



COBENGE 2005

XXXIII - Congresso Brasileiro de Ensino de Engenharia

"Promovendo e valorizando a engenharia em um cenário de constantes mudanças"

12 a 15 de setembro - Campina Grande Pb

Promoção/Organização: ABENGE/UFPG-UFPE

APLICAÇÕES DE PROCESSAMENTO DIGITAL DE SINAIS EM ENGENHARIA ELÉTRICA

Alexandre Senda – senda@mackenzie.br

Universidade Presbiteriana Mackenzie, Escola de Engenharia

Rua Itambé, 45 – Prédio 6 - Higienópolis

01239-902 – São Paulo – SP

Mario S. S. Melo – mario.melo@mackenzie.br

Magno T. M. Silva – magnotmsilva@mackenzie.br

Marcio Eisencraft – marcioft@mackenzie.br

Marco A. A. Melo – mant@mackenzie.br

***Resumo:** Técnicas digitais de processamento de sinais e sistemas de tempo discreto vêm sendo cada vez mais empregadas em sistemas de telecomunicações, processamento de áudio e imagens, processamento de sinais de voz, sistemas de controle entre outras aplicações. Assim, torna-se indispensável a introdução de disciplinas nos currículos de Engenharia Elétrica que forneçam o ferramental básico para lidar com tais sistemas, como Transformadas Z e de Fourier Discreta. Este artigo mostra de forma resumida a evolução destes conhecimentos na Engenharia Elétrica e algumas propostas de trabalhos de graduação com objetivo de motivar e incentivar o estudo dessas técnicas pelos alunos.*

***Palavras chaves:** Processamento digital de sinais, Simulações computacionais, Matlab, Processamento de áudio.*

1. INTRODUÇÃO

Nas últimas décadas, uma grande parte dos sistemas baseados em circuitos analógicos de tempo contínuo passaram a ser implementados através de sistemas digitais de tempo discreto. Este fenômeno deve-se, em grande parte, à maior facilidade de acesso a placas dedicadas (DSP – *digital signal processors*) e microcomputadores de uso geral.

Dentre as áreas que passaram por estas mudanças, destacam-se sistemas de telecomunicações (LATHI, 1998), processamento de áudio e imagens (GONZALEZ, 1993; MITRA, 2001), processamento de sinais de voz (RABINER, 1978), sistemas de controle (NISE, 2002), entre muitas outras aplicações. A tendência de digitalização de sistemas tem se tornado cada vez mais intensa.

Cursos tradicionais de Engenharia Elétrica são baseados em ferramentas matemáticas essencialmente de tempo contínuo aplicadas sobretudo a circuitos elétricos. Entre essas, ganham destaque as transformadas de Laplace e de Fourier. Exemplo disso é que esses assuntos foram

cobrados em mais da metade das questões dos Exames Nacionais de Cursos (ENC – “Provas”) realizados entre 1998 e 2003. Porém, com o advento das novas tecnologias, torna-se indispensável que um engenheiro elétrico tenha contato, em um número considerável de matérias, com as ferramentas equivalentes de tempo discreto, como as transformadas Z e de Fourier Discreta.

Estes novos conhecimentos são geralmente agrupados sob o nome de Processamento Digital de Sinais (PDS). Atualmente, PDS é um campo imenso e diversificado. Há milhares de engenheiros ao redor do mundo que consideram processamento de sinais como sua área de especialidade e centenas de milhares, cujo trabalho envolve essa área (NEBEKER, 1998).

As mudanças curriculares nos cursos de Engenharia Elétrica, que vêm ocorrendo nos últimos anos devido à introdução de PDS, trazem uma série de desafios. A existência de poucas obras em língua portuguesa e a ênfase dada às ferramentas de tempo contínuo no restante do curso podem trazer dificuldades. Esses problemas acabam se traduzindo em falta de motivação de parte dos alunos.

Uma forma eficiente de despertar o interesse dos alunos por essas ferramentas é mostrar a eles que os conhecimentos adquiridos nas aulas são efetivamente empregados em uma série de tecnologias presentes em seu dia a dia. Isso pode ser conseguido de forma prática através de recursos computacionais, usando programas de simulação numérica, como o Matlab[®] (CHAPMAN, 2005; INGLE & PROAKIS, 2000; MITRA, 2001).

O objetivo deste trabalho é primeiramente relatar de forma resumida como a introdução ao processamento digital de sinais tem sido tratada nos cursos de Engenharia Elétrica em geral e em particular na Universidade Presbiteriana Mackenzie (UPM). A seguir, são descritas algumas propostas de trabalhos de graduação conduzidos por alunos dos dois últimos semestres do curso, que têm levado a resultados interessantes dos pontos de vista de produção e motivação dos alunos no estudo de PDS.

A Seção 2 traz um breve resumo da evolução de PDS. A seguir, a Seção 3 descreve os equipamentos e programas utilizados em disciplinas ligadas a PDS na UPM e a Seção 4 resume três propostas de trabalho orientadas a alunos do último ano de graduação em Engenharia Elétrica. A Seção 5 contém uma análise do aprendizado dos alunos durante a elaboração dos trabalhos e as conclusões.

2. BREVE HISTÓRICO DE PROCESSAMENTO DIGITAL DE SINAIS

Desde a invenção do cálculo diferencial e integral no século XVII, cientistas e engenheiros têm desenvolvido modelos para representar fenômenos físicos através de funções de variáveis contínuas e equações diferenciais. Técnicas numéricas têm sido usadas para resolver essas equações. Matemáticos do século XVIII, como Euler, Bernoulli e Lagrange desenvolveram métodos para integração numérica e interpolação de funções de uma variável contínua. Numa pesquisa histórica desenvolvida por HEIDEMAN, JOHNSON e BURRUS (1984), verificou-se que Gauss descobriu o princípio fundamental da transformada rápida de Fourier (FFT – *Fast Fourier Transform*) antes da publicação do tratado de Fourier sobre a representação de funções em séries harmônicas (OPPENHEIM & SCHAFFER, 1998).

Até o final da década de 1940, o processamento de sinais era feito tipicamente com sistemas analógicos baseados em circuitos eletrônicos ou dispositivos mecânicos. A emergência da disciplina de Processamento Digital de Sinais começou a ocorrer de fato um pouco depois da II Guerra Mundial. Neste sentido, 1948 pode ser considerado como o *annus mirabilis*. Neste ano, foi publicado o clássico trabalho de Shannon que deu origem à Teoria da Informação (SHANNON, 1948), o PCM (*Pulse-Code Modulation*) tornou-se popular (OLIVER *et al.*, 1948) e métodos digitais para estimação espectral foram introduzidos. Na telefonia e

rádio até então, os sinais eram transmitidos tradicionalmente com modulação em amplitude (AM – *Amplitude Modulation*) ou modulação em frequência (FM - *Frequency Modulation*). Nessas modulações, o sinal é analógico, enquanto no PCM o sinal é digital. Ainda em 1948, Hamming inventou os códigos de correção de erros, salientando uma grande vantagem dos sinais digitais face aos analógicos e o transistor foi criado nos laboratórios da Bell Telephone, o que nos anos subsequentes foi de fundamental importância para a expansão do domínio de PDS (NEBEKER, 1998).

Nos anos 1950, o uso de computadores digitais estava começando a aumentar em ambientes de trabalho e em laboratórios científicos. Embora fossem caros e com capacidades relativamente limitadas, esses computadores eram freqüentemente utilizados para simular sistemas de processamento de sinais antes da produção em *hardware*, o que apresentava vantagens em termos de flexibilidade. Entretanto, o processamento não podia ser feito em tempo real, o que limitava as aplicações (OPPENHEIM & SCHAFER, 1998).

As limitações dos computadores digitais impulsionaram o desenvolvimento de técnicas eficientes de PDS que são utilizadas até hoje, como por exemplo, um algoritmo de FFT para o cálculo de transformadas de Fourier, proposto por COOLEY e TUKEY (1965) (OPPENHEIM & SCHAFER, 1998). Na década de 1960, a bem sucedida exploração do espaço feita pelos Estados Unidos baseou-se em técnicas de PDS (NEBEKER, 1998). Nesta época, o processamento de sinais de forma adaptativa começou a se estabelecer a partir do trabalho de WIDROW (1966), proporcionando a sua expansão em muitas aplicações práticas, como antenas adaptativas, cancelamento de eco acústico, processamento de sinais biomédicos, equalização adaptativa, identificação de sistemas, etc. Embora a aplicação dos algoritmos adaptativos fosse limitada pela tecnologia da época, a pesquisa neste campo não parou de crescer e ainda é bastante promissora até os dias de hoje.

Cabe observar que essa evolução só foi possível graças à invenção e subsequente proliferação dos microprocessadores que permitiram implementações de baixo custo de sistemas de processamento de sinais de tempo discreto. Na década de 1980, a tecnologia de circuitos integrados avançou a um nível que permitiu a implementação de microcontroladores em ponto fixo ou ponto flutuante com arquiteturas especialmente projetadas para implementar algoritmos de processamento de sinais de tempo discreto (OPPENHEIM & SCHAFER, 1998). Esses circuitos dedicados são chamados de DSPs. Isso impulsionou o desenvolvimento de algumas subáreas de PDS, como processamento de imagens. Neste caso, uma das maiores contribuições dessa década, foi a definição de um padrão internacional para digitalização e compressão de imagens pelo JPEG (*Joint Photographic Experts Group*), que na década seguinte inspirou o surgimento de padrões para imagens em movimento, definidos pelo MPEG (*Moving Pictures Expert Group*) (NEBEKER, 1998). O amadurecimento do processamento digital de imagens possibilitou a modernização do tratamento de imagens médicas e o advento da TV Digital.

A evolução das técnicas de PDS está ligada à da capacidade dos DSPs. No entanto, observando a evolução dos processadores nos últimos anos, a pesquisa e a proposta de novas técnicas nessa área não podem ser limitadas pela capacidade dos processadores. Quem imaginaria na década de 50, que 24h de música poderiam ser armazenadas num aparelho de apenas alguns centímetros cúbicos?

3. FACILIDADES UTILIZADAS NO ENSINO DE PDS NA UPM

Diversas disciplinas abordam os conceitos envolvidos em PDS no curso de Engenharia Elétrica da UPM que abrange 10 semestres. Entre elas, destacam-se Processamento Digital de Sinais (5º semestre), Análise de Sinais II (6º semestre), Técnicas Digitais Aplicadas a Biociências (7º semestre) e Controle II (8º semestre). Além dessas disciplinas, os alunos mais inte-

ressados podem desenvolver Trabalhos de Graduação Interdisciplinar (TGI) relacionados ao tema no 8º, 9º e 10º semestres.

Para o desenvolvimento dessas atividades, os alunos contam com uma estrutura que abrange três laboratórios com cerca de 50 estações de trabalho, capazes de suportar a versão 7.0 do Matlab. Para uso do curso de graduação em Engenharia Elétrica, a UPM possui 38 licenças de uso do Matlab 7.0 e 25 licenças para o Matlab 6.5. Também estão disponibilizados os principais pacotes (*toolboxes*) necessários para o desenvolvimento dos trabalhos como o *Signal Processing*, *Control System*, *Data Acquisition*, *Communications* e o *Simulink* (MATSUMOTO, 2003; PROAKIS *et al.*, 2004).

Além desses programas, os laboratórios contam também com 11 conjuntos de desenvolvimento TMS320026 baseado no DSP TMS320C2X da Texas Instruments (TEXAS, 1993). Para os trabalhos e disciplinas mais ligados à área de Controle Digital estão disponíveis seis conjuntos de sistemas de controle baseados em plataforma computacional da ECP Systems incluindo emulador industrial, sistema retilíneo, sistema torcional, pêndulo invertido, levitador magnético e giroscópio (ECP, 1999).

A biblioteca conta com cerca de 100 títulos diferentes sobre os diversos temas ligados a PDS.

4. PROPOSTAS DE TRABALHOS DE GRADUAÇÃO ENVOLVENDO PDS

A seguir são apresentadas três propostas de projetos desenvolvidas por alunos de graduação com objetivo de motivar o estudo de aplicações de PDS.

4.1. Reconhecimento de fonemas

Este TGI, desenvolvido durante três semestres pelo aluno Alexandre Senda teve como objetivo analisar e caracterizar alguns aspectos simples de fonemas de falantes da região metropolitana de São Paulo (SENDA, 2005).

A análise da frequência fundamental neste projeto tem como propósito determinar se o falante é um adulto do sexo feminino ou masculino ou ainda uma criança.

Segundo BEHLAU e PONTES (1995), para falantes brasileiros, a frequência fundamental das vozes masculinas podem variar de 80 a 150 Hz, as femininas variam de 150 a 250 Hz e as infantis encontram-se acima de 250 Hz.

Uma forma de se obter a frequência fundamental é usando o conceito de *cepstrum* (JACKSON, 1997) que é a transformada de Fourier de tempo discreto (TFTD) inversa do logaritmo da amplitude do espectro do sinal, ou seja,

$$c[n] = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} \log |X(e^{j\Omega})| e^{j\Omega n} d\Omega \quad (1)$$

em que $X(e^{j\Omega})$ é a TFTD do sinal $x[n]$.

Se $X(e^{j\Omega})$ possuir harmônicas espaçadas de forma regular, sua TFTD inversa apresentará um pico no espaçamento entre elas, possibilitando a obtenção da frequência fundamental do sinal $x[n]$.

O cepstrum da vogal [a] pronunciada por um falante adulto do sexo masculino é mostrado na Figura 1. Cabe observar que no eixo das abscissas utiliza-se o “tempo espectral”, denominado *quefrecy*.

Obtida a quefrequency em que ocorre o pico, inverte-se seu valor e então, dependendo do resultado obtido, classifica-se o falante conforme seu respectivo grupo (masculino, feminino ou criança).

No exemplo da Figura 1, o pico ocorre em $quefrequency = 0,01$ s e a frequência fundamental é $F_0 = 1/0,01 = 100$ Hz, correspondendo a uma voz masculina.

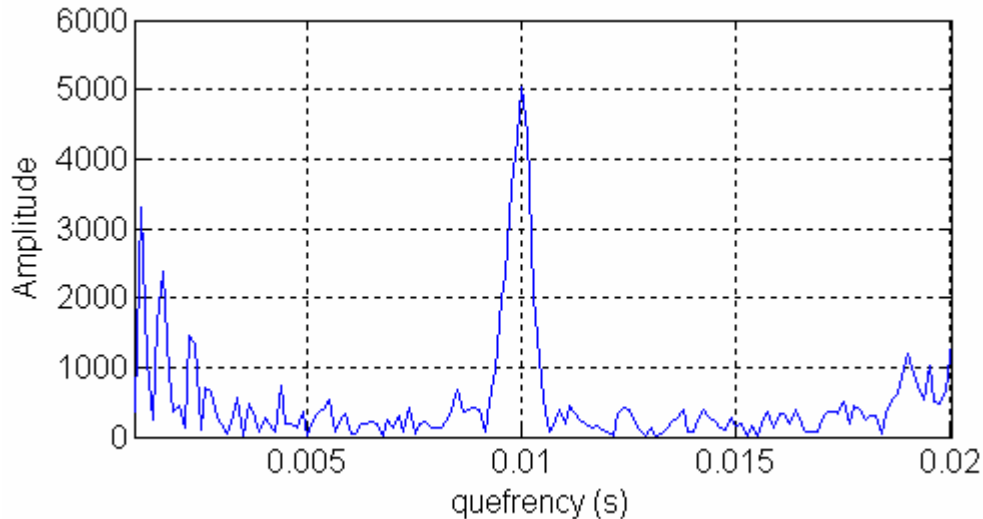


Figura 1 – Cepstrum da vogal [a] de um falante do sexo masculino.

Numa segunda análise, propõe-se determinar a vogal pronunciada por um falante. Tal processo é feito determinando-se os picos das formantes F_1 e F_2 . Os valores encontrados podem ser comparados, por exemplo, com os dados compilados em (MONTEIRO, 1995) sendo possível determinar a vogal pronunciada.

Cada vogal foi gravada duas vezes. A primeira gravação é chamada de X_{1S} e a segunda de X_{2S} , sendo X a vogal e S o grupo a que pertence o falante (M para masculino e F para feminino). As gravações foram realizadas com habitantes da cidade de São Paulo com idade entre 18 e 45 anos.

Para a vogal a_{1M} , têm-se os resultados mostrados na Figura 2. Para melhor visualização do sinal espectral, é utilizado o método de Yule Walker (MARPLE, 1986) que “suaviza” o contorno do sinal espectral, possibilitando a observação dos picos das formantes, $F_1 = 695,3$ Hz e $F_2 = 1219$ Hz.

Segundo MONTEIRO (1995), para a vogal [a] masculina, as faixas de frequências das formantes são $F_1 = (730,3 \pm 59,48)$ Hz e para $F_2 = (1273 \pm 91,12)$ Hz. Como as formantes encontradas estão nestas faixas, o programa reconhece a_{1M} como sendo a vogal [a].

Para as demais vogais, o programa também apresenta bons resultados. A vogal [i] apresenta maiores dificuldades de detecção. Os resultados são expressos de forma detalhada em (SENDA, 2005).

4.2. Efeitos digitais aplicados ao áudio

Este trabalho foi desenvolvido pelo aluno Mário S. S. Melo em seu TGI e teve por objetivo analisar efeitos digitais aplicados ao áudio, além de sua simulação computacional através de filtros digitais.

O primeiro passo para a criação de um efeito digital é a digitalização do sinal a ser trabalhado. A qualidade do sinal digitalizado dependerá do número de bits por amostra e da frequência de amostragem (PROAKIS & MANOLAKIS, 1996). Utilizando o *Simulink*, foram

simulados os seguintes efeitos: controle de ganho, eco, reverberação, distorção, controle de graves, controle de agudos, além de uma simulação em tempo real, em que mais de um efeito é utilizado.

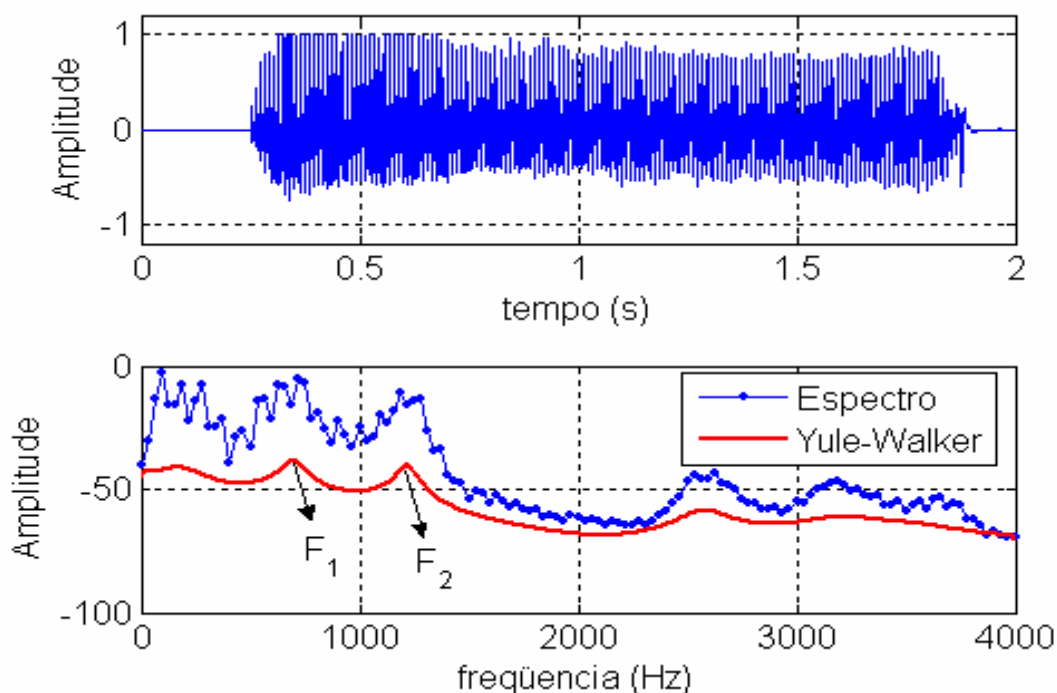


Figura 2 – Forma de onda e densidade espectral da vogal a_{1M} .

Com o auxílio de uma guitarra ligada ao computador, foi gravado um pequeno solo em um arquivo chamado `original.wav`, cuja forma de onda e espectro são mostrados respectivamente nas figuras 3-(a) e 3-(b). Esse arquivo foi utilizado em vários esquemas, cada um representando um efeito. Por exemplo, na Figura 4, é apresentado um diagrama de blocos que simula o efeito de distorção. Os parâmetros dos blocos de ganho e saturação podem ser alterados para se chegar ao nível de distorção desejado. Ao se executar a simulação, é possível escutar o som característico da guitarra em um amplificador com as válvulas saturadas através das caixas de som do computador. As figuras 3-(c) e 3-(d) mostram respectivamente a forma de onda e o espectro do sinal gerado na simulação. Comparando as formas de onda e os espectros dos sinais original e distorcido, é possível observar claramente o efeito da distorção.

Para cada efeito simulado, foram feitas comparações entre os espectros, as formas de onda, as funções de transferência e o som resultante. Os resultados dessas simulações estão disponíveis em (PDSMACK, 2005) e maiores detalhes de programação podem ser encontrados em (MELO, 2005).

4.3. Cancelamento de eco acústico

Filtro digital é um sistema de tempo discreto que é aplicado a um conjunto de dados ruidosos a fim de extrair informações sobre uma determinada quantidade de interesse (HAYKIN, 1996). Os filtros podem ser fixos ou variantes no tempo. Filtros variantes são também conhecidos como filtros adaptativos. A filtragem adaptativa apresenta inúmeras aplicações práticas como, identificação de sistemas, equalização adaptativa, eliminação de ruído e/ou eco acústico, processamento de sinais biomédicos, etc.

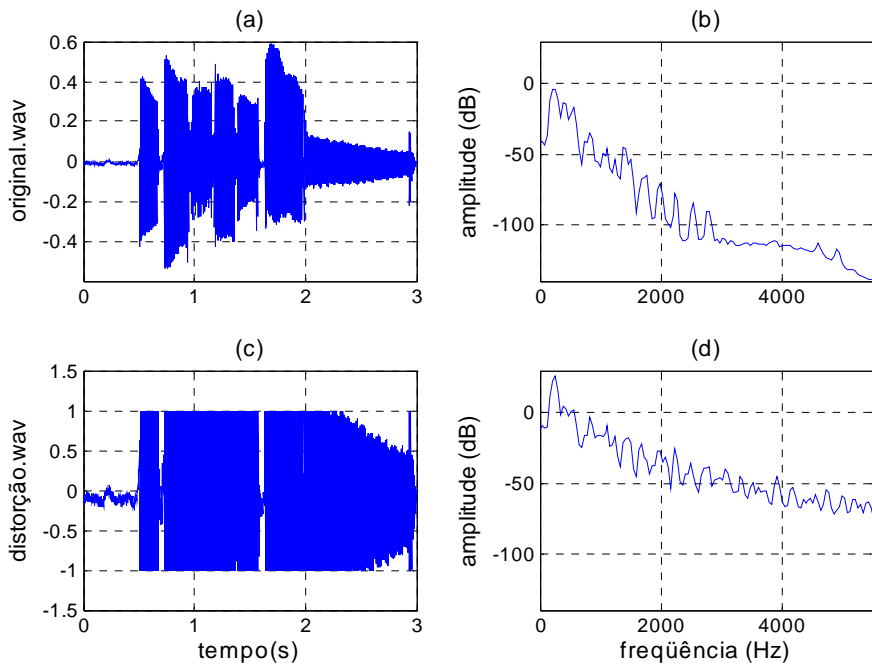


Figura 3 - (a) Forma de onda do sinal original; (b) Espectro do sinal original; (c) Forma de onda do sinal com distorção; e (d) Espectro do sinal com distorção.

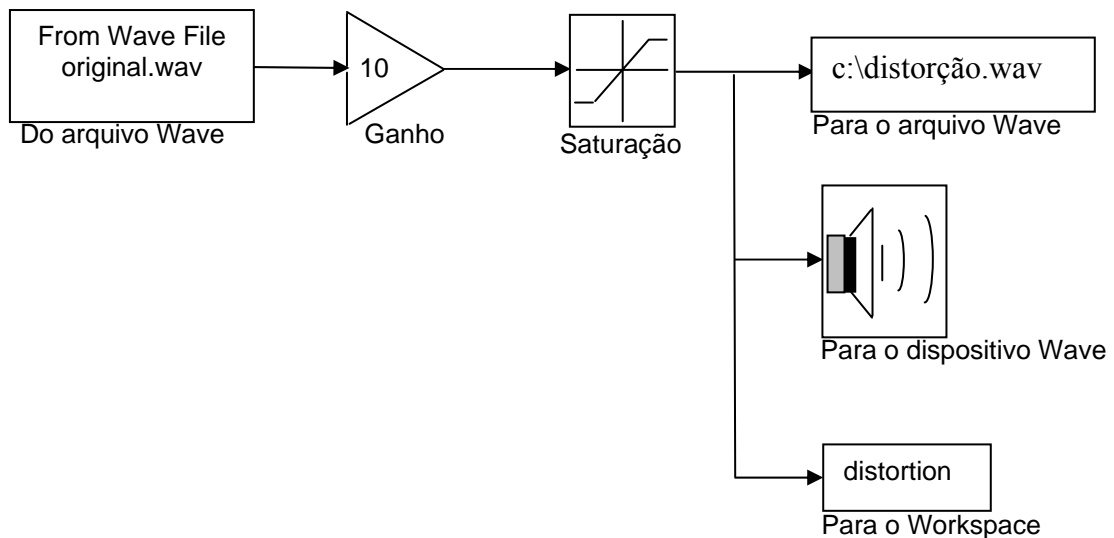


Figura 4 - Diagrama de blocos para o efeito de distorção.

A introdução da filtragem adaptativa em disciplinas de PDS tem ocorrido nos últimos anos em cursos de Engenharia Elétrica e tem despertado grande interesse nos alunos. Dentre as inúmeras aplicações, a de cancelamento de eco acústico tem sido bastante adequada como motivação e/ou introdução de filtragem adaptativa. Suponha que numa ligação telefônica, um dos participantes esteja utilizando um aparelho celular viva-voz em um automóvel. O sinal que sai no alto-falante do aparelho sofre reverberações nas paredes do veículo e é captado juntamente com ruído pelo microfone. Neste caso, o outro participante pode ouvir a própria voz com um atraso e uma atenuação, o que é chamado de eco acústico. Um filtro adaptativo

pode ser utilizado para eliminação de eco, como mostrado na Figura 5. O sinal que sai do alto-falante do viva-voz é representado por $x[n]$, $v[n]$ é a soma de ruído com o sinal de voz da pessoa que se encontra no veículo. O sinal captado pelo microfone do viva-voz é denotado por $d[n]$ e corresponde à soma do sinal de eco $c[n]$ com o sinal $v[n]$. O sinal de erro, denotado por $e[n]$, é definido como a diferença entre o sinal captado pelo microfone do viva-voz e a saída do filtro adaptativo, ou seja, $e[n] = d[n] - y[n]$. Esse sinal é utilizado por um algoritmo para adaptação dos coeficientes do filtro. Depois de uma convergência inicial do algoritmo, o sinal $y[n]$ deve ser uma estimativa do sinal $c[n]$ e o sinal de erro $e[n]$ deve convergir para o sinal interesse $v[n]$.

Uma medida bastante útil quando se trabalha com cancelamento de eco é a de ERLE (*Echo Return Loss Enhancement*) que mostra a redução de eco em dB e é definida como

$$\text{ERLE}[n] = 10 \log_{10} \left(\frac{E\{d^2[n]\}}{E\{e^2[n]\}} \right), \quad (2)$$

sendo $E\{\cdot\}$ o operador de esperança matemática.

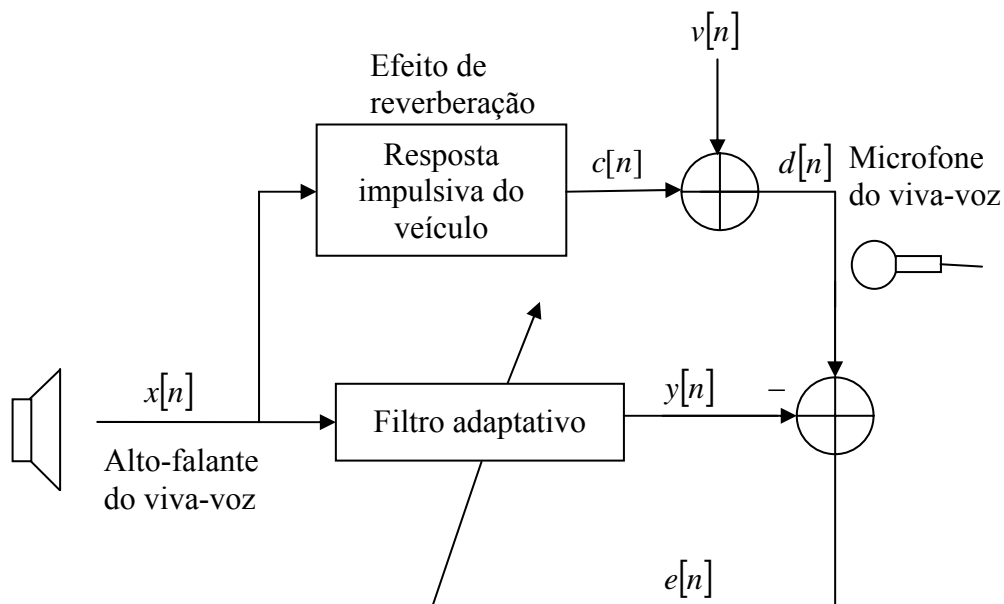


Figura 5 - Diagrama de blocos de um cancelador de eco acústico.

Um dos algoritmos mais adequados para o cancelamento de eco acústico é o EF-LSL (*Error-Feedback Least-Squares Lattice*) (HAYKIN, 1996). Esse algoritmo apresenta uma complexidade computacional proporcional ao número de coeficientes do filtro adaptativo e pode ser implementado de forma eficiente em *hardware* (MIRANDA *et al.*, 1999). Uma outra vantagem é sua robustez numérica, ou seja, independente do fator de ponderação (esquecimento) utilizado, ele não diverge. Considerando o sinal de voz e a resposta impulsiva de (PDSMACK, 2005), ao se aplicar o algoritmo EF-LSL com $\lambda = 0,999$, $\delta = 10^{-5}$ e um filtro com $M = 256$ coeficientes, obtém-se a curva de ERLE da Figura 6. Pode-se observar uma excelente redução do eco (redução máxima em torno de 50 dB).

Numa proposta inicial de uma disciplina de graduação, os algoritmos LMS (*Least-Mean-Squares*) e NLMS (*Normalized LMS*) podem ser abordados. No entanto, algoritmos do tipo

RLS (*Recursive Least Squares*) e/ou LSL podem ser apenas mencionados, por exigirem um tempo e um embasamento teórico maiores. A aplicação de cancelamento de eco acústico em questão pode ser considerada como um exercício computacional a ser resolvido com o Matlab. Neste caso, os resultados da redução de eco obtidos com o algoritmo NLMS, implementado pelos alunos, podem ser comparados aos resultados obtidos com o algoritmo EFLSL, cuja implementação é fornecida numa função do Matlab.

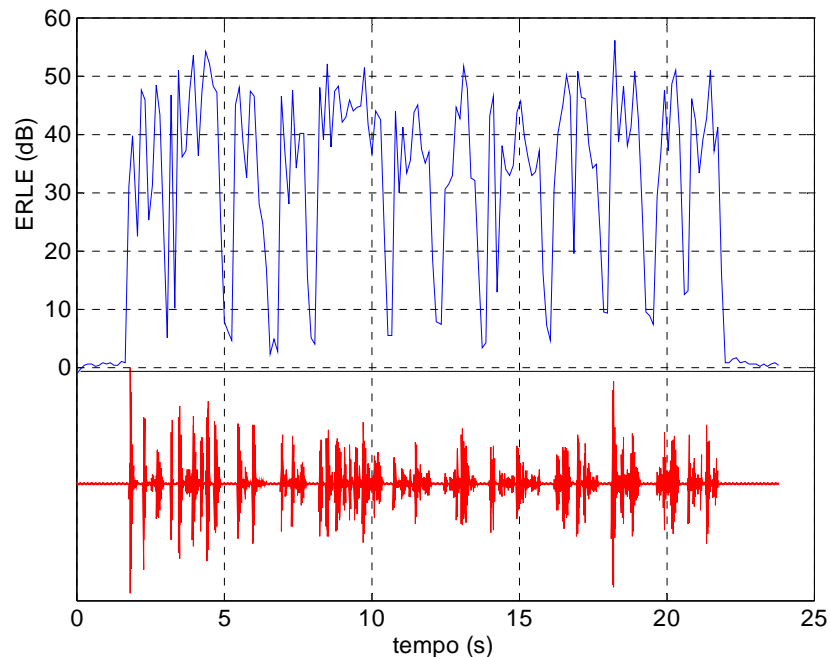


Figura 6 - Curva de ERLE em função do tempo e sinal de eco.

5. CONCLUSÕES E ANÁLISE DE APRENDIZAGEM

A introdução de ferramentas de tempo discreto nos cursos de Engenharia Elétrica envolve conceitos teóricos que podem causar dificuldades de aprendizado aos alunos. A fim de facilitar a aprendizagem, é importante a motivação e aplicação dos conceitos teóricos em situações práticas. Neste contexto, o presente artigo mostrou possíveis sugestões de trabalhos que podem ser desenvolvidos junto aos alunos de graduação.

Os resultados alcançados nos TGIs apresentados deixam claro que os alunos aprenderam muito e de forma motivada. Por exemplo, no trabalho sobre reconhecimento de fonemas, comentado na Seção 4.1, o aluno por conta própria, procurou uma série de especialistas na área de Fonoaudiologia conseguindo juntar conhecimento técnico na área de PDS com conhecimentos da área médica e lingüística para produzir resultados úteis a todas elas. O trabalho, aprovado com nota máxima, foi apresentado a alunos do 5º semestre, despertando muita curiosidade e interesse de alunos que estão começando a fase profissionalizante do curso de Engenharia Elétrica.

Os bons resultados obtidos no trabalho sobre efeitos digitais aplicados ao áudio podem ser, ao menos em parte, creditados ao fato do aluno apresentar interesse prévio no assunto, já que ele é guitarrista de uma banda. Os resultados são um claro exemplo de como os conhecimentos acadêmicos podem ser misturados a atividades lúdicas para gerar interesse e prazer no estudo.

Cabe observar ainda que esses trabalhos podem servir como motivação para a continuidade dos estudos dos alunos. Ao terem o interesse científico despertado, eles podem se tornar alunos de pós-graduação e em suas dissertações de Mestrado e/ou teses de Doutorado uma continuidade dos trabalhos de graduação interdisciplinar poderia ser potencialmente considerada.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BEHLAU, M. S.; PONTES, P. **Avaliação e Tratamento das Disfonias**. São Paulo: Editora Lovise, 1995.

CHAPMAN, S. J. **Matlab Programming for Engineers**. Thomson Engineering, 2005.

COOLEY, J. W.; TUKEY, J. W. An algorithm for the Machine Computation of Complex Fourier Series. **Mathematics of Computation**, v. 19, p. 297-301, Apr. 1965.

ECP EDUCATIONAL CONTROL PRODUCTS. **Manuals for Model 205/205a, 220, 730 and 750**, 1999.

GONZALEZ, R. C.; WOODS, R. E. **Digital Image Processing**. Reading: Addison-Wesley, 1993.

HAIDEMAN, M. T.; JOHNSON, D. H.; BURRUS, C. S. Gauss and the History of the Fast Fourier Transform. **IEEE ASSP Magazine**. v. 1, n. 4, p.14-21, Oct. 1984.

HAYKIN, S. **Adaptive Filter Theory**. New Jersey: Prentice Hall, 1996.

INGLE, V. K.; PROAKIS, J. G. **Digital Signal Processing using Matlab**. Pacific Grove: Brooks/Cole, 2000.

JACKSON, L. B. **Digital Filters and Signal Processing**. Massachussets: Kluwer Academic Publishers, 1997.

LATHI, B. P. **Modern Digital and Analog Communication Systems**. New York: Oxford University Press, 1998.

LEHMAN, S. **Harmony Central: Effects Explained**, 1996.

Disponível em: <http://www.harmony-central.com/Effects/effects-explained.html>
Acesso em 25 de outubro de 2004

MARPLE, S. L. **Digital Spectral Analysis**. New Jersey: Prentice-Hall, 1986.

MATSUMOTO, E. Y. **Simulink 5 Fundamentos**. São Paulo: Érica, 2003.

MELO, M. S. S. **Efeitos Digitais Aplicados ao Áudio**. 2005. Trabalho de Graduação Interdisciplinar – Escola de Engenharia da Universidade Presbiteriana Mackenzie, São Paulo.

MIRANDA, M. D.; GERKEN, M.; SILVA, M. T. M. Efficient implementation of error-feedback LSL algorithm. **Electronic Letters**, v. 35, n. 16, Aug 1999

MITRA, S. K. **Digital Signal Processing – A Computer-Based Approach**. New York: McGrawHill, 2001.

MONTEIRO, M. C. **Uma análise espectrográfica das formantes das vogais orais do português brasileiro falado em São Paulo**. 1995. Monografia (Especialização)-Escola Paulista de Medicina, São Paulo.

NEBEKER, F. **Signal Processing – the emergece of a discipline 1948 to 1998**. New Jersey: IEEE History Center, 1998.

NISE, N. S. **Control Systems Engineering**. Reading: John Wiley & Sons, 2000.

OLIVER, B. M.; PIERCE, J. R.; SHANNON, C. The philosophy of PCM. **Proceedings of the Institute of Radio Engineers**, v. 36, p. 1324-1332, 1948.

OPPENHEIM, A. V.; SCHAFER, R. W.; BUCK, J. R. **Discrete-time signal processing**. New Jersey: Prentice Hall, 1998.

PDSMACK, Disponível em <http://meusite.mackenzie.com.br/marcioft/cobenge2005.html>. Criado em 4 de junho de 2005.

PROAKIS, J.G.; MANOLAKIS, D.G. **Digital Signal Processing - Principles, Algorithms and Applications**. Nova Jersey: Prentice Hall, 1996.

PROAKIS, G. J.; SALEHI, M.; BAUCH, G. **Contemporary Communication Systems using Matlab and Simulink**. Pacific Grove: Brooks/Cole, 2004.

RABINER, L. R.; SCHAFER, R. W. **Digital Processing of Speech Signals**, Upper Saddle River: Pearson Education, 1978.

SENDA, A. **Reconhecimento de Fonemas da Língua Portuguesa da Região de São Paulo**. 2005. Trabalho de Graduação Interdisciplinar – Escola de Engenharia da Universidade Presbiteriana Mackenzie, São Paulo.

SHANNON, C. E. A mathematical theory of communication. **Bell System Technical Journal**, v. 27, p. 379-423 e p. 623-656, July/Oct. 1948.

TEXAS INSTRUMENTS. **TMS320C2x DSP Starter Kit – User’s Guide**, 1993.

WIDROW, B. **Adaptive Filters, I: Fundamentals**. Tech Rep. 6764-6, Stanford: Stanford Electronics Laboratory, 1966.

DIGITAL SIGNAL PROCESSING APPLICATIONS IN ELECTRICAL ENGINEERING

Abstract: *Nowadays, digital techniques of discrete-time signals and systems play an important role in Telecommunication, audio, video and voice processing. Consequently, the introduction of related disciplines in the Electrical Engineering curriculum becomes unavoidable. These disciplines should discuss basic tools like Z-Transform and Discrete Fourier Transform. In this paper, we show the evolution of digital signal processing and some proposed works for Electrical Engineering undergraduate students with the objective of motivating the study of these tools.*

Key-words: Digital signal processing, Computer simulations, Matlab, Audio processing.