



TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

**Tratamento de Sinal de Áudio
com aplicações em Música Digital**
Reverb Shimmer

Filipe Miguel Ribeiro

Brasília, julho de 2017

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA



UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
Faculdade de Tecnologia

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

**Tratamento de Sinal de Áudio
com aplicações em Música Digital
*Reverb Shimmer***

Filipe Miguel Ribeiro

*Trabalho de Conclusão de Curso submetido ao Departamento de Engenharia
Elétrica como requisito parcial para obtenção
do grau de Engenheiro Eletricista*

Banca Examinadora

Prof. Dr. André Café, ENE/UnB
Orientador

Prof. Fulano de Tal 2, ENE/UnB
Examinador Interno

Prof. Fulano de Tal 2, ENE/UnB
Examinador interno

Prof. Fulano de Tal 2, ENE/UnB
Examinador interno

FICHA CATALOGRÁFICA

RIBEIRO, FILIPE MIGUEL

Tratamento de Sinal de Áudiocom aplicações em Música Digital *Reverb Shimmer* [Distrito Federal] 2017.

xvi, 12 p., 210 x 297 mm (ENE/FT/UnB, Engenheiro, Engenharia Elétrica, 2017).

Trabalho de Conclusão de Curso - Universidade de Brasília, Faculdade de Tecnologia.

Departamento de Engenharia Elétrica

1. Efeito Reverb Shimmer

2. Microntrolador MSP430

3. Misturas Convolutivas

4. Separação de sinais de fala

I. ENE/FT/UnB

II. Título (série)

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

RIBEIRO, F. M. (2017). *Tratamento de Sinal de Áudiocom aplicações em Música Digital Reverb Shimmer*. Trabalho de Conclusão de Curso, Departamento de Engenharia Elétrica, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 12 p.

CESSÃO DE DIREITOS

AUTOR: Filipe Miguel Ribeiro

TÍTULO: Tratamento de Sinal de Áudiocom aplicações em Música Digital *Reverb Shimmer*.

GRAU: Engenheiro Eletricista ANO: 2017

É concedida à Universidade de Brasília permissão para reproduzir cópias deste Trabalho de Conclusão de Curso e para emprestar ou vender tais cópias somente para propósitos acadêmicos e científicos. Os autores reservam outros direitos de publicação e nenhuma parte deste Trabalho de Conclusão de Curso pode ser reproduzida sem autorização por escrito dos autores.

Filipe Miguel Ribeiro

Depto. de Engenharia Elétrica (ENE) - FT

Universidade de Brasília (UnB)

Campus Darcy Ribeiro

CEP 70919-970 - Brasília - DF - Brasil

Dedicatória

Dedicatória do autor 1

Filipe Miguel Ribeiro

Agradecimentos

A inclusão desta seção de agradecimentos é opcional e fica à critério do(s) autor(es), que caso deseje(em) inclui-la deverá(ao) utilizar este espaço, seguindo esta formatação.

Filipe Miguel Ribeiro

RESUMO

INSIRA SEU RESUMO AQUI.

ABSTRACT

INSERT YOUR ABSTRACT HERE.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	1
1.1	CONTEXTUALIZAÇÃO E DEFINIÇÃO DO PROBLEMA	1
1.2	INTRODUÇÃO À CONCEITUAÇÃO DO EFEITO DE MODULAÇÃO <i>Reverb</i>	1
1.2.1	APLICABILIDADE	1
1.3	COMPARATIVO ENTRE SOLUÇÕES DE HARDWARE	1
1.3.1	MICROCONTROLADORES E DSP'S.....	1
1.3.2	HARDWARES COMERCIAIS DO EFEITO <i>Reverb - Shimmer</i>	2
1.3.3	MICROCONTROLADOR MSP430F5529 E TMS320	2
1.4	DIAGRAMA DE BLOCO DO PROJETO	2
2	METODOLOGIA E FERRAMENTAS	3
2.1	SINAIS DE TEMPO DISCRETO E TRANSFORMADA DISCRETA DE <i>Fourier</i> .	3
2.2	FILTROS DIGITAIS.....	3
2.2.1	CONCEITOS INICIAIS	3
2.2.2	FILTROS IIR	3
2.2.3	FILTROS FIR	4
2.2.4	FILTROS ADAPTATIVOS	5
2.2.5	FILTRO PENTE - <i>Comb Filter</i>	6
2.3	CONVERSÃO DIGITAL ANALÓGICA	7
2.4	CONVERSÃO ANALÓGICA DIGITAL	7
2.5	COMUNICAÇÃO SERIAL I2C	7
2.6	FERRAMENTAS COMPUTACIONAIS	7
2.6.1	<i>Code Composer Studio</i>	7
2.6.2	<i>WinFilter</i>	7
3	IMPLEMENTAÇÃO DO PROJETO	8
3.1	CONCEITUAÇÃO DO EFEITO REVERB	8
3.2	BLOCO 2.....	8
3.2.1	MICROCONTROLADOR MSP 430	8
3.2.2	COMUNICAÇÃO SERIAL	8
3.2.3	CONVERSORES ANALÓGICO DIGITAL.....	8
3.3	BLOCO 3.....	8
4	SIMULAÇÕES E RESULTADOS	9
4.1	DIAGRAMA TEMPORAIS	9
4.2	RESULTADO DO SISTEMA REALIZADO	9

5	CONCLUSÕES	10
5.1	REALIZAÇÃO DO PROJETO.....	10
5.2	AUTO-CRÍTICA	10
5.3	MODELOS PARA TRABALHOS FUTUROS	10
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	11
	APÊNDICES	12

LISTA DE FIGURAS

2.1	Diagrama de fluxo de sinais e diagrama de blocos de um filtro FIR	4
2.2	Filtro Pente - <i>Comb Filter</i> - Forma de Realimentação.....	6

LISTA DE TABELAS

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolos Latinos

Q Fluxo [ml/s]

Símbolos Gregos

Δ Variação entre duas grandezas similares

ε Fração muito pequena de uma certa grandeza

Grupos Adimensionais

e Número de Euler

Subscritos

max Máximo

Sobrescritos

— Valor médio

Siglas

BTC Bioimpedância transtorácica

CO *Cardiac output* (débito cardíaco)

HR *Heart rate* (frequência cardíaca)

HRV *Heart rate variability* (variabilidade da frequência cardíaca)

LoG *Laplacian of Gaussian* (laplaciano da gaussiana)

RM Ressonância magnética

SNA Sistema nervoso autônomo

SV *Stroke volume* (volume ou débito sistólico)

SVV *Stroke volume variability* (variabilidade do volume sistólico)

TE Tempo de eco

TR Tempo de repetição

1 INTRODUÇÃO

1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO E DEFINIÇÃO DO PROBLEMA

1.2 INTRODUÇÃO À CONCEITUAÇÃO DO EFEITO DE MODULAÇÃO REVERB

1.2.1 Aplicabilidade

Numa sala, ou em qualquer ambiente acústico, existe um caminho direto pelo qual uma fonte de áudio qualquer pode ser ouvida, no entanto, as respectivas ondas sonoras também podem fluir em caminhos mais longos devido a, por exemplo, reflexão das paredes, do teto, de objetos, antes delas chegarem ao receptor.

A energia envolvida com essas reflexões, as quais viajam essas distâncias maiores do que o som emitido no caminho direto, são parcialmente absorvidas pelas superfícies, logo elas chegam ao receptor com um som mais "fraco" que o som direto.

Essas amostras de som atrasadas e atenuadas ocorridas no evento da emissão do som original é o que denominamos de *reverberação*.

Muito embora possa parecer algo sim, o efeito de reverberação é muito mais que uma série de ecos.

1.3 COMPARATIVO ENTRE SOLUÇÕES DE HARDWARE

1.3.1 Microcontroladores e DSP's

O termo sistemas embarcados constituem circuitos eletrônicos que utilizam processadores digitais (microprocessadores ou microcontroladores, etc.) em aplicações dedicadas para determinado equipamento ou produtos.

Os microcontroladores, diferentemente dos microprocessadores, em geral, possuem todos os periféricos necessários num único chip. Seu tamanho também é muito pequeno, mesmo contendo vários periféricos como: memórias, barramentos, *timers*, portas de comunicação, conversores de sinal analógicos para digital etc.

Por outro lado, esses dispositivos possuem um desempenho menor que os microprocessadores, mas são ideais em aplicações que necessitam de menores dimensões, tempo e custos.

As linguagens de programação das unidades processadores de sistemas embarcados podem variar, mas em geral, se limitam às linguagens *C/C++*, *Assembly* e *Java*.

Nessa linha, temos ainda o processador digital de sinais (DSP - *Digital Signal Processing*) e pode definir tanto o processador quanto o processo em si. Esse tipo de tratamento exige um alto desempenho para aplicações numéricas em tempo real.

Os DSP's são construídos para computar de forma eficiente equações de diferenças e algoritmos de transformadas diversas (como a *Fast Fourier Transform* - FFT). As aplicações dos DSP's, em suma, estão relacionadas com sistemas de controle de alta velocidade, realizações de filtros digitais, transformadas rápidas de *Fourier*, processamento de sons e imagens, entre outras.

1.3.2 Hardwares Comerciais do Efeito *Reverb* - *Shimmer*

1.3.3 Microcontrolador MSP430F5529 e TMS320

Foram utilizados ao longo do projeto como soluções de hardware essencialmente o *microcontrolador launchpad MSP430F5529*.

Não obstante foram apontados na subseção anterior a respeito das limitações do hardware para tratamento de sinais de áudio em tempo real, o escopo do trabalho levou em consideração a economicidade do hardware em questão, bem como a utilização de operações no domínio do tempo, sem utilização de etapas intermediárias como realização da transformada de *Fourier* para manipulação do sinal de áudio.

Além disso, o projeto teve uma participação do desempenho do TMS320 C2000 o qual, devido ao tempo de aprendizagem do DSP para correta aplicabilidade no projeto, não fora possível.

1.4 DIAGRAMA DE BLOCO DO PROJETO

2 METODOLOGIA E FERRAMENTAS

2.1 SINAIS DE TEMPO DISCRETO E TRANSFORMADA DISCRETA DE *FOURIER*

2.2 FILTROS DIGITAIS

2.2.1 Conceitos Iniciais

Os filtros digitais não contém uma implementação física em si, diferentemente dos filtros analógicos constituídos, geralmente, de associação de resistores e capacitores. Eles são construídos através de algoritmos.

Para que isso possa ocorrer é necessário que o sinal de áudio (analógico) seja devidamente convertido em um sinal digital. esse sinal portanto convolui por um algoritmo de filtro adequado.

De maneira geral, o projeto de um filtro consiste em obter os coeficientes para os filtros. Isso é realizado através de uma equação chamada de equação das diferenças. O processo pode ser simplesmente realizado pela equação (2.1):

$$\text{Saida} = \sum_{1}^n \text{Coeficiente}_n \text{do filtro} * \text{Amostra}_n \quad (2.1)$$

Assim, o contexto de um filtro digital estará associado a equações de diferenças (ou funções de transferência no domínio Z) cujo parâmetros (coeficientes) serão calculados com o objetivo de discriminar (extrair, atenuar, etc.) determinadas componentes espectrais presentes em um sinal ou uma informação no mesmo sentido dos filtros analógicos, sem a necessidade de um circuito (*hardware*) adicional. Em outras palavras, o filtro digital será uma rotina adicional agregada ao algoritmo responsável pela realização do sistema proposto em questão.

2.2.2 Filtros IIR

Os filtros digitais de resposta infinita ao impulso (*Infinite Impulse Response - IIR*), também conhecidos como filtros recursivos ou autorregressivos, são modelados pela equação de diferença (2.2) ou pela função de transferência (2.3), em que basicamente os valores dos coeficientes dos modelos define a natureza do filtro (passa-baixa; passa-alta; passa-faixa; rejeita-faixa).

A denominação de IIR se deve que a saída do modelo decai para um valor nulo em um tempo infinito em resposta a um impulso aplicado na entrada filtro correspondente.

$$y(k) = \frac{1}{a_0} \left(\sum_{m=0}^M b_m x(k-m) - \sum_{n=1}^N a_n y(k-n) \right) \quad (2.2)$$

$$D(z) = \frac{y(z)}{x(z)} = \frac{b_0 + b_1 z^{-1} + \dots + b_m z^{-m}}{a_1 z^{-1} + a_n z^{-n}} \quad (2.3)$$

Resumidamente, a forma usual de calcular os coeficientes de um filtro digital IIR consiste em utilizar o modelo de um filtro analógico, e aplicar uma transformada Z via aproximação retangular ou trapezoidal (OPPENHEIN, 1998).

Notoriamente, uma das vantagens na utilização dos filtros IIR é que eles resultam em comprimentos (quantidade de coeficientes) de filtro menor do que o filtro FIR correspondente, porém, esta melhoria é obtida às custas de distorção de fase e um transitório que não se limita a um intervalo de tempo finito (ROBERTS, 1987).

Adicionalmente, conforme veremos na seção (2.2.5) deste capítulo, um exemplo clássico de um filtro IIR é o Filtro Pente, pois se estável, a resposta simplesmente consiste em repetir 'series de impulsos que decrescem em amplitude com o tempo.

2.2.3 Filtros FIR

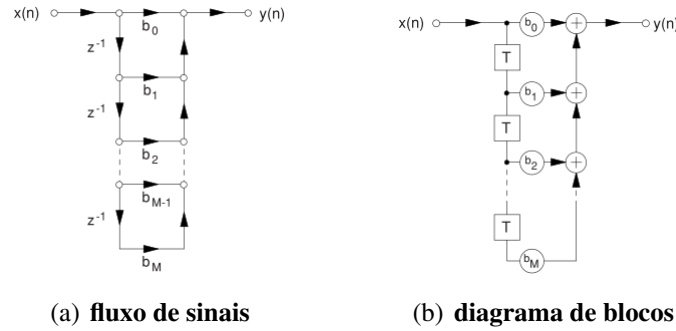


Figura 2.1: Diagrama de fluxo de sinais e diagrama de blocos de um filtro FIR

O lóbulo principal da janela retangular tem aproximadamente a metade da largura do lóbulo principal da janela *Hamming*;

Os lóbulos laterais da janela *Hamming*, em relação ao lóbulo principal, são muitos reduzidos em comparação com os da janela retangular. Especificamente, o pico de amplitude do primeiro lóbulo lateral da janela retangular está somente aproximadamente 13 dB abaixo do pico do lóbulo principal, ao passo que o valor correspondente para a janela *Hamming* é de aproximadamente 40 dB.

É devido a esta último ponto que a janela *Hamming* reduz as oscilações na resposta em frequência de um filtro digital FIR. Todavia, há um preço a ser pago por esta melhoria, a saber, uma faixa de transição mais larga no espectro do filtro.(HAYKIN; VEEN, 2001)

Vantagens:

- Um filtro não recursivo como o filtro FIR é inerentemente estável. Conforme pode ser visto na função de transferência ela é especificada em termos dos zeros apenas no plano- z . Logo não há grandes preocupações em termos da escolha dos coeficientes que possam causar instabilidade no sistema, posto que seu LGR encontra-se estritamente dentro do semi-plano esquerdo do domínio- z .
- O filtro FIR (resposta ao impulso) tem forma simétrica no seu espectro de frequência. Isso produz uma característica de fase linear ideal, ou seja, é equivalente a puramente um atraso temporal em todas as componentes de frequência passando pelo filtro. Em outras palavras, podemos dizer que o filtro FIR não tem *distorção de fase*.

(LYNN; FUERST, 1998)

2.2.4 Filtros Adaptativos

Os filtros adaptativos são constituídos, geralmente, por estruturas FIR, em que os coeficientes dos modelos associados são modificados conforme um procedimento adaptativo. Essa modalidade de filtro geralmente é empregada nos seguintes contextos (*lista não exaustiva*):

- Como procedimento alternativo na obtenção de valores dos coeficientes de um determinado filtro FIR, em que padrões de entrada e saída conhecidos são utilizados para estabelecer os valores dos coeficientes do filtro em questão;
- Cancelamento ou redução de ecos/barulhos de um determinado ambiente;
- Na modelagem de sistemas dinâmicos; e
- Como modelagem básica de representações de redes neurais artificiais.

A equação (2.4) representa o modelo de um filtro FIR, em que $W_m(k)$ denota os valores dos coeficientes do filtro em um instante de tempo k .

$$y(k) = \sum_{m=0}^M W_m(k)x(k-m) \quad (2.4)$$

A diferença ou erro $\epsilon(k)$ entre o valor de padrão desejado $d(k)$ para a resposta do filtro e a informação da saída atual $y(k)$ do modelo associado é expressa por:

$$\epsilon(k) = d(k) - y(k) \quad (2.5)$$

Basicamente para ajustar os valores dos coeficientes de um filtro adaptativo tipicamente utiliza o método do gradiente para essa finalidade (fonte....), sendo o critério da somatória do erro quadrático de $\epsilon(k)$ frequentemente utilizado na etapa de adaptação.

Vale salientar, que alguns sistemas de comunicação de voz utilizam filtros adaptativos com o objetivo de cancelar ou reduzir ecos ou barulhos do ambiente. Nesse contexto, foi pensado inicialmente a utilização desse modelo de filtro para o projeto. No entanto, será explicado mais a frente a não adoção desse modelo, bem como pela utilização de um filtro FIR típico.

2.2.5 Filtro Pente - *Comb Filter*

Em termos práticos *comb filter* ou “filtro pente” é uma versão atrasada do mesmo sinal, causando uma interferência construtiva ou destrutiva de dois sons tocados simultaneamente, porém com atraso entre um para o outro.

Há basicamente dois tipos de *comb filters*: o com realimentação na entrada (*feedback comb filter*) e com alimentação na saída (*feedforward comb filter*).

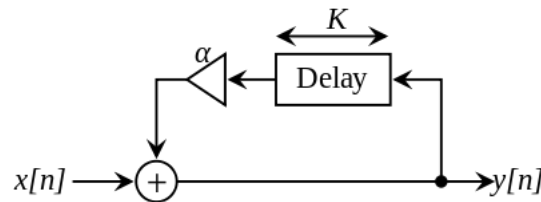


Figura 2.2: Filtro Pente - *Comb Filter* - Forma de Realimentação

O filtro com realimentação

Como já informado, o caso do filtro pente com realimentação negativa é um caso especial de um Filtro de Resposta Infinita (2.2.2), desde que é observado uma figura de atraso (delay) no sentido de realimentação no sistema. Este filtro pode ser modelo físico computacional de "séries de ecos", os quais decaem exponencialmente e espaçados uniformemente no tempo (SMITH, 2010).

Continuando a análise do modelo do referido filtro, ve-se que a estrutura geral de um sistema de realimentação de um *comb filter* pode ser mostrado através da figura (2.2). Além disso pode ser descrito pela seguinte equação de diferenças (2.6):

$$y[n] = x[n] + \alpha y[n - K] \quad (2.6)$$

Se rearranjarmos os termos da equação para que todos as variáveis em y fiquem do mesmo lado da equação e, na sequência, aplicamos a transformada Z em ambos os membros, teremos:

$$(1 - \alpha z^{-K})Y(z) = X(z) \quad (2.7)$$

Finalmente temos a função de transferência (2.8) correspondente ao sistema:

$$H(z) = \frac{Y(z)}{X(z)} = \frac{1}{1 - \alpha z^{-K}} = \frac{z^K}{z^K - \alpha} \quad (2.8)$$

Uma das formas de estimar a resposta de magnitude em função do valor do tempo de delay K e fator de atenuação/ganho α é expressar $H(z)$ em termos de módulo $|H(K, \alpha)|$, bem como, de maneira conveniente, utilizando uma substituição $z = e^{j\theta}$.

$$|H(K, \alpha, \theta)| = \frac{1}{\sqrt{(1 + \alpha^2) - 2\alpha \cos(\theta K)}} \quad (2.9)$$

Nota-se pela expressão do ganho dada pela equação (2.9) que seu valor tem valores de resposta periódica indo de um valor mínimo e subindo para um valor máximo.

$$1 - \alpha \quad (2.10)$$

De maneira análoga o *Comb Filter* também pode ser implementado no domínio do tempo. O diagrama de representação do sistema pode ser descrito pela equação ():

$$y(t) = x(t) + \alpha x(t - \tau) \quad (2.11)$$

2.3 CONVERSÃO DIGITAL ANALÓGICA

2.4 CONVERSÃO ANALÓGICA DIGITAL

2.5 COMUNICAÇÃO SERIAL I2C

2.6 FERRAMENTAS COMPUTACIONAIS

2.6.1 *Code Compose Studio*

2.6.2 *WinFilter*

3 IMPLEMENTAÇÃO DO PROJETO

3.1 CONCEITUAÇÃO DO EFEITO REVERB

3.2 BLOCO 2

3.2.1 Microntrolador MSP 430

Aqui será dada uma pequena atenção a respeito da escolha do microcontrolador da *Texas Instruments* para o referido projeto, em especial as vantagens auferidas:

1. Baixo Consumo:
2. Baixa Tensão de Operação:
3. Alta Performance:
4. Grande Quantidade de Periféricos:

3.2.2 Comunicação Serial

3.2.3 Conversores Analógico Digital

3.3 BLOCO 3

4 SIMULAÇÕES E RESULTADOS

4.1 DIAGRAMA TEMPORAIS

4.2 RESULTADO DO SISTEMA REALIZADO

5 CONCLUSÕES

Relembrar os objetivos

5.1 REALIZAÇÃO DO PROJETO

5.2 AUTO-CRÍTICA

5.3 MODELOS PARA TRABALHOS FUTUROS

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

HAYKIN, S.; VEEN, B. V. *Sinais E Sistemas*. Bookman, 2001. ISBN 9788573077414.
Disponível em: <<https://books.google.com.br/books?id=tdNYclZwaYIC>>.

LYNN, P. A.; FUERST, W. *Introductory Digital Signal Processing with Computer Applications with 3.5 Disk*. 2nd. ed. New York, NY, USA: John Wiley & Sons, Inc., 1998. ISBN 0471976318.

OPPENHEIN, R. W. S. A. V. *Discrete-Time Signal Processing*. [S.l.]: Prentice-Hall, 1998.

ROBERTS, C. T. M. R. A. *Digital Signal Processing*. [S.l.]: Addison-Wesley Company, 1987.

SMITH, J. O. *Physical Audio Signal Processing*. [S.l.]: W3K, 2010. ISBN 978-0-9745607-2-4.

APÊNDICES