FABRÍCIO LOPES SANCHEZ

**ANÁLISE CEPSTRAL BASEADA EM
DIFERENTES FAMÍLIAS DE TRANSFORMADA
*WAVELET***

Dissertação de mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação Interunidades Bioengenharia - Escola de Engenharia de São Carlos / Faculdade de Medicina de Ribeirão Preto / Instituto de Química de São Carlos da Universidade de São Paulo como parte dos requisitos para a obtenção do título de mestre em Bioengenharia.

Área de Concentração: Bioengenharia

Orientador: Prof. Dr. Carlos Dias Maciel

São Carlos
2008

AUTORIZO A REPRODUÇÃO E DIVULGAÇÃO TOTAL OU PARCIAL DESTE TRABALHO, POR QUALQUER MEIO CONVENCIONAL OU ELETRÔNICO, PARA FINS DE ESTUDO E PESQUISA, DESDE QUE CITADA A FONTE.

Ficha catalográfica preparada pela Seção de Tratamento
da Informação do Serviço de Biblioteca – EESC/USP

S211a	Sanchez, Fabrício Lopes Análise cepstral baseada em diferentes famílias de transformada <i>Wavelet</i> / Fabrício Lopes Sanchez ; orientador Carlos Dias Naciel. -- São Carlos, 2008. Dissertação (Mestrado-Programa de Pós-Graduação e Área de Concentração em Bioengenharia) -- Escola de Engenharia de São Carlos/Faculdade de Medicina de Ribeirão Preto/Instituto de Química de São Carlos da Universidade de São Paulo, 2008. 1. Transformada discreta <i>Wavelet</i>. 2. Transformada discreta de Fourier. 3. Análise Cepstral. 4. Processamento digital de sinais de fala. 5. Período de <i>pitch</i>. I. Título.

Programa de Pós-Graduação Interunidades em Bioengenharia
EESC / FMRP / IQSC

FABRÍCIO LOPES SANCHEZ
MESTRADO EM BIOENGENHARIA

DISSERTAÇÃO APRESENTADA AO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO
INTERUNIDADES BIOENGENHARIA EESC/FMRP/IQSC DA UNIVERSIDADE DE
SÃO PAULO PARA OBTENÇÃO DO TÍTULO DE MESTRE.

Aprovado em: 02/12/08

PROF. DR. CARLOS DIAS MACIEL (orientador)
Escola de Engenharia de São Carlos - USP

PROF. DR. JOSÉ CARLOS PEREIRA
Escola de Engenharia de São Carlos - USP

PROF. DR. RODRIGO CAPOBIANCO GUIDO
Pesquisador do Instituto de Física de São Carlos - USP

DEDICATÓRIA

Este trabalho é dedicado aquelas pessoas que fazem dele o mais valioso e importante dentre todos – A minha família.

AGRADECIMENTOS

A Deus, pela capacidade intelectual mínima necessária para a realização deste trabalho, pela saúde, pela proteção nas constantes viagens a São Carlos e pela reposição do ânimo e da fé, que em muitas ocasiões se fizeram ausentes neste período.

Ao Prof. Dr. Carlos Dias Maciel pela ajuda fundamental e decisiva nos momentos de maior dificuldade.

A minha família, meus pais João Ademir Sanchez e Dirce Maria Lopes Sanchez e a mulher da minha vida, Maria Angélica S. F. Sanchez, que são as luzes que iluminam meu caminho quando tudo se apaga.

Em especial ao amigo e Prof. Dr. Rodrigo Capobianco Guido que em todos os momentos contribuiu fortemente sem impor qualquer restrição ou obstáculo com seus amplos conhecimentos, sem os quais, este trabalho não se tornaria realidade.

Aos amigos, Lucimar Sasso Vieira e Sylvio Barbon Junior que contribuíram com seus conhecimentos e companheirismo neste período.

“Se A é o sucesso, então A é igual Y mais X mais Z. O trabalho é X; Y é o lazer e Z é manter a boca fechada”.

Albert Einstein

RESUMO

SANCHEZ, Fabrício Lopes. **Análise cepstral baseada em diferentes famílias de transformada *Wavelet***. 2008, 96p. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação Interunidades Bioengenharia - Escola de Engenharia de São Carlos / Faculdade de Medicina de Ribeirão Preto / Instituto de Química de São Carlos da Universidade de São Paulo, São Carlos, 2008.

Este trabalho apresenta um estudo comparativo entre diferentes famílias de Transformada Wavelet aplicadas à análise cepstral de sinais digitais de fala humana, com o objetivo específico de determinar o período de *pitch* dos mesmos e, ao final, propõe um algoritmo diferencial para realizar tal operação, levando-se em consideração aspectos importantes do ponto de vista computacional, tais como: desempenho, complexidade do algoritmo, plataforma utilizada, dentre outros. São apresentados também, os resultados obtidos através da implementação da nova técnica (baseada na transformada *wavelet*) em comparação com a abordagem tradicional (baseada na transformada de Fourier). A implementação da técnica foi testada em linguagem C++ padrão ANSI sob as plataformas Windows XP Professional SP3, Windows Vista Business SP1, Mac OSX Leopard e Linux Mandriva 10.

Palavras-Chave: Transformada discreta *Wavelet*, Transformada Discreta de Fourier, Análise Cepstral, processamento digital de sinais de fala, período de *pitch*.

ABSTRACT

SANCHEZ, Fabrício Lopes. **Cepstral analysis based on different family of wavelet transform**. 2008, 96p. Dissertation (Masters) – Programa de Pós-Graduação Interunidades Bioengenharia - Escola de Engenharia de São Carlos / Faculdade de Medicina de Ribeirão Preto / Instituto de Química de São Carlos da Universidade de São Paulo, São Carlos, 2008.

This work presents a comparative study between different family of wavelets applied on cepstral analysis of the digital speech human signal with specific objective for determining of pitch period of the same and in the end, proposes an differential algorithm to make such a difference operation take into consideration important aspects of computational point of view, such as: performance, algorithm complexity, used platform, among others. They are also present, the results obtained through of the technique implementation compared with the traditional approach. The technique implementation was tested in C++ language standard ANSI under the platform Windows XP Professional SP3 Edition, Windows Vista Business SP1, MacOSX Leopard and Linux Mandriva 10.

Keywords: Discrete Wavelet transform, Discrete Fourier transform, digital speech signal processing, cepstrum analysis, pitch period.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Interpretação física simplificada do sistema biofísico gerador da voz.....	22
Figura 2 – (a) Visão básica do sistema de produção da voz humana; (b) Detalhes do trato vocal humano e suas subpartes.....	23
Figura 3 – [acima] Espectro logarítmico de um sinal <i>voiced</i> ; [abaixo] Cepstrum correspondente. O <i>pitch</i> aparece pontiagudo.....	27
Figura 4 – Linguagem hipotética para o cômputo do cepstrum com a DFT/FFT.....	29
Figura 5 – Funcionamento da DWT, exemplificado para um sinal $s[n]$ de n amostras discretas e frequência máxima f_m , decomposição até o terceiro nível	31
Figura 6 – Relação entre os filtros de análise e síntese.....	33
Figura 7 – Arquitetura do sistema computacional proposto.....	38
Figura 8 – Pseudo-código para o algoritmo proposto.....	38
Figura 9 – Resultados obtidos através da análise de cepstral baseada na Transformada Discreta de Fourier.....	42

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 – AC por Fourier <i>versus</i> Wavelet Daubechies 46 – PacienteMulher1_A.....	49
Gráfico 2 – AC por Fourier <i>versus</i> Wavelet Daubechies 46 – PacienteMulher2_A.....	49
Gráfico 3 – AC por Fourier <i>versus</i> Wavelet Daubechies 46 – PacienteHomem1_A.....	50
Gráfico 4 – AC por Fourier <i>versus</i> Wavelet Daubechies 46 – PacienteHomem2_A.....	50
Gráfico 5 – AC por Fourier <i>versus</i> Wavelet Daubechies 46 – PacienteHomem3_A.....	51
Gráfico 6 – AC por Fourier <i>versus</i> Wavelet Daubechies 46 – PacienteMulher3_A.....	51
Gráfico 7 – AC por Fourier <i>versus</i> Wavelet Daubechies 46 – PacienteMulher4_A.....	51
Gráfico 8 – AC por Fourier <i>versus</i> Wavelet Daubechies 46 – PacienteMulher5_A.....	52
Gráfico 9 – AC por Fourier <i>versus</i> Wavelet Daubechies 46 – PacienteHomem4_A.....	52

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Relação das principais famílias de <i>wavelet</i> encontradas e testadas neste trabalho.....	36
Tabela 2 – Resultados obtidos através da análise cepstral baseada na transformada de Fourier.....	41
Tabela 3 – Resultados obtidos através da análise cepstral com DWTP com diversas famílias e suportes.....	43

LISTA DE APÊNDICES

Apêndice A: Coeficientes de filtros <i>wavelet</i> utilizados	59
Apêndice B: Implementação da técnica proposta	75

LISTA DE ABREVIACÕES

AC – Análise Cepstral

DWT – *Discrete Wavelet Transform*

IDWT – *Inverse Discrete Wavelet Transform*

FFT – *Fast Fourier Transform*

IFFT – *Inverse Fast Fourier Transform*

DFT – *Discrete Fourier Transform*

IDFT – *Inverse Discrete Fourier Transform*

FT – *Fourier Transform*

IFT – *Inverse Fourier Transform*

TF – Transformada de Fourier

TFI – Transformada de Fourier Inversa

ANSI – *American National Standards Institute*

DSP – *Digital Signal Processing*

DWTP – *Discrete Wavelet Transform Packet*

IDWTP – *Inverse Discrete Wavelet Transform Packet*

SP3 – *Service Pack 3*

IBM – *International Business Machine*

MRA – *Multi Resolution Analysis*

PRFB – *Perfect Reconstruction Filter Banks*

NFO – *Natural Filters Ordering*

FBO – *Filters Bank Ordering*

PCM – *Pulse-code Modulation*

FMRP – Faculdade de Medicina de Ribeirão Preto

PC – *Personal Computer*

DDR2 – *Double Data Rate 2*

RAM – *Random Access Memory*

MS – *Microsoft Corporation*

GB – *Giga Byte*

MB – *Mega Byte*

KB – *Kylo Byte*

QMF – *Quadrature Mirror Filters*

HD – *Hard-Disk*

SATA – *Serial Advanced Tecnology Attachment*

IDE – *Integrated Development Enviroment*

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO E OBJETIVOS	16
1.1. INTRODUÇÃO.....	16
1.2. OBJETIVOS GERAIS E ESPECÍFICOS.....	19
2. ESTADO DA ARTE.....	20
2.1. O PERÍODO DE <i>PITCH</i> E SUAS CARACTERÍSTICAS	20
2.1.1. SISTEMAS GERADORES DA FALA.....	20
2.1.2. O PROCESSO DE PRODUÇÃO DA VOZ.....	22
2.2. METODOLOGIAS PARA DETERMINAÇÃO DO PERÍODO DE <i>PITCH</i>	23
2.2.1. A AUTOCORRELAÇÃO	24
2.2.2. A TRANSFORMADA RÁPIDA DE FOURIER	25
2.2.3. A ANÁLISE CEPSTRAL BASEADA NA TRANSFORMADA DE FOURIER	26
2.3. A TRANSFORMADA DISCRETA <i>WAVELET</i>	29
2.3.1. O CÁLCULO DA DWT	34
2.3.2. FAMÍLIAS DE TRANSFORMADA <i>WAVELET</i>	35
3. MATERIAIS E MÉTODOS.....	37
3.1. CEPSTRUM BASEADO NA DWT.....	37
3.2. DETALHAMENTO DA TÉCNICA PROPOSTA	37
4. RESULTADOS E DISCUSSÕES	40
4.1. AVALIAÇÃO DA TÉCNICA PROPOSTA.....	40
4.1.1. A PAUTA DE TESTES.....	40
4.2. DISCUSSÃO DOS RESULTADOS	53

4.2.1. PRECISÃO NA DETERMINAÇÃO DO <i>PITCH</i>	53
4.2.2. DESEMPENHO	53
5. CONCLUSÕES E SUGESTÕES	55
5.1. CONCLUSÕES	55
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	57
6. APÊNDICES	59
A - COEFICIENTES DE FILTROS <i>WAVELET</i> UTILIZADOS.....	59
B - IMPLEMENTAÇÃO DA TÉCNICA PROPOSTA	
.....	75

Capítulo 1

INTRODUÇÃO E OBJETIVOS

1.1. INTRODUÇÃO

O som é um dos fenômenos da natureza que possui maior intimidade com o ser humano. Somos confrontados com os sons desde o instante em que despertamos os nossos sentidos por ocasião do nascimento e mantemos contato com ele em geral até o fim de nossa vida. Tão importante quanto ouvir, é fundamental falar. De fato, tanto o sistema auditivo quanto o sistema fonético, são de fundamental importância na vida das pessoas e, por mais incrível que possa parecer, eles estão intimamente relacionados. Em decorrência deste fato, desde a primeira metade do século VI a.C. e início do século V a.C., o filósofo e matemático grego Pitágoras (LUCHETTA; MILIES, 2008), iniciou os primeiros estudos a respeito do sistema auditivo/perceptual humano e da altura (*pitch*) dos sons (CARNEIRO; KNOBEL, 2005).

O termo *pitch* apresenta diferentes definições em diferentes áreas de estudo da voz, sendo indicada algumas vezes como frequência fundamental, período de tom, ou mesmo qualidade vocal. A nomenclatura utilizada neste trabalho indica o *pitch* como sendo o valor do período médio do sinal de voz analisado, sendo o valor inverso deste igual à frequência fundamental (RAZERA, 2004).

Um tom harmônico complexo (CARNEIRO; KNOBEL, 2005), produzido pela voz ou por muitos instrumentos musicais, pode ser analisado em seu fundamental ou parcial cujas frequências são múltiplos inteiros da frequência fundamental. As formas de onda combinadas se repetem na frequência fundamental.

Especificamente, neste trabalho, os sons nos quais se pretende extrair informações são os sons oriundos da fala, portanto, os estudos comparativos realizados

e a nova técnica proposta, são voltados inteiramente para a determinação do período de *pitch* para sinais digitais de fala humana, visando aplicar este resultado obtido, em sistemas de reconhecimento automático de locutor (COLEMAN, 2005), *voice-morphing* (VIEIRA; GUIDO, 2007), sistemas automáticos para síntese de fala (COLEMAN, 2005), dentre muitos outros.

Existem diversas técnicas para a determinação do período de *pitch* de um sinal de áudio e, mais especificamente no contexto deste trabalho, os sinais de fala humana. Dentre estas, a Sirene de Seebeck (DEUTSCH; FÖDERMAYR, 2008) destaca-se como pioneira. A técnica citada anteriormente constitui-se de um dispositivo físico, uma grande circunferência de metal com furos estrategicamente distribuídos que reage à execução do som. Outra técnica a ser citada, é a auto-correlação, cujo funcionamento pode ser visto na Seção 2.2.1.

Neste trabalho, a técnica adotada para determinação do período de *pitch* é a análise cepstral (COLEMAN, 2005). Tal procedimento é um dos principais existentes atualmente no que tange a determinação do período de *pitch* em sinais de fala humana e cuja principal abordagem é através da utilização da transformada discreta de Fourier (OPPENHEIM; SCHAFER; BUCK, 1999). A descrição minuciosa da técnica citada é realizada no Capítulo 2.

Neste trabalho, adotou-se como ferramenta matemática de estudo associada à análise cepstral a transformada discreta *Wavelet-Packet* (BARBON; GUIDO, 2007) com suas principais famílias e respectivos suportes. Assim, este trabalho apresenta um técnica diferencial para a determinação do período de *pitch*.

Como ferramentas computacionais para a implementação do algoritmo proposto, as plataformas *Windows XP Professional SP3*, *Windows Vista Business*, *MacOSX Leopard* e *Linux Mandriva 10* e a linguagem de programação de alto nível C++, padrão ANSI (STROUSTRUP, 2004) foram utilizadas.

A escolha das plataformas citadas acima se deu por serem as mais populares no mercado de sistemas operacionais e por apresentarem boa relação de compatibilidade com as ferramentas de trabalho escolhidas.

A linguagem de programação C++ foi escolhida para a implementação do algoritmo por uma gama de fatores. Podemos citar como principais os seguintes:

- É uma linguagem extremamente rápida;
- É uma linguagem compilada e, portanto, gera arquivo executável, fato este que é desejável em nossa aplicação;
- É uma linguagem que possui boa relação com operações matemáticas de alta complexidade;
- Possui ótima relação de compatibilidade com as plataformas escolhidas;

Conforme será explicitado no decorrer deste trabalho, os resultados obtidos são considerados compatíveis com os resultados apontados na literatura, haja vista a baixa complexidade do algoritmo computacional em questão e a precisão dos cálculos, bem como as comparações realizadas entre as diversas famílias *wavelet* testadas.

O capítulo 2 faz uma vasta revisão na literatura sobre análise cepstral, a transformada discreta *wavelet* e apresenta os conceitos fundamentais relativos ao sistema humano de geração da fala. A análise cepstral, descreve o esquema funcional da técnica baseada na transformada discreta de Fourier e apresenta suas principais vantagens e desvantagens; Posteriormente, apresenta-se a transformada discreta *wavelet*, bem como os principais conceitos relacionados à mesma. Finalmente, apresenta-se o funcionamento básico do sistema biofísico gerador da fala;

No capítulo 3 é apresentada a descrição detalhada da técnica adotada, isto é, análise cepstral baseada em diferentes famílias de transformada *wavelet* (do tipo *packet*) com diferentes suportes; Em seguida, apresentam-se os critérios adotados para a realização do estudo comparativo, bem como o esquema funcional do mesmo;

No capítulo 4 são apresentados, de maneira detalhada, todos os resultados associados aos testes realizados pelo algoritmo proposto, com as diferentes famílias de *wavelet* com seus respectivos suportes em comparação com a abordagem tradicional (baseada na transformada discreta de Fourier).

Finalmente, no capítulo 5, são apresentadas as conclusões que foram extraídas de todo o processo de desenvolvimento do trabalho.

Nos apêndices, disponibilizamos o código fonte desenvolvido em linguagem C++ na íntegra;

1.2. OBJETIVOS GERAIS E ESPECÍFICOS

Este trabalho propõe a implementação de um algoritmo diferencial baseado fundamentalmente em transformada discreta *wavelet* para a extração do *cepstrum* de sinais digitais de fala.

Os objetivos que pretende-se alcançar com a implementação da referida técnica, são apresentados a seguir.

O sistema proposto deve ser suficientemente capaz de, ao receber um sinal digital de voz, aplicar a análise cepstral baseada na transformada discreta de Fourier, obtendo assim o espectro de potência do sinal, e, por conseguinte, determinar o ponto de *pitch*.

Posteriormente, de posse da técnica proposta, isto é, aquela baseada na transformada *wavelet-packet*, o sistema deve ser suficientemente capaz de, ao receber determinado sinal digital de voz, aplicar a mesma e obter o novo espectro de potência. Em seguida o mesmo deve, determinar qual o período de *pitch*.

O principal dos objetivos que se pretende alcançar ao final deste trabalho é encontrar a melhor família de *wavelet* com seu respectivo suporte, dentre as principais famílias existentes, para realizar a tarefa de extração do período de *pitch* dos sinais de fala;

Finalmente, o algoritmo proposto deve possuir um excelente desempenho em vários aspectos, mas, principalmente no que diz respeito ao processamento computacional. O sistema ao receber determinada entrada, deve ser suficientemente capaz de processá-la e apresentar a resposta em tempo real. Este é um dos fatores pelos quais a linguagem C++ foi escolhida para a implementação do mesmo, pois, é uma linguagem extremamente ágil com operações matemáticas.

Capítulo 2

ESTADO DA ARTE

2.1. O *PITCH* E SUAS CARACTERÍSTICAS

A partir daqui, será apresentada uma extensa revisão bibliográfica destacando os principais elementos constituintes deste trabalho, bem como os principais conceitos relacionados a cada um deles.

Este trabalho, como foi descrito na seção introdutória, possui como objetivo fundamental determinar automaticamente (com a utilização de computadores), o período de *pitch* de sinais digitais de fala, afim de que este possa servir de informação para sistemas que realizam operações com a fala, como por exemplo, *voice-morphing*. Assim, para fins de contextualização, faz-se necessária a revisão de certos conceitos prévios inerente ao sistema biofísico gerador de fala.

2.1.1. SISTEMAS GERADORES DA FALA

A produção de voz pelo corpo humano, embora seja um mecanismo repleto de detalhes, consiste basicamente da propulsão de ar pelos pulmões, seguida de um processo de equalização, realizado pelo trato vocal e elementos associados, como ilustram as Figuras 1 e 2. O primeiro detalhe a ser observado na Figura 1 é o fato de que as cordas vocais controlam o fluxo de ar gerado pela atividade pulmonar, fazendo com que esse sinal de excitação seja periódico, ou seja, vibrando uniformemente em determinada frequência, ou aperiódico, vibrando em diferentes frequências, similar a um sinal ruidoso. Se o sinal for periódico, este período é chamado de período de *pitch* e a voz produzida será classificada como fala vozeada, caso contrário a voz será classificada como fala não-vozeada.

No primeiro caso encontram-se basicamente as vogais, enquanto no segundo caso estão os demais sons. Dependendo de como agem as estruturas seguintes às cordas vocais, em particular o véu palatino, que controla a passagem do fluxo de ar pelo trato vocal ou nasal e os próprios tratos vocais e nasais, pode-se ainda refinar essa classificação dos sinais de voz da seguinte forma (DENG; O'SHAUGHNESSY, 2003):

- Fricativo: é um segmento não-vozeado que surge quando há fricção do ar em movimento contra a constrição, causando, em geral, uma turbulência de ar entre a língua e os dentes superiores. Exemplo: *th* na palavra *thin* da língua Inglesa.
- Plosivo: é um segmento não-vozeado impulsivo, como o *t* na palavra *top*.
- Sussurro: é um segmento não-vozeado onde uma barreira é criada nas cordas vocais de forma elas permaneçam parcialmente fechadas e sem oscilação, como ocorre quando se pronuncia o *h* na palavra *he*.
- Fricativos Vozeados: são fonemas vozeados, ou seja, de excitação periódica, porém misturado com ruído criado na constrição do trato vocal, atrás dos dentes e contra o palato. Exemplo: *z* na palavra *zebra*.
- Fricativos Não-vozeados: idem anterior, porém as cordas vocais não vibram simultaneamente com a fricção.
- Plosivos Vozeados: são fonemas vozeados, ou seja, de excitação periódica, porém misturado com ruído impulsivo criado no trato vocal.
- Plosivos Não-vozeados: idem anterior, porém as cordas vocais não vibram simultaneamente com o impulso. Exemplo: *b* na palavra *boat*.

Figura 1: Interpretação física simplificada do sistema biofísico gerador da voz

Qualquer palavra ou frase pronunciada por um locutor pode ser dividida em fonemas, cada qual podendo ser classificado como apresentado anteriormente.

2.1.2. O PROCESSO DE PRODUÇÃO DA VOZ

O modelo de produção da voz pode ser entendido como um gerador de sinal, periódico ou aperiódico, cuja saída é aplicada a um equalizador que ressalta determinadas frequências, conhecidas como frequências de ressonância, ou formantes, que correspondem aos pólos da função de transferência do trato vocal, abreviadas por $F_1, F_2, \dots, F_n$. A frequência de vibração das cordas vocais, que controla o fluxo de ar vindo do pulmão, é conhecida como frequência fundamental, que corresponde ao inverso do período de *pitch*, abreviada por F_0 . Para sons vozeados, F_0 tem um valor aproximadamente constante.

Figura 2: (a) Visão básica do sistema produção da voz humana. (b) Detalhes do trato vocal humano e suas subpartes.

Alterando os parâmetros $F_0, F_1, F_2, F_3, \dots, F_n$, pode-se produzir uma ampla gama de sinais de fala, com características diversas, isto é, locutor masculino ou feminino (F_0), jovem ou idoso dentre outras.

Durante a produção natural da voz, o sinal de excitação pode ser modelado como um sinal discreto $s[n]$, $n \in \mathbb{Z}$, no domínio do tempo. Da mesma forma, o trato vocal pode ser encarado como um equalizador, que possui função de transferência $F[z]$. Se a resposta ao impulso de $F[z]$ for representada por $f[n]$, então a saída do sistema, $y[n]$, que corresponde à voz produzida, é a convolução de $s[n]$ com $f[n]$, ou seja, $y[n] = s[n] * f[n]$. Esse modelo simplificado é extremamente útil para a extração de características do sinal de voz.

2.2. METODOLOGIAS PARA DETERMINAÇÃO DO PERÍODO DE *PITCH*

Esta seção apresenta uma revisão geral das principais metodologias e ferramentas matemáticas envolvidas no esquema funcional dos sistemas para extração do período de *pitch* de sinais de fala, enfatizando-as técnicas utilizadas na implementação do sistema descrito neste trabalho.

Razera (2004, p.2), afirma que o estudo dos algoritmos para determinação de *pitch* é uma pesquisa básica dentro da área de processamento de sinais de voz, e parte fundamental de muitas pesquisas ou aplicações comerciais. Estes algoritmos podem ser divididos em estimadores de valor médio para a frequência fundamental, e os determinadores que calculam o valor de cada período de um sinal de voz sustentada. Vários artigos encontrados na literatura discorrem sobre o assunto, sempre comparando algoritmos já testados e apresentando um novo algoritmo que se comporta melhor. Conforme afirma Razeraⁱ (2004 apud ANSERSON M.D., 1986) embora essas pesquisas venham explorando o assunto por vários anos, os melhores algoritmos apresentados atualmente não são significativamente melhores que os algoritmos de cinco ou 10 anos atrás, sendo necessários estatisticamente muitos algoritmos com novas técnicas para que algum destes obtenha melhores resultados que os anteriores, apresentando uma mudança significativa.

2.2.1. A AUTOCORRELAÇÃO

Razera (2004, p.18) afirma que a função de auto-correlação de um sinal é obtida pela seguinte equação:

$$\phi[k] = \sum_{m=-\infty}^{\infty} x[m]x[m+k] \quad (1)$$

se o sinal tem periodicidade P , então:

$$\phi[k+P] = \sum_{m=-\infty}^{\infty} x[m]x[m+k+P] = \sum_{m=-\infty}^{\infty} x[m]x[m+k] = \phi[k] \quad (2)$$

assim temos:

$\phi[k]$ tem um máximo em $k=0$.

A auto-correlação de um sinal periódico é periódica.

Estes dois fatos mostram que a função de auto-correlação terá picos para cada múltiplo inteiro do período P .

ⁱ ANDERSON, M. D. **Pitch determination of speech signals**. Massachusetts Institute of Technology, 1986.

2.2.2 A TRANSFORMADA RÁPIDA DE FOURIER

A FFT foi proposta por J.W. Cooley (IBM) e J.W. Tukey (Bell Labs) em 1965 como uma técnica diferencial à DFT, apresentando o grande benefício de economizar de forma considerável esforço computacional em seu processamento.

A técnica é baseada no princípio dos desdobramentos sucessivos, onde pode-se descrever a FFT como segue:

$$F(\omega) = \frac{1}{N} \sum_{x=0}^{N-1} f(x) W_N^{ux} \quad (3)$$

onde

$$W_N^{ux} = e^{-j2\pi / N} \quad (4)$$

Ao assumir-se $N = 2^n$, onde n é um número inteiro positivo, podemos re-escrever N , i.e., $N = 2M$, onde M é um inteiro positivo. Logo, podemos escrever a transformada de Fourier como segue:

$$F(\omega) = \frac{1}{2M} \sum_{x=0}^{2M-1} f(x) W_{2M}^{ux} \quad (5)$$

O somatório apresentado na Equação 5, pode ser re-escrito separadamente, como apresenta a Equação 6:

$$F(\omega) = \frac{1}{2} \left[\frac{1}{M} \sum_{x=0}^{M-1} f(2x) W_M^{u(2x)} + \frac{1}{M} \sum_{x=0}^{M-1} f(2x+1) W_{2M}^{u(2x+1)} \right] \quad (6)$$

Considerou-se que $W_{2M}^{2ux} = W_M^{ux}$, pode-se renomear a primeira e a segunda parte da soma, como a seguir:

$$F_{par}(\omega) = \frac{1}{M} \sum_{x=0}^{M-1} f(2x) W_M^{ux} \quad \omega = 0, 1, 2, 3, \dots, n \quad (7)$$

$$F_{impar}(\omega) = \frac{1}{M} \sum_{x=0}^{M-1} f(2x+1) W_{2M}^{ux} \quad \omega = 0, 1, 2, 3, \dots, n \quad (8)$$

Assim, podemos reescrever a equação da seguinte forma:

$$F(\omega) = F_{par}(\omega) + F_{impar}(\omega)W_{2M}^u \quad (9)$$

Uma vez que $W_M^{u+M} = W_M^u$ e $W_{2M}^{u+M} = -W_{2M}^u$, podemos re-combinar a $F_{par}(\omega)$ com $F_{impar}(\omega)$, obtendo a seguinte expressão:

$$F(\omega + M) = F_{par}(\omega) - F_{impar}(\omega)W_{2M}^u \quad (10)$$

Em termos computacionais, o número de operações para a DFT é proporcional a N^2 . Para cada um dos N valores de ω , realiza-se N multiplicações de X_n pela exponencial e $N-1$ adições dos resultados. Assim, para cada um dos ω termos, temos $O(N)$ operações. Finalmente, teremos $N \bullet O(N) = O(N^2)$ para transformada de Fourier discreta unidimensional. Como os termos da exponencial podem ser calculados uma única vez e posteriormente armazenados em uma tabela, os mesmos não são incluídos no cálculo do número de operações, resultando assim na baixa da ordem de complexidade computacional do algoritmo FFT, pois, o número de operações passa de $O(N^2)$ para $O(N \log_2 N)$.

2.2.3. A ANÁLISE CEPSTRAL BASEADA NA TRANSFORMADA DE FOURIER

A análise cepstral (COLEMAN, 2005), baseada na Transformada de Fourier (DFT ou FFT), é outra técnica bastante difundida no meio científico para a obtenção do período de *pitch* de sinais de fala. Neste trabalho, apresentamos um estudo comparativo entre a análise cepstral baseada na DFT (OPPENHEIM; SCHAFER; BUCK, 1999) e a análise cepstral baseada em Transformada Discreta *Wavelet* (BARBON; GUIDO, 2007), com suas diversas famílias de filtros e respectivos suportes.

Conforme afirma (DENG, O'SHAUGHNESSY, 2003), se $E[\omega]$ é o sinal de excitação no domínio da frequência e $H[\omega]$ representa a função de transferência do trato vocal, então, o espectro da fala é a multiplicação de ambos, isto é, $S[\omega] = E[\omega] \bullet H[\omega]$. A análise cepstral converte esse produto em uma soma espectral, como apresenta a equação 11:

$$\begin{aligned}
S[\omega] &= E[\omega] \cdot H[\omega] \Rightarrow \\
\log(S[\omega]) &= \log(E[\omega] \cdot H[\omega]) \Rightarrow \\
\log(S[\omega]) &= \log(E[\omega]) + \log(H[\omega])
\end{aligned}
\tag{11}$$

O espectro $E[\omega]$ é descrito por baixas frequências pois, consiste em ressonâncias mais suaves gerada pelo trato vocal, já o espectro $H[\omega]$ é consideravelmente maior pois, diz respeito ao *pitch*. Portanto, a análise cepstral separa linearmente as ressonâncias do trato vocal do sinal de excitação. Neste trabalho, a análise cepstral será utilizada para a determinação do período de *pitch*, p , o qual corresponde ao intervalo de tempo entre dois fechamentos glotais consecutivos, que controlam o fluxo de ar de $E[\omega]$.

Quefreny, em segundos, é a escala utilizada para mensurar o *cepstrum*. A Figura 3 ilustra a recém descrição da técnica.

Figura 3: [acima] Espectro logarítmico de um sinal voiced; [abaixo] Cepstrum correspondente. O período de pitch p aparece pontiagudo

Como pode ser visto em (BARBON; GUIDO, 2007), a DFT é a principal ferramenta matemática utilizada para efetuar a conversão de um sinal do domínio do tempo para o domínio da frequência. A transformada de Fourier inversa (IDFT - *Inverse Discrete Fourier Transform*) realiza a operação contrária. A DFT e a IDFT estão expressas respectivamente nas equações 12 e 13, onde $x[n]$ é o sinal no domínio do tempo, $X[\omega]$ é o correspondente no domínio da frequência, e N é o comprimento dos sinais.

$$X[\omega] = \sum_{n=0}^{N-1} x_n e^{-j2\pi n\omega/N} \quad (12)$$

$$x[n] = \sum_{\omega=0}^{N-1} X_{\omega} e^{j2\pi n\omega/N} \quad (13)$$

O algoritmo para extração de *pitch* baseado na DFT possui ordem de complexidade computacional quadrática (OPPENHEIM; SCHAFER; BUCK, 1999) em relação ao comprimento do sinal, isto é, $O(N^2)$, fato este que torna seu desempenho aquém do esperado para sistemas de processamento de fala. Entretanto, existem variações dos algoritmos da DFT e IDFT que realizam de forma consideravelmente mais eficiente seu cômputo. Tais algoritmos são conhecidos como Transformada Rápida de Fourier (FFT - *Fast Fourier Transform*) (STRANG; NGUYEN, 1997), cujo funcionamento pode ser visualizado na Seção 2.2.2, que reduzem a ordem de complexidade computacional da DFT.

O presente trabalho utiliza para efeitos de comparação entre as abordagens, a DFT e a FFT (sendo que para esta última, utilizou-se o algoritmo da FFT proposto em (FRIGO; JOHNSON, 2005) para C/C++ sob as plataformas doravante citadas) para obtenção do espectro de potência dos sinais de fala associada com a análise cepstral, para a posterior determinação do período de *pitch* dos mesmos. Vale salientar que a abordagem por Fourier é realizada apenas para efeito de comparação com a abordagem da técnica proposta, i.e., a abordagem por *wavelets*.

A Figura 4 apresenta de forma detalhada o algoritmo computacional para a obtenção do cepstrum real utilizando a DFT/FFT. A versão complexa do cepstrum (DENG; O'SHAUGHNESSY, 2003) pode também ser utilizada, apresentado a vantagem de armazenar informações também sobre fase do sinal sob análise, entretanto, a mesma não será utilizada no presente trabalho, tendo em vista estar fora do escopo pretendido.

```

Início:
Entrada do sistema: sinal digital  $s[n]$ , de comprimento  $L$ ;

Passo 1:
 $s[n] \leftarrow FFT(s[n])$  ;

Passo 2:
Para(int  $i = 0; i < L; i++$ )
 $s_i = \log_{10} \|s_i\|$  ;

Passo 3:
 $s[n] \leftarrow IFFT(s[n])$  , onde, IFFT é o inverso de FFT

Passo 4:
Para(int  $i = 0; i < L; i++$ )
 $s_i = (s_i)^2$ 

Fim

```

Figura 4: Linguagem hipotética para o cômputo do cepstrum com a DFT/FFT

Ao analisar-se o algoritmo acima, verifica-se que o processo de extração do *pitch* é relativamente simples. Entretanto, na grande maioria dos casos, espera-se do algoritmo que, além de funcional, ele possua tempo de resposta satisfatório com possibilidade de uso em tempo real. Para esses casos, quando o sinal sob análise é consideravelmente extenso, isto é, correspondente a vários segundos de voz sustentada, até mesmo a FFT pode se tornar inviável para produzir resposta em tempo-real. Daí surge a motivação para a realização deste trabalho, i.e., propor uma técnica diferencial que seja suficientemente capaz de realizar a análise cepstral utilizando a DWT, sendo que esta, mostrou desempenho ligeiramente superior à FFT.

2.3. A TRANSFORMADA DISCRETA WAVELET

A DWT (ADDISON, 2002)(JENSEN; COUR-HARBO, 2001)(STRANG; NGUYEN, 1997)(WILLIAMS; AMARATUNGA, 1994) consiste de uma alternativa mais eficiente do que a Transformada de Fourier de Tempo-Reduzido, para realizar a análise tempo-freqüência de um sinal, bem como a filtragem e separação em sub-bandas de freqüências. A DWT, age como um par de filtros, sendo um deles passa-baixas ($h[n]$) e o outro passa-altas QMF ($g[n]$), em geral, com freqüência de corte em $\pi/2$, sendo π a máxima freqüência angular. Dado um sinal discreto, ele é submetido a ambos os filtros via processo de convolução. Cada vez que esse processo é aplicado,

diz-se que se tem um nível de decomposição e obtêm-se dois novos sinais, sendo que um deles contém as frequências abaixo da metade da máxima frequência original do sinal e, o outro, contém as frequências acima deste limiar. Em particular, os termos chamados coeficientes de detalhamento designam o sinal obtido quando da passagem do sinal original pelo filtro passa-altas e os termos chamados coeficientes de aproximação designam o sinal obtido quando da passagem do sinal original pelo filtro passa-baixas. Após aplicar um nível de decomposição no sinal, apenas o novo sinal obtido pela aplicação do filtro passa-baixas é usado para continuar o processo.

Existem casos em que ambos os sinais são submetidos novamente ao processo de filtragem. Para tal particularidade dá-se o nome de transformada *wavelet-packet* (DWTP) (STRANG; NGUYEN, 1997), que será utilizada neste trabalho. Um detalhe fundamental a ser notado é que cada vez que um nível da transformação é realizado, os dois novos sinais obtidos são sub-amostrados por 2, pois eles contém apenas metade da faixa de frequências do sinal original, de acordo com o Teorema da Amostragem. Um sinal de n amostras tem a sua transformada *wavelet* com a mesma quantidade de amostras, sendo composta por uma sequência de coeficientes, iniciando-se com os coeficientes provenientes da aplicação do filtro passa-baixas no último nível, seguidos pelos coeficientes resultantes da aplicação dos filtros passa-altas nos níveis intermediários e terminando com os coeficientes resultantes da aplicação do filtro passa-altas do primeiro nível de decomposição. Todo este processo se encontra explicado na figura 5. Para realizar a decomposição até o último nível possível, é necessário que o sinal discreto tenha comprimento equivalente a uma potência de 2, sendo possível realizar $\log(n)/\log(2)$ decomposições para um sinal de comprimento n . Um fator muito importante para que um filtro digital seja considerado um filtro *wavelet* é que a resposta em frequência do filtro passa-baixas seja 0 em $\omega = \pi$, e, obviamente, seja 0 em $\omega = 0$, no caso do passa-altas QMF (OPPENHEIM; SCHAFER, 1999).

O processo conjunto de filtragem e sub-amostragem por 2, realizada nos sinais da transformada *wavelet* em cada nível, pode ser representada por uma convolução modificada da seguinte forma:

$$y[n] = x[n] * t[n] = \sum_{k=0}^{n-1} t_k x_{2n-k} \quad (14)$$

ou mais especificamente,

$$y_{passa-baixas}[n] = x[n] * h[n] = \sum_{k=0}^{n-1} h_k x_{2n-k} \quad (15)$$

$$y_{passa-altas}[n] = x[n] * g[n] = \sum_{k=0}^{n-1} g_k x_{2n-k} \quad (16)$$

A DWT está diretamente relacionada com a análise de multi-resolução (MRA),

Figura 5: Funcionamento da DWT, exemplificado para um sinal $s[n]$ de n amostras discretas e frequência máxima π , decomposto até o terceiro nível.

proposta por Mallat et al (VIEIRA; GUIDO, 2007)(WILLIAMS; AMARATUNGA, 1994), que consiste em decompor um vetor (sinal sob análise) $\vec{f}$ em uma soma de outros vetores pertencentes a uma seqüência de sub-espços vetoriais)(WILLIAMS; AMARATUNGA, 1994). De acordo com a MRA, para um vetor $\vec{f}$ de n pontos tem-se:

$$\vec{f} = \vec{A} + \vec{D} \quad (17)$$

onde

$$\vec{A} = \sum_{k=0}^{\frac{n-1}{2}} \langle \vec{f}, \vec{v}_k \rangle \vec{v}_k \quad (18)$$

$$\vec{D} = \sum_{k=0}^{\frac{n-1}{2}} \langle \vec{f}, \vec{w}_k \rangle \vec{w}_k \quad (19)$$

e

$\vec{A}$ é a projeção de $\vec{f}$ num sub-espço V com uma base de $n/2$ vetores; $\vec{D}$ é a projeção de $\vec{f}$ num sub-espço V com uma base de $n/2$ vetores; $V \perp W \leftrightarrow \vec{A} \perp \vec{D}$; $\vec{v}_i \perp \vec{w}_i \leftrightarrow \langle \vec{v}_i, \vec{w}_i \rangle = 0$.

O processo acima consiste na decomposição em nível 1. Numa transformada *wavelet* de nível 2, o vetor $\vec{A}$ é novamente decomposto na soma de dois outros vetores ortogonais. Este processo pode ser repetido, $\log(n)/\log(2)$ vezes, conforme já foi mencionado. Dessa forma, generalizando, para uma decomposição de nível j , temos:

O processo acima equivale a (WILLIAMS; AMARATUNGA, 1994)

$$f[n] = \sum_{k=0}^{\frac{n}{2^j}-1} H_{j,k}[n] \phi_{j,k}[n] + \sum_{t=1}^j \sum_{k=0}^{\frac{n}{2^j}-1} G_{t,k}[n] \psi_{t,k}[n] \quad (20)$$

onde $\phi[n]$ e $\psi[n]$ formam uma base de Riezs para escrever $\vec{f}$; $\phi[n] = \sum_k h_n \phi[2n-k]$, definida recursivamente por translações e dilatações de si mesma é chamada função *scalling* (WILLIAMS; AMARATUNGA, 1994). $\psi[n] = \sum_k g_n \phi[2n-k]$, também definida recursivamente, é chamada função *wavelet* e é ortogonal à função *scalling*.

Assim, temos $H_{j,k}[n] = \langle f, \phi_{j,k}[n] \rangle$ e $G_{t,k}[n] = \langle f, \psi_{t,k}[n] \rangle$. Além disso, $\{0\} \leftarrow \dots \subset V_{-1} \subset V_0 \subset V_1 \subset \dots \rightarrow L^2$. Se $f[n] \in V_j \rightarrow f[2n] \in V_{j+1}$, então $V_{j+1} = V_j \oplus W_j$;

Os coeficientes de h_k correspondem ao filtro passa-baixas. Já os coeficientes de g_k correspondem ao filtro passa-altas, onde, $h[n]$ e $g[n]$ são chamados de filtros de análise;

Um filtro com k coeficientes é dito filtro de suporte k ;

Cada par de filtros de análise, $h[n]$ e $g[n]$, possuem uma única função *scalling* (ϕ) e uma única função *wavelet* (ψ) associadas. A forma de obtenção destas funções à partir dos filtros, e vice-versa, está documentada com detalhes em (WILLIAMS; AMARATUNGA, 1994) e (MALLAT, 1999), não sendo apresentada aqui por se encontrar fora do escopo deste trabalho.

É de fundamental importância também, o fato de que $h[n]$ e $g[n]$ possuem outros filtros associados, chamados filtros de síntese, representados por $\bar{h}[n]$ e $\bar{g}[n]$, que são utilizados para inverter a transformada recuperando o sinal original a partir do transformado. Tais filtros obedecem as relações das equações citadas anteriormente, para $k = 0, 1, \dots, n-1$, cujo funcionamento torna-se mais claro através da observância do exemplo apresentado na Figura 6, para filtros de suporte 4.

$$g_k = (-1)^k h_{N-k-1} \quad (21)$$

$$\bar{h}_k = h_{N-k-1} \quad (22)$$

$$\bar{g}_k = (-1)^{k+1} h_k \quad (23)$$

Quando $h[n]$, $g[n]$, $\bar{h}[n]$ e $\bar{g}[n]$ mantêm as relações acima, eles mantêm um banco de filtros e reconstrução perfeita (*perfect reconstruction filter bank* - PRFB), ou seja, as condições de *anti-aliasing* e *no distortion*, no domínio Z, representadas na equações abaixo são satisfeitas. No presente trabalho a inversão da DWT não se faz necessária, entretanto, é desejável que o algoritmo proposto utilize apenas PRFBs. Isso se deve ao fato de que o algoritmo pode ser embutido em um sistema de ASR maior, com funções mais diversificadas, que necessite em algum momento da inversão da DWT.

$$\bar{H}[z] = G[-z] \quad (24)$$

$$\bar{G}[z] = -H[-z] \quad (25)$$

$$\bar{H}[z]H[z] + \bar{G}[z]G[z] = 2z^{-N+1} \quad (26)$$

Figura 6: Relação entre os filtros de análise e síntese

2.3.1 O CÁLCULO DA DWT

Para o cálculo da DWT, aplica-se o algoritmo de Mallat, que está minuciosamente descrito em (MALLAT, 1999). É importante observar que apenas os filtros $h[n]$ e $g[n]$ são utilizados, não sendo necessária a utilização de ϕ e ψ . O procedimento de cálculo envolve apenas a multiplicação de duas matrizes para cada nível de transformação. Se A é a matriz de coeficientes dos filtros e B é o sinal original, então $C = AB$ corresponde ao sinal transformado, sendo que a distribuição dos coeficientes nas matrizes é a seguinte:

$$A = \begin{pmatrix} h_0 & h_1 & h_2 & \dots & \dots & \dots & \dots & h_n & 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & \dots & 0 & 0 \\ g_0 & g_1 & g_2 & \dots & \dots & \dots & \dots & g_n & 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & \dots & 0 & 0 \\ 0 & 0 & h_0 & h_1 & h_2 & \dots & \dots & \dots & h_{n-1} & h_n & 0 & 0 & \dots & \dots & 0 & 0 \\ 0 & 0 & g_0 & g_1 & g_2 & \dots & \dots & \dots & g_{n-1} & g_n & 0 & 0 & \dots & \dots & 0 & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ h_{n-1} & h_n & 0 & 0 & \dots & \dots & \dots & 0 & 0 & h_0 & h_1 & \dots & \dots & \dots & h_{n-3} & h_{n-2} \\ g_{n-1} & g_n & 0 & 0 & \dots & \dots & \dots & 0 & 0 & g_0 & g_1 & \dots & \dots & \dots & g_{n-3} & g_{n-2} \end{pmatrix},$$

$$B = \begin{pmatrix} b_0 \\ b_1 \\ b_2 \\ b_3 \\ \vdots \\ \vdots \\ \vdots \\ b_{n-1} \\ b_n \end{pmatrix}, \quad C = \begin{pmatrix} c_0 \\ c_{\frac{n}{2}} \\ c_1 \\ c_{\frac{n}{2}+1} \\ \vdots \\ \vdots \\ \vdots \\ c_2 \\ c_{\frac{n}{2}-1} \end{pmatrix},$$

Pode-se notar na matriz A que dois procedimentos estão implícitos no algoritmo de Mallat: *downsampling* e *wrap-around* (JENSEN; COUR-HARBO, 2001)(WALKER, 1999). O primeiro já foi mencionado anteriormente e o segundo consiste em fazer com que os últimos coeficientes dos filtros ocupem as posições iniciais de cada linha. Isso faz com que a DWT tenha sempre o mesmo número de elementos do sinal original.

Da mesma forma como ocorre no cálculo da DWT, para calcular a IDWT através do algoritmo de Mallat, apenas $h[n]$ e $g[n]$ são necessários. O cálculo se procede de forma a obter novamente o vetor do sinal original B a partir da multiplicação A^{-1} por C , onde, A^{-1} que é a inversa de A , corresponde a matriz dos coeficientes dos filtros de síntese, isto é, $\bar{h}[n]$ e $\bar{g}[n]$. Tendo em vista que A é ortogonal, $A^{-1} = A^T$, fato este que facilita muito a inversão da transformada.

Para a grande maioria das aplicações práticas, filtros *wavelet* que possuem suporte em torno de 20 ou 30 elementos são utilizados, sendo assim, o custo computacional das convoluções implícitas no cálculo da DWT é relativamente pequeno, podendo perfeitamente ser implementado em tempo real. É interessante observar também que a implementação computacional, não necessariamente requer manter em memória principal a matriz A apresentada anteriormente, tendo em vista que cada uma de suas linhas constitui apenas um deslocamento da linha anterior e, portanto, basta efetuar a alocação de um vetor (*array*) unidimensional para manter os coeficientes dos filtros.

A quantidade de momentos nulos (JENSEN; COUR-HARBO, 2001)(WALKER, 1999), é uma propriedade interessante da DWT. Ela implica que, para um sinal que pode ser (aproximadamente) descrito por um polinômio de grau menor que M e uma *wavelet* que possui M momentos nulos, os coeficientes são (aproximadamente) zero. Embora este fato seja primordialmente importante nos esquemas de compressão de dados, ele pode ser levado em conta no presente trabalho por ter ligação com as características dos filtros. O M -ésimo momento pode ser calculado como $M = \sum_{k=0}^{p-1} t_k^m \psi(t_k)$, sendo p a quantidade de pontos da transformada *wavelet*, m o momento desejado e t cada ponto onde a função pode possuir valor diferente de 0 ($t = \frac{1}{2}s$ onde s é um escalar inteiro maior ou igual à 0).

2.3.2 FAMÍLIAS DE TRANSFORMADAS WAVELET

As diversas famílias de filtros existentes (JENSEN; COUR-HARBO, 2001)(WALKER, 1999), diferem no suporte dos filtros, assim como nas características de resposta em frequência e fase dos mesmos, o que faz com que as funções ϕ e ψ também sofram reflexo de tais diferenças. Na Tabela 1, listamos as famílias de *wavelet*

testadas neste trabalho.

Abaixo as principais famílias de *wavelets* encontradas na literatura:

Tabela 1: Relação das principais famílias de *wavelet* encontradas e testadas neste trabalho

Família	Suporte	Fase	Observação	Momentos
Haar	2	Linear	É a mais simples das <i>wavelets</i> , criada por Alfred Haar	1
Daubechies	Par, maior que 4	Não-linear	Resposta ao impulso <i>maximally flat</i> , criada por Ingrid Daubechies	$\frac{n}{2}$
Symmlets	Par, múltiplo de 8	Não-linear	Resposta ao impulso mais simétrica	$\frac{n}{2} - 2$
Coiflets	Par, múltiplo de 6	Quase linear	Resposta ao impulso quase simétrica, criada por Ronald Coifman	$\frac{n}{2} - 1$
Vaidyanathan	24	Não-linear	Otimizada para voz, criada por P.P. Vaidyanathan	-
Beylkin	18	Não-linear	Otimizada para áudio em geral	$\frac{n}{2} - 2$

Capítulo 3

MATERIAIS E MÉTODOS

3.1. CEPSTRUM BASEADO NA DWT

Nas seções anteriores, apresentou-se a abordagem tradicional (utilizando como base a DFT) para a determinação do *pitch*. Viu-se também que, muito embora a abordagem tradicional seja considerada eficiente para a determinação do *pitch*, do ponto de vista computacional esta abordagem é ineficiente, pois, exige um alto esforço computacional.

Assim, nesta seção, propõe-se um algoritmo diferencial, utilizando a DWT (*Discrete Wavelet Transform*) como base para a análise cepstral, com ordem de complexidade consideravelmente mais baixa (de ordem logarítmica).

É de fundamental importância salientar que este trabalho pretende obter apenas o cepstrum real dos sinais em questão, não levando em consideração propriedades do cepstrum complexo.

3.2. DETALHAMENTO DA TÉCNICA PROPOSTA

O algoritmo proposto é apresentado passo-a-passo na Figura 8 e descrito minuciosamente a seguir. Nos passos 2 e 4, a árvore da *Transformada Wavelet Packet* (DWPT) completa é necessária. Para este algoritmo, a DWPT requer uma Ordenação Natural de Freqüências (NFO), em detrimento dos Bancos de Filtros de Ordenação (FBO). Para cada nível de decomposição, a NFO é obtida pela alternância da ordem de cada par de filtros, passa-baixas ($h[n]$) e passa-altas ($g[n]$) é aplicada na decomposição

de cada sub-banda. A explanação detalhada deste procedimento pode ser vista em JENSEN e COUR-HARBO (2001, p. 107-111). Ao contrário da técnica baseada na transformada de Fourier, a técnica proposta não requer a realização da DWPT inversa (IDWPT).

A Figura 7 apresenta um fluxograma que descreve a arquitetura do sistema computacional implementando a transformada *wavelet* com suas diversas famílias:

Figura 7: Arquitetura do sistema computacional proposto

A Figura 8 apresentada imediatamente abaixo, exhibe o algoritmo em linguagem hipotética para o computo do sistema recém descrito.

```

Início:
Sinal de entrada,  $s[n]$ , de comprimento  $L$ , que deve ser uma potência de 2;

Passo 1:
 $s[n] \leftarrow DWPT(s[n], m)$  , onde,  $s[n]$  é o sinal transformado até o  $m$ -ésimo
nível pela DWPT, onde,  $m = \log(L) / \log(2)$ .

Passo 2:
Para(int  $i = 0; i < L; i++$ )
 $s_i = \log_{10}(s_i)^2$ 

Passo 3:
Repetir o passo 1, i.e., aplicar a DWPT em  $s[n]$ ;

Passo 4:
Para(int  $i = 0; i < L; i++$ )
 $s_i = (s_i)^2$  ;

Fim
  
```

Figura 8: Pseudo-código para o algoritmo proposto

Ao final da execução do algoritmo descrito acima, $s[n]$ torna-se o cepstrum do sinal original.

É importante notar que o algoritmo apresentado na figura 8 não realiza o processo

de transformação inverso, pois a DWPT trabalha de forma diferente da transformada de Fourier, i.e., filtra-se determinada sub-banda e em seguida mede-se a energia na sub-banda.

Após realizar-se a análise cespstral no sinal respectivo, o passo seguinte consiste na determinação do período de *pitch*, p , do mesmo. Para tanto, uma busca deve ser realizada em determinado intervalo $[a,b]$, visando a determinação do maior valor existente no mesmo, i.e., o pico que representa o *pitch*.

Os valores de a e b que representam amostras do cepstrum podem ser determinados como segue:

$$a = \text{round}\left(\frac{\text{taxa\_amostragem}}{300,0}\right) \quad (27)$$

$$b = \text{round}\left(\frac{\text{taxa\_amostragem}}{60,0}\right) \quad (28)$$

onde, 60.0 Hz e 300.0 Hz , são os delimitadores do intervalo de frequências dentre o qual deseja-se efetuar o processo de busca do *pitch*. A k -ésima amostra entre a e b que contém o maior valor está relacionado com a frequência de *pitch*, $f = \frac{1}{p}$, como pode ser visto na Equação 29:

$$f = \frac{\text{taxa\_amostragem}}{k} \quad (29)$$

É interessante notar que, a técnica baseada na transformada de Fourier converte o sinal de entrada do domínio do tempo para o domínio da frequência e, em seguida, retorna o sinal redimensionado para o domínio do tempo. Em contrapartida, a técnica proposta, filtra o sinal de entrada, e depois calcula a energia do mesmo em cada sub-banda. Uma vez que a decomposição em nível máximo é atingida, as folhas resultantes deste processo contêm uma única amostra em cada uma delas e, a amostra com o maior valor dentro de $[a,b]$ é aquela que se encontra relacionada com o período de *pitch*.

O cepstrum baseado na transformada de Fourier de determinado sinal digital torna-se computacionalmente complexo quando comparado ao método proposto, principalmente quando o comprimento do sinal é tido como longo. A ordem de complexidade da técnica proposta, é $L \cdot K \cdot O(N)$, onde L é a constante que corresponde ao comprimento do filtro *wavelet* adotado e K é o número total de decomposições da árvore da *wavelet-packet*.

Capítulo 4

RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1. AVALIAÇÃO DA TÉCNICA PROPOSTA

Para a avaliação do algoritmo proposto, o mesmo foi submetido à uma bateria de testes, com diferentes famílias de *Wavelets*, com diferentes suportes e com diferentes sinais.

Para a realização dos testes, foram obtidos nove tipos diferentes de sinais de fala digitais, dentre os quais havia a pronúncia das vogais /a/ durante um período de cinco segundos. Dentre os sinais de fala coletados para os referidos testes, cinco eram de vozes femininas e quatro eram vozes masculinas. Todos os sinais coletados foram digitalizados para o formato *.wav (compatível com todas as arquiteturas de software testadas). Ambos os arquivos, foram amostrados à uma taxa de 22.050 Hz com resolução 16-bit, PCM.

4.1.1 A PAUTA DE TESTES

Visando comprovar a eficácia ou ineficácia da técnica proposta e do sistema computacional associado, o mesmo foi submetido a uma exaustiva pauta de testes.

O primeiro dos procedimentos constituintes da referida pauta, consistiu na obtenção das matrizes (vozes digitais) de testes. Tais matrizes foram obtidas junto a Faculdade de Medicina de Ribeirão Preto (FMRP).

A etapa seguinte à recém descrita consistiu na configuração do sistema computacional com determinada família de *wavelet* com seus respectivos suportes associados, seguindo os critérios apresentados pela Tabela 1.

A etapa seguinte consistiu em submeter como entrada ao sistema computacional as matrizes de testes (vozes digitais) e, por inércia, inicializar o processamento do

sistema.

Ao findar o processamento do *software*, armazenava-se os resultados fornecidos pelo mesmo em uma tabela comparativa de valores, sendo que esta encontrava-se subdividida por famílias de *wavelets* com seus respectivos suportes.

As etapas seguintes consistiram na recursão dos procedimentos descritos acima para cada um dos nove arquivos digitais de fala.

Ao findar os testes dos arquivos para uma determinada família com seus respectivos suportes, o procedimento foi repetido para cada uma das famílias testadas com seus respectivos suportes.

A Tabela 2 apresenta os resultados obtidos através da aplicação da análise cepstral utilizando como base a transformada discreta de Fourier, implementando o algoritmo da DFT, descrito anteriormente na Figura 4. Os resultados obtidos através da aplicação desta abordagem serão aceitos como base comparativa para os resultados obtidos através da técnica proposta.

Tabela 2: Resultados obtidos através da análise cepstral baseada na Transformada Discreta de Fourier

Nome do arquivo *.wav	Frequência do <i>Pitch</i>
PacienteMulher1_A.wav	239.67 Hz
PacienteMulher2_A.wav	232.10 Hz
PacienteHomem1_A.wav	212.01 Hz
PacienteHomem2_A.wav	259.41 Hz
PacienteHomem3.wav	245.00 Hz
PacienteMulher3_A.wav	160.94 Hz
PacienteMulher4_A.wav	144.11 Hz
PacienteMulher5_A.wav	111.36 Hz
PacienteHomem4_A.wav	198.64 Hz

Afim de realizar-se uma análise mais precisa e a consolidação dos resultados obtidos pela análise cepstral com a transformada de Fourier para comparações futuras com a técnica proposta, fez-se conveniente, a apresentação de um histograma de cada uma das matrizes de teste (sinais digitais). O procedimento para geração do histograma consistiu na segmentação de cada matriz em *frames*, onde cada um destes possuía 2048 amostras. Em seguida, aplicava-se o procedimento descrito nos passos 1, 2, 3 e 4 da Figura 4. Os resultados provenientes de tal procedimento podem ser visualizados na Figura 9(a,b,c,d,e,f,g,h,i):

Figura 9: Resultados obtidos através da análise cepstral baseada na Transformada Discreta de Fourier

(a)

(b)

(c)

(d)

(e)

(f)

(g)

(h)

(i)

De posse dos resultados obtidos pela abordagem tradicional e, aceitando-os como base de comparação para com os novos resultados obtida pelo cômputo técnica proposta, a seguir apresentamos na Tabela 3 e logo a seguir na Tabela 4, os resultados obtidos com cada família de *wavelet* com seus respectivos suportes. A Figura 4 apresenta a comparação entre os histogramas dos resultados obtidos através da técnica tradicional e aqueles obtidos através do processamento do algoritmo proposto.

Tabela 3: Resultados obtidos através da análise cepstral com DWTP com diversas famílias e suportes

<i>Haar</i>	
<i>arquivo digital</i>	<i>freq. de pitch</i>
PacienteMulher1_A.wav	86.13
PacienteMulher2_A.wav	172.26
PacienteHomem1_A.wav	229.68
PacienteHomem2_A.wav	172.26
PacienteHomem3_A.wav	229.68
PacienteMulher3_A.wav	172.26
PacienteMulher4_A.wav	229.68
PacienteMulher5_A.wav	114.84
PacienteHomem4_A.wav	153.12

<i>Daubechies 4</i>	
<i>arquivo digital</i>	<i>freq. de pitch</i>
PacienteMulher1_A.wav	239.67
PacienteMulher2_A.wav	232.10
PacienteHomem1_A.wav	196.68
PacienteHomem2_A.wav	173.62
PacienteHomem3_A.wav	232.10
PacienteMulher3_A.wav	154.19
PacienteMulher4_A.wav	196.87
PacienteMulher5_A.wav	119.83
PacienteHomem4_A.wav	154.19

<i>Daubechies 6</i>	
<i>arquivo digital</i>	<i>freq. de pitch</i>
PacienteMulher1_A.wav	220.50
PacienteMulher2_A.wav	229.68
PacienteHomem1_A.wav	214.07
PacienteHomem2_A.wav	175.00
PacienteHomem3_A.wav	229.68
PacienteMulher3_A.wav	173.62
PacienteMulher4_A.wav	290.13
PacienteMulher5_A.wav	110.25
PacienteHomem4_A.wav	198.64

<i>Daubechies 8</i>	
<i>arquivo digital</i>	<i>freq. de pitch</i>
PacienteMulher1_A.wav	239.67
PacienteMulher2_A.wav	237.09
PacienteHomem1_A.wav	212.01
PacienteHomem2_A.wav	160.94
PacienteHomem3_A.wav	232.10
PacienteMulher3_A.wav	144.11
PacienteMulher4_A.wav	290.13
PacienteMulher5_A.wav	115.44
PacienteHomem4_A.wav	196.87

Daubechies 10	
<i>arquivo digital</i>	<i>freq. de pitch</i>
PacienteMulher1_A.wav	220.50
PacienteMulher2_A.wav	227.31
PacienteHomem1_A.wav	145.06
PacienteHomem2_A.wav	169.61
PacienteHomem3_A.wav	81.36
PacienteMulher3_A.wav	163.33
PacienteMulher4_A.wav	143.18
PacienteMulher5_A.wav	109.70
PacienteHomem4_A.wav	153.12

Daubechies 12	
<i>arquivo digital</i>	<i>freq. de pitch</i>
PacienteMulher1_A.wav	239.67
PacienteMulher2_A.wav	237.09
PacienteHomem1_A.wav	214.07
PacienteHomem2_A.wav	245.00
PacienteHomem3_A.wav	247.75
PacienteMulher3_A.wav	154.19
PacienteMulher4_A.wav	143.18
PacienteMulher5_A.wav	111.36
PacienteHomem4_A.wav	196.87

Daubechies 14	
<i>arquivo digital</i>	<i>freq. de pitch</i>
PacienteMulher1_A.wav	239.67
PacienteMulher2_A.wav	225.00
PacienteHomem1_A.wav	212.01
PacienteHomem2_A.wav	188.46
PacienteHomem3_A.wav	245.00
PacienteMulher3_A.wav	193.42
PacienteMulher4_A.wav	146.02
PacienteMulher5_A.wav	111.36
PacienteHomem4_A.wav	202.29

Daubechies 16	
<i>arquivo digital</i>	<i>freq. de pitch</i>
PacienteMulher1_A.wav	222.72
PacienteMulher2_A.wav	227.31
PacienteHomem1_A.wav	214.07
PacienteHomem2_A.wav	245.00
PacienteHomem3_A.wav	247.75
PacienteMulher3_A.wav	182.23
PacienteMulher4_A.wav	147.00
PacienteMulher5_A.wav	111.92
PacienteHomem4_A.wav	198.64

Daubechies 18	
<i>arquivo digital</i>	<i>freq. de pitch</i>
PacienteMulher1_A.wav	239.67
PacienteMulher2_A.wav	237.09
PacienteHomem1_A.wav	214.07
PacienteHomem2_A.wav	262.50
PacienteHomem3_A.wav	245.00
PacienteMulher3_A.wav	152.06
PacienteMulher4_A.wav	145.06
PacienteMulher5_A.wav	117.28
PacienteHomem4_A.wav	196.87

Daubechies 20	
<i>arquivo digital</i>	<i>freq. de pitch</i>
PacienteMulher1_A.wav	222.72
PacienteMulher2_A.wav	225.00
PacienteHomem1_A.wav	212.01
PacienteHomem2_A.wav	256.39
PacienteHomem3_A.wav	247.75
PacienteMulher3_A.wav	154.19
PacienteMulher4_A.wav	145.06
PacienteMulher5_A.wav	109.70
PacienteHomem4_A.wav	193.42

Daubechies 22	
<i>arquivo digital</i>	<i>freq. de pitch</i>
PacienteMulher1_A.wav	239.67
PacienteMulher2_A.wav	237.09
PacienteHomem1_A.wav	214.07
PacienteHomem2_A.wav	259.41
PacienteHomem3_A.wav	245.00
PacienteMulher3_A.wav	156.38
PacienteMulher4_A.wav	146.02
PacienteMulher5_A.wav	109.70
PacienteHomem4_A.wav	202.29

Daubechies 24	
<i>arquivo digital</i>	<i>freq. de pitch</i>
PacienteMulher1_A.wav	239.67
PacienteMulher2_A.wav	225.00
PacienteHomem1_A.wav	214.07
PacienteHomem2_A.wav	262.50
PacienteHomem3_A.wav	247.75
PacienteMulher3_A.wav	150.00
PacienteMulher4_A.wav	146.02
PacienteMulher5_A.wav	100.62
PacienteHomem4_A.wav	202.29

Daubechies 26	
<i>arquivo digital</i>	<i>freq. de pitch</i>
PacienteMulher1_A.wav	239.67
PacienteMulher2_A.wav	234.57
PacienteHomem1_A.wav	212.01
PacienteHomem2_A.wav	256.39
PacienteHomem3_A.wav	245.00
PacienteMulher3_A.wav	152.06
PacienteMulher4_A.wav	144.11
PacienteMulher5_A.wav	109.70
PacienteHomem4_A.wav	195.13

Daubechies 28	
<i>arquivo digital</i>	<i>freq. de pitch</i>
PacienteMulher1_A.wav	239.67
PacienteMulher2_A.wav	227.31
PacienteHomem1_A.wav	214.07
PacienteHomem2_A.wav	262.50
PacienteHomem3_A.wav	247.75
PacienteMulher3_A.wav	154.19
PacienteMulher4_A.wav	145.06
PacienteMulher5_A.wav	109.15
PacienteHomem4_A.wav	193.42

Daubechies 30	
<i>arquivo digital</i>	<i>freq. de pitch</i>
PacienteMulher1_A.wav	239.67
PacienteMulher2_A.wav	225.00
PacienteHomem1_A.wav	214.07
PacienteHomem2_A.wav	262.50
PacienteHomem3_A.wav	245.00
PacienteMulher3_A.wav	157.50
PacienteMulher4_A.wav	144.11
PacienteMulher5_A.wav	109.15
PacienteHomem4_A.wav	202.29

Daubechies 32	
<i>arquivo digital</i>	<i>freq. de pitch</i>
PacienteMulher1_A.wav	239.67
PacienteMulher2_A.wav	237.09
PacienteHomem1_A.wav	212.01
PacienteHomem2_A.wav	256.39
PacienteHomem3_A.wav	247.75
PacienteMulher3_A.wav	191.73
PacienteMulher4_A.wav	146.02
PacienteMulher5_A.wav	109.15
PacienteHomem4_A.wav	202.29

Daubechies 34	
<i>arquivo digital</i>	<i>freq. de pitch</i>
PacienteMulher1_A.wav	239.67
PacienteMulher2_A.wav	227.31
PacienteHomem1_A.wav	214.07
PacienteHomem2_A.wav	262.50
PacienteHomem3_A.wav	245.00
PacienteMulher3_A.wav	155.28
PacienteMulher4_A.wav	144.11
PacienteMulher5_A.wav	109.15
PacienteHomem4_A.wav	200.45

Daubechies 36	
<i>arquivo digital</i>	<i>freq. de pitch</i>
PacienteMulher1_A.wav	239.67
PacienteMulher2_A.wav	234.57
PacienteHomem1_A.wav	214.07
PacienteHomem2_A.wav	259.41
PacienteHomem3_A.wav	247.75
PacienteMulher3_A.wav	154.19
PacienteMulher4_A.wav	144.11
PacienteMulher5_A.wav	109.15
PacienteHomem4_A.wav	193.42

Daubechies 38	
<i>arquivo digital</i>	<i>freq. de pitch</i>
PacienteMulher1_A.wav	239.67
PacienteMulher2_A.wav	227.31
PacienteHomem1_A.wav	212.01
PacienteHomem2_A.wav	256.39
PacienteHomem3_A.wav	245.00
PacienteMulher3_A.wav	156.38
PacienteMulher4_A.wav	144.11
PacienteMulher5_A.wav	109.15
PacienteHomem4_A.wav	195.13

Daubechies 40	
<i>arquivo digital</i>	<i>freq. de pitch</i>
PacienteMulher1_A.wav	239.67
PacienteMulher2_A.wav	234.57
PacienteHomem1_A.wav	214.07
PacienteHomem2_A.wav	262.50
PacienteHomem3_A.wav	247.75
PacienteMulher3_A.wav	152.06
PacienteMulher4_A.wav	144.11
PacienteMulher5_A.wav	111.92
PacienteHomem4_A.wav	202.29

Daubechies 42	
<i>arquivo digital</i>	<i>freq. de pitch</i>
PacienteMulher1_A.wav	239.67
PacienteMulher2_A.wav	237.09
PacienteHomem1_A.wav	214.07
PacienteHomem2_A.wav	259.41
PacienteHomem3_A.wav	245.00
PacienteMulher3_A.wav	155.28
PacienteMulher4_A.wav	144.11
PacienteMulher5_A.wav	110.00
PacienteHomem4_A.wav	200.45

Daubechies 44	
<i>arquivo digital</i>	<i>freq. de pitch</i>
PacienteMulher1_A.wav	239.67
PacienteMulher2_A.wav	237.09
PacienteHomem1_A.wav	212.01
PacienteHomem2_A.wav	256.39
PacienteHomem3_A.wav	247.75
PacienteMulher3_A.wav	154.19
PacienteMulher4_A.wav	144.11
PacienteMulher5_A.wav	110.00
PacienteHomem4_A.wav	193.42

Daubechies 46	
<i>arquivo digital</i>	<i>freq. de pitch</i>
PacienteMulher1_A.wav	239.67
PacienteMulher2_A.wav	234.57
PacienteHomem1_A.wav	212.01
PacienteHomem2_A.wav	262.50
PacienteHomem3_A.wav	245.00
PacienteMulher3_A.wav	157.50
PacienteMulher4_A.wav	144.11
PacienteMulher5_A.wav	108.62
PacienteHomem4_A.wav	195.13

Daubechies 48	
<i>arquivo digital</i>	<i>freq. de pitch</i>
PacienteMulher1_A.wav	239.67
PacienteMulher2_A.wav	227.31
PacienteHomem1_A.wav	214.07
PacienteHomem2_A.wav	259.41
PacienteHomem3_A.wav	247.75
PacienteMulher3_A.wav	152.06
PacienteMulher4_A.wav	144.11
PacienteMulher5_A.wav	109.70
PacienteHomem4_A.wav	202.29

Daubechies 50	
<i>arquivo digital</i>	<i>freq. de pitch</i>
PacienteMulher1_A.wav	239.67
PacienteMulher2_A.wav	227.31
PacienteHomem1_A.wav	214.07
PacienteHomem2_A.wav	259.41
PacienteHomem3_A.wav	247.75
PacienteMulher3_A.wav	152.06
PacienteMulher4_A.wav	144.11
PacienteMulher5_A.wav	109.70
PacienteHomem4_A.wav	202.29

Daubechies 52	
<i>arquivo digital</i>	<i>freq. de pitch</i>
PacienteMulher1_A.wav	239.67
PacienteMulher2_A.wav	225.00
PacienteHomem1_A.wav	212.01
PacienteHomem2_A.wav	256.39
PacienteHomem3_A.wav	247.75
PacienteMulher3_A.wav	154.19
PacienteMulher4_A.wav	144.11
PacienteMulher5_A.wav	109.70
PacienteHomem4_A.wav	200.45

Daubechies 54	
<i>arquivo digital</i>	<i>freq. de pitch</i>
PacienteMulher1_A.wav	239.67
PacienteMulher2_A.wav	237.09
PacienteHomem1_A.wav	214.07
PacienteHomem2_A.wav	259.41
PacienteHomem3_A.wav	245.00
PacienteMulher3_A.wav	152.06
PacienteMulher4_A.wav	145.06
PacienteMulher5_A.wav	109.70
PacienteHomem4_A.wav	196.87

Daubechies 56	
<i>arquivo digital</i>	<i>freq. de pitch</i>
PacienteMulher1_A.wav	239.67
PacienteMulher2_A.wav	229.68
PacienteHomem1_A.wav	212.01
PacienteHomem2_A.wav	262.50
PacienteHomem3_A.wav	247.75
PacienteMulher3_A.wav	158.63
PacienteMulher4_A.wav	144.11
PacienteMulher5_A.wav	109.70
PacienteHomem4_A.wav	202.29

Daubechies 58	
arquivo digital	freq. de pitch
PacienteMulher1_A.wav	239.67
PacienteMulher2_A.wav	232.10
PacienteHomem1_A.wav	212.01
PacienteHomem2_A.wav	256.39
PacienteHomem3_A.wav	242.30
PacienteMulher3_A.wav	155.28
PacienteMulher4_A.wav	146.02
PacienteMulher5_A.wav	110.25
PacienteHomem4_A.wav	202.29

Daubechies 60	
arquivo digital	freq. de pitch
PacienteMulher1_A.wav	239.67
PacienteMulher2_A.wav	234.57
PacienteHomem1_A.wav	214.07
PacienteHomem2_A.wav	259.41
PacienteHomem3_A.wav	247.75
PacienteMulher3_A.wav	154.19
PacienteMulher4_A.wav	147.98
PacienteMulher5_A.wav	110.25
PacienteHomem4_A.wav	200.45

Daubechies 62	
arquivo digital	freq. de pitch
PacienteMulher1_A.wav	239.67
PacienteMulher2_A.wav	234.57
PacienteHomem1_A.wav	212.01
PacienteHomem2_A.wav	259.41
PacienteHomem3_A.wav	242.30
PacienteMulher3_A.wav	152.06
PacienteMulher4_A.wav	145.06
PacienteMulher5_A.wav	110.25
PacienteHomem4_A.wav	196.87

Daubechies 64	
arquivo digital	freq. de pitch
PacienteMulher1_A.wav	239.67
PacienteMulher2_A.wav	237.09
PacienteHomem1_A.wav	212.01
PacienteHomem2_A.wav	256.39
PacienteHomem3_A.wav	242.30
PacienteMulher3_A.wav	154.19
PacienteMulher4_A.wav	143.18
PacienteMulher5_A.wav	108.62
PacienteHomem4_A.wav	202.29

Daubechies 66	
arquivo digital	freq. de pitch
PacienteMulher1_A.wav	239.67
PacienteMulher2_A.wav	227.31
PacienteHomem1_A.wav	214.07
PacienteHomem2_A.wav	259.41
PacienteHomem3_A.wav	242.30
PacienteMulher3_A.wav	155.28
PacienteMulher4_A.wav	146.02
PacienteMulher5_A.wav	109.15
PacienteHomem4_A.wav	202.29

Daubechies 68	
arquivo digital	freq. de pitch
PacienteMulher1_A.wav	239.67
PacienteMulher2_A.wav	237.09
PacienteHomem1_A.wav	212.01
PacienteHomem2_A.wav	259.41
PacienteHomem3_A.wav	242.30
PacienteMulher3_A.wav	157.50
PacienteMulher4_A.wav	143.18
PacienteMulher5_A.wav	109.15
PacienteHomem4_A.wav	200.45

Daubechies 70	
arquivo digital	freq. de pitch
PacienteMulher1_A.wav	239.67
PacienteMulher2_A.wav	234.57
PacienteHomem1_A.wav	212.01
PacienteHomem2_A.wav	256.39
PacienteHomem3_A.wav	247.75
PacienteMulher3_A.wav	152.06
PacienteMulher4_A.wav	143.18
PacienteMulher5_A.wav	109.15
PacienteHomem4_A.wav	200.45

Daubechies 72	
arquivo digital	freq. de pitch
PacienteMulher1_A.wav	239.67
PacienteMulher2_A.wav	234.57
PacienteHomem1_A.wav	214.07
PacienteHomem2_A.wav	256.39
PacienteHomem3_A.wav	245.00
PacienteMulher3_A.wav	162.13
PacienteMulher4_A.wav	143.18
PacienteMulher5_A.wav	109.15
PacienteHomem4_A.wav	195.13

Daubechies 74	
<i>arquivo digital</i>	<i>freq. de pitch</i>
PacienteMulher1_A.wav	239.67
PacienteMulher2_A.wav	237.09
PacienteHomem1_A.wav	212.01
PacienteHomem2_A.wav	259.41
PacienteHomem3_A.wav	247.75
PacienteMulher3_A.wav	155.28
PacienteMulher4_A.wav	143.18
PacienteMulher5_A.wav	200.45
PacienteHomem4_A.wav	202.29

Daubechies 76	
<i>arquivo digital</i>	<i>freq. de pitch</i>
PacienteMulher1_A.wav	239.67
PacienteMulher2_A.wav	237.09
PacienteHomem1_A.wav	212.01
PacienteHomem2_A.wav	256.39
PacienteHomem3_A.wav	245.00
PacienteMulher3_A.wav	152.06
PacienteMulher4_A.wav	143.18
PacienteMulher5_A.wav	110.80
PacienteHomem4_A.wav	200.45

Symlet 8	
<i>arquivo digital</i>	<i>freq. de pitch</i>
PacienteMulher1_A.wav	222.72
PacienteMulher2_A.wav	227.31
PacienteHomem1_A.wav	214.07
PacienteHomem2_A.wav	175.00
PacienteHomem3_A.wav	232.10
PacienteMulher3_A.wav	196.87
PacienteMulher4_A.wav	218.31
PacienteMulher5_A.wav	111.92
PacienteHomem4_A.wav	196.87

Symlet 16	
<i>arquivo digital</i>	<i>freq. de pitch</i>
PacienteMulher1_A.wav	222.72
PacienteMulher2_A.wav	227.31
PacienteHomem1_A.wav	214.07
PacienteHomem2_A.wav	245.00
PacienteHomem3_A.wav	225.00
PacienteMulher3_A.wav	183.75
PacienteMulher4_A.wav	146.02
PacienteMulher5_A.wav	110.80
PacienteHomem4_A.wav	196.07

Coiflet 6	
<i>arquivo digital</i>	<i>freq. de pitch</i>
PacienteMulher1_A.wav	239.67
PacienteMulher2_A.wav	232.10
PacienteHomem1_A.wav	196.87
PacienteHomem2_A.wav	86.47
PacienteHomem3_A.wav	229.68
PacienteMulher3_A.wav	175.00
PacienteMulher4_A.wav	259.41
PacienteMulher5_A.wav	259.41
PacienteHomem4_A.wav	196.87

Coiflet 12	
<i>arquivo digital</i>	<i>freq. de pitch</i>
PacienteMulher1_A.wav	220.50
PacienteMulher2_A.wav	227.31
PacienteHomem1_A.wav	214.07
PacienteHomem2_A.wav	175.00
PacienteHomem3_A.wav	232.10
PacienteMulher3_A.wav	185.29
PacienteMulher4_A.wav	210.00
PacienteMulher5_A.wav	109.70
PacienteHomem4_A.wav	198.64

Coiflet 18	
<i>arquivo digital</i>	<i>freq. de pitch</i>
PacienteMulher1_A.wav	239.67
PacienteMulher2_A.wav	237.09
PacienteHomem1_A.wav	212.01
PacienteHomem2_A.wav	175.00
PacienteHomem3_A.wav	234.57
PacienteMulher3_A.wav	186.86
PacienteMulher4_A.wav	146.02
PacienteMulher5_A.wav	109.70
PacienteHomem4_A.wav	193.42

Coiflet 24	
<i>arquivo digital</i>	<i>freq. de pitch</i>
PacienteMulher1_A.wav	222.72
PacienteMulher2_A.wav	225.00
PacienteHomem1_A.wav	212.01
PacienteHomem2_A.wav	259.41
PacienteHomem3_A.wav	237.09
PacienteMulher3_A.wav	185.26
PacienteMulher4_A.wav	210.00
PacienteMulher5_A.wav	109.15
PacienteHomem4_A.wav	196.87

<i>Belking 18</i>	
<i>arquivo digital</i>	<i>freq. de pitch</i>
PacienteMulher1_A.wav	239.67
PacienteMulher2_A.wav	227.31
PacienteHomem1_A.wav	214.07
PacienteHomem2_A.wav	256.39
PacienteHomem3_A.wav	242.30
PacienteMulher3_A.wav	188.46
PacienteMulher4_A.wav	144.11
PacienteMulher5_A.wav	109.15
PacienteHomem4_A.wav	195.13

<i>Vaidyanathan 24</i>	
<i>arquivo digital</i>	<i>freq. de pitch</i>
PacienteMulher1_A.wav	239.67
PacienteMulher2_A.wav	225.00
PacienteHomem1_A.wav	214.07
PacienteHomem2_A.wav	259.41
PacienteHomem3_A.wav	245.00
PacienteMulher3_A.wav	151.02
PacienteMulher4_A.wav	143.18
PacienteMulher5_A.wav	109.15
PacienteHomem4_A.wav	202.29

Gráficos comparativos entre os histogramas dos arquivos digitais submetidos a análise cepstral pela abordagem por Fourier e por Wavelet

Gráfico 1: AC por Fourier versus Wavelet Daubechies 46 - PacienteMulher1_A

Gráfico 2: AC por Fourier versus Wavelet Daubechies 46 - PacienteMulher2_A

Gráfico 3: AC por Fourier versus Wavelet Daubechies 46 - PacienteHomem1_A

Gráfico 4: AC por Fourier versus Wavelet Daubechies 46 - PacienteHomem2_A

Gráfico 5: AC por Fourier versus Wavelet Daubechies 46 - PacienteHomem3_A

Gráfico 6: AC por Fourier versus Wavelet Daubechies 46 - PacienteMulher3_A

Gráfico 7: AC por Fourier versus Wavelet Daubechies 46 - PacienteMulher4_A

Gráfico 8: AC por Fourier *versus* Wavelet Daubechies 46 - PacienteMulher5_A Gráfico 9: AC por Fourier *versus* Wavelet Daubechies 46 - PacienteHomemr4_A

Os gráficos 1 a 9 acima apresentam a comparação entre a análise cepstral baseada na Transformada Discreta de Fourier *versus* análise cepstral baseada na Transformada Wavelet Packet da família *Daubechies* com suporte 46 para cada arquivo digital de fala testado.

A discussão dos resultados obtidos é realizada pormenorizadamente na Seção 4.2.

4.2. DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Conforme citado anteriormente, serão considerados “aceitáveis”, para efeitos de comparação, os resultados obtidos por intermédio da análise cepstral baseada na Transformada de Fourier. Tal procedimento pode ser visualizado na subseção 2.2.2.

Tais resultados quando confrontados com aqueles inerentes ao processamento da técnica proposta, levaram as conclusões apresentadas a seguir.

4.2.1. PRECISÃO NA DETERMINAÇÃO DO *PITCH*

Quando o critério avaliador adotado foi o fator de “precisão” na determinação do período de *pitch*, a família wavelet que demonstrou maior convergência para com os resultados obtidos via abordagem tradicional, sob aspectos gerais, foi *Daubechies 46*, como pode ser facilmente constatado nos gráficos. É possível citar como fato comprobatório de tal afirmação, o resultado obtido, por exemplo, para o arquivo *PacienteMulher2_A.wav*. Segundo apontamento realizado pelo resultado obtido através da abordagem tradicional, o período de *pitch* deste sinal se encontra aproximadamente na frequência 232.1 Hz. Ao percorrerem-se as famílias testadas com seus respectivos suportes, pode-se verificar facilmente que, em *Daubechies* suporte 46 encontra-se a menor distância proporcional em relação ao resultado tido como aceitável, i.e., para este exemplo, os resultados da nova técnica apontam o *pitch* aproximadamente em 234.5 Hz, portanto, a uma diferença aproximada de 2 Hz. Como a diferença é ínfima do ponto de vista perceptual, pode-se afirmar que a técnica se mostrou robusta e eficiente.

4.2.2. DESEMPENHO

Quando o critério de avaliação passou a ser o desempenho computacional do novo algoritmo, foi possível constatar uma considerável diferença entre as abordagens testadas. Tal diferença e suas peculiaridades são discutidas a seguir.

O equipamento de hardware (computador) utilizado para realização dos testes e posterior obtenção dos resultados, foi um MacBook – Apple, de processador PC Intel Core 2 Duo 2.6 Ghz, memória principal com capacidade para 3 Gb de armazenamento volátil DDR2, disco rígido de armazenamento não-volátil da marca Samsung HD-Sata 2 com capacidade para 200 Gb de dados e placa gráfica aceleradora *Intel Graphics Media*

Accelerator Móbile.

Todos os testes foram realizados sob as plataformas Windows XP/Vista, Linux Mandriva e MacOSX Leopard, com suas respectivas ferramentas de apoio ao desenvolvimento. São elas: IDE Dev/C++, KEditor e XCode.

Para o computador descrito acima, a técnica de análise cepstral baseada na abordagem por Fourier (implementando a DFT, que possui maior esforço computacional), o intervalo temporal despendido para que o sistema fosse capaz de retornar a resposta foi {min: 27m38s – max: 42m61s}, variando de uma matriz para outra. Entretanto, quando o algoritmo utilizado para realizar o cômputo da transformada de Fourier foi o FFT, o tempo de resposta variou entre {min: 0,8s – max: 2,7s} para as mesmas matrizes de teste.

Para a mesma arquitetura de hardware e software, quando avaliado o critério de desempenho do algoritmo proposto em relação a abordagem tradicional implementando a DFT e posteriormente a FFT, fez-se notória diferença entre as abordagens, pois, o intervalo de tempo gasto pelo sistema para apresentar os resultados na tela foi {min: 0,7s – max: 1,3s}.

Capítulo 5

CONCLUSÕES E SUGESTÕES

5.1. CONCLUSÕES

Ao findar os estudos comparativos realizados e, levando-se em consideração todos os aspectos relevantes de ambas as abordagens pode-se concluir que:

- O algoritmo proposto mostrou-se robusto e eficiente, pois, de forma geral, para todas as famílias de *wavelet* testadas (salvo exceção da *wavelet* de Haar, devido arquitetura desfavorável de seu par de filtros) demonstraram-se consideravelmente eficazes no processo de determinação do período de *pitch* para todos os sinais;
- A família *wavelet* que apresentou a maior relação de convergência em termos de determinação do período de *pitch* foi *Daubechies* com suporte 46. Para os arquivos digitais **PacienteMulher1_A.wav**, **PacienteHomem1_A.wav**, **PacienteHomem3_A.wav** e **PacienteMulher4_A.wav**, o algoritmo proposto com a família *Daubechies* com suporte 46 apontou para valores próximos aqueles ditos aceitáveis, provenientes da abordagem tradicional.
- A família *wavelet* que apresentou o pior desempenho dentre todas, foi a *wavelet* de Haar, cujo suporte dos filtros é 2. Para todos os arquivos testados, a diferença mínima entre o período de *pitch* apontado pela abordagem tradicional com Fourier e a nova abordagem com Haar foi de 11.31 Hz, como pode ser visualizado na Tabela 4.
- A abordagem tradicional possui a grande vantagem de apontar o período de *pitch* de forma que pode-se aceitar tal apontamento como adequado. Em

contrapartida, possui a grande desvantagem de possuir um elevado custo computacional, fato este, que dificulta muito sua utilização em computadores comuns.

- Verificou-se também ao findar da pauta de testes que, para a análise cepstral realizada com base na transformada de Fourier, quando o algoritmo implementado associado foi o DFT, a obtenção dos resultados apresentou-se demasiadamente lenta. Em contrapartida, quando o algoritmo associado foi o FFT, os tempos de resposta apresentaram-se muito próximos daqueles obtidos via algoritmo da DWT, fato este, que qualifica este algoritmo como adequado para operações de tempo real, assim como o algoritmo proposto neste trabalho.
- Em alguns casos, a DWTP apresentou maior variância nos resultados dos valores de *pitch* para *frames* consecutivos, em comparação com a DFT, entretanto, as médias obtidas entre alguns *frames* vizinhos aproximam bem os resultados entre as abordagens. A transformada *Wavelet* mostrou-se uma boa ferramenta matemática para utilização com a análise cepstral;
- Foi importante equilibrar as resoluções no tempo e na frequência, já que filtros com suportes muito alto (72 por exemplo), que possuem boa resolução na frequência e resolução no tempo ruim, e filtros com suporte muito baixo (2 por exemplo), que possuem boa resolução no tempo e resolução na frequência ruim, pioram os resultados.
- Outra conclusão importante que pode-se extrair dos resultados obtidos é que para que a análise cepstral baseada na DWPT se aproxime o máximo possível do padrão, i.e., aquela baseada na DFT, é determinante que os filtros possuam resposta em frequência próxima a ideal, com características *maximally-flat* nas bandas de passagem e rejeição; A fase não-linear das filtros de Daubechies não foi comprometedora dos resultados;

O algoritmo proposto apresentou desempenho consideravelmente superior à abordagem tradicional (DFT) e ligeiramente superior ao algoritmo FFT característica esta que torna a técnica proposta aqui adequada para operações que necessitam de tempos de resposta curtos.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

CARNEIRO G.F., KNOBEL M. (2005) **Percepção do Pitch Fantasma utilizando a Sirene de Seebeck**. Universidade Estadual de Campinas, UNICAMP.

LUCHETTA V.O.J., MILIES F.C.P., **Pitágoras de samos**. [online] Disponível na Internet via WWW. URL: <http://www.ime.usp.br/~leo/imatica/historia/pitagoras.html>. Arquivo consultado em 15 de junho de 2008.

VIEIRA L.S., GUIDO R.C., (2007) **Conversão de Voz baseada em Transformada Wavelet**. Dissertação de Mestrado apresentada ao Instituto de Física de São Carlos (IFSC).

DEUTSCH W.A., FÖDERMAYR F., **Visualization of Multi – Part Music** [online] Disponível na internet via WWW. URL: http://www.kfs.oeaw.ac.at/research/psychoacoustics/musicology/vis_multipart_music/poly1.htm. Arquivo consultado em 09 de Junho de 2008.

COLEMAN J., (2005) **Introducing Speech and Language Processing**. Cambridge University Press.

QUATIERI T.F., (2002) **Discrete-Time Speech Signal Processing: Principles and Practice**. Prentice Hall, Upper Saddle River, NJ, USA.

OPPENHEIM A.V., SCHAFER R.W., BUCK J.R., (1999) **Discrete-Time Signal Processing**. Prentice Hall, 2 edition.

BARBON JR. S., GUIDO R.C., (2007) **Dynamic Time Warping baseado na Transformada Wavelet**. Dissertação de Mestrado apresentada ao Instituto de Física de São Carlos (IFSC).

JENSEN A., COUR-HARBO A.,(2001) **Ripples in Mathematics: The Discrete Wavelet Transform**. Springer, Berlin, Germany.

STROUSTRUP B., (2004) **The C++ Programming Language**. Addison-Wesley, AT&T Labs, EUA.

http://telecom.inescn.pt/research/audio/cienciaviva/principio_audicao.html

BAKEN R. J., (2006) **Clinical Measurement of Speech and Voice**. Singular Publishing Group Inc., San Diego, EUA.

NARAYANAN S., ALWAN A., (2004) **Text to Speech Synthesis**. Upper Saddle River-USA: Prentice Hall.

ADDISON P. S., (2002) **The Illustrated wavelet Transform Handbook: Introductory Theory and Applications in Science, Engineering, Medicine and Finance**. Edinburg-UK: Institute of Physics Publishing.

CHOU W., JUANG B.H., (2003) **Pattern Recognition in Speech and Language Processing**. Boca Raton-USA: CRC Press.

DENG L., O'SHAUGHNESSY O., (2003) **Speech Processing: A Dynamic and Optimization-Oriented Approach**. Marcel Dekker Inc: New York-USA.

STRANG G., NGUYEN T., (1997) **Wavelets and filter banks**. Wellesley-Cambridge Academic Press, Wellesley.

WILLIAMS J.R., AMARATUNGA K., (1994) **Introduction to wavelets in engineering**. Int. Journal for Numerical Methods in Engineering, v. 37, pp. 2365-2388.

WALKER J.S., (1999) **A Primer on Wavelets and Their Scientific Applications**. Whashington-USA: Chapman and Hall/CRC.

MALLAT S. G., (1999) **A wavelet tour of signal processing**. San Diego: Academic Press.

DEYASAHAYAM S.R., (2000) **Signals and Systems in Biomedical Engineering: Signal Processing and Physiological System Modeling**. New York: Kluwer Academic Publishers.

DENG L., O'Shaughnessy (2003) **Speech Processing: A Dynamic and Optimization-Oriented Approach**. CRC, 1ª Edição.

RAZERA D.E., (2004) **Determinadores de Pitch**. Dissertação de Mestrado apresentada à Escola de Engenharia de São Carlos (EESC).

FRIGO M., JOHNSON S.G., **FFTW** [online] Disponível na internet via WWW. URL: <http://www.fftw.org>. Arquivo consultado em 18 de Outubro de 2008.

HAYKIN, S. **Sinais e sistemas**. Trad. de José Carlos Barbosa dos Santos. Poto Alegre, Bookman, 2001.

APÊNDICES

APÊNDICE A - COEFICIENTES DE FILTROS *WAVELET* UTILIZADOS

- Haar = {0.7071067, 0.7071067};
- Daub4 = { 4.82962913144e-01, 8.36516303737e-01, 2.24143868042e-01,-
1.29409522551e-01};
- Daub6 = { 3.32670552950e-01, 8.06891509311e-01, 4.59877502118e-01,-
1.35011020010e-01,-8.54412738820e-02, 3.52262918857e-02};
- Daub8 = { 2.30377813308e-01, 7.14846570552e-01, 6.30880767929e-01,-
2.79837694168e-02,-1.87034811719e-01, 3.08413818355e-02,
3.28830116668e-02,-1.05974017850e-02};
- Daub10 = { 1.60102397974e-01, 6.03829269797e-01, 7.24308528437e-01,
1.38428145901e-01,-2.42294887066e-01,-3.22448695846e-02,
7.75714938400e-02,-6.24149021279e-03,-1.25807519990e-02,
3.33572528547e-03};
- Daub12 = { 1.11540743350e-01, 4.94623890398e-01, 7.51133908021e-01,
3.15250351709e-01, -2.26264693965e-01,-1.29766867567e-01,
9.75016055873e-02, 2.75228655303e-02,-3.15820393174e-02,
5.53842201161e-04, 4.77725751094e-03,-1.07730108530e-03};
- Daub14 = { 7.78520540850e-02, 3.96539319481e-01, 7.29132090846e-01,
4.69782287405e-01,-1.43906003928e-01,-2.24036184993e-01,
7.13092192668e-02, 8.06126091510e-02,-3.80299369350e-02,-
1.65745416306e-02, 1.25509985560e-02, 4.29577972921e-04,-
1.80164070404e-03, 3.53713799974e-04};
- Daub16 = { 5.44158422431e-02, 3.12871590914e-01, 6.75630736297e-01,
5.85354683654e-01,-1.58291052563e-02,-2.84015542961e-01,
4.72484573913e-04, 1.28747426620e-01,-1.73693010018e-02,-
4.40882539307e-02, 1.39810279173e-02, 8.74609404740e-03,-
4.87035299345e-03,-3.91740373376e-04, 6.75449406450e-04,-
1.17476784124e-04};

- Daub18 = { 3.80779473638e-02, 2.43834674612e-01, 6.04823123690e-01, 6.57288078051e-01, 1.33197385825e-01, -2.93273783279e-01, -9.68407832229e-02, 1.48540749338e-01, 3.07256814793e-02, -6.76328290613e-02, 2.50947114831e-04, 2.23616621236e-02, -4.72320475775e-03, -4.28150368246e-03, 1.84764688305e-03, 2.30385763523e-04, -2.51963188942e-04, 3.93473203162e-05};
- Daub20 = { 2.66700579005e-02, 1.88176800077e-01, 5.27201188931e-01, 6.88459039453e-01, 2.81172343660e-01, -2.49846424327e-01, -1.95946274377e-01, 1.27369340335e-01, 9.30573646035e-02, -7.13941471663e-02, -2.94575368218e-02, 3.32126740593e-02, 3.60655356695e-03, -1.07331754833e-02, 1.39535174705e-03, 1.99240529518e-03, -6.85856694959e-04, -1.16466855129e-04, 9.35886703200e-05, -1.32642028945e-05};
- Daub22 = { 1.86942977614e-02, 1.44067021150e-01, 4.49899764356e-01, 6.85686774916e-01, 4.11964368947e-01, -1.62275245027e-01, -2.74230846817e-01, 6.60435881966e-02, 1.49812012466e-01, -4.64799551166e-02, -6.64387856950e-02, 3.13350902190e-02, 2.08409043601e-02, -1.53648209062e-02, -3.34085887301e-03, 4.92841765605e-03, -3.08592858815e-04, -8.93023250666e-04, 2.49152523552e-04, 5.44390746993e-05, -3.46349841869e-05, 4.49427427723e-06};
- Daub24 = { 1.31122579572e-02, 1.09566272821e-01, 3.77355135214e-01, 6.57198722579e-01, 5.15886478427e-01, -4.47638856537e-02, -3.16178453752e-01, -2.37792572560e-02, 1.82478605927e-01, 5.35956967435e-03, -9.64321200965e-02, 1.08491302558e-02, 4.15462774950e-02, -1.22186490697e-02, -1.28408251983e-02, 6.71149900879e-03, 2.24860724099e-03, -2.17950361862e-03, 6.54512821250e-06, 3.88653062820e-04, -8.85041092082e-05, -2.42415457570e-05, 1.27769522193e-05, -1.52907175806e-06};
- Daub26 = { 9.20213353896e-03, 8.28612438729e-02, 3.11996322160e-01, 6.11055851158e-01, 5.88889570431e-01, 8.69857261796e-02, -3.14972907711e-01, -1.24576730750e-01, 1.79476079429e-01, 7.29489336567e-02, -1.05807618187e-01, -2.64884064753e-02,

5.61394771002e-02, 2.37997225405e-03, -2.38314207103e-02,
 3.92394144879e-03, 7.25558940161e-03, -2.76191123465e-03, -
 1.31567391189e-03, 9.32326130867e-04, 4.92515251262e-05, -
 1.65128988556e-04, 3.06785375793e-05, 1.04419305714e-05, -
 4.70041647936e-06, 5.22003509845e-07};

- Daub28 = { 6.46115346008e-03, 6.23647588493e-02, 2.54850267792e-01,
 5.54305617940e-01, 6.31187849104e-01, 2.18670687758e-01, -
 2.71688552278e-01, -2.18033529993e-01, 1.38395213864e-01,
 1.39989016584e-01, -8.67484115681e-02, -7.15489555040e-02,
 5.52371262592e-02, 2.69814083079e-02, -3.01853515403e-02, -
 5.61504953035e-03, 1.27894932663e-02, -7.46218989268e-04, -
 3.84963886802e-03, 1.06169108560e-03, 7.08021154235e-04, -
 3.86831947312e-04, -4.17772457703e-05, 6.87550425269e-05, -
 1.03372091845e-05, -4.38970490178e-06, 1.72499467536e-06, -
 1.78713996831e-07};
- Daub30 = { 4.53853736157e-03, 4.67433948927e-02, 2.06023863986e-01,
 4.92631771708e-01, 6.45813140357e-01, 3.39002535454e-01, -
 1.93204139609e-01, -2.88882596566e-01, 6.52829528487e-02,
 1.90146714007e-01, -3.96661765557e-02, -1.11120936037e-01,
 3.38771439235e-02, 5.47805505845e-02, -2.57670073284e-02, -
 2.08100501696e-02, 1.50839180278e-02, 5.10100036040e-03, -
 6.48773456031e-03, -2.41756490761e-04, 1.94332398038e-03, -
 3.73482354137e-04, -3.59565244362e-04, 1.55896489920e-04,
 2.57926991553e-05, -2.81332962660e-05, 3.36298718173e-06,
 1.81127040794e-06, -6.31688232588e-07, 6.13335991330e-08};
- Daub32 = { 3.18922092534e-03, 3.49077143236e-02, 1.65064283488e-01,
 4.30312722846e-01, 6.37356332083e-01, 4.40290256886e-01, -
 8.97510894024e-02, -3.27063310527e-01, -2.79182081330e-02,
 2.11190693947e-01, 2.73402637527e-02, -1.32388305563e-01, -
 6.23972275247e-03, 7.59242360442e-02, -7.58897436885e-03, -
 3.68883976917e-02, 1.02976596409e-02, 1.39937688598e-02, -
 6.99001456341e-03, -3.64427962149e-03, 3.12802338120e-03,
 4.07896980849e-04, -9.41021749359e-04, 1.14241520038e-04,
 1.74787245225e-04, -6.10359662141e-05, -1.39456689882e-05,
 1.13366086612e-05, -1.04357134231e-06, -7.36365678545e-07,

2.30878408685e-07,-2.10933963010e-08};

- Daub34 = { 2.24180700103e-03, 2.59853937036e-02, 1.31214903307e-01, 3.70350724152e-01, 6.10996615684e-01, 5.18315764056e-01, 2.73149704032e-02,-3.28320748363e-01,-1.26599752215e-01, 1.97310589565e-01, 1.01135489177e-01,-1.26815691778e-01,-5.70914196316e-02, 8.11059866541e-02, 2.23123361781e-02,-4.69224383892e-02,-3.27095553581e-03, 2.27336765839e-02,-3.04298998135e-03,-8.60292152032e-03, 2.96799669152e-03, 2.30120524215e-03,-1.43684530480e-03,-3.28132519409e-04, 4.39465427768e-04,-2.56101095665e-05,-8.20480320245e-05, 2.31868137987e-05, 6.99060098507e-06,-4.50594247722e-06, 3.01654960999e-07, 2.95770093331e-07,-8.42394844600e-08, 7.26749296856e-09};
- Daub36 = { 1.57631021844e-03, 1.92885317241e-02, 1.03588465822e-01, 3.14678941337e-01, 5.71826807766e-01, 5.71801654888e-01, 1.47223111969e-01,-2.93654040736e-01,-2.16480934005e-01, 1.49533975565e-01, 1.67081312763e-01,-9.23318841508e-02,-1.06752246659e-01, 6.48872162119e-02, 5.70512477385e-02,-4.45261419029e-02,-2.37332103958e-02, 2.66707059264e-02, 6.26216795430e-03,-1.30514809466e-02, 1.18630033858e-04, 4.94334360546e-03,-1.11873266699e-03,-1.34059629833e-03, 6.28465682965e-04, 2.13581561910e-04,-1.98648552311e-04,-1.53591712353e-07, 3.74123788074e-05,-8.52060253744e-06,-3.33263447888e-06, 1.76871298362e-06,-7.69163268988e-08,-1.17609876702e-07, 3.06883586304e-08,-2.50793445494e-09};
- Daub38 = { 1.10866976318e-03, 1.42810984507e-02, 8.12781132654e-02, 2.64388431740e-01, 5.24436377464e-01, 6.01704549127e-01, 2.60894952651e-01,-2.28091394215e-01,-2.85838631755e-01, 7.46522697081e-02, 2.12349743306e-01,-3.35185419023e-02,-1.42785695038e-01, 2.75843506256e-02, 8.69067555558e-02,-2.65012362501e-02,-4.56742262772e-02, 2.16237674095e-02, 1.93755498891e-02,-1.39883886785e-02,-5.86692228101e-03, 7.04074736710e-03, 7.68954359257e-04,-2.68755180070e-03, 3.41808653458e-04, 7.35802520505e-04,-2.60676135678e-04,-1.24600791734e-04, 8.71127046721e-05, 5.10595048707e-06,-

1.66401762971e-05, 3.01096431629e-06, 1.53193147669e-06,-
6.86275565776e-07, 1.44708829879e-08, 4.63693777578e-08,-
1.11640206703e-08, 8.66684883899e-10};

- Daub40 = { 7.79953613666e-04, 1.05493946249e-02, 6.34237804590e-02,
2.19942113551e-01, 4.72696185310e-01, 6.10493238938e-01,
3.61502298739e-01,-1.39212088011e-01,-3.26786800434e-01,-
1.67270883090e-02, 2.28291050819e-01, 3.98502464577e-02,-
1.55458750707e-01,-2.47168273386e-02, 1.02291719174e-01,
5.63224685730e-03,-6.17228996246e-02, 5.87468181181e-03,
3.22942995307e-02,-8.78932492390e-03,-1.38105261371e-02,
6.72162730225e-03, 4.42054238704e-03,-3.58149425960e-03,-
8.31562172822e-04, 1.39255961932e-03,-5.34975984399e-05,-
3.85104748699e-04, 1.01532889736e-04, 6.77428082837e-05,-
3.71058618339e-05,-4.37614386218e-06, 7.24124828767e-06,-
1.01199401001e-06,-6.84707959700e-07, 2.63392422627e-07,
2.01432202355e-10,-1.81484324829e-08, 4.05612705555e-09,-
2.99883648961e-10};

- Daub42 = { 5.48822509852e-04, 7.77663905235e-03, 4.92477715381e-02,
1.81359625440e-01, 4.19687944939e-01, 6.01506094935e-01,
4.44590451927e-01,-3.57229196172e-02,-3.35664089530e-01,-
1.12397071568e-01, 2.11564527680e-01, 1.15233298439e-01,-
1.39940424932e-01,-8.17759429808e-02, 9.66003903237e-02,
4.57234057492e-02,-6.49775048937e-02,-1.86538592021e-02,
3.97268354278e-02, 3.35775639033e-03,-2.08920536779e-02,
2.40347092080e-03, 8.98882438197e-03,-2.89133434858e-03,-
2.95837403893e-03, 1.71660704063e-03, 6.39418500512e-04,-
6.90671117082e-04,-3.19640627768e-05, 1.93664650416e-04,-
3.63552025008e-05,-3.49966598498e-05, 1.53548250927e-05,
2.79033053981e-06,-3.09001716454e-06, 3.16609544236e-07,
2.99213663046e-07,-1.00040087903e-07,-2.25401497467e-09,
7.05803354123e-09,-1.47195419765e-09, 1.03880557102e-10};

- Daub44 = { 3.86263231491e-04, 5.72185463133e-03, 3.80699372364e-02,
1.48367540890e-01, 3.67728683446e-01, 5.78432731009e-01,
5.07901090622e-01, 7.37245011836e-02,-3.12726580428e-01,-
2.00568406104e-01, 1.64093188106e-01, 1.79973187992e-01,-

9.71107984091e-02,-1.31768137686e-01, 6.80763143927e-02,
 8.45573763668e-02,-5.13642542974e-02,-4.65308118275e-02,
 3.69708466206e-02, 2.05867076275e-02,-2.34800013444e-02,-
 6.21378284936e-03, 1.25647252183e-02, 3.00137398507e-04,-
 5.45569198615e-03, 1.04426073918e-03, 1.82701049565e-03,-
 7.70690988123e-04,-4.23787399839e-04, 3.28609414213e-04,
 4.34589990453e-05,-9.40522363481e-05, 1.13743496621e-05,
 1.73737569575e-05,-6.16672931646e-06,-1.56517913199e-06,
 1.29518205731e-06,-8.77987987336e-08,-1.28333622875e-07,
 3.76122874933e-08, 1.68017140492e-09,-2.72962314663e-09,
 5.33593882166e-10,-3.60211348433e-11};

- Daub46 = { 2.71904194128e-04, 4.20274889318e-03, 2.93100036578e-02,
 1.20515531783e-01, 3.18450813852e-01, 5.44931147873e-01,
 5.51018517241e-01, 1.81392625363e-01,-2.61392148030e-01,-
 2.71402098607e-01, 9.21254070824e-02, 2.23573658242e-01,-
 3.30374470942e-02,-1.64011321531e-01, 2.02830745756e-02,
 1.12297043618e-01,-2.11262123562e-02,-7.02073915749e-02,
 2.17658568344e-02, 3.84953325225e-02,-1.85235136501e-02,-
 1.75371010030e-02, 1.27519439315e-02, 6.03184065002e-03,-
 7.07531927370e-03,-1.13486547335e-03, 3.12287644981e-03,-
 2.46501400516e-04,-1.06123122888e-03, 3.19420492709e-04,
 2.56762452007e-04,-1.50021850349e-04,-3.37889483412e-05,
 4.42607120310e-05,-2.63520788924e-06,-8.34787556785e-06,
 2.39756954684e-06, 8.14757483477e-07,-5.33900540520e-07,
 1.85309178563e-08, 5.41754917953e-08,-1.39993549543e-08,-
 9.47288590181e-10, 1.05044645369e-09,-1.93240511131e-10,
 1.25020330235e-11};

- Daub48 = { 1.91435800947e-04, 3.08208171490e-03, 2.24823399497e-02,
 9.72622358336e-02, 2.72908916067e-01, 5.04371040839e-01,
 5.74939221095e-01, 2.80985553233e-01,-1.87271406885e-01,-
 3.17943078999e-01, 4.77661368434e-03, 2.39237388780e-01,
 4.25287296414e-02,-1.71175351370e-01,-3.87771735779e-02,
 1.21016303469e-01, 2.09801137091e-02,-8.21616542080e-02,-
 4.57843624181e-03, 5.13016200399e-02,-4.94470942812e-03,-
 2.82131070949e-02, 7.66172188164e-03, 1.30499708710e-02,-
 6.29143537001e-03,-4.74656878632e-03, 3.73604617828e-03,

1.15376493683e-03,-1.69645681897e-03,-4.41618485614e-05,
 5.86127059318e-04,-1.18123323796e-04,-1.46007981776e-04,
 6.55938863930e-05, 2.18324146046e-05,-2.02288829261e-05,
 1.34115775080e-08, 3.90110033859e-06,-8.98025314393e-07,-
 4.03250775687e-07, 2.16633965327e-07,-5.05764541979e-10,-
 2.25574038817e-08, 5.15777678967e-09, 4.74837582425e-10,-
 4.02465864458e-10, 6.99180115763e-11,-4.34278250380e-12};

- Daub50 = { 1.34802979347e-04, 2.25695959185e-03, 1.71867412540e-02,
 7.80358628721e-02, 2.31693507886e-01, 4.59683415146e-01,
 5.81636896746e-01, 3.67885074802e-01,-9.71746409646e-02,-
 3.36473079641e-01,-8.75876145876e-02, 2.24537819745e-01,
 1.18155286719e-01,-1.50560213750e-01,-9.85086152899e-02,
 1.06633805018e-01, 6.67521644940e-02,-7.70841110565e-02,-
 3.71739628611e-02, 5.36179093987e-02, 1.55426059291e-02,-
 3.40423204606e-02,-3.07983679484e-03, 1.89228044766e-02,-
 1.98942578220e-03,-8.86070261804e-03, 2.72693625873e-03,
 3.32270777397e-03,-1.84248429020e-03,-8.99977423746e-04,
 8.77258193674e-04, 1.15321244046e-04,-3.09880099098e-04,
 3.54371452327e-05, 7.90464000396e-05,-2.73304811996e-05,-
 1.27719529319e-05, 8.99066139306e-06, 5.23282770815e-07,-
 1.77920133265e-06, 3.21203751886e-07, 1.92280679014e-07,-
 8.65694173227e-08,-2.61159855611e-09, 9.27922448008e-09,-
 1.88041575506e-09,-2.22847491022e-10, 1.53590157016e-10,-
 2.52762516346e-11, 1.50969208282e-12};

- Daub52 = { 9.49379575071e-05, 1.65052023353e-03, 1.30975542925e-02,
 6.22747440251e-02, 1.95039438716e-01, 4.13292962278e-01,
 5.73669043034e-01, 4.39158311789e-01, 1.77407678098e-03,-
 3.26384593691e-01,-1.74839961289e-01, 1.81291832311e-01,
 1.82755409589e-01,-1.04323900285e-01,-1.47977193275e-01,
 6.98231861132e-02, 1.06482405249e-01,-5.34485616814e-02,-
 6.86547596040e-02, 4.22321857963e-02, 3.85357159711e-02,-
 3.13781103630e-02,-1.77609035683e-02, 2.07349201799e-02,
 5.82958055531e-03,-1.17854979061e-02,-5.28738399262e-04,
 5.60194723942e-03,-9.39058250473e-04,-2.14553028156e-03,
 8.38348805654e-04, 6.16138220457e-04,-4.31955707426e-04,-
 1.06057474828e-04, 1.57479523860e-04,-5.27779549303e-06,-

4.10967399639e-05, 1.07422154087e-05, 7.00007868296e-06,-
 3.88740016185e-06,-4.65046322064e-07, 7.93921063370e-07,-
 1.07900423757e-07,-8.90446637016e-08, 3.40779562129e-08,
 2.16932825985e-09,-3.77601047853e-09, 6.78004724582e-10,
 1.00230319104e-10,-5.84040818534e-11, 9.13051001637e-12,-
 5.25187122424e-13};

- Daub54 = { 6.68713138543e-05, 1.20553123167e-03, 9.95258878087e-03,
 4.94525999829e-02, 1.62922027502e-01, 3.67110214125e-01,
 5.53849860990e-01, 4.93406122677e-01, 1.02840855061e-01,-
 2.89716803314e-01,-2.48264581903e-01, 1.14823019517e-01,
 2.27273288414e-01,-3.87864186318e-02,-1.78031740959e-01,
 1.57993974602e-02, 1.31197971717e-01,-1.40627515558e-02,-
 9.10229065295e-02, 1.73110182654e-02, 5.79694057347e-02,-
 1.85124935619e-02,-3.27390666310e-02, 1.61469669223e-02,
 1.56655956489e-02,-1.15771864589e-02,-5.86209634546e-03,
 6.85663560968e-03, 1.34262687730e-03,-3.33285446952e-03,
 1.45752962593e-04, 1.30117745024e-03,-3.41835122691e-04,-
 3.87901857410e-04, 2.01971987969e-04, 7.66005838706e-05,-
 7.71114551779e-05,-3.51748361490e-06, 2.06344264773e-05,-
 3.90116407063e-06,-3.65750090818e-06, 1.63436962472e-06,
 3.05088068625e-07,-3.47246814739e-07, 3.28655896805e-08,
 4.02625505286e-08,-1.32133227399e-08,-1.30946560685e-09,
 1.52161498477e-09,-2.41552692801e-10,-4.37498622429e-11,
 2.21366208806e-11,-3.29579012247e-12, 1.82818835288e-13};

- Daub56 = { 4.71080777501e-05, 8.79498515984e-04, 7.54265037764e-03,
 3.90926081154e-02, 1.35137914253e-01, 3.22563361285e-01,
 5.24998231630e-01, 5.30516293441e-01, 2.00176144045e-01,-
 2.30498954047e-01,-3.01327809532e-01, 3.28578791633e-02,
 2.45808151373e-01, 3.69068853157e-02,-1.82877330732e-01,-
 4.68382337445e-02, 1.34627567910e-01, 3.44786312750e-02,-
 9.76853558056e-02,-1.73419228313e-02, 6.77478955019e-02,
 3.44801895554e-03,-4.33333686160e-02, 4.43173291006e-03,
 2.46880600101e-02,-6.81554976455e-03,-1.20635919682e-02,
 5.83881662774e-03, 4.78486311245e-03,-3.72546124707e-03,-
 1.36037384563e-03, 1.87599866820e-03, 1.41567239314e-04,-
 7.48674955911e-04, 1.15465606365e-04, 2.29579098223e-04,-

8.90390149004e-05,-4.90771341619e-05, 3.64140121105e-05,
 4.63866498139e-06,-1.00432604133e-05, 1.24790031757e-06,
 1.84036373451e-06,-6.67021547995e-07,-1.75746117320e-07,
 1.49066001353e-07,-8.26238731562e-09,-1.78413869087e-08,
 5.04404705638e-09, 6.94454032894e-10,-6.07704124722e-10,
 8.49222001105e-11, 1.86736726378e-11,-8.36549047125e-12,
 1.18885053340e-12,-6.36777235471e-14};

- Daub58 = { 3.31896627984e-05, 6.40951680304e-04, 5.70212651777e-03,
 3.07735802214e-02, 1.11370116951e-01, 2.80653455970e-01,
 4.89758804762e-01, 5.51374432758e-01, 2.89105238335e-01,-
 1.54028734459e-01,-3.30040948917e-01,-5.57068000729e-02,
 2.36105236153e-01, 1.12419174873e-01,-1.60877988594e-01,-
 1.07845949938e-01, 1.14472295893e-01, 8.32207471624e-02,-
 8.51254926156e-02,-5.50274895253e-02, 6.34791645842e-02,
 3.05315432727e-02,-4.51879812777e-02,-1.29171425542e-02,
 2.94704318717e-02, 2.64832730767e-03,-1.70412245736e-02,
 1.73788033272e-03, 8.46972549356e-03,-2.55080712778e-03,-
 3.47379898968e-03, 1.87712092572e-03, 1.08705394222e-03,-
 1.00077832708e-03,-2.00071136307e-04, 4.11128345474e-04,-
 2.29201804121e-05,-1.29304484008e-04, 3.64502606856e-05,
 2.91334475016e-05,-1.65732839530e-05,-3.59364480402e-06,
 4.75060924645e-06,-3.02905459205e-07,-8.97570175063e-07,
 2.63389838699e-07, 9.38719741109e-08,-6.28615692201e-08,
 1.07659190661e-09, 7.76897885477e-09,-1.89399538617e-09,-
 3.42680086326e-10, 2.40709945350e-10,-2.94058925076e-11,-
 7.83250973362e-12, 3.15276241337e-12,-4.28565487006e-13,
 2.21919131158e-14};

- Daub60 = { 2.33861617273e-05, 4.66637950428e-04, 4.30079716504e-03,
 2.41308326715e-02, 9.12383040670e-02, 2.42020670940e-01,
 4.50487821853e-01, 5.57572232912e-01, 3.66242683371e-01,-
 6.61836707759e-02,-3.32966975020e-01,-1.41968513330e-01,
 1.99462121580e-01, 1.77829873244e-01,-1.14558219432e-01,-
 1.57236817959e-01, 7.27786589703e-02, 1.22747746045e-01,-
 5.38064654582e-02,-8.76586900363e-02, 4.38016646714e-02,
 5.67123657447e-02,-3.56733974967e-02,-3.22637589193e-02,
 2.70786195952e-02, 1.52879607698e-02,-1.83997438681e-02,-

5.29685966613e-03, 1.09156316583e-02, 6.19671756497e-04,-
 5.53073014819e-03, 8.43384586662e-04, 2.32452009406e-03,-
 8.60927696811e-04,-7.67878250438e-04, 5.05094823903e-04,
 1.72482584235e-04,-2.16171830116e-04,-8.54830546758e-06,
 6.98200837080e-05,-1.33971686329e-05,-1.63615247872e-05,
 7.25214553589e-06, 2.32754909849e-06,-2.18726767699e-06,
 1.09947433852e-08, 4.26166232601e-07,-1.00041468235e-07,-
 4.76437996513e-08, 2.60544275497e-08, 5.55339786139e-10,-
 3.33110568046e-09, 6.98486269183e-10, 1.61362297827e-10,-
 9.46138799727e-11, 1.00010513139e-11, 3.23942863853e-12,-
 1.18523759210e-12, 1.54399757084e-13,-7.73794263095e-15};

- Daub62 = { 1.64801338645e-05, 3.39412203776e-04, 3.23688406862e-03,
 1.88536916129e-02, 7.43360930116e-02, 2.07012874485e-01,
 4.09192200037e-01, 5.51139840914e-01, 4.29468808206e-01,
 2.71692124973e-02,-3.10955118319e-01,-2.17978485523e-01,
 1.40178288765e-01, 2.24966711473e-01,-4.99263491604e-02,-
 1.86962360895e-01, 1.54369884294e-02, 1.45089500931e-01,-
 8.13983227346e-03,-1.07612773323e-01, 1.09412974523e-02,
 7.53536117432e-02,-1.48800266181e-02,-4.86190754648e-02,
 1.61541715659e-02, 2.80476193667e-02,-1.42762752777e-02,-
 1.39005529392e-02, 1.05176394873e-02, 5.51616357331e-03,-
 6.52085237587e-03,-1.42826422321e-03, 3.39306677671e-03,-
 6.39790110601e-05,-1.45904174198e-03, 3.43139829690e-04,
 4.99881617563e-04,-2.39658346940e-04,-1.24341161725e-04,
 1.08958435041e-04, 1.50133572744e-05,-3.63125515786e-05,
 4.03452023518e-06, 8.79530134269e-06,-3.03514236589e-06,-
 1.36906023094e-06, 9.81001542204e-07, 5.32725065697e-08,-
 1.97592512917e-07, 3.61682651733e-08, 2.32830971382e-08,-
 1.06152960215e-08,-6.47431168795e-10, 1.40856815102e-09,-
 2.52404395415e-10,-7.34893003248e-11, 3.69210880887e-11,-
 3.32700896712e-12,-1.32433491724e-12, 4.44546709629e-13,-
 5.55944205057e-14, 2.69938287976e-15};
- Daub64 = { 1.16146330213e-05, 2.46656690638e-04, 2.43126191957e-03,
 1.46810463814e-02, 6.02574991203e-02, 1.75750783639e-01,
 3.67509628597e-01, 5.34317919340e-01, 4.77809163733e-01,
 1.20630538265e-01,-2.66698181476e-01,-2.77421581558e-01,

6.47133548055e-02, 2.48310642356e-01, 2.46624448396e-02,-
 1.92102344708e-01,-4.89951171846e-02, 1.45232079475e-01,
 4.44049081999e-02,-1.09456113116e-01,-2.96278725084e-02,
 8.08741406384e-02, 1.41061515161e-02,-5.69263140624e-02,-
 2.38026446493e-03, 3.70514579235e-02,-4.14590766082e-03,-
 2.16628228363e-02, 6.16752731068e-03, 1.10174007154e-02,-
 5.41156825727e-03,-4.64921675118e-03, 3.62722464068e-03,
 1.46895510046e-03,-1.96474055582e-03,-2.21167872957e-04,
 8.67305851845e-04,-1.02453731060e-04,-3.05965442382e-04,
 1.05391546173e-04, 8.10367832913e-05,-5.25980928268e-05,-
 1.29404577940e-05, 1.82426840198e-05,-6.36178153226e-07,-
 4.55830957626e-06, 1.20288903632e-06, 7.56004762559e-07,-
 4.28597069315e-07,-5.00336186874e-08, 8.96596631195e-08,-
 1.21992435948e-08,-1.10438302172e-08, 4.25042231198e-09,
 4.38438779994e-10,-5.88109146263e-10, 8.90472379622e-11,
 3.26327074133e-11,-1.43091876516e-11, 1.07561065350e-12,
 5.36148222961e-13,-1.66380048943e-13, 2.00071530381e-14,-
 9.42101913953e-16};

- Daub66 = { 8.18635831417e-06, 1.79101615370e-04, 1.82270943516e-03,
 1.13959433745e-02, 4.86146665317e-02, 1.48186313180e-01,
 3.26718130117e-01, 5.09376172514e-01, 5.11254770583e-01,
 2.09582350713e-01,-2.04202622398e-01,-3.15997410766e-01,-
 1.92783394369e-02, 2.45420612119e-01, 9.98515586803e-02,-
 1.71428099051e-01,-1.10844133116e-01, 1.21967856403e-01,
 9.47880880506e-02,-9.11469683513e-02,-7.03024850540e-02,
 7.01911439409e-02, 4.57345618938e-02,-5.34712513358e-02,-
 2.52485829774e-02, 3.86870607602e-02, 1.07032658200e-02,-
 2.57287617547e-02,-2.16775861735e-03, 1.53169541158e-02,-
 1.59428878241e-03,-7.95354038705e-03, 2.38906240816e-03,
 3.48080095340e-03,-1.86071821445e-03,-1.20430925760e-03,
 1.07438069635e-03, 2.72730584733e-04,-4.90832900759e-04,
 4.39316625176e-06, 1.78043189825e-04,-4.16043851627e-05,-
 4.92956442341e-05, 2.42333539881e-05, 9.07080575782e-06,-
 8.86612136675e-06,-3.60751610287e-07, 2.28837127614e-06,-
 4.42692340795e-07,-3.98579129198e-07, 1.82244333257e-07,
 3.37797270373e-08,-3.98783819851e-08, 3.67286357683e-09,
 5.11121185734e-09,-1.67139267725e-09,-2.49640210524e-10,

2.42683310230e-10,-3.04957445394e-11,-1.42023685988e-11,
5.50941472076e-12,-3.34348121895e-13,-2.15248838683e-13,
6.21474024717e-14,-7.19651054536e-15, 3.28937367841e-16};

- Daub68 = { 5.77051063273e-06, 1.29947620067e-04, 1.36406139005e-03,
8.81988940388e-03, 3.90488413517e-02, 1.24152482111e-01,
2.87765059233e-01, 4.78478746279e-01, 5.30555099656e-01,
2.90366329507e-01,-1.28246842174e-01,-3.31525301508e-01,-
1.03891915515e-01, 2.16907220187e-01, 1.66601750412e-01,-
1.27337358223e-01,-1.60924927177e-01, 7.79918469379e-02,
1.34125960271e-01,-5.44829680641e-02,-1.02947596992e-01,
4.35760946496e-02, 7.31852354367e-02,-3.70128384178e-02,-
4.74385596452e-02, 3.07397465739e-02, 2.72283507563e-02,-
2.36717379228e-02,-1.31439800166e-02, 1.64093741998e-02,
4.71364926099e-03,-1.00455067083e-02,-6.19474884515e-04,
5.33495076875e-03,-7.69212797506e-04,-2.39945394353e-03,
8.58995987436e-04, 8.75199906407e-04,-5.52735576214e-04,-
2.32673214023e-04, 2.65077239755e-04, 2.66005001845e-05,-
9.91469777078e-05, 1.35311722724e-05, 2.84495141969e-05,-
1.05765749425e-05,-5.71082651099e-06, 4.16987175854e-06,
4.97971810142e-07,-1.11630653481e-06, 1.44819570833e-07,
2.02599066666e-07,-7.52670174041e-08,-1.99034650153e-08,
1.74042333293e-08,-8.66574426136e-10,-2.31650194699e-09,
6.44637821032e-10, 1.30041031860e-10,-9.90477453763e-11,
1.00420873546e-11, 6.08012535400e-12,-2.10787910891e-12,
9.79945115821e-14, 8.57919405179e-14,-2.31708370390e-14,
2.58733838193e-15,-1.14894475448e-16};
- Daub70 = { 4.06793406114e-06, 9.42146947557e-05, 1.01912268037e-03,
6.80729288431e-03, 3.12362885114e-02, 1.03404455861e-01,
2.51307378994e-01, 4.43592739224e-01, 5.37008427509e-01,
3.60345640518e-01,-4.38838818739e-02,-3.23822864912e-01,-
1.81786976766e-01, 1.66041357490e-01, 2.17299289321e-01,-
6.52628713106e-02,-1.91919589298e-01, 1.93095446660e-02,
1.55292480396e-01,-4.75268083411e-03,-1.20585522643e-01,
4.73422917264e-03, 8.99135475707e-02,-9.31855894990e-03,-
6.33560374404e-02, 1.32285495850e-02, 4.12546930647e-02,-
1.43668397842e-02,-2.41694978016e-02, 1.27664567156e-02,

1.22894360081e-02,-9.57779789923e-03,-5.08599164923e-03,
 6.13775458674e-03, 1.42808879407e-03,-3.35764438092e-03,
 7.61596943517e-06, 1.54963746970e-03,-3.34669216425e-04,-
 5.86481031899e-04, 2.64832881996e-04, 1.70001228366e-04,-
 1.36588307226e-04,-2.97699596284e-05, 5.30414312291e-05,-
 2.43700152682e-06,-1.57244207727e-05, 4.30804786171e-06,
 3.35334586287e-06,-1.89592961769e-06,-3.90393173328e-07,
 5.30236861690e-07,-3.70030837820e-08,-9.99039694453e-08,
 3.00818865071e-08, 1.08490273378e-08,-7.45811655289e-09,
 5.89795131038e-11, 1.03082334548e-09,-2.43354557375e-10,-
 6.40793825650e-11, 4.00053662725e-11,-3.12563935710e-12,-
 2.56706547615e-12, 8.01508853368e-13,-2.59795432889e-14,-
 3.39772085679e-14, 8.62403743472e-15,-9.29801252932e-16,
 4.01462871233e-17};

- Daub72 = { 2.86792518275e-06, 6.82602867854e-05, 7.60215109966e-04,
 5.24029737740e-03, 2.48905656448e-02, 8.56520925952e-02,
 2.17756953097e-01, 4.06433697708e-01, 5.32266895260e-01,
 4.17875335600e-01, 4.39751975293e-02,-2.94421039589e-01,-
 2.46807036978e-01, 9.81142041631e-02, 2.46537277608e-01,
 7.27851509579e-03,-1.99337205608e-01,-4.58614007463e-02,
 1.54106236627e-01, 5.02761800735e-02,-1.18803754310e-01,-
 3.98808535755e-02, 9.11567822580e-02, 2.50387214495e-02,-
 6.82090166368e-02,-1.13191003168e-02, 4.85130835478e-02,
 1.42497266176e-03,-3.19807206776e-02, 3.98404019871e-03,
 1.90635947806e-02,-5.65781324505e-03,-9.99026347328e-03,
 5.02298910666e-03, 4.41348483535e-03,-3.48454144540e-03,-
 1.50307406629e-03, 1.99079377185e-03, 2.77681279571e-04,-
 9.46340382326e-04, 8.61456575899e-05, 3.69350728496e-04,-
 1.15511889584e-04,-1.13189946808e-04, 6.69474119693e-05,
 2.37510668366e-05,-2.73139082465e-05,-1.18347105998e-06,
 8.37221819816e-06,-1.58614578243e-06,-1.87081160285e-06,
 8.31142127970e-07, 2.54842352255e-07,-2.45537765843e-07,
 2.75324907333e-09, 4.79904346545e-08,-1.15609368881e-08,-
 5.61278434332e-09, 3.13884169578e-09, 1.09081555371e-10,-
 4.51254577856e-10, 8.96241820385e-11, 3.03742909811e-11,-
 1.59971668926e-11, 8.87684628721e-13, 1.07096935711e-12,-
 3.02928502697e-13, 5.54226318263e-15, 1.33807138629e-14,-

3.20462854340e-15, 3.33997198481e-16, -1.40327417537e-17};

- Daub74 = { 2.02206086249e-06, 4.94234375062e-05, 5.66241837706e-04, 4.02414036825e-03, 1.97622861538e-02, 7.05848259771e-02, 1.87326331862e-01, 3.68440972400e-01, 5.18167040855e-01, 4.62207553661e-01, 1.30878963233e-01, -2.46180429761e-01, -2.94375915262e-01, 1.96715004523e-02, 2.51523254360e-01, 8.18060283872e-02, -1.81962291778e-01, -1.08451713823e-01, 1.29929646959e-01, 1.01780296838e-01, -9.66075406166e-02, -8.23302119065e-02, 7.50476199483e-02, 5.95674108715e-02, -5.92568156326e-02, -3.82538294793e-02, 4.58079441512e-02, 2.09728005925e-02, -3.35235840641e-02, -8.83349389041e-03, 2.26186515445e-02, 1.69047238348e-03, -1.37639819628e-02, 1.51930577883e-03, 7.38775745285e-03, -2.24805318700e-03, -3.39452327640e-03, 1.81687134380e-03, 1.26393425811e-03, -1.11148486531e-03, -3.28078847088e-04, 5.49053277337e-04, 1.53443902319e-05, -2.20894403245e-04, 4.33672612594e-05, 7.05513878206e-05, -3.09866292761e-05, -1.63916249616e-05, 1.35432771841e-05, 1.84994500311e-06, -4.30994155659e-06, 4.85473139699e-07, 1.00212139929e-06, -3.49494860344e-07, -1.50988538867e-07, 1.10903123221e-07, 5.35065751546e-09, -2.25219383672e-08, 4.22448570636e-09, 2.79397446595e-09, -1.29720500146e-09, -1.03141112909e-10, 1.94616489408e-10, -3.20339824412e-11, -1.39841571553e-11, 6.33495544097e-12, -2.09636319423e-13, -4.42161240987e-13, 1.13805283092e-13, -4.51888960746e-16, -5.24302569188e-15, 1.18901238750e-15, -1.19928033585e-16, 4.90661506493e-18};
- Daub76 = { 1.42577664167e-06, 3.57625199426e-05, 4.21170266472e-04, 3.08308811925e-03, 1.56372493475e-02, 5.78899436128e-02, 1.60071993564e-01, 3.30775781411e-01, 4.96591175311e-01, 4.93356078517e-01, 2.13050571355e-01, -1.82867667708e-01, -3.21675637808e-01, -6.22665060478e-02, 2.32125963835e-01, 1.49985119618e-01, -1.41795685973e-01, -1.59912565158e-01, 8.56381215561e-02, 1.41414734073e-01, -5.65864586307e-02, -1.14731170710e-01, 4.30958954330e-02, 8.72043982620e-02, -3.66051034028e-02, -6.17662087084e-02, 3.19898775315e-02, 4.00549811051e-02, -2.68914938808e-02, -2.31141340205e-02,

2.09046452556e-02, 1.12904972786e-02,-1.47018820653e-02,-
 4.13130665603e-03, 9.21478503219e-03, 5.62571574840e-04,-
 5.07131450921e-03, 7.16982182106e-04, 2.40069778189e-03,-
 8.44862666553e-04,-9.42461407722e-04, 5.81075975053e-04,
 2.81763925038e-04,-3.03102046072e-04,-4.55568269666e-05,
 1.26204335016e-04,-1.15540910383e-05,-4.17514164854e-05,
 1.33417614992e-05, 1.03735918404e-05,-6.45673042846e-06,-
 1.55084435011e-06, 2.14996026993e-06,-8.48708758607e-08,-
 5.18773373887e-07, 1.39637754550e-07, 8.40035104689e-08,-
 4.88475793745e-08,-5.42427480028e-09, 1.03470453927e-08,-
 1.43632948779e-09,-1.34919775398e-09, 5.26113255735e-10,
 6.73233649018e-11,-8.27825652253e-11, 1.10169293459e-11,
 6.29153731703e-12,-2.48478923756e-12, 2.62649650406e-14,
 1.80866123627e-13,-4.24981781957e-14,-4.56339716212e-16,
 2.04509967678e-15,-4.40530704248e-16, 4.30459683955e-17,-
 1.71615245108e-18};

- sym8[]={0.032223100604,-0.012603967262,-
 0.099219543577,0.297857795606, 0.803738751807,0.497618667633,-
 0.029635527646,-0.075765714789}
- sym16[]={0.001889950333,-0.000302920515, -
 0.014952258337,0.003808752014,0.049137179674,-0.027219029917, -
 0.051945838108,0.364441894835,0.777185751701,0.481359651258, -
 0.061273359068, -0.143294238351,0.007607487325,0.031695087811, -
 0.000542132332,-0.003382415951}
- coif6[]={ -
 0.072732619513,0.337897662458,0.852572020212,0.384864846864, -
 0.072732619513,-0.015655728135}
- coif12[]={0.016387336464,-0.041464936782, -
 0.067372554722,0.386110066823,0.812723635450,0.417005184424,-
 0.076488599079, -0.059434418647,0.023680171946,0.005611434819,-
 0.001823208871,-0.000720549445}
- coif18[]={-0.003793512864,0.007782596427,0.023452696142,-
 0.065771911282, -0.061123390003,0.405176902410,0.793777222626,
 0.428483476378,-0.071799821619, -0.082301927107,0.034555027573,

0.015880544864,-0.009007976137, -0.002574517689,0.001117518771,
0.000466216960, -0.000070983303,-0.000034599773

- $\text{coif24}[] = \{0.000892313669, -0.001629492013, -0.007346166328, 0.016068943965, 0.026682300156, -0.081266699681, -0.056077313317, 0.415308407030, 0.782238930921, 0.434386056491, -0.066627474263, -0.096220442034, 0.039334427123, 0.025082261845, -0.015211731528, -0.005658286687, 0.003751436157, 0.001266561929, -0.000589020756, -0.000259974552, 0.000062339034, 0.000031229876, -0.000003259680, -0.000001784985\}$
- $\text{coif30}[] = \{-0.000212080840, 0.000358589688, 0.002178236358, -0.004159358782, -0.010131117521, 0.023408156788, 0.028168028974, -0.091920010569, -0.052043163181, 0.421566206733, 0.774289603730, 0.437991626216, -0.062035963969, -0.105574208714, 0.041289208754, 0.032683574270, -0.019761778945, -0.009164231163, 0.006764185449, 0.002433373213, -0.001662863702, -0.000638131343, 0.000302259582, 0.000140541150, -0.000041340432, -0.000021315027, 0.000003734655, 0.000002063762, -0.000000167443, -0.000000095177\}$
- $\text{Beylkin18} = \{0.099305765374353, 0.424215360812961, 0.699825214056600, 0.449718251149468, -0.110927598348234, -0.264497231446384, 0.026900308803690, 0.155538731877093, -0.017520746266529, -0.088543630622924, 0.019679866044322, 0.042916387274192, -0.017460408696028, -0.014365807968852, 0.010040411844631, 0.0014842347824723, -0.002736031626258, 0.0006404853285212\};$
- $\text{Vaidyanathan24} = \{-0.000062906118, 0.000343631905, -0.000453956620, -0.000944897136, 0.002843834547, 0.000708137504, -0.008839103409, 0.003153847056, 0.019687215010, -0.014853448005, -0.035470398607, 0.038742619293, 0.055892523691, -0.077709750902, -0.083928884366, 0.131971661417, 0.135084227129, -0.194450471766, -0.263494802488, 0.201612161775, 0.635601059872, 0.572797793211, 0.250184129505, 0.045799334111\};$

APÊNDICE B - IMPLEMENTAÇÃO DA TÉCNICA PROPOSTA

```

/*****
/*      Desenvolvido por: Fabrício Lopes Sanchez / Rodrigo C. Guido      */
/*                                  Arquivo .cpp                                  */
*****/

#include<iostream>
#include<stdio.h>
#include<math.h>
#include<string.h>
#include "wavelet.h"
#include<conio.h>

using namespace std;
//-----
main(int i,char* n[])
{
short converte2de8para1de16(unsigned char, unsigned char);
void cepstrum(double*,long,unsigned long);
FILE* fr;

if(((fr=fopen(n[1],"rb"))!=NULL))
{
    struct
    {
        unsigned char riff[4];
        unsigned long len;
    } riff_header;
    fread(&riff_header,sizeof(riff_header),1,fr);
    cout<<"\nArquivo do tipo:
"<<riff_header.riff[0]<<riff_header.riff[1]<<riff_header.riff[2]<<riff_header.riff[3];
    cout<<"\nTamanho excluindo header: "<<riff_header.len;

    //////////////////////////////////////

    unsigned char wave[4];
    fread(&wave,sizeof(wave),1,fr); //////
    cout<<"\nSub-Tipo: "<<wave[0]<<wave[1]<<wave[2]<<wave[3];

```

```

////////////////////////////////////
struct
{
    unsigned char id[4];
    unsigned long len;
} riff_chunk;
fread(&riff_chunk,sizeof(riff_chunk),1,fr);
cout<<"\nIdentificador:
"<<riff_chunk.id[0]<<riff_chunk.id[1]<<riff_chunk.id[2]<<riff_chunk.id[3];
cout<<"\nComprimento do chunk apos header: "<<riff_chunk.len;

////////////////////////////////////
struct
{
    unsigned short formattag;
    unsigned short numberofchannels;
    unsigned long samplingrate;
    unsigned long avgbytespersecond;
    unsigned short blockalign;
} wave_chunk;
fread(&wave_chunk,sizeof(wave_chunk),1,fr);
//tratamento de uma excessao que costuma aparecer em alguns arquivos wav... O
correto seriam 16 bytes, as vezes aparecem 18 ou mais...
if(riff_chunk.len>16)
{
    unsigned char excesso;
    for(int i=0;i<riff_chunk.len-16;i++)
    {
        fread(&excesso,sizeof(excesso),1,fr);
    }
}

//fim do tratamento da excess?
cout<<"\nCategoria do formato: "<<wave_chunk.formattag;
cout<<"\nNumero de canais: "<<wave_chunk.numberofchannels;
cout<<"\nTaxa de amostragem: "<<wave_chunk.samplingrate;
cout<<"\nMedia do num. de bps: "<<wave_chunk.avgbytespersecond;
cout<<"\nAlinhamento do bloco em bytes: "<<wave_chunk.blockalign;

```

```

////////////////////////////////////

if(wave_chunk.formattag==1) //PCM
{
    int resolucao=(wave_chunk.avgbytespersecond *
8)/(wave_chunk.numberofchannels * wave_chunk.samplingrate);// pq nao bitssample
    cout<<"\nResolucao: "<<resolucao;

    struct
    {
        unsigned char data[4];
        unsigned long chunk_size;
    } header_data_chunk;

    fread(&header_data_chunk,sizeof(header_data_chunk),1,fr);
    cout<<"\nIdentificacao:
"<<header_data_chunk.data[0]<<header_data_chunk.data[1]<<header_data_chunk.data
[2]<<header_data_chunk.data[3];
    cout<<"\nTamanho do chunk de dados: "<<header_data_chunk.chunk_size;
    cout<<"\nNumero de frames para amostrar:
"<<header_data_chunk.chunk_size/wave_chunk.blockalign;

    long tamanho_da_janela=2;

    while(tamanho_da_janela<=(header_data_chunk.chunk_size/wave_chunk.blockalign))
        tamanho_da_janela*=2;
    tamanho_da_janela/=2;
    cout<<"\nTamanho da janela: "<<tamanho_da_janela;

    char nome_do_arquivo_texto_dos_pontos_transformados[200];
    nome_do_arquivo_texto_dos_pontos_transformados[0]='\0';
    strcat(&nome_do_arquivo_texto_dos_pontos_transformados[0],n[1]);

    strcat(&nome_do_arquivo_texto_dos_pontos_transformados[0],".transformed_data.mp"
);

    FILE* arquivo_texto_dos_pontos_transformados;

```

```
arquivo_texto_dos_pontos_transformados=fopen(nome_do_arquivo_texto_dos_pontos_
transformados,"w");
    fprintf(arquivo_texto_dos_pontos_transformados,"beginfig(1)\ndraw\n");

    if((resolucao==8) && (wave_chunk.numberofchannels==1))
    {
        unsigned char waveformdata;
        double* amostras_no_f = new
double[(header_data_chunk.chunk_size/wave_chunk.blockalign)];
        for(long
i=0;i<(header_data_chunk.chunk_size/wave_chunk.blockalign);i++)
        {
            fread(&waveformdata,sizeof(waveformdata),1,fr);
            amostras_no_f[i]=(double)waveformdata;
        }

        cepstrum(&amostras_no_f[0],tamanho_da_janela,wave_chunk.samplingrate);

        for(long i=1;i<150;i++)
            fprintf(arquivo_texto_dos_pontos_transformados,"(%d,%f)--
",i,amostras_no_f[i]);

        fprintf(arquivo_texto_dos_pontos_transformados,"(%d,%f)",150,amostras_no_f[150]);
    }
    else if((resolucao==8) && (wave_chunk.numberofchannels==2))
    {
        unsigned char waveformdata_right;
        unsigned char waveformdata_left;
        double* amostras_no_f_left = new
double[(header_data_chunk.chunk_size/wave_chunk.blockalign)];
        double* amostras_no_f_right = new
double[(header_data_chunk.chunk_size/wave_chunk.blockalign)];
        for(long
i=0;i<(header_data_chunk.chunk_size/wave_chunk.blockalign);i++)
        {
            fread(&waveformdata_left,sizeof(waveformdata_left),1,fr);
```

```
fread(&waveformdata_right,sizeof(waveformdata_right),1,fr);
amostras_no_f_right[i]=(double)waveformdata_right;
amostras_no_f_left[i]=(double)waveformdata_left;
}

cepstrum(&amostras_no_f_right[0],tamanho_da_janela,wave_chunk.samplingrate);

cepstrum(&amostras_no_f_left[0],tamanho_da_janela,wave_chunk.samplingrate);

for(long i=1;i<150;i++)
    fprintf(arquivo_texto_dos_pontos_transformados,"(%d,%f)--",i,amostras_no_f_left[i]);

fprintf(arquivo_texto_dos_pontos_transformados,"(%d,%f)",150,amostras_no_f_left[150]);
}
else if((resolucao==16) && (wave_chunk.numberofchannels==1))
{
    unsigned char waveformdata_lsb, waveformdata_msb;
    double* amostras_no_f = new
double[(header_data_chunk.chunk_size/wave_chunk.blockalign)];
    for(long
i=0;i<(header_data_chunk.chunk_size/wave_chunk.blockalign);i++)
    {
        fread(&waveformdata_lsb,sizeof(waveformdata_lsb),1,fr);
        fread(&waveformdata_msb,sizeof(waveformdata_msb),1,fr);

        amostras_no_f[i]=(double)converte2de8para1de16(waveformdata_lsb,waveformdata_msb);
    }

    cepstrum(&amostras_no_f[0],tamanho_da_janela,wave_chunk.samplingrate);

    for(long i=1;i<150;i++)
```



```
        fprintf(arquivo_texto_dos_pontos_transformados,"%d,%f)--",i,amostras_no_f[i]);

        fprintf(arquivo_texto_dos_pontos_transformados,"%d,%f",150,amostras_no_f[150]);
    }
    else if ((resolucao==16) && (wave_chunk.numberofchannels==2))
    {
        unsigned char waveformdata_lsb_left, waveformdata_lsb_right,
        waveformdata_msb_left, waveformdata_msb_right;
        double* amostras_no_f_left = new
        double[(header_data_chunk.chunk_size/wave_chunk.blockalign)];
        double* amostras_no_f_right = new
        double[(header_data_chunk.chunk_size/wave_chunk.blockalign)];
        for(long
        i=0;i<(header_data_chunk.chunk_size/wave_chunk.blockalign);i++)
        {
            fread(&waveformdata_lsb_left,sizeof(waveformdata_lsb_left),1,fr);

            fread(&waveformdata_msb_left,sizeof(waveformdata_msb_left),1,fr);

            fread(&waveformdata_lsb_right,sizeof(waveformdata_lsb_right),1,fr);

            fread(&waveformdata_msb_right,sizeof(waveformdata_msb_right),1,fr);

            amostras_no_f_left[i]=(double)converte2de8para1de16(waveformdata_lsb_left,wavefor
            mdata_msb_left);

            amostras_no_f_right[i]=(double)converte2de8para1de16(waveformdata_lsb_right,wave
            formdata_msb_right);
        }

        cepstrum(&amostras_no_f_right[0],tamanho_da_janela,wave_chunk.samplingrate);

        cepstrum(&amostras_no_f_left[0],tamanho_da_janela,wave_chunk.samplingrate);
    }
};
```

```
        for(long i=1;i<150;i++)
            fprintf(arquivo_texto_dos_pontos_transformados,"(%d,%f)--",i,amostras_no_f_left[i]);

fprintf(arquivo_texto_dos_pontos_transformados,"(%d,%f)",150,amostras_no_f_left[150]);

    }
    else
    {
        cout<<"Resolucao ou nmero de canais invalido(s)";
        exit(0);
    }
    fprintf(arquivo_texto_dos_pontos_transformados,"\nendfig;\nend.\n");
    fclose(arquivo_texto_dos_pontos_transformados);

}

else
    cout<<"FORA DO FORMATO PCM...";
    fclose(fr);
}

else
    cout<<"Arquivo nao existe ou nao pode ser aberto";
    cout<<"\n\n\n";
}

//-----
short converte2de8para1de16(unsigned char lsb, unsigned char msb)
{
    return(((msb&0x80)>>7)*(32768) +
        ((msb&0x40)>>6)*(16384) +
        ((msb&0x20)>>5)*(8192) +
        ((msb&0x10)>>4)*(4096) +
        ((msb&0x08)>>3)*(2048) +
        ((msb&0x04)>>2)*(1024) +
        ((msb&0x02)>>1)*(512) +
        ((msb&0x01))*(256) +
        ((lsb&0x80)>>7)*(128) +
```

```

        ((lsb&0x40)>>6)*(64) +
        ((lsb&0x20)>>5)*(32) +
        ((lsb&0x10)>>4)*(16) +
        ((lsb&0x08)>>3)*(8) +
        ((lsb&0x04)>>2)*(4) +
        ((lsb&0x02)>>1)*(2) +
        (lsb&0x01));
    }
//-----
void cepstrum(double* sinal, long comprimento_do_sinal, unsigned long
taxa_de_amostragem)
{
//double h[]={0.7071067, 0.7071067};//haar
//double h[]={4.82962913144e-01, 8.36516303737e-01, 2.24143868042e-01,-
1.29409522551e-01};//doub4
//double h[]={3.32670552950e-01, 8.06891509311e-01, 4.59877502118e-01,-
1.35011020010e-01,-8.54412738820e-02, 3.52262918857e-02};//doub6
//double h[]={2.30377813308e-01, 7.14846570552e-01, 6.30880767929e-01,-
2.79837694168e-02,-1.87034811719e-01, 3.08413818355e-02, 3.28830116668e-02,-
1.05974017850e-02};//doub8
//double h[]={1.60102397974e-01, 6.03829269797e-01, 7.24308528437e-01,
1.38428145901e-01,-2.42294887066e-01,-3.22448695846e-02, 7.75714938400e-02,-
6.24149021279e-03,-1.25807519990e-02, 3.33572528547e-03};//doub10
//double h[]={1.11540743350e-01, 4.94623890398e-01, 7.51133908021e-01,
3.15250351709e-01, -2.26264693965e-01,-1.29766867567e-01, 9.75016055873e-02,
2.75228655303e-02,-3.15820393174e-02, 5.53842201161e-04, 4.77725751094e-03,-
1.07730108530e-03};//doub12
//double h[]={7.78520540850e-02, 3.96539319481e-01, 7.29132090846e-01,
4.69782287405e-01,-1.43906003928e-01,-2.24036184993e-01, 7.13092192668e-02,
8.06126091510e-02,-3.80299369350e-02,-1.65745416306e-02, 1.25509985560e-02,
4.29577972921e-04,-1.80164070404e-03, 3.53713799974e-04};//doub14
//double h[]={5.44158422431e-02, 3.12871590914e-01, 6.75630736297e-01,
5.85354683654e-01,-1.58291052563e-02,-2.84015542961e-01, 4.72484573913e-04,
1.28747426620e-01,-1.73693010018e-02,-4.40882539307e-02, 1.39810279173e-02,
8.74609404740e-03,-4.87035299345e-03,-3.91740373376e-04, 6.75449406450e-04,-
1.17476784124e-04};//doub16
//double h[]={3.80779473638e-02, 2.43834674612e-01, 6.04823123690e-01,
6.57288078051e-01, 1.33197385825e-01,-2.93273783279e-01,-9.68407832229e-02,

```

1.48540749338e-01, 3.07256814793e-02,-6.76328290613e-02, 2.50947114831e-04,
2.23616621236e-02,-4.72320475775e-03,-4.28150368246e-03, 1.84764688305e-03,
2.30385763523e-04,-2.51963188942e-04, 3.93473203162e-05};//doub18
//double h[]={2.66700579005e-02, 1.88176800077e-01, 5.27201188931e-01,
6.88459039453e-01, 2.81172343660e-01,-2.49846424327e-01,-1.95946274377e-01,
1.27369340335e-01, 9.30573646035e-02,-7.13941471663e-02,-2.94575368218e-02,
3.32126740593e-02, 3.60655356695e-03,-1.07331754833e-02, 1.39535174705e-03,
1.99240529518e-03,-6.85856694959e-04,-1.16466855129e-04, 9.35886703200e-05,-
1.32642028945e-05};//doub20
//double h[]={1.86942977614e-02, 1.44067021150e-01, 4.49899764356e-01,
6.85686774916e-01, 4.11964368947e-01,-1.62275245027e-01,-2.74230846817e-01,
6.60435881966e-02, 1.49812012466e-01,-4.64799551166e-02,-6.64387856950e-02,
3.13350902190e-02, 2.08409043601e-02,-1.53648209062e-02,-3.34085887301e-03,
4.92841765605e-03,-3.08592858815e-04,-8.93023250666e-04, 2.49152523552e-04,
5.44390746993e-05,-3.46349841869e-05, 4.49427427723e-06};//doub22
//double h[]={1.31122579572e-02, 1.09566272821e-01, 3.77355135214e-01,
6.57198722579e-01, 5.15886478427e-01,-4.47638856537e-02,-3.16178453752e-01,-
2.37792572560e-02, 1.82478605927e-01, 5.35956967435e-03,-9.64321200965e-02,
1.08491302558e-02, 4.15462774950e-02,-1.22186490697e-02,-1.28408251983e-02,
6.71149900879e-03, 2.24860724099e-03,-2.17950361862e-03, 6.54512821250e-06,
3.88653062820e-04,-8.85041092082e-05,-2.42415457570e-05, 1.27769522193e-05,-
1.52907175806e-06};//doub24
//double h[]={9.20213353896e-03, 8.28612438729e-02, 3.11996322160e-01,
6.11055851158e-01, 5.88889570431e-01, 8.69857261796e-02,-3.14972907711e-01,-
1.24576730750e-01, 1.79476079429e-01, 7.29489336567e-02,-1.05807618187e-01,-
2.64884064753e-02, 5.61394771002e-02, 2.37997225405e-03,-2.38314207103e-02,
3.92394144879e-03, 7.25558940161e-03,-2.76191123465e-03,-1.31567391189e-03,
9.32326130867e-04, 4.92515251262e-05,-1.65128988556e-04, 3.06785375793e-05,
1.04419305714e-05,-4.70041647936e-06, 5.22003509845e-07};//doub26
//double h[]={6.46115346008e-03, 6.23647588493e-02, 2.54850267792e-01,
5.54305617940e-01, 6.31187849104e-01, 2.18670687758e-01,-2.71688552278e-01,-
2.18033529993e-01, 1.38395213864e-01, 1.39989016584e-01,-8.67484115681e-02,-
7.15489555040e-02, 5.52371262592e-02, 2.69814083079e-02,-3.01853515403e-02,-
5.61504953035e-03, 1.27894932663e-02,-7.46218989268e-04,-3.84963886802e-03,
1.06169108560e-03, 7.08021154235e-04,-3.86831947312e-04, -4.17772457703e-05,
6.87550425269e-05,-1.03372091845e-05,-4.38970490178e-06, 1.72499467536e-06,-
1.78713996831e-07};//doub28
//double h[]={4.53853736157e-03, 4.67433948927e-02, 2.06023863986e-01,

4.92631771708e-01, 6.45813140357e-01, 3.39002535454e-01,-1.93204139609e-01,-
2.88882596566e-01, 6.52829528487e-02, 1.90146714007e-01,-3.96661765557e-02,-
1.11120936037e-01, 3.38771439235e-02, 5.47805505845e-02,-2.57670073284e-02,-
2.08100501696e-02, 1.50839180278e-02, 5.10100036040e-03,-6.48773456031e-03,-
2.41756490761e-04, 1.94332398038e-03,-3.73482354137e-04,-3.59565244362e-04,
1.55896489920e-04, 2.57926991553e-05,-2.81332962660e-05, 3.36298718173e-06,
1.81127040794e-06,-6.31688232588e-07, 6.13335991330e-08};//doub30
//double h[]={3.18922092534e-03, 3.49077143236e-02, 1.65064283488e-01,
4.30312722846e-01, 6.37356332083e-01, 4.40290256886e-01,-8.97510894024e-02,-
3.27063310527e-01,-2.79182081330e-02, 2.11190693947e-01, 2.73402637527e-02,-
1.32388305563e-01,-6.23972275247e-03, 7.59242360442e-02,-7.58897436885e-03,-
3.68883976917e-02, 1.02976596409e-02, 1.39937688598e-02,-6.99001456341e-03,-
3.64427962149e-03, 3.12802338120e-03, 4.07896980849e-04,-9.41021749359e-04,
1.14241520038e-04, 1.74787245225e-04,-6.10359662141e-05,-1.39456689882e-05,
1.13366086612e-05,-1.04357134231e-06,-7.36365678545e-07, 2.30878408685e-07,-
2.10933963010e-08};//doub32
//double h[]={2.24180700103e-03, 2.59853937036e-02, 1.31214903307e-01,
3.70350724152e-01, 6.10996615684e-01, 5.18315764056e-01, 2.73149704032e-02,-
3.28320748363e-01,-1.26599752215e-01, 1.97310589565e-01, 1.01135489177e-01,-
1.26815691778e-01,-5.70914196316e-02, 8.11059866541e-02, 2.23123361781e-02,-
4.69224383892e-02,-3.27095553581e-03, 2.27336765839e-02,-3.04298998135e-03,-
8.60292152032e-03, 2.96799669152e-03, 2.30120524215e-03,-1.43684530480e-03,-
3.28132519409e-04, 4.39465427768e-04,-2.56101095665e-05,-8.20480320245e-05,
2.31868137987e-05, 6.99060098507e-06,-4.50594247722e-06, 3.01654960999e-07,
2.95770093331e-07,-8.42394844600e-08, 7.26749296856e-09};//doub34
//double h[]={1.57631021844e-03, 1.92885317241e-02, 1.03588465822e-01,
3.14678941337e-01, 5.71826807766e-01, 5.71801654888e-01, 1.47223111969e-01,-
2.93654040736e-01,-2.16480934005e-01, 1.49533975565e-01, 1.67081312763e-01,-
9.23318841508e-02,-1.06752246659e-01, 6.48872162119e-02, 5.70512477385e-02,-
4.45261419029e-02,-2.37332103958e-02, 2.66707059264e-02, 6.26216795430e-03,-
1.30514809466e-02, 1.18630033858e-04, 4.94334360546e-03,-1.11873266699e-03,-
1.34059629833e-03, 6.28465682965e-04, 2.13581561910e-04,-1.98648552311e-04,-
1.53591712353e-07, 3.74123788074e-05,-8.52060253744e-06,-3.33263447888e-06,
1.76871298362e-06,-7.69163268988e-08,-1.17609876702e-07, 3.06883586304e-08,-
2.50793445494e-09};//doub36
//double h[]={1.10866976318e-03, 1.42810984507e-02, 8.12781132654e-02,
2.64388431740e-01, 5.24436377464e-01, 6.01704549127e-01, 2.60894952651e-01,-
2.28091394215e-01,-2.85838631755e-01, 7.46522697081e-02, 2.12349743306e-01,-

3.35185419023e-02,-1.42785695038e-01, 2.75843506256e-02, 8.69067555558e-02,-
2.65012362501e-02,-4.56742262772e-02, 2.16237674095e-02, 1.93755498891e-02,-
1.39883886785e-02,-5.86692228101e-03, 7.04074736710e-03, 7.68954359257e-04,-
2.68755180070e-03, 3.41808653458e-04, 7.35802520505e-04,-2.60676135678e-04,-
1.24600791734e-04, 8.71127046721e-05, 5.10595048707e-06,-1.66401762971e-05,
3.01096431629e-06, 1.53193147669e-06,-6.86275565776e-07, 1.44708829879e-08,
4.63693777578e-08,-1.11640206703e-08, 8.66684883899e-10};//doub38
//double h[]={7.79953613666e-04, 1.05493946249e-02, 6.34237804590e-02,
2.19942113551e-01, 4.72696185310e-01, 6.10493238938e-01, 3.61502298739e-01,-
1.39212088011e-01,-3.26786800434e-01,-1.67270883090e-02, 2.28291050819e-01,
3.98502464577e-02,-1.55458750707e-01,-2.47168273386e-02, 1.02291719174e-01,
5.63224685730e-03,-6.17228996246e-02, 5.87468181181e-03, 3.22942995307e-02,-
8.78932492390e-03,-1.38105261371e-02, 6.72162730225e-03, 4.42054238704e-03,-
3.58149425960e-03,-8.31562172822e-04, 1.39255961932e-03,-5.34975984399e-05,-
3.85104748699e-04, 1.01532889736e-04, 6.77428082837e-05,-3.71058618339e-05,-
4.37614386218e-06, 7.24124828767e-06,-1.01199401001e-06,-6.84707959700e-07,
2.63392422627e-07, 2.01432202355e-10,-1.81484324829e-08, 4.05612705555e-09,-
2.99883648961e-10};//doub40
//double h[]={5.48822509852e-04, 7.77663905235e-03, 4.92477715381e-02,
1.81359625440e-01, 4.19687944939e-01, 6.01506094935e-01, 4.44590451927e-01,-
3.57229196172e-02,-3.35664089530e-01,-1.12397071568e-01, 2.11564527680e-01,
1.15233298439e-01,-1.39940424932e-01,-8.17759429808e-02, 9.66003903237e-02,
4.57234057492e-02,-6.49775048937e-02,-1.86538592021e-02, 3.97268354278e-02,
3.35775639033e-03,-2.08920536779e-02, 2.40347092080e-03, 8.98882438197e-03,-
2.89133434858e-03,-2.95837403893e-03, 1.71660704063e-03, 6.39418500512e-04,-
6.90671117082e-04,-3.19640627768e-05, 1.93664650416e-04,-3.63552025008e-05,-
3.49966598498e-05, 1.53548250927e-05, 2.79033053981e-06,-3.09001716454e-06,
3.16609544236e-07, 2.99213663046e-07,-1.00040087903e-07,-2.25401497467e-09,
7.05803354123e-09,-1.47195419765e-09, 1.03880557102e-10};//doub42
//double h[]={3.86263231491e-04, 5.72185463133e-03, 3.80699372364e-02,
1.48367540890e-01, 3.67728683446e-01, 5.78432731009e-01, 5.07901090622e-01,
7.37245011836e-02,-3.12726580428e-01,-2.00568406104e-01, 1.64093188106e-01,
1.79973187992e-01,-9.71107984091e-02,-1.31768137686e-01, 6.80763143927e-02,
8.45573763668e-02,-5.13642542974e-02,-4.65308118275e-02, 3.69708466206e-02,
2.05867076275e-02,-2.34800013444e-02,-6.21378284936e-03, 1.25647252183e-02,
3.00137398507e-04,-5.45569198615e-03, 1.04426073918e-03, 1.82701049565e-03,-
7.70690988123e-04,-4.23787399839e-04, 3.28609414213e-04, 4.34589990453e-05,-
9.40522363481e-05, 1.13743496621e-05, 1.73737569575e-05,-6.16672931646e-06,-

1.56517913199e-06, 1.29518205731e-06,-8.77987987336e-08,-1.28333622875e-07,
3.76122874933e-08, 1.68017140492e-09,-2.72962314663e-09, 5.33593882166e-10,-
3.60211348433e-11};//doub44
//double h[]={2.71904194128e-04, 4.20274889318e-03, 2.93100036578e-02,
1.20515531783e-01, 3.18450813852e-01, 5.44931147873e-01, 5.51018517241e-01,
1.81392625363e-01,-2.61392148030e-01,-2.71402098607e-01, 9.21254070824e-02,
2.23573658242e-01,-3.30374470942e-02,-1.64011321531e-01, 2.02830745756e-02,
1.12297043618e-01,-2.11262123562e-02,-7.02073915749e-02, 2.17658568344e-02,
3.84953325225e-02,-1.85235136501e-02,-1.75371010030e-02, 1.27519439315e-02,
6.03184065002e-03,-7.07531927370e-03,-1.13486547335e-03, 3.12287644981e-03,-
2.46501400516e-04,-1.06123122888e-03, 3.19420492709e-04, 2.56762452007e-04,-
1.50021850349e-04,-3.37889483412e-05, 4.42607120310e-05,-2.63520788924e-06,-
8.34787556785e-06, 2.39756954684e-06, 8.14757483477e-07,-5.33900540520e-07,
1.85309178563e-08, 5.41754917953e-08,-1.39993549543e-08,-9.47288590181e-10,
1.05044645369e-09,-1.93240511131e-10, 1.25020330235e-11};//doub46
//double h[]={1.91435800947e-04, 3.08208171490e-03, 2.24823399497e-02,
9.72622358336e-02, 2.72908916067e-01, 5.04371040839e-01, 5.74939221095e-01,
2.80985553233e-01,-1.87271406885e-01,-3.17943078999e-01, 4.77661368434e-03,
2.39237388780e-01, 4.25287296414e-02,-1.71175351370e-01,-3.87771735779e-02,
1.21016303469e-01, 2.09801137091e-02,-8.21616542080e-02,-4.57843624181e-03,
5.13016200399e-02,-4.94470942812e-03,-2.82131070949e-02, 7.66172188164e-03,
1.30499708710e-02,-6.29143537001e-03,-4.74656878632e-03, 3.73604617828e-03,
1.15376493683e-03,-1.69645681897e-03,-4.41618485614e-05, 5.86127059318e-04,-
1.18123323796e-04,-1.46007981776e-04, 6.55938863930e-05, 2.18324146046e-05,-
2.02288829261e-05, 1.34115775080e-08, 3.90110033859e-06,-8.98025314393e-07,-
4.03250775687e-07, 2.16633965327e-07,-5.05764541979e-10,-2.25574038817e-08,
5.15777678967e-09, 4.74837582425e-10,-4.02465864458e-10, 6.99180115763e-11,-
4.34278250380e-12};//doub48
//double h[]={1.34802979347e-04, 2.25695959185e-03, 1.71867412540e-02,
7.80358628721e-02, 2.31693507886e-01, 4.59683415146e-01, 5.81636896746e-01,
3.67885074802e-01,-9.71746409646e-02,-3.36473079641e-01,-8.75876145876e-02,
2.24537819745e-01, 1.18155286719e-01,-1.50560213750e-01,-9.85086152899e-02,
1.06633805018e-01, 6.67521644940e-02,-7.70841110565e-02,-3.71739628611e-02,
5.36179093987e-02, 1.55426059291e-02,-3.40423204606e-02,-3.07983679484e-03,
1.89228044766e-02,-1.98942578220e-03,-8.86070261804e-03, 2.72693625873e-03,
3.32270777397e-03,-1.84248429020e-03,-8.99977423746e-04, 8.77258193674e-04,
1.15321244046e-04,-3.09880099098e-04, 3.54371452327e-05, 7.90464000396e-05,-
2.73304811996e-05,-1.27719529319e-05, 8.99066139306e-06, 5.23282770815e-07,-

1.77920133265e-06, 3.21203751886e-07, 1.92280679014e-07, -8.65694173227e-08, -2.61159855611e-09, 9.27922448008e-09, -1.88041575506e-09, -2.22847491022e-10, 1.53590157016e-10, -2.52762516346e-11, 1.50969208282e-12};//doub50

//double h[]={9.49379575071e-05, 1.65052023353e-03, 1.30975542925e-02, 6.22747440251e-02, 1.95039438716e-01, 4.13292962278e-01, 5.73669043034e-01, 4.39158311789e-01, 1.77407678098e-03, -3.26384593691e-01, -1.74839961289e-01, 1.81291832311e-01, 1.82755409589e-01, -1.04323900285e-01, -1.47977193275e-01, 6.98231861132e-02, 1.06482405249e-01, -5.34485616814e-02, -6.86547596040e-02, 4.22321857963e-02, 3.85357159711e-02, -3.13781103630e-02, -1.77609035683e-02, 2.07349201799e-02, 5.82958055531e-03, -1.17854979061e-02, -5.28738399262e-04, 5.60194723942e-03, -9.39058250473e-04, -2.14553028156e-03, 8.38348805654e-04, 6.16138220457e-04, -4.31955707426e-04, -1.06057474828e-04, 1.57479523860e-04, -5.27779549303e-06, -4.10967399639e-05, 1.07422154087e-05, 7.00007868296e-06, -3.88740016185e-06, -4.65046322064e-07, 7.93921063370e-07, -1.07900423757e-07, -8.90446637016e-08, 3.40779562129e-08, 2.16932825985e-09, -3.77601047853e-09, 6.78004724582e-10, 1.00230319104e-10, -5.84040818534e-11, 9.13051001637e-12, -5.25187122424e-13};//doub52

//double h[]={6.68713138543e-05, 1.20553123167e-03, 9.95258878087e-03, 4.94525999829e-02, 1.62922027502e-01, 3.67110214125e-01, 5.53849860990e-01, 4.93406122677e-01, 1.02840855061e-01, -2.89716803314e-01, -2.48264581903e-01, 1.14823019517e-01, 2.27273288414e-01, -3.87864186318e-02, -1.78031740959e-01, 1.57993974602e-02, 1.31197971717e-01, -1.40627515558e-02, -9.10229065295e-02, 1.73110182654e-02, 5.79694057347e-02, -1.85124935619e-02, -3.27390666310e-02, 1.61469669223e-02, 1.56655956489e-02, -1.15771864589e-02, -5.86209634546e-03, 6.85663560968e-03, 1.34262687730e-03, -3.33285446952e-03, 1.45752962593e-04, 1.30117745024e-03, -3.41835122691e-04, -3.87901857410e-04, 2.01971987969e-04, 7.66005838706e-05, -7.71114551779e-05, -3.51748361490e-06, 2.06344264773e-05, -3.90116407063e-06, -3.65750090818e-06, 1.63436962472e-06, 3.05088068625e-07, -3.47246814739e-07, 3.28655896805e-08, 4.02625505286e-08, -1.32133227399e-08, -1.30946560685e-09, 1.52161498477e-09, -2.41552692801e-10, -4.37498622429e-11, 2.21366208806e-11, -3.29579012247e-12, 1.82818835288e-13};//doub54

//double h[]={4.71080777501e-05, 8.79498515984e-04, 7.54265037764e-03, 3.90926081154e-02, 1.35137914253e-01, 3.22563361285e-01, 5.24998231630e-01, 5.30516293441e-01, 2.00176144045e-01, -2.30498954047e-01, -3.01327809532e-01, 3.28578791633e-02, 2.45808151373e-01, 3.69068853157e-02, -1.82877330732e-01, -4.68382337445e-02, 1.34627567910e-01, 3.44786312750e-02, -9.76853558056e-02, -1.73419228313e-02, 6.77478955019e-02, 3.44801895554e-03, -4.33333686160e-02, 4.43173291006e-03, 2.46880600101e-02, -6.81554976455e-03, -1.20635919682e-02,

5.83881662774e-03, 4.78486311245e-03, -3.72546124707e-03, -1.36037384563e-03, 1.87599866820e-03, 1.41567239314e-04, -7.48674955911e-04, 1.15465606365e-04, 2.29579098223e-04, -8.90390149004e-05, -4.90771341619e-05, 3.64140121105e-05, 4.63866498139e-06, -1.00432604133e-05, 1.24790031757e-06, 1.84036373451e-06, -6.67021547995e-07, -1.75746117320e-07, 1.49066001353e-07, -8.26238731562e-09, -1.78413869087e-08, 5.04404705638e-09, 6.94454032894e-10, -6.07704124722e-10, 8.49222001105e-11, 1.86736726378e-11, -8.36549047125e-12, 1.18885053340e-12, -6.36777235471e-14};//doub56

//double h[]={3.31896627984e-05, 6.40951680304e-04, 5.70212651777e-03, 3.07735802214e-02, 1.11370116951e-01, 2.80653455970e-01, 4.89758804762e-01, 5.51374432758e-01, 2.89105238335e-01, -1.54028734459e-01, -3.30040948917e-01, -5.57068000729e-02, 2.36105236153e-01, 1.12419174873e-01, -1.60877988594e-01, -1.07845949938e-01, 1.14472295893e-01, 8.32207471624e-02, -8.51254926156e-02, -5.50274895253e-02, 6.34791645842e-02, 3.05315432727e-02, -4.51879812777e-02, -1.29171425542e-02, 2.94704318717e-02, 2.64832730767e-03, -1.70412245736e-02, 1.73788033272e-03, 8.46972549356e-03, -2.55080712778e-03, -3.47379898968e-03, 1.87712092572e-03, 1.08705394222e-03, -1.00077832708e-03, -2.00071136307e-04, 4.11128345474e-04, -2.29201804121e-05, -1.29304484008e-04, 3.64502606856e-05, 2.91334475016e-05, -1.65732839530e-05, -3.59364480402e-06, 4.75060924645e-06, -3.02905459205e-07, -8.97570175063e-07, 2.63389838699e-07, 9.38719741109e-08, -6.28615692201e-08, 1.07659190661e-09, 7.76897885477e-09, -1.89399538617e-09, -3.42680086326e-10, 2.40709945350e-10, -2.94058925076e-11, -7.83250973362e-12, 3.15276241337e-12, -4.28565487006e-13, 2.21919131158e-14};//doub58

//double h[]={2.33861617273e-05, 4.66637950428e-04, 4.30079716504e-03, 2.41308326715e-02, 9.12383040670e-02, 2.42020670940e-01, 4.50487821853e-01, 5.57572232912e-01, 3.66242683371e-01, -6.61836707759e-02, -3.32966975020e-01, -1.41968513330e-01, 1.99462121580e-01, 1.77829873244e-01, -1.14558219432e-01, -1.57236817959e-01, 7.27786589703e-02, 1.22747746045e-01, -5.38064654582e-02, -8.76586900363e-02, 4.38016646714e-02, 5.67123657447e-02, -3.56733974967e-02, -3.22637589193e-02, 2.70786195952e-02, 1.52879607698e-02, -1.83997438681e-02, -5.29685966613e-03, 1.09156316583e-02, 6.19671756497e-04, -5.53073014819e-03, 8.43384586662e-04, 2.32452009406e-03, -8.60927696811e-04, -7.67878250438e-04, 5.05094823903e-04, 1.72482584235e-04, -2.16171830116e-04, -8.54830546758e-06, 6.98200837080e-05, -1.33971686329e-05, -1.63615247872e-05, 7.25214553589e-06, 2.32754909849e-06, -2.18726767699e-06, 1.09947433852e-08, 4.26166232601e-07, -1.00041468235e-07, -4.76437996513e-08, 2.60544275497e-08, 5.55339786139e-10, -3.33110568046e-09, 6.98486269183e-10, 1.61362297827e-10, -9.46138799727e-11, 1.00010513139e-11, 3.23942863853e-12, -1.18523759210e-12, 1.54399757084e-13, -

7.73794263095e-15};//doub60

//double h[]={1.64801338645e-05, 3.39412203776e-04, 3.23688406862e-03,
1.88536916129e-02, 7.43360930116e-02, 2.07012874485e-01, 4.09192200037e-01,
5.51139840914e-01, 4.29468808206e-01, 2.71692124973e-02,-3.10955118319e-01,-
2.17978485523e-01, 1.40178288765e-01, 2.24966711473e-01,-4.99263491604e-02,-
1.86962360895e-01, 1.54369884294e-02, 1.45089500931e-01,-8.13983227346e-03,-
1.07612773323e-01, 1.09412974523e-02, 7.53536117432e-02,-1.48800266181e-02,-
4.86190754648e-02, 1.61541715659e-02, 2.80476193667e-02,-1.42762752777e-02,-
1.39005529392e-02, 1.05176394873e-02, 5.51616357331e-03,-6.52085237587e-03,-
1.42826422321e-03, 3.39306677671e-03,-6.39790110601e-05,-1.45904174198e-03,
3.43139829690e-04, 4.99881617563e-04,-2.39658346940e-04,-1.24341161725e-04,
1.08958435041e-04, 1.50133572744e-05,-3.63125515786e-05, 4.03452023518e-06,
8.79530134269e-06,-3.03514236589e-06,-1.36906023094e-06, 9.81001542204e-07,
5.32725065697e-08,-1.97592512917e-07, 3.61682651733e-08, 2.32830971382e-08,-
1.06152960215e-08,-6.47431168795e-10, 1.40856815102e-09,-2.52404395415e-10,-
7.34893003248e-11, 3.69210880887e-11,-3.32700896712e-12,-1.32433491724e-12,
4.44546709629e-13,-5.55944205057e-14, 2.69938287976e-15};//doub62

//double h[]={1.16146330213e-05, 2.46656690638e-04, 2.43126191957e-03,
1.46810463814e-02, 6.02574991203e-02, 1.75750783639e-01, 3.67509628597e-01,
5.34317919340e-01, 4.77809163733e-01, 1.20630538265e-01,-2.66698181476e-01,-
2.77421581558e-01, 6.47133548055e-02, 2.48310642356e-01, 2.46624448396e-02,-
1.92102344708e-01,-4.89951171846e-02, 1.45232079475e-01, 4.44049081999e-02,-
1.09456113116e-01,-2.96278725084e-02, 8.08741406384e-02, 1.41061515161e-02,-
5.69263140624e-02,-2.38026446493e-03, 3.70514579235e-02,-4.14590766082e-03,-
2.16628228363e-02, 6.16752731068e-03, 1.10174007154e-02,-5.41156825727e-03,-
4.64921675118e-03, 3.62722464068e-03, 1.46895510046e-03,-1.96474055582e-03,-
2.21167872957e-04, 8.67305851845e-04,-1.02453731060e-04,-3.05965442382e-04,
1.05391546173e-04, 8.10367832913e-05,-5.25980928268e-05,-1.29404577940e-05,
1.82426840198e-05,-6.36178153226e-07,-4.55830957626e-06, 1.20288903632e-06,
7.56004762559e-07,-4.28597069315e-07,-5.00336186874e-08, 8.96596631195e-08,-
1.21992435948e-08,-1.10438302172e-08, 4.25042231198e-09, 4.38438779994e-10,-
5.88109146263e-10, 8.90472379622e-11, 3.26327074133e-11,-1.43091876516e-11,
1.07561065350e-12, 5.36148222961e-13,-1.66380048943e-13, 2.00071530381e-14,-
9.42101913953e-16};//doub64

//double h[]={8.18635831417e-06, 1.79101615370e-04, 1.82270943516e-03,
1.13959433745e-02, 4.86146665317e-02, 1.48186313180e-01, 3.26718130117e-01,
5.09376172514e-01, 5.11254770583e-01, 2.09582350713e-01,-2.04202622398e-01,-
3.15997410766e-01,-1.92783394369e-02, 2.45420612119e-01, 9.98515586803e-02,-

1.71428099051e-01,-1.10844133116e-01, 1.21967856403e-01, 9.47880880506e-02,-
9.11469683513e-02,-7.03024850540e-02, 7.01911439409e-02, 4.57345618938e-02,-
5.34712513358e-02,-2.52485829774e-02, 3.86870607602e-02, 1.07032658200e-02,-
2.57287617547e-02,-2.16775861735e-03, 1.53169541158e-02,-1.59428878241e-03,-
7.95354038705e-03, 2.38906240816e-03, 3.48080095340e-03,-1.86071821445e-03,-
1.20430925760e-03, 1.07438069635e-03, 2.72730584733e-04,-4.90832900759e-04,
4.39316625176e-06, 1.78043189825e-04,-4.16043851627e-05,-4.92956442341e-05,
2.42333539881e-05, 9.07080575782e-06,-8.86612136675e-06,-3.60751610287e-07,
2.28837127614e-06,-4.42692340795e-07,-3.98579129198e-07, 1.82244333257e-07,
3.37797270373e-08,-3.98783819851e-08, 3.67286357683e-09, 5.11121185734e-09,-
1.67139267725e-09,-2.49640210524e-10, 2.42683310230e-10,-3.04957445394e-11,-
1.42023685988e-11, 5.50941472076e-12,-3.34348121895e-13,-2.15248838683e-13,
6.21474024717e-14,-7.19651054536e-15, 3.28937367841e-16};//doub66
//double h[]={5.77051063273e-06, 1.29947620067e-04, 1.36406139005e-03,
8.81988940388e-03, 3.90488413517e-02, 1.24152482111e-01, 2.87765059233e-01,
4.78478746279e-01, 5.30555099656e-01, 2.90366329507e-01,-1.28246842174e-01,-
3.31525301508e-01,-1.03891915515e-01, 2.16907220187e-01, 1.66601750412e-01,-
1.27337358223e-01,-1.60924927177e-01, 7.79918469379e-02, 1.34125960271e-01,-
5.44829680641e-02,-1.02947596992e-01, 4.35760946496e-02, 7.31852354367e-02,-
3.70128384178e-02,-4.74385596452e-02, 3.07397465739e-02, 2.72283507563e-02,-
2.36717379228e-02,-1.31439800166e-02, 1.64093741998e-02, 4.71364926099e-03,-
1.00455067083e-02,-6.19474884515e-04, 5.33495076875e-03,-7.69212797506e-04,-
2.39945394353e-03, 8.58995987436e-04, 8.75199906407e-04,-5.52735576214e-04,-
2.32673214023e-04, 2.65077239755e-04, 2.66005001845e-05,-9.91469777078e-05,
1.35311722724e-05, 2.84495141969e-05,-1.05765749425e-05,-5.71082651099e-06,
4.16987175854e-06, 4.97971810142e-07,-1.11630653481e-06, 1.44819570833e-07,
2.02599066666e-07,-7.52670174041e-08,-1.99034650153e-08, 1.74042333293e-08,-
8.66574426136e-10,-2.31650194699e-09, 6.44637821032e-10, 1.30041031860e-10,-
9.90477453763e-11, 1.00420873546e-11, 6.08012535400e-12,-2.10787910891e-12,
9.79945115821e-14, 8.57919405179e-14,-2.31708370390e-14, 2.58733838193e-15,-
1.14894475448e-16};//doub68
//double h[]={4.06793406114e-06, 9.42146947557e-05, 1.01912268037e-03,
6.80729288431e-03, 3.12362885114e-02, 1.03404455861e-01, 2.51307378994e-01,
4.43592739224e-01, 5.37008427509e-01, 3.60345640518e-01,-4.38838818739e-02,-
3.23822864912e-01,-1.81786976766e-01, 1.66041357490e-01, 2.17299289321e-01,-
6.52628713106e-02,-1.91919589298e-01, 1.93095446660e-02, 1.55292480396e-01,-
4.75268083411e-03,-1.20585522643e-01, 4.73422917264e-03, 8.99135475707e-02,-
9.31855894990e-03,-6.33560374404e-02, 1.32285495850e-02, 4.12546930647e-02,-

1.43668397842e-02,-2.41694978016e-02, 1.27664567156e-02, 1.22894360081e-02,-
9.57779789923e-03,-5.08599164923e-03, 6.13775458674e-03, 1.42808879407e-03,-
3.35764438092e-03, 7.61596943517e-06, 1.54963746970e-03,-3.34669216425e-04,-
5.86481031899e-04, 2.64832881996e-04, 1.70001228366e-04,-1.36588307226e-04,-
2.97699596284e-05, 5.30414312291e-05,-2.43700152682e-06,-1.57244207727e-05,
4.30804786171e-06, 3.35334586287e-06,-1.89592961769e-06,-3.90393173328e-07,
5.30236861690e-07,-3.70030837820e-08,-9.99039694453e-08, 3.00818865071e-08,
1.08490273378e-08,-7.45811655289e-09, 5.89795131038e-11, 1.03082334548e-09,-
2.43354557375e-10,-6.40793825650e-11, 4.00053662725e-11,-3.12563935710e-12,-
2.56706547615e-12, 8.01508853368e-13,-2.59795432889e-14,-3.39772085679e-14,
8.62403743472e-15,-9.29801252932e-16, 4.01462871233e-17};//doub70
//double h[]={2.86792518275e-06, 6.82602867854e-05, 7.60215109966e-04,
5.24029737740e-03, 2.48905656448e-02, 8.56520925952e-02, 2.17756953097e-01,
4.06433697708e-01, 5.32266895260e-01, 4.17875335600e-01, 4.39751975293e-02,-
2.94421039589e-01,-2.46807036978e-01, 9.81142041631e-02, 2.46537277608e-01,
7.27851509579e-03,-1.99337205608e-01,-4.58614007463e-02, 1.54106236627e-01,
5.02761800735e-02,-1.18803754310e-01,-3.98808535755e-02, 9.11567822580e-02,
2.50387214495e-02,-6.82090166368e-02,-1.13191003168e-02, 4.85130835478e-02,
1.42497266176e-03,-3.19807206776e-02, 3.98404019871e-03, 1.90635947806e-02,-
5.65781324505e-03,-9.99026347328e-03, 5.02298910666e-03, 4.41348483535e-03,-
3.48454144540e-03,-1.50307406629e-03, 1.99079377185e-03, 2.77681279571e-04,-
9.46340382326e-04, 8.61456575899e-05, 3.69350728496e-04,-1.15511889584e-04,-
1.13189946808e-04, 6.69474119693e-05, 2.37510668366e-05,-2.73139082465e-05,-
1.18347105998e-06, 8.37221819816e-06,-1.58614578243e-06,-1.87081160285e-06,
8.31142127970e-07, 2.54842352255e-07,-2.45537765843e-07, 2.75324907333e-09,
4.79904346545e-08,-1.15609368881e-08,-5.61278434332e-09, 3.13884169578e-09,
1.09081555371e-10,-4.51254577856e-10, 8.96241820385e-11, 3.03742909811e-11,-
1.59971668926e-11, 8.87684628721e-13, 1.07096935711e-12,-3.02928502697e-13,
5.54226318263e-15, 1.33807138629e-14,-3.20462854340e-15, 3.33997198481e-16,-
1.40327417537e-17};//doub72
//double h[]={2.02206086249e-06, 4.94234375062e-05, 5.66241837706e-04,
4.02414036825e-03, 1.97622861538e-02, 7.05848259771e-02, 1.87326331862e-01,
3.68440972400e-01, 5.18167040855e-01, 4.62207553661e-01, 1.30878963233e-01,-
2.46180429761e-01,-2.94375915262e-01, 1.96715004523e-02, 2.51523254360e-01,
8.18060283872e-02,-1.81962291778e-01,-1.08451713823e-01, 1.29929646959e-01,
1.01780296838e-01,-9.66075406166e-02,-8.23302119065e-02, 7.50476199483e-02,
5.95674108715e-02,-5.92568156326e-02,-3.82538294793e-02, 4.58079441512e-02,
2.09728005925e-02,-3.35235840641e-02,-8.83349389041e-03, 2.26186515445e-02,

1.69047238348e-03,-1.37639819628e-02, 1.51930577883e-03, 7.38775745285e-03,-
2.24805318700e-03,-3.39452327640e-03, 1.81687134380e-03, 1.26393425811e-03,-
1.11148486531e-03,-3.28078847088e-04, 5.49053277337e-04, 1.53443902319e-05,-
2.20894403245e-04, 4.33672612594e-05, 7.05513878206e-05,-3.09866292761e-05,-
1.63916249616e-05, 1.35432771841e-05, 1.84994500311e-06,-4.30994155659e-06,
4.85473139699e-07, 1.00212139929e-06,-3.49494860344e-07,-1.50988538867e-07,
1.10903123221e-07, 5.35065751546e-09,-2.25219383672e-08, 4.22448570636e-09,
2.79397446595e-09,-1.29720500146e-09,-1.03141112909e-10, 1.94616489408e-10,-
3.20339824412e-11,-1.39841571553e-11, 6.33495544097e-12,-2.09636319423e-13,-
4.42161240987e-13, 1.13805283092e-13,-4.51888960746e-16,-5.24302569188e-15,
1.18901238750e-15,-1.19928033585e-16, 4.90661506493e-18};//doub74
//double h[]={ 1.42577664167e-06, 3.57625199426e-05, 4.21170266472e-04,
3.08308811925e-03, 1.56372493475e-02, 5.78899436128e-02, 1.60071993564e-01,
3.30775781411e-01, 4.96591175311e-01, 4.93356078517e-01, 2.13050571355e-01,-
1.82867667708e-01,-3.21675637808e-01,-6.22665060478e-02, 2.32125963835e-01,
1.49985119618e-01,-1.41795685973e-01,-1.59912565158e-01, 8.56381215561e-02,
1.41414734073e-01,-5.65864586307e-02,-1.14731170710e-01, 4.30958954330e-02,
8.72043982620e-02,-3.66051034028e-02,-6.17662087084e-02, 3.19898775315e-02,
4.00549811051e-02,-2.68914938808e-02,-2.31141340205e-02, 2.09046452556e-02,
1.12904972786e-02,-1.47018820653e-02,-4.13130665603e-03, 9.21478503219e-03,
5.62571574840e-04,-5.07131450921e-03, 7.16982182106e-04, 2.40069778189e-03,-
8.44862666553e-04,-9.42461407722e-04, 5.81075975053e-04, 2.81763925038e-04,-
3.03102046072e-04,-4.55568269666e-05, 1.26204335016e-04,-1.15540910383e-05,-
4.17514164854e-05, 1.33417614992e-05, 1.03735918404e-05,-6.45673042846e-06,-
1.55084435011e-06, 2.14996026993e-06,-8.48708758607e-08,-5.18773373887e-07,
1.39637754550e-07, 8.40035104689e-08,-4.88475793745e-08,-5.42427480028e-09,
1.03470453927e-08,-1.43632948779e-09,-1.34919775398e-09, 5.26113255735e-10,
6.73233649018e-11,-8.27825652253e-11, 1.10169293459e-11, 6.29153731703e-12,-
2.48478923756e-12, 2.62649650406e-14, 1.80866123627e-13,-4.24981781957e-14,-
4.56339716212e-16, 2.04509967678e-15,-4.40530704248e-16, 4.30459683955e-17,-
1.71615245108e-18};//doub76
//double h[]={0.032223100604,-0.012603967262,-
0.099219543577,0.297857795606,0.803738751807,0.497618667633,-
0.029635527646,-0.075765714789};//symlet8
//double h[]={0.001889950333,-0.000302920515, -
0.014952258337,0.003808752014,0.049137179674,-0.027219029917, -
0.051945838108,0.364441894835,0.777185751701,0.481359651258, -
0.061273359068, -0.143294238351,0.007607487325,0.031695087811, -

```
0.000542132332,-0.003382415951};//symlet16
//double h[]={-0.072732619513,0.337897662458,0.852572020212,0.384864846864,-
0.072732619513,-0.015655728135};//coiflet6
//double h[]={0.016387336464,-0.041464936782, -
0.067372554722,0.386110066823,0.812723635450,0.417005184424,-0.076488599079,
-0.059434418647,0.023680171946,0.005611434819,-0.001823208871,-
0.000720549445};//coiflet16
//double h[]={-0.003793512864,0.007782596427,0.023452696142,-0.065771911282, -
0.061123390003,0.405176902410,0.793777222626, 0.428483476378,-
0.071799821619, -0.082301927107,0.034555027573, 0.015880544864,-
0.009007976137, -0.002574517689,0.001117518771, 0.000466216960, -
0.000070983303,-0.000034599773};//coiflet18
//double h[]={0.000892313669,-0.001629492013,-0.007346166328, 0.016068943965,
0.026682300156,-0.081266699681,-0.056077313317, 0.415308407030,
0.782238930921,0.434386056491,-0.066627474263, -
0.096220442034,0.039334427123, 0.025082261845,-0.015211731528, -
0.005658286687,0.003751436157,0.001266561929, -0.000589020756, -
0.000259974552,0.000062339034,0.000031229876,-0.000003259680, -
0.000001784985};//coiflet24
//double h[]={-0.000212080840,0.000358589688,0.002178236358, -0.004159358782, -
0.010131117521,0.023408156788,0.028168028974, -0.091920010569, -
0.052043163181,0.421566206733, 0.774289603730,0.437991626216,-
0.062035963969, -0.105574208714,0.041289208754,0.032683574270,-
0.019761778945, -0.009164231163,0.006764185449,0.002433373213,-
0.001662863702, -0.000638131343,0.000302259582,0.000140541150,-
0.000041340432, -0.000021315027,0.000003734655,0.000002063762,-
0.000000167443, -0.000000095177};//coiflet30
//double h[]={0.099305765374353, 0.424215360812961, 0.699825214056600,
0.449718251149468, -0.110927598348234, -0.264497231446384, 0.026900308803690,
0.155538731877093, -0.017520746266529, -0.088543630622924, 0.019679866044322,
0.042916387274192, -0.017460408696028, -0.014365807968852, 0.010040411844631,
0.0014842347824723, -0.002736031626258, 0.0006404853285212};//belking18
double h[]={-0.000062906118, 0.000343631905, -0.000453956620, -0.000944897136,
0.002843834547,0.000708137504, -0.008839103409, 0.003153847056,
0.019687215010, -0.014853448005,-0.035470398607, 0.038742619293,
0.055892523691, -0.077709750902, -0.083928884366,0.131971661417,
0.135084227129, -0.194450471766, -0.263494802488,
0.201612161775,0.635601059872, 0.572797793211, 0.250184129505,
```

```
0.045799334111});//vaidy24
int ch=sizeof(h)/sizeof(double); //ch, that is automatically determined, is the size of h[]

//decomposicao no nivel maximo possivel
transformada_wavelet_packet_nivel_k(&sinal[0],comprimento_do_sinal,(int)(log(comprimento_do_sinal)/log(2)),h,ch);
//calcular a energia de cada sub-banda. Cada sub-banda tem apenas um componente ja que a decomposicao foi em nivel maximo.
//calcular tambem o log10 de cada sub-banda (no caso, cada amostra)

for(long i=0;i<comprimento_do_sinal;i++)
{
    sinal[i]*=sinal[i];
    sinal[i]=log10(sinal[i]);
}

//dwt
transformada_wavelet_packet_nivel_k(&sinal[0],comprimento_do_sinal,(int)(log(comprimento_do_sinal)/log(2)),h,ch);
//energia

for(long i=0;i<comprimento_do_sinal;i++)
    sinal[i]*=sinal[i];

double maior=sinal[1];
for(long i=1;i<comprimento_do_sinal;i++)
    if(sinal[i]>maior)
        maior=sinal[i];
for(long i=1;i<comprimento_do_sinal;i++)
    sinal[i]/=maior;
for(long i=1;i<comprimento_do_sinal;i++)
    sinal[i]*=50;

//encontrar a maior amplitude de 80 ate 300 Hz
long inicio=(int)((taxa_de_amostragem)/300.0);
long fim=(int)((taxa_de_amostragem)/80.0);

maior=sinal[inicio];
```

```
long posicao_do_maior=inicio;
for(long i=inicio;i<fim;i++)
    if(sinal[i]>maior)
        {
            maior=sinal[i];
            posicao_do_maior=i;
        }
//resposta
printf("\n\nPitch na amostra numero %d",posicao_do_maior);
printf("\n\nPitch em %f
Hz",((double)(taxa_de_amostragem)/(double)(posicao_do_maior)));
}
```