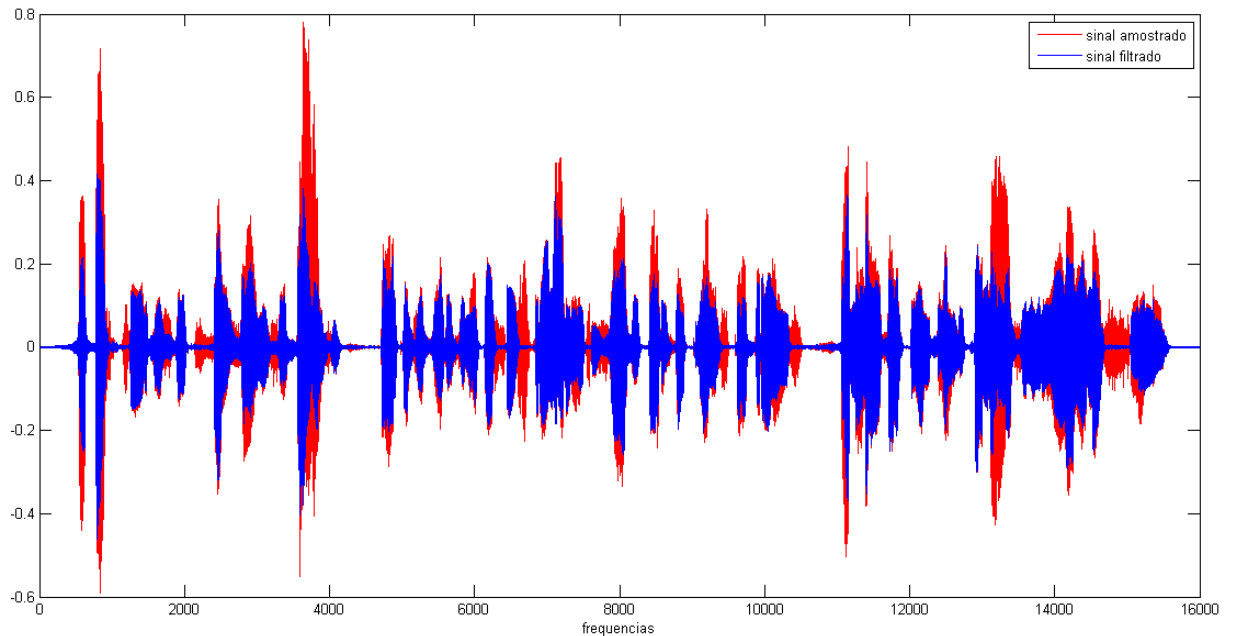


FIGURA 10: SINAL DE VOZ FEMININA FILTRADO EM UM PASSA-BAIXA COM 1kHz DE CORTE

Após o filtro, ambos os sinais foram atenuados nas frequências maiores que 1kHz (a frequência de corte) e isto refletiu no áudio que passou a ser mais pausado e mais grave.

#### 4.7. Para cada um dos dois sinais de voz, acrescente ruído branco Gaussiano com Relação Sinal-Ruído de 3 e 10 dB.

Para cada um dos sinais, voz masculina e voz feminina, foi adicionado um ruído Gaussiano com relação sinal ruído (RSR) de 3dB e 10dB. Ao adicionar um ruído com RSR de 3dB, o sinal original sofreu uma atenuação significativa de potência. Com o ruído de RSR de 10dB, a atenuação também foi observada porém com impacto menor em relação ao anterior. Este comportamento era esperado uma vez que quanto maior o ruído menor a relação com a potência do sinal.

Foi possível observar, para ambos os sinais, que ao adicionar o ruído gaussiano a voz ficou mais grave e pausada (pronúncia devagar) em relação ao sinal original.

As figuras de 11 a 14 apresentam a Densidade Espectral de Potência desses sinais com ruído gaussiano.

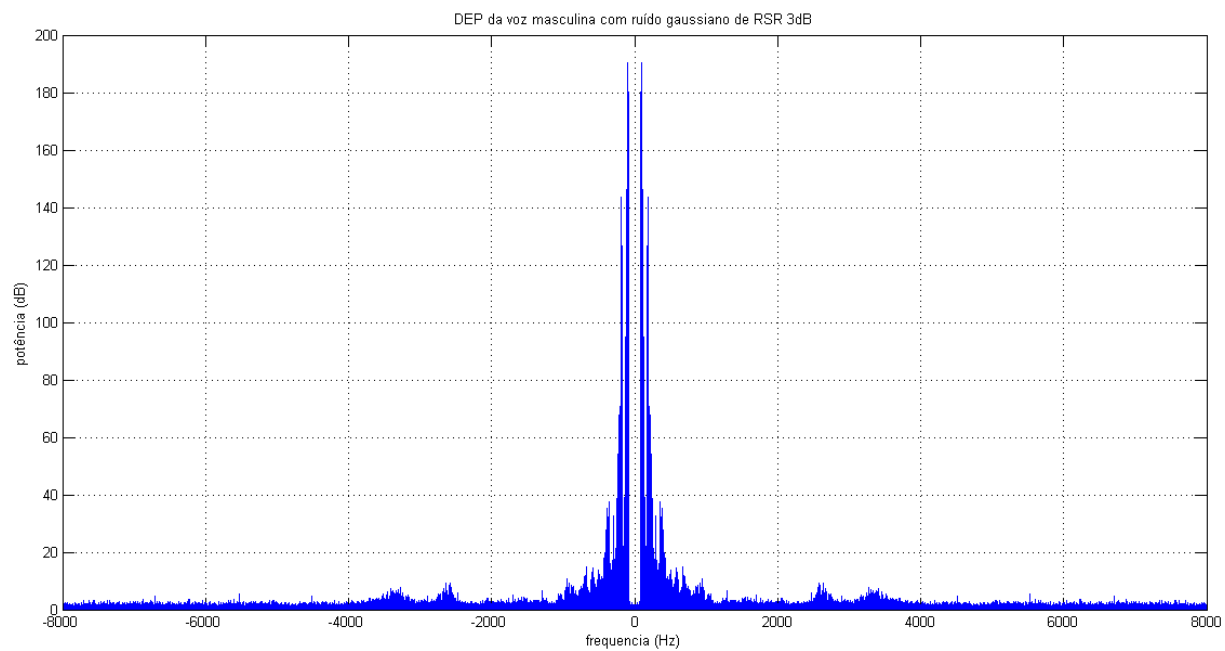


FIGURA 11: DEP DA VOZ MASCULINA COM RUIÍDO GAUSSIANO COM RSR DE 3dB

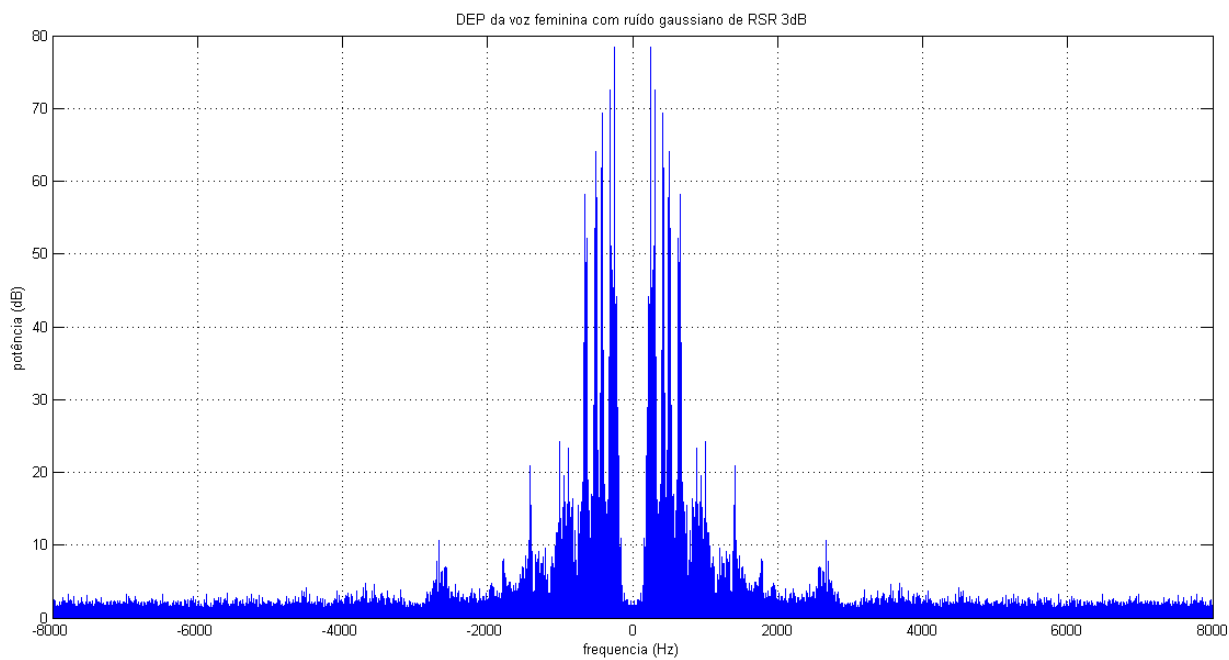


FIGURA 12: DEP DA VOZ FEMININA COM RUIÍDO GAUSSIANO COM RSR DE 3dB

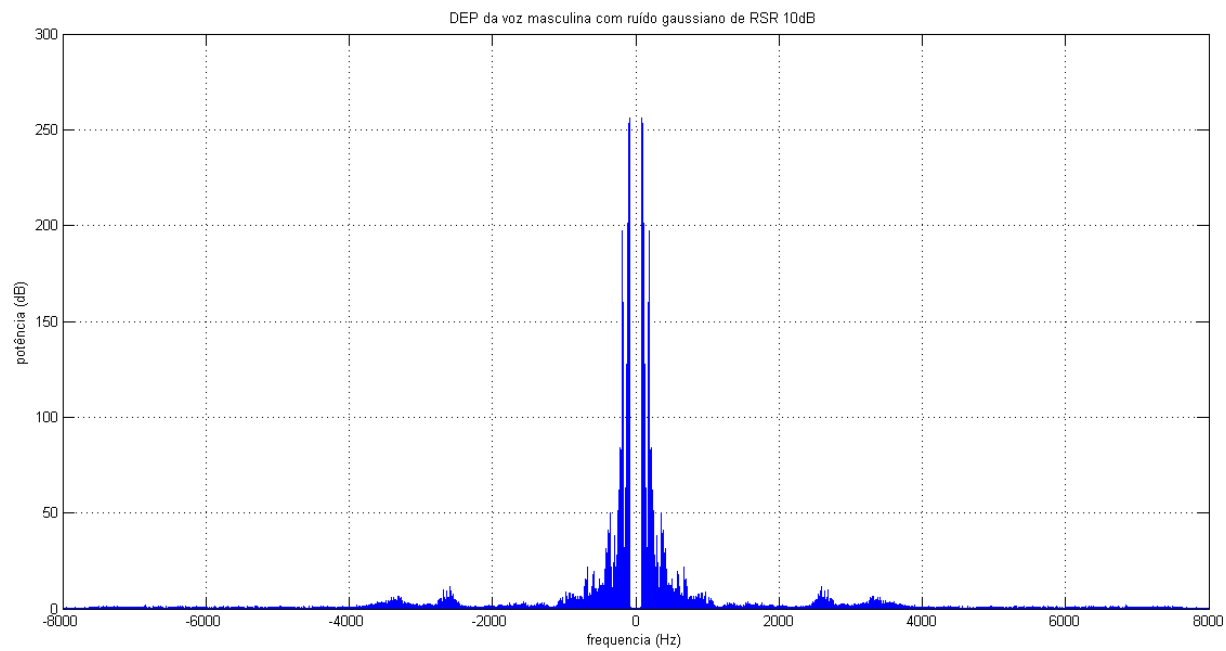


FIGURA 13: DEP DA VOZ MASCULINA COM RUÍDO GAUSSIANO COM RSR DE 10dB

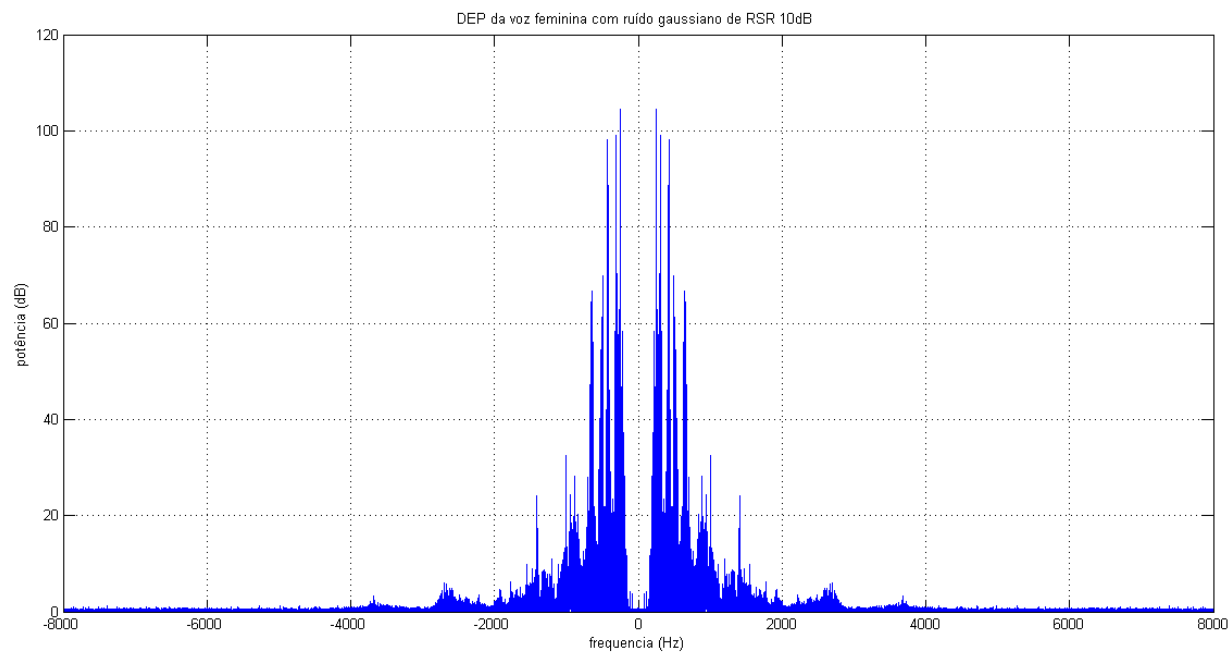


FIGURA 14: DEP DA VOZ FEMININA COM RUÍDO GAUSSINO COM RSR DE 10dB

#### 4.8. Implementar um filtro de Wiener e plotar o sinal filtrado na frequência do filtro e a Densidade Espectral de Potência na saída do filtro.

Filtro de Wiener é usado para reduzir o ruído presente em um sinal de entrada de modo que o sinal de saída do filtro seja o mais próximo possível do sinal original sem ruído. O critério de desempenho é baseado no *mean square error* (MSE).

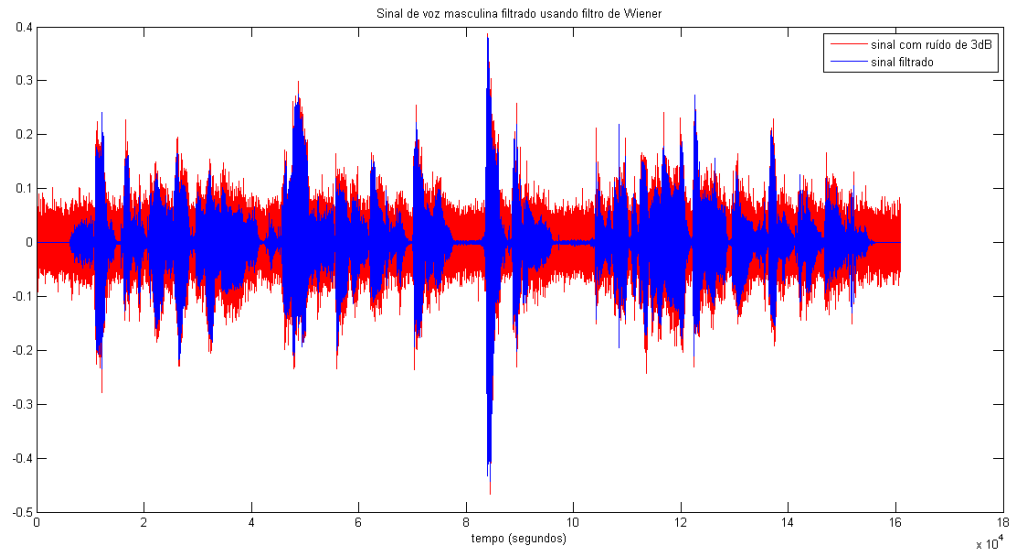


FIGURA 15: SINAL DE VOZ MASCULINA FILTRADO USANDO FILTRO DE WIENER

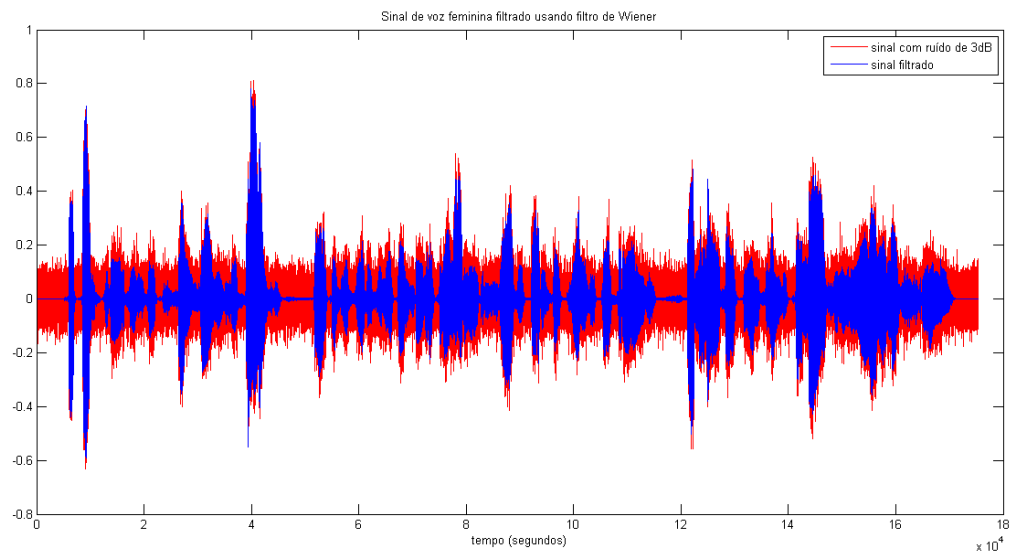


FIGURA 16: SINAL DE VOZ FEMININA FILTRADO USANDO FILTRO DE WIENER

O áudio do sinal de voz filtrado é parecido com o áudio do sinal amostrado para ambos os sinais.

## 5. Conclusões

Processamento de sinais tem grande aplicação na recuperação de sinais corrompidos ou degradados pelo meio de transmissão. Foi observado que um sinal amostrado possui uma pequena distinção do sinal original digitalizado. Esta distinção pode ser explicada pela transformação do sinal original contínuo para o sinal discreta com taxa de amostragem fixa.

Outro ponto observado foi a percepção, através do áudio, do ruído branco adicionado ao sinal de voz e a possibilidade de manipulação deste processo. É possível implementar um sistema para reter o sinal desejado e bloquear ou rejeitar o sinais indesejados, no caso o ruído.

## 6. Referências Bibliográficas

- [1] ITU-T Test Signals for Telecommunication Systems. <http://www.itu.int/net/itu-t/sigdb/genaudio/AudioForm-g.aspx?val=1000050>

## 7. Anexo

```
% Comunicacoes Moveis - Modulo 01 - Trabalho 01
% Autor: Loide Mara Verdes
% 28/09/2014

%parametros gerais
n_samples = 512;

%----- questao 1
% Carrega os arquivos .wav na pasta  portuguese_br
h_file = 'portugues_br/Port_m2.wav';
m_file = 'portugues_br/Port_f2.wav';
[h_y, h_fs, h_nb] = wavread(h_file);
[m_y, m_fs, m_nb] = wavread(m_file);

%----- questao 2
%plota as curvas para a voz masculina e feminina, respectivamente, em
%função do tempo
h_t = [0:1/h_fs:(length(h_y)-1)/h_fs];
plot(h_t,h_y)
xlabel('tempo (segundos)')
title('Ondas representando a voz masculina')
grid;

m_t = [0:1/m_fs:(length(m_y)-1)/m_fs];
figure;
plot(m_t,m_y)
xlabel('tempo (segundos)')
title('Ondas representando a voz feminina')
grid;

%----- questao 3
%estima autocorrelacao entre as amostras
[h_corr, h_lag] = xcorr(h_y,n_samples,'coeff');
figure;
stem(h_lag,h_corr)
xlabel('Lag')
title('Autocorrelação da voz masculina')
grid;

[m_corr, m_lag] = xcorr(m_y,n_samples,'coeff');
figure;
stem(m_lag,m_corr)
xlabel('Lag')
title('Autocorrelação da voz feminina')
grid;

%----- questao 4
%estima DEP usando FFT sobre a autocorrelação
%plota em dB

h_pds_db = abs(fftshift(fft(h_corr)));
h_freq = -h_fs/2:h_fs/length(h_corr):h_fs/2-(h_fs/length(h_corr));
figure;
plot(h_freq, h_pds_db)
```



```

ylabel('potência (dB)')
xlabel('frequencia (Hz)')
title('DEP estimada usando FFT sobre a autocorrelação da voz masculina')
grid;

m_pds_db = abs(fftshift(fft(m_corr)));
m_freq = -m_fs/2:m_fs/length(m_corr):m_fs/2-(m_fs/length(m_corr));
figure;
plot(m_freq, m_pds_db)
ylabel('potência (dB)')
xlabel('frequencia (Hz)')
title('DEP estimada usando FFT sobre a autocorrelação da voz feminina')
grid;

%plota em linear
h_pds_linear = db2pow(h_pds_db);
figure;
plot(h_freq, h_pds_linear)
ylabel('potência (W)')
xlabel('frequencia (Hz)')
title('DEP estimada usando FFT sobre a autocorrelação da voz masculina')
grid;

m_pds_linear = db2pow(m_pds_db);
figure;
plot(m_freq, m_pds_linear)
ylabel('potência (W)')
xlabel('frequencia (Hz)')
title('DEP estimada usando FFT sobre a autocorrelação da voz feminina')
grid;

%----- questao 5
%estima a largura de banda essencial
h_E = sum(abs(h_y.^2));
h_bw = 0.95 * h_E;

m_E = sum(abs(m_y.^2));
m_bw = 0.95 * m_E;

%----- questao 6
%filtra o sinal em um passa-baixa de frequencia de corte 1kHz
h_dft = fftshift(fft(h_y));
h_index=round(1000/(h_fs/length(h_y)));

h_zeros=zeros(1,length(h_dft)/2-h_index);
h_ones=ones(1,h_index);
h_filter=[h_zeros,h_ones,h_ones,h_zeros];

h_signal_filtered = h_dft.*h_filter';
h_signal_filtered = fftshift(h_signal_filtered);
h_signal_filtered = real(ifft(h_signal_filtered));
% sound(h_signal_filtered);
h_f = 0:h_fs/length(h_y):h_fs-(h_fs/length(h_y));
figure;
plot(h_f,h_y, 'r')

```

```

xlabel('frequencias');
hold;
plot(h_f,h_signal_filtered, 'b')
legend('sinal amostrado','sinal filtrado');

m_dft = fftshift(fft(m_y));
m_index=round(1000/(m_fs/length(m_y)));

m_zeros=zeros(1,length(m_dft)/2-m_index);
m_ones=ones(1,m_index);
m_filter=[m_zeros,m_ones,m_ones,m_zeros];

m_signal_filtered = m_dft.*m_filter';
m_signal_filtered = fftshift(m_signal_filtered);
m_signal_filtered = real(ifft(m_signal_filtered));
% sound(m_signal_filtered);
m_f = 0:m_fs/length(m_y):m_fs-(m_fs/length(m_y));
figure;
plot(m_f,m_y, 'r')
xlabel('frequencias')
hold;
plot(m_f,m_signal_filtered, 'b')
legend('sinal amostrado','sinal filtrado');

%----- questao 7
%adiciona ruido branco gaussiano com RSR 3 e 10 dB e plota a DEP com ruido
h_noised_3 = awgn(h_y, 3, 'measured');
%sound(h_noised_3);

h_xcorr_noised_3 = xcorr(h_noised_3, 'coeff');
h_pds_noised_3 = abs(fftshift(fft(h_xcorr_noised_3)));
h_freq_3 = -h_fs/2:h_fs/length(h_xcorr_noised_3):h_fs/2-(h_fs/length(h_xcorr_noised_3));
figure;
plot(h_freq_3, h_pds_noised_3)
ylabel('potência (dB)')
xlabel('frequencia (Hz)')
title('DEP da voz masculina com ruído gaussiano de RSR 3dB')
grid;

h_noised_10 = awgn(h_y, 10, 'measured');
%sound(h_noised_10);

h_xcorr_noised_10 = xcorr(h_noised_10, 'coeff');
h_pds_noised_10 = abs(fftshift(fft(h_xcorr_noised_10)));
h_freq_10 = -h_fs/2:h_fs/length(h_xcorr_noised_10):h_fs/2-(h_fs/length(h_xcorr_noised_10));
figure;
plot(h_freq_10, h_pds_noised_10)
ylabel('potência (dB)')
xlabel('frequencia (Hz)')
title('DEP da voz masculina com ruído gaussiano de RSR 10dB ')
grid;

m_noised_3 = awgn(m_y, 3, 'measured');

```

```

%sound(m_noised_3);

m_xcorr_noised_3 = xcorr(m_noised_3, 'coeff');
m_pds_noised_3 = abs(fftshift(fft(m_xcorr_noised_3)));
m_freq_3 = -m_fs/2:m_fs/length(m_xcorr_noised_3):m_fs/2-
(m_fs/length(m_xcorr_noised_3));
figure;
plot(m_freq_3, m_pds_noised_3)
ylabel('potência (dB)')
xlabel('frequencia (Hz)')
title('DEP da voz feminina com ruído gaussiano de RSR 3dB')
grid;

m_noised_10 = awgn(m_y, 10, 'measured');
%sound(m_noised_10);

m_xcorr_noised_10 = xcorr(m_noised_10, 'coeff');
m_pds_noised_10 = abs(fftshift(fft(m_xcorr_noised_10)));
m_freq_10 = -m_fs/2:m_fs/length(m_xcorr_noised_10):m_fs/2-
(m_fs/length(m_xcorr_noised_10));
figure;
plot(m_freq_10, m_pds_noised_10)
ylabel('potência (dB)')
xlabel('frequencia (Hz)')
title('DEP da voz feminina com ruído gaussiano de RSR 10dB ')
grid;

%----- questao 8
%implementar um filtro de weiner
h_w = h_y ./ h_noised_3; %h_noised_3 = h_y + h_noised_3dB
h_filtered = h_w .* h_noised_3;
%sound(h_filtered);

figure;
plot(h_noised_3, 'r')
xlabel('tempo (segundos)')
hold;
plot(h_filtered, 'b')
xlabel('tempo (segundos)')
legend('sinal com ruído de 3dB', 'sinal filtrado');
title('Sinal de voz masculina filtrado usando filtro de Wiener');

m_w = m_y ./ m_noised_3; %h_noised_3 = h_y + h_noised_3dB
m_filtered = m_w .* m_noised_3;
%sound(m_filtered);

figure;
plot(m_noised_3, 'r')
xlabel('tempo (segundos)')
hold;
plot(m_filtered, 'b')
xlabel('tempo (segundos)')
legend('sinal com ruído de 3dB', 'sinal filtrado');
title('Sinal de voz feminina filtrado usando filtro de Wiener');

```