



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, 21 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, 21 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
1.1.1	EFEITO DE AMBIENTIZAÇÃO: <i>Reverb</i>	1
1.1.2	TIPOS DE REVERB	2
1.2	COMPARATIVO ENTRE SOLUÇÕES DE HARDWARE	3
1.2.1	HARDWARES DE REVERB-SHIMMER	4
1.2.2	MICROCONTROLADORES E DSP'S	5
1.2.3	HARDWARES COMERCIAIS DO EFEITO <i>Reverb - Shimmer</i>	6
1.2.4	MICROCONTROLADOR MSP430F5529 E TMS320	6
1.3	DIAGRAMA DE BLOCO DO PROJETO	6
2	METODOLOGIA E FERRAMENTAS	8
2.1	SINAIS DE TEMPO DISCRETO E TRANSFORMADA DISCRETA DE <i>Fourier</i> ..	8
2.1.1	PROBLEMA DA AMOSTRAGEM DE SINAL DISCRETO	8
2.2	FILTROS DIGITAIS	11
2.2.1	CONCEITOS INICIAIS	11
2.2.2	FILTROS IIR	11
2.2.3	FILTROS FIR	12
2.2.4	FILTROS ADAPTATIVOS	13
2.2.5	FILTRO PENTE - <i>Comb Filter</i>	14
2.3	CONVERSÃO ANALÓGICA DIGITAL	16
2.4	CONVERSÃO DIGITAL ANALÓGICA	16
2.5	COMUNICAÇÃO SERIAL I2C	16
2.6	FERRAMENTAS COMPUTACIONAIS	16
2.6.1	<i>Code Compose Studio</i>	16
2.6.2	<i>WinFilter</i>	16
3	IMPLEMENTAÇÃO DO PROJETO	17
3.1	BLOCO 0 - CONVERSÃO ANALÓGICO DIGITAL	17
3.2	BLOCO 1 - PROJETANDO UM FILTRO FIR	17
3.2.1	MICROCONTROLADOR MSP 430	17
3.2.2	COMUNICAÇÃO SERIAL	17
3.3	BLOCO 2 - IMPLEMENTANDO O PITCH-SHIFTER	17
3.4	BLOCO 3 - DELAY TIME	17
4	SIMULAÇÕES E RESULTADOS	18
4.1	DIAGRAMA TEMPORAIS	18

4.2	RESULTADO DO SISTEMA REALIZADO	18
5	CONCLUSÕES	19
5.1	REALIZAÇÃO DO PROJETO.....	19
5.2	AUTO-CRÍTICA	19
5.3	MODELOS PARA TRABALHOS FUTUROS	19
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	20
	APÊNDICES.....	21

LISTA DE FIGURAS

1.1	Ilustração do efeito de Reverberação.	1
1.2	Resposta de um Impulso de uma sala pequena.	2
1.3	Câmara de reverb de mola de um amplificador	2
1.4	Pequeno protótipo de um reverb de placas.	3
1.5	Foto modelo Eventide H9 - Effects Processor.	5
1.6	Diagrama de Blocos Principal do Projeto.....	6
1.7	Diagrama de Fluxo de Sinais do Projeto.....	7
2.1	Diagrama de fluxo de sinais e diagrama de blocos de um filtro FIR	12
2.2	Filtro Pente - <i>Comb Filter</i> - Formas de Realimentação	14

LISTA DE TABELAS

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolos Latinos

Q	Fluxo	[ml/s]
-----	-------	--------

Símbolos Gregos

Δ	Varição 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

DSP	Processador Digital de Sinais - <i>Digital Signal Processing</i>
LoG	<i>Laplacian of Gaussian</i> (laplaciano da gaussiana)
TE	Tempo de eco
TR	Tempo de repetição
Ts	Período de Amostragem

1 INTRODUÇÃO

1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO E DEFINIÇÃO DO PROBLEMA

1.1.1 Efeito de ambientização: *Reverb*

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**.

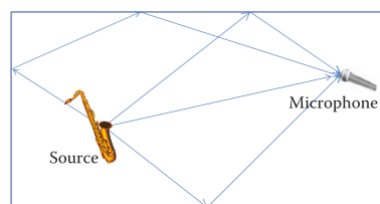


Figura 1.1: Ilustração do efeito de Reverberação.

Muito embora possa parecer ao primeiro momento, o efeito de reverberação é muito mais que uma série de ecos. Um eco, por exemplo, pode ser entendido um resultado de uma distinção, atraso de versões de um som, o qual você pode ouvir com um atraso no mínimo de 40 milissegundos. Já a reverberação de uma sala vazia, por exemplo, há muitas e muitas reflexões, e as primeiras delas que chegam ao receptor são muito mais curtas que termos de tempo de duração. Logo essas reflexões não são tão percebidas ou distinguidas do som da fonte diretamente. Em vez disso, nós percebemos apenas o efeito da combinação de todas essas reflexões.

Nesse sentido, podemos também considerar que a reverberação do som é mais do que um simples dispositivo de *delay* com retorno. No *reverb* a taxa em que as reflexões chegarão muda ao longo do tempo, em oposição de termos apenas que simular reflexões que tenham um intervalo fixo entre elas. Essas reflexões são relacionadas a posição do som que o receptor está na sala, ao tipo de construção da sala (oval, retangular), tamanho e material das paredes.

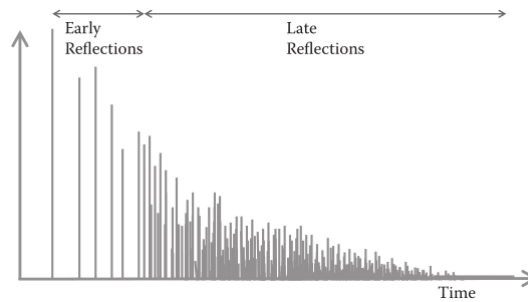


Figura 1.2: *Resposta de um Impulso de uma sala pequena.*

1.1.2 Tipos de Reverb

Falando sob o aspecto musical e industrial de equipamentos que realizam o processamento e simulação de efeitos de repetição (tal como o reverb, delay) temos no mercado diversos tipos de *reverb's*, os quais possuem diferentes aplicações que veremos a seguir:

- **Spring** ("Reverb-de-mola") - O efeito de reverberação com mola é um método que foi primeiramente proposto por *Hammond* em 1940s. O reverb de mola foi criado naturalmente, por um sistema mecânico, o qual usa um transdutor e um captador nas extremidades de uma mola, para criar e capturar vibrações dentro dela. Muitos amplificadores de guitarra incluem esse tipo de reverberação dentro de seus projetos. Existem ainda muitos pedais de reverb que oferecem esse efeito emulado digitalmente e apenas algumas companhias, por questões de custo de construção, também lançaram produtos com um sistema real de reverb de molas.



Figura 1.3: *Câmara de reverb de mola de um amplificador*

- **Room** ("Reverb-sala") - Este tipo de reverb é usado para simular um som natural de uma sala acústica, geralmente vazia, que tem um tamanho geralmente pequeno. Esses reverbs usualmente possuem reflexões curtas que desaparecem rapidamente com o tempo.
- **Hall** ("Reverb-palco") - Reverb's dessa categoria são usados para simular um tipo de reverberação encontrado num grande teatro ou até mesmo catedrais ou igrejas. Eles "soam" geralmente mais fortes do que um *room reverb* por conta da quantidade de reflexões serem significativamente maiores e mais longas. Pode ser encontrado a variação de hall reverbs como "*cathedral*".

- **Plate** ("Reverb-de-placas") - Um plate reverb é definitivamente o efeito que exige uma grande logística a ser empregada. Uma grande máquina conforme mostrado na figura () a qual fornece o áudio dentro de grandes "placas" penduradas de metal que produzem um som de reverb que é mais definido do que o efeito do hall-reverb enquanto ainda é capaz de produzir longos decaimentos no tempo.



Figura 1.4: Pequeno protótipo de um reverb de placas.

- **Pitch-Shifter Reverb** aka **Shimmer** - Bem esse efeito de reverb será o foco de desenvolvimento desse trabalho. O shimmer tem se tornado bem comum entre pedais de guitarra principalmente nesses últimos anos. A grosso modo, esses reverbs adicionam componentes harmônicos do som original para dar a sensação de ambiência e harmonia e simulam a reverberação desses sons mais agudos na "cauda"(no final do reverb).

Este som tem características bem peculiares, as quais geralmente as pessoas associam a um som de orquestra angelical ou sintetizadores de teclado, dando uma intensa ambiência e atmosfera no som.

Diferente dos demais reverbs, o Shimmer é um efeito eminentemente sintetizado, ou seja, produzido digitalmente por meio de algoritmos embarcados em DSP's e comercializados como equipamentos de produção digital.

1.2 COMPARATIVO ENTRE SOLUÇÕES DE HARDWARE

De acordo com a seção 1.1.1, numa sala de concerto, o som que espectador ouve contém tanto o som original produzido pela fonte (voz, instrumento acústico, sistema de sonorização, etc) quanto às milhares de reflexões desse som original, que bate no chão, paredes e teto, até chegar aos ouvidos, com um pequeno atraso. Essas reflexões são como milhares de ecos do sinal direto que, devido à sua grande quantidade, não são percebidas exatamente como ecos, mas sim como o efeito de “reverberação”.

Baseados na reflexividade de um ambiente podemos distinguir os materiais de que ele é composto. Em salas grandes com paredes elevadas de tijolo a reverberação geralmente é muito pesada e precisa de algum tempo até cessar. Já uma sala pequena, com muitos objetos dentro, possui uma

reverberação muito pequena, em geral nem percebida como tal. Entretanto, essa pequena reverberação de fato existe, e por essa razão é que os projetistas de processadores de efeitos incluem vários tipos básicos de reverberações, dando a eles nomes de tipos diferentes de “salas” - room reverb. É muito natural, por exemplo, que uma programação de reverb chamada “Catedral” - reverb hall produza uma reverberação longa e muito densa, enquanto uma programação chamada de “Room” represente a acústica de uma sala muito menor (ALBAR, 2007).

Diante dessa realidade, no mercado, atualmente, várias são as empresas que possuem em seu portfólio esse tipo de efeito com essas características clássicas. Contudo, o efeito *shimmer* é um dos mais complexos a serem implementados na prática devido ao seu alto custo de processamento. Todos os detalhes serão abordados mais a frente neste trabalho.

NOTA

Vale destacar que o efeito puramente de reverberação já é notoriamente conhecido e manipulado por diversos hardwares e softwares no mercado. Note-se que estamos falando do efeito adicional incorporado ao produto que é o chamado *shimmer*.

1.2.1 Hardwares de Reverb-Shimmer

Apesar dos equipamentos ora aqui listados serem conservacionalmente populares no meio musical, tendo diversas aplicações em projetos musicais, infelizmente não se pôde obter detalhes técnicos específicos, em termos de performance de *hardware*, além do que consta em seus manuais ou algum *review* na internet, os quais foram de imensa ajuda principalmente para o produto da empresa Strymon (*BigSky Reverb*).

1. **Eventide H9:** A Eventide, Inc. (também conhecida anteriormente como Eventide *Clock Works Inc.*, ou hoje simplesmente como Eventide) é uma companhia de áudio, transmissões, comunicações e aviação dos Estados Unidos cuja divisão de áudio produz processadores de áudio, software DSP e efeitos de guitarra. Eventide foi uma das primeiras companhias a produzir processadores de áudio digital e seus produtos são fundamentais em gravação e reprodução de som, pós-produção e estúdios de transmissão. Ela possui um pedal de guitarra chamado H9 (1.5) "revolucionário" que embarca diversos tipos de efeito e possui grande poder de processamento e efeito com qualidade profissional num formato relativamente compacto. Neste pedal é possível importar algoritmos de efeitos de modulação, de repetição e diversas ambiências tal como o efeito de reverb shimmer tudo através de sua entrada serial universal (USB) utilizando um *software* proprietário.
2. **Strymon BigSky:** A empresa Strymon, fundada em meados de 2008, é considerada uma das empresas mais bem sucedidas no universo de pedais de guitarra de linha exclusiva (*boutique-pedals*) que integram algoritmos de tratamento de sinais de áudio extremamente avançados.



Figura 1.5: Foto modelo Eventide H9 - Effects Processor.

Vale salientar que com tantas grandes empresas produzindo diversos produtos, sendo por vezes um réplica do outro, é impressionante ver uma pequena empresa produzir um produto de qualidade notoriamente alta. Foi, de fato, uma reinvenção da roda em termos de qualidade dos efeitos e o resultado esperado pelo usuário final.

(a) **Qualidade de Áudio:**

- Baixo ruído na entrada do dispositivo, alta performance de áudio com resolução de 24-bit e taxa de amostragem de 96kHz, tanto para o conversor Analógico digital quanto para o conversor digital analógico.
- 115 db de relação sinal-ruído em 50

(b) **Processador:**

1.2.2 Micontroladores 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.

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

1.2.4 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.

1.3 DIAGRAMA DE BLOCO DO PROJETO

Nesta parte do trabalho, é mostrado de maneira abstrata os blocos necessários para que obtenha a saída do sistema desejado, ou seja, o efeito do *Reverb* com *Shimmer* implementado em software e executado em hardware.

Temos aqui na figura ?? um sinal analógico oriundo de um instrumento musical - guitarra, que passa por um processador de som digital - DSP o qual faz toda o trabalho de tratamento do sinal analógico convertido para amostras digitais. Aplicando, portanto, nesse contexto, um filtro de resposta finita; um algoritmo de seleção de frequências denominado *pitch-shifter* e por fim realimentando o sistema acrescentando um pequeno atraso temporal (*delay*).

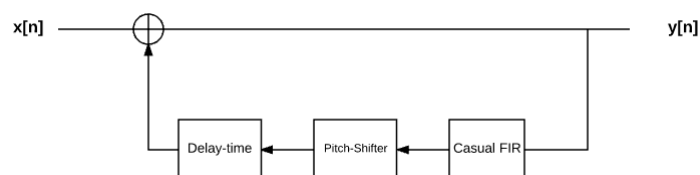


Figura 1.6: *Diagrama de Blocos Principal do Projeto.*

Como uma lei de controle de malha fechada podemos ilustrar (figura 1.7) também como um diagrama de fluxo de sinais da seguinte forma:

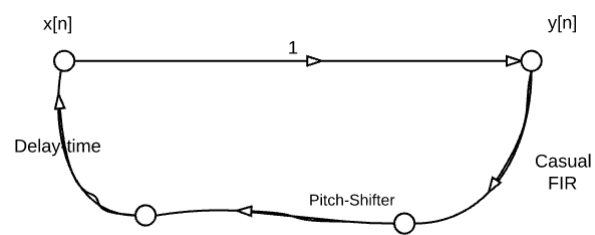


Figura 1.7: *Diagrama de Fluxo de Sinais do Projeto.*

2 METODOLOGIA E FERRAMENTAS

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

2.1.1 Problema da Amostragem de Sinal Discreto

Sabe-se que a transformada de Fourier de um sinal de tempo contínuo $x(t)$ é dada por:

$$X(f) = \mathcal{F}[x(t)] = \int_{-\infty}^{\infty} x(t)e^{-j2\pi ft} dt \quad (2.1)$$

Na maioria das vezes, um sinal de áudio dificilmente terá uma representação analítica, como geralmente ocorre com os sinais no mundo real. Assim, teremos que representar o sinal $X(f)$ numa quantidade finita de frequências, em outras palavras, é possível determinar somente um número finito de amostras de $X(f)$.

Nesse caso, uma forma de amostrar um sinal é através do concatenamento do sinal original $x(t)$ por um trem de impulsos periódicos $\delta_{T_s}(t)$. O período, T_s , é chamado de intervalo de amostragem: é o espaçamento entre amostras consecutivas tomadas de $x(t)$.

O sinal amostrado $x_s(t)$ é dado matematicamente pela seguinte equação, para $n \in \mathbb{Z}$:

$$x_s(t) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} x(nT_s)\delta(t - nT_s) \quad (2.2)$$

A transformada de Fourier neste caso para o sinal $x_s(t)$, pode ser obtida da seguinte forma:

$$X_s(f) = \mathcal{F}[x(t)\delta_{T_s}(t)] = X(f) * \Delta_{T_s}(f) = X(f) * f_s \sum_{k=-\infty}^{\infty} \delta(f - kf_s) = \boxed{f_s \sum_{k=-\infty}^{\infty} X(f - kf_s)} \quad (2.3)$$

Nota-se que o sinal $X_s(f)$ é periódico com período f_s hertz. Considerando uma largura espectral do sinal $X(f)$ como B , em que $X(f) = 0$ para $|f| \geq f_s/2$ - isto é, $B \leq f_s/2$, ou, de forma análoga $f_s \geq 2B$.

Dessa forma podemos avaliar o sinal $X(f)$ como sendo:

$$X(f) = T_s \cdot X_s(f) \quad (2.4)$$

, para $|f| < f_s/2$, se $f_s \geq 2B$

Ou seja, se $f_s \geq 2B$, é possível obter $X(f)$ a partir do sinal discreto $X_s(f)$ que, por consequência, reconstruir $x(t)$ a partir de $x_s(t)$. Esse resultado é conhecido como **teorema da amostragem**.

No nosso caso concreto, teremos que utilizar esses conceitos para avaliar uma taxa de amostragem coerente bem como conceitos relativos ao tipo de método usado para representar digitalmente amostras de um sinal analógico.

Vale também salientar que o espectro $X_s(f)$ pode ser obtido calculando-se diretamente a transformada de Fourier de $x_s(t)$ usando-se as equações (2.1) e (2.2), pode-se mostrar que:

$$X_s(f) = \int_{-\infty}^{\infty} \underbrace{x_s(t)}_{x(nT_s)\delta(t-nT_s)} e^{-j2\pi ft} dt = \sum_{n=-\infty}^{\infty} x(nT_s) e^{-j2\pi f n T_s} \quad (2.5)$$

Substituindo na equação (2.4), para $|f| < f_s/2$, se $f_s \geq 2B$ temos:

$$X(f) = T_s \sum_{n=-\infty}^{\infty} x(nT_s) e^{-j2\pi f n T_s} \quad (2.6)$$

Nota-se que a equação (2.6) pode ser usada também para o cálculo numérico de $X(f)$ ¹.

Apesar dessa discretização do sinal ainda tratamos de um sinal com somatório infinito, que, em geral, não será possível de ser calculado. Portanto, esse somatório precisa ser truncado, e consequentemente, não se terá mais a igualdade da equação (2.6), mesmo que $X(f) = 0$ para $|f| \geq f_s/2$.

Uma consideração acerca desse truncamento é dada pela equação abaixo, para $n \in [0, N-1]$:

$$\hat{X}(f) = T_s \sum_{n=0}^{N-1} x(nT_s) e^{-j2\pi f n T_s} \quad (2.7)$$

Uma forma de tratar o truncamento, por questões de continuidade manter a continuidade do sinal amostrado, é considerá-lo como resultante do truncamento do sinal $x(t)$, realizado por meio da multiplicação desse sinal com um sinal $w(t)$ de duração finita, geralmente $w(t)$ é um sinal retangular. Chamaos o sinal $w(t)$ de sinal-janela ou, simplesmente janela.

Assim definimos o sinal $x_w(t)$ como sendo:

$$x_w(t) = w(t)x(t) \quad (2.8)$$

¹A expressão dada equação (2.6) para $X(f)$ é a mesma que se obtém utilizando a regra do trapézio para solucionar numericamente a equação (2.1), contudo com essa abordagem é mais difícil visualizar com clareza aspectos importantes e limitações desse cálculo numérico

Escolhendo um tempo de janelamento $T_w = NT_s$, tem-se que $x_w(nT_s) = 0$ para $n \notin [0, N - 1]$. Assim, substituindo na equação (2.6) podemos obter uma aproximação $\hat{X}(f)$, para $|f| < f_s/2$, dada por:

$$\hat{X}(f) = T_s \sum_{n=0}^{N-1} x_w(nT_s) e^{-j2\pi f n T_s} \quad (2.9)$$

Podemos considerar que a aproximação da equação (2.9) é idêntica a fornecida pela equação (2.7) pois, considerando que o sinal $w(t)$ é uma janela retangular², então $x_w(nT_s) = x(nT_s)$, para $n \in [0, N - 1]$.

Todavia o somatório dessas equações, embora finito, não poderá ser transformado em uma expressão analítica válida para qualquer $|f| < f_s/2$. Isto é, para cada valor de f dado, para o qual se deseje determinar $\hat{X}(f)$, será preciso calcular o referido somatório, o que não é nada prático.

Uma alternativa é o cálculo de $\hat{X}(f)$ para valores de f espaçados de:

$$\Delta f = \frac{f_s}{N} \quad (2.10)$$

Ou seja, para $f = k\Delta f$, $k \in \mathbb{Z}$

Assim, usando a equação³ (2.9), para $|k| \leq N/2$:

$$\hat{X}(k\Delta f) = T_s \sum_{n=0}^{N-1} x_w(nT_s) e^{-j2\pi k \frac{f_s}{N} n T_s} = T_s \sum_{n=0}^{N-1} x_w(nT_s) e^{-j \frac{2\pi}{N} k n} \quad (2.11)$$

Finalmente definindo o sinal de tempo discreto $x_w[n] = x_w(nT_s)$, a equação (2.11) pode ser reescrita como:

$$\hat{X}(k\Delta f) = T_s \sum_{n=0}^{N-1} x_w[n] e^{-j2\pi k \frac{f_s}{N} n} \quad (2.12)$$

O somatório dessa equação é a transformada de Fourier discreta (DFT - *discrete Fourier transform*).

O conhecimento desse conceito matemático, bem como suas limitações quanto aos problemas de janelamento e de sobreposição espectral (aliasing) são fundamentais para entendimento das próximas atividades efetuadas.

² $w(t) = \text{rect}\left(\frac{t-T_w/2}{T_w}\right) = \begin{cases} 1, & 0 \leq t < T_w \\ 0, & \text{c.c} \end{cases}$

³Sendo $|f| < f_s/2$ e $f = k\Delta f$, portanto $|f| = |k|f_s/2 \Rightarrow |k| > N/2$.

2.2 FILTROS DIGITAIS

2.2.1 Conceitos Iniciais

Os filtros digitais não contêm 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 (2.13):

$$\text{Saida} = \sum_{n=1}^n \text{Coeficiente}_n \text{do filtro} * \text{Amostra}_n \quad (2.13)$$

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 (2.14) ou pela função de transferência (2.15), 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.

$$y(k) = \frac{1}{a_0} \left(\sum_{m=0}^M b_m x(k-m) - \sum_{n=1}^N a_n y(k-n) \right) \quad (2.14)$$

$$D(z) = \frac{y(z)}{x(z)} = \frac{b_0 + b_1 z^{-1} + \dots + b_m z^{-m}}{a_1 z^{-1} + a_n z^{-n}} \quad (2.15)$$

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

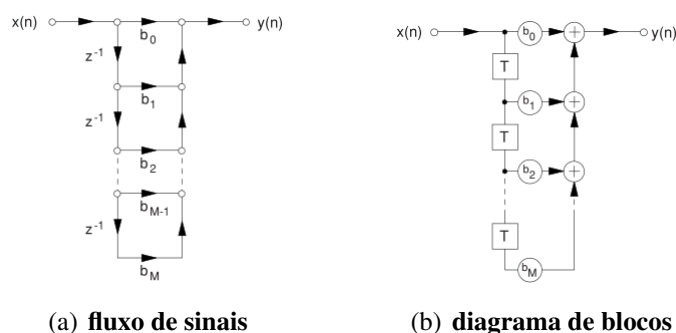


Figura 2.1: Diagrama de fluxo de sinais e diagrama de blocos de um filtro FIR

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 () 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 .

$$y(k) = \sum_{m=0}^M W_m(k)x(k-m) \quad (2.16)$$

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

$$\epsilon(k) = d(k) - y(k) \quad (2.17)$$

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.

Nesse sentido, há basicamente dois tipos de *comb filters*: o (*feedback comb filter*) e (*feedforward comb filter*). Resumidamente, os nomes referem-se à direção em que os sinais são atrasados antes de serem adicionados à entrada. O primeiro tipo considera em adicionar a saída do filtro a entrada imediatamente posterior, enquanto o segundo considera apenas adicionar à saída do filtro as entradas presente e a mesma entrada atrasada.

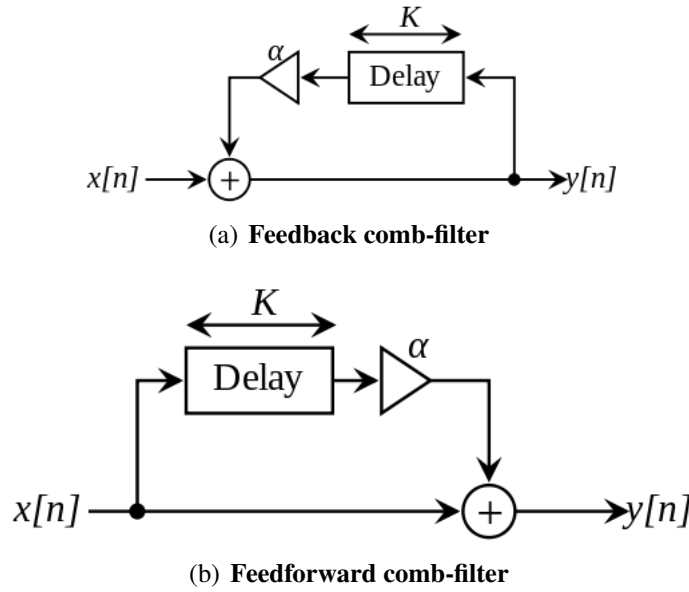


Figura 2.2: Filtro Pente - Comb Filter - Formas de Realimentação

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

Continuando a análise do modelo do referido filtro, ve-se que a estrutura geral de um sistema de realimentação de um *feedback comb filter* pode ser mostrado através da figura 2.2(a). Além disso pode ser descrito pela seguinte equação⁴ de diferenças 2.18:

$$y[n] = x[n] + \alpha y[n - K] \quad (2.18)$$

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:

⁴Para um critério de estabilidade o coeficiente α da equação 2.18 tem que ser menor ou igual a 1 (0db).

$$(1 - \alpha z^{-K})Y(z) = X(z) \quad (2.19)$$

Finalmente temos a função de transferência (2.20) correspondente ao sistema:

$$H(z) = \frac{Y(z)}{X(z)} = \frac{1}{1 - \alpha z^{-K}} = \frac{z^K}{z^K - \alpha} \quad (2.20)$$

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 $z = e^{j\omega}$.

$$|H(e^{j\omega})| = \frac{1}{|1 - \alpha e^{-j\omega K}|}, \quad -\pi \leq \omega \leq \pi \quad (2.21)$$

Nota-se pela expressão do ganho dada pela equação (2.21) que seu valor tem valores de resposta **periódica** indo de um valor mínimo e subindo para um valor máximo.

Supondo o valor de $\alpha = 1$ (0 dB), para simplificar os cálculos, a amplitude da resposta reduz-se a:

$$H(w) = \frac{1}{2|\sin(\omega M/2)|} \quad (2.22)$$

Note ainda que para $\alpha > 0$ são produzidos picos de ressonância em:

$$\begin{aligned} \sin(\omega K/2) &= 0 \\ \omega \frac{K}{2} &= p\pi, \quad p = 0, 1, 2, \dots, K-1 \\ w_p &= 2\pi \frac{p}{K} \end{aligned} \quad (2.23)$$

Ou seja, em todos harmônicos pares do filtro.

Ademais, esses filtros são utilizados em toda sorte de efeitos de sons, principalmente no universo de instrumentos musicais. Vários desses filtros podem ser usados por exemplo para simular uma reverberação.

Por último, vamos falar do modelo proposto para o projeto deste trabalho, no qual consiste de uma versão mais generalista do *feedback comb-filter*. Este modelo propõe a alocação de um filtro casual $H_l(z)$ na malha de realimentação, em vez de apenas um ganho de atenuação α . A função de transferência 2.19 pode ser então reescrita como:

$$H(z) = \frac{1}{1 - H_l(z)z^{-K}} \quad (2.24)$$

NOTA

Para o critério de estabilidade do sistema, a amplitude de resposta do filtro $H_l(z)$ deverá ser menor que 1 em todas as frequências, i.e, $|H_l(e^{j\omega T})| < 1, \forall \omega T \in [-\pi, \pi)$

2.3 CONVERSÃO ANALÓGICA DIGITAL**2.4 CONVERSÃO DIGITAL ANALÓGICA****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 BLOCO 0 - CONVERSÃO ANALÓGICO DIGITAL

3.2 BLOCO 1 - PROJETANDO UM FILTRO FIR

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

3.3 BLOCO 2 - IMPLEMENTANDO O PITCH-SHIFTER

3.4 BLOCO 3 - DELAY TIME

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

ALBAR, N. *Tutorial: Efeito de Guitarras*. 2007. Cifraclub. Disponível em: <<https://www.cifraclub.com.br/aprenda/guitarra/tutoriais/81/>>.

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

III, J. O. S. *Physical Audio Signal Processing for Virtual Musical Instruments and Digital Audio Effects*. [S.l.]: W3K Publishing, 2010. ISBN 0974560723.

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.

APÊNDICES