

Implementação de um Algoritmo de Reverberação Estéreo em Tempo Real

Gabriel Barbosa Ferraz de Andrade



CENTRO DE INFORMÁTICA
UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAÍBA

João Pessoa, 2024

Gabriel Barbosa Ferraz de Andrade

Implementação de um Algoritmo de Reverberação Estéreo em Tempo Real

Monografia apresentada ao curso Engenharia de Computação
do Centro de Informática, da Universidade Federal da Paraíba,
como requisito para a obtenção do grau de
Bacharel em Engenharia de Computação

Orientador: Carlos Eduardo Coelho Freire Batista

Maio de 2024

Catálogo na publicação
Seção de Catalogação e Classificação

A553i Andrade, Gabriel Barbosa Ferraz de.
Implementação de um algoritmo de reverberação
estéreo em tempo real / Gabriel Barbosa Ferraz de
Andrade. - João Pessoa, 2024.
45 f. : il.

Orientação: Carlos Eduardo Coelho Freire Batista.
TCC (Graduação) - UFPB/CI.

1. Reverberação. 2. Áudio. I. Batista, Carlos
Eduardo Coelho Freire. II. Título.

UFPB/CI

CDU 004.421



UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAÍBA
CENTRO DE INFORMÁTICA

ATA DE DEFESA PÚBLICA DO TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

No dia 14 de maio de 2024, às 10h, no LAVID, reuniram-se os membros da Banca Examinadora constituída para julgar o Trabalho de Conclusão de Curso do Sr. Gabriel Barbosa Ferraz de Andrade, aluno do Curso de Engenharia da Computação da Universidade Federal da Paraíba.

A comissão examinadora foi composta pelo professor Carlos Eduardo Coelho Freire Batista (CI/UFPB), orientador e presidente da banca, pelo professor Alexandre Magno e Silva Ferreira (CCTA/UFPB), e pelo professor Derzu Omaia (CI/UFPB).

Iniciando os trabalhos, o presidente da banca cumprimentou os presentes, comunicou-os da finalidade da reunião e passou a palavra ao candidato para que fizesse a exposição oral da monografia intitulada “Implementação de um Algoritmo de Reverberação Estéreo em Tempo Real”.

Concluída a exposição, o candidato foi arguido pela Banca Examinadora que, em seguida, emitiu o seguinte parecer: “aprovado”, com conceito 9,5 (0,0 a 10,0). Do ocorrido, eu, Carlos Eduardo Coelho Freire Batista, presidente da banca, lavrei a presente ata que vai assinada por mim e pelos membros da banca examinadora.

João Pessoa, 14 de maio de 2024

Carlos Eduardo Coelho Freire Batista

Alexandre Magno e Silva Ferreira

Derzu Omaia

*Nós criamos o reverberador digital por entretenimento,
porque achamos que ia ser divertido*

Manfred Schroeder

RESUMO

Reverberação é um fenômeno natural que sempre se fez presente em expressões culturais musicais da sociedade, desde apresentações em conceituadas casas de ópera até sermões em grandes templos religiosos. Com o avanço da tecnologia, atualmente é possível simular perceptualmente um espaço em tempo real em um computador pessoal. Com isso foi proposto uma solução de um módulo de eco com múltiplos *taps* com uma etapa de reverberação, com objetivo de fornecer uma sensação de espaço combinado com a variedade de ritmos fornecidos pelas repetições. Foi alcançado uma implementação que fornece uma atmosfera cinematográfica, mas que possui limitações quando aplicado em sinais percussivos.

Palavras-chave: <Reverberação>, <Áudio>, <DSP>.

ABSTRACT

Reverb is a natural phenomenon present in society's cultural expressions since its inception, from lavish presentations in opera houses to religious sermons in temples. With technology's progress, now it's possible to simulate a physical space perceptually in real-time with a personal computer. This research proposes an implementation based on multi-tap delays with a diffusion step, intending to add a sensation of width combined with the variety of rhythms of the echos. The result is a cinematic algorithm with limitations when applied to percussive signals.

Key-words: <Reverb>, <Audio>, <DSP>.

LISTA DE FIGURAS

1	Representação de um sinal contínuo e um discreto.	19
2	Bloco representando um sistema.	20
3	Possíveis ligações entre sistemas.	21
4	Filtro pente do reverberador simples e filtro passa-tudo de Schroeder. . . .	22
5	Estrutura de reverberação de Moorer.	23
6	Estrutura de reverberação de Gardner.	24
7	Implementação simplificada do algoritmo de Dattorro feito pela Valley. . .	25
8	Reverberador multi-canaís de Gerzon.	26
9	Generalização do filtro pente para uma matriz de retroalimentação. . . .	27
10	Reverberador de quatro canais de Stautner e Puckette.	28
11	Comparação da estrutura paralela e <i>interleaved</i> de sinais multi-canaís. . . .	32
12	Diagrama de blocos resumido do sistema.	33
13	<i>Stereo Memory Man with Hazarai</i> produzido pela <i>Eletro-Harmonix</i>	33
14	Pré-amplificador do <i>Space Echo</i> produzido pela <i>Roland</i>	34
15	Diagrama de blocos do estágio de saturação do sistema.	35
16	Diagrama de blocos do eco com múltiplos taps.	36
17	Diagrama de blocos do reverberador.	37
18	Diagrama de blocos do estágio de saída do sistema.	38
19	Interface da aplicação utilizando o editor genérico do JUCE.	38
20	Áudio processado com atraso e espaçamento entre <i>taps</i> de 1s. Diagrama abaixo mostra o resultado com o parâmetro de alternância de canal no máximo.	39
21	Áudio processado com atraso e espaçamento entre <i>taps</i> de 200ms, retroalimentação em 0.56 e alternância de canais no máximo.	39
22	Comparação por espectrograma do reverberador implementado com soluções comerciais.	40
23	Efeito do bloco de saturação em uma senoide de 440hz pura representada na esquerda, com saturação em 50% no diagrama do meio e em 100% no diagrama da direita.	40

24	Espectrograma da resposta a uma senoide variando de 0hz até 22000hz, com artefatos comprovando a existência de <i>aliasing</i>	41
----	---	----

LISTA DE TABELAS

1	Comparação de desempenho com soluções já existentes na indústria	41
---	--	----

LISTA DE ABREVIATURAS

DAW - Estação de Trabalho de Áudio Digital

VST - Virtual Studio Technology

DSP - Processamento de Sinais Digitais

IRCAM - Institut de Recherche et Coordination Acoustique/Musique

Sumário

1	INTRODUÇÃO	17
1.1	Definição do Problema	18
1.2	Objetivo geral	18
1.3	Objetivos específicos	18
1.4	Estrutura da monografia	18
2	CONCEITOS GERAIS E REVISÃO DA LITERATURA	19
2.1	SINAIS E SISTEMAS DIGITAIS	19
2.2	Sinais	19
2.3	Sistemas	20
2.4	REVERBERACAO ARTIFICIAL	20
2.5	Reverberação com Filtros passa-tudo	20
2.6	Melhorias no Algoritmo de Schroeder	22
2.7	Simulador de reverberador de placa digital de Dattorro	24
2.8	Reverberação com rede de atraso com retroalimentação	26
3	METODOLOGIA	29
3.1	TRABALHANDO COM ÁUDIO DIGITAL	29
3.2	Ambiente de Desenvolvimento	29
3.3	Trabalhando no Domínio do Tempo	30
3.4	Taxa de Amostragem	30
3.5	Processamento de Sinais de Áudio em Blocos	30
3.6	Processamento com Múltiplos Canais	31
3.7	DIAGRAMA DO SISTEMA	33
3.8	Preamp	34
3.9	Bloco de Ecos	35
3.10	Bloco de Reverberação	37
3.11	Bloco de Saída e Conclusão do Sistema	38

4	APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS	39
5	CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS	42
	REFERÊNCIAS	44

1 INTRODUÇÃO

Reverberação é um fenômeno natural que ocorre em espaços que possuem superfícies como paredes, nas quais ondas sonoras passam por uma série de reflexões, gerando um efeito que é um misto de eco e difusão. Durante nosso cotidiano estamos sempre interagindo com esse efeito em salas, corredores, ginásios, dentre outros ambientes, com isso a área de acústica buscou analisar e controlar esse fenômeno.

O início da engenharia acústica é marcado com o estudo teórico de reverberação e dos coeficientes de absorção dos materiais, Sabine (1932) estabelece a aplicação prática desses estudos em auditórios visando estabelecer métodos para arquitetos afinarem o efeito sonoro de forma que o som da apresentação seja projetado com clareza para a plateia e o apresentador.

Embora os fundamentos teóricos da aplicação prática de reverberação foram estabelecidos durante o século XX, a influência do efeito na produção musical se estende desde do início da Idade Média, com a acústica das grandes catedrais cristãs influenciando diretamente nas práticas sonoras realizadas na época (Doyle, 2005). Essa relação continua atualmente e se estende além da construção de auditórios e catedrais, antes dos anos 80 estúdios construía salas com características sonoras específicas para gravar vocais ou instrumentos acústicos, porém com a necessidade de possuir mais controle dos parâmetros acústicos do efeito e de redução de custos teve-se o desenvolvimento de soluções eletromecânicas que imitava a percepção auditória do fenômeno, como reverberadores de placas ou de mola, presentes em várias gravações renomadas dos anos 60 e 70.

Após os anos 80, com a evolução da computação, outra classe de reverberadores se tornou popular nos estúdios, os módulos digitais (White, 2003). O objetivo dessa categoria de processador de áudio é replicar o efeito em tempo real para monitoração e gravação das faixas de áudio que compõe a música, com isso esses módulos em vez de realizar uma simulação física, levando em consideração elementos como geometria da sala ou materiais das superfícies, tentam replicar o efeito perceptual da reverberação, utilizando processamento digital de sinais para implementar grandes redes de blocos de atrasos com retroalimentação, simulando as etapas de desenvolvimento e decaimento do som que ocorrem durante o efeito na natureza (Reiss; McPherson, 2015).

O objetivo desse trabalho é implementar uma solução que realize uma simulação perceptual do efeito de reverberação em tempo real, tomando como base os algoritmos clássicos da literatura e utilizando ferramentas padrões da indústria atual de processamento de áudio. A solução fornece acesso aos parâmetros do algoritmo de forma que o usuário manipule o efeito de acordo com sua necessidade, sendo executada nativamente dentro das DAW, *digital audio workstation*, através do formato VST.

1.1 Definição do Problema

Reverberação é um efeito sonoro essencial na produção musical e fornece uma sensação de espaço e textura a instrumentos e performances. Com os avanços de desempenho de processadores e computadores pessoais é possível implementar uma simulação perceptual desse fenômeno acústico que rode de forma nativa dentro das ferramentas padrões de composição e edição de áudio da indústria sem depender de *hardware* especializado.

A proposta desse trabalho é implementar um sistema de processamento de sinais inspirado na estrutura de atraso e difusão estabelecido na literatura.

1.2 Objetivo geral

Desenvolver um sistema de processamento de sinais digitais de áudio, que simule a percepção do efeito de reverberação, utilizando a interface VST da Steinberg para maior integração da solução com as DAW.

1.3 Objetivos específicos

- Implementar estrutura de ecos com múltiplos *taps*;
- Implementar o filtro passa-tudo;
- Implementar estrutura de filtros em paralelos para etapa de difusão;
- Avaliar resultado da solução dentro de uma *DAW*.

1.4 Estrutura da monografia

No capítulo 2 é realizado a discussão dos conceitos gerais e uma revisão da literatura. Composto por uma rápida discussão de alguns conceitos de sinais e sistemas e uma revisão da teórica básica de reverberação como um efeito de áudio digital.

No capítulo 3 é demonstrado a metodologia utilizada nesse projeto. Contendo uma discussão detalhada de como se trabalhar com áudio digital, especificamente com técnicas envolvendo *buffers* e operações aritméticas. Também é elaborado uma visão por cima do sistema e seus diagramas de blocos.

No capítulo 4 é apresentado os resultados da solução proposta, incluindo algumas comparações com outras soluções comerciais.

Finalizando, no capítulo 5 é feito uma conclusão do projeto, incluindo uma discussão sobre a área de áudio digital, desafios para desenvolvedores que planejam entrar na área e possibilidades de melhorias no projeto.

2 CONCEITOS GERAIS E REVISÃO DA LITERATURA

Nessa sessão do trabalho será apresentado as teorias de processamento de sinais digitais que servem de fundamento para o desenvolvimento de algoritmos de reverberação. Também será feita uma revisão das soluções propostas pela literatura de reverberação, desde do início da simulação perceptual do efeito até o estado da arte.

2.1 SINAIS E SISTEMAS DIGITAIS

Como esse trabalho procura analisar e replicar, mesmo que perceptualmente, um efeito físico, é válido entrar no tema de sinais e sistemas. Na natureza são diversos fatores que influenciam na reverberação, com a teoria apresentada nessa sessão é possível quebrar esse problema complexo em blocos, facilitando a reprodução computacional do fenômeno físico, para isso será considerado o som como um sinal que será processado por diversos sistemas para atingir o efeito desejado.

2.2 Sinais

Segundo Smith (2002), um sinal é uma descrição de como um parâmetro varia em função de outro, por exemplo, em sistemas eletrônicos é comum avaliar a variação de tensão em função do tempo. Podemos separar os tipos de sinais entre contínuo, onde o sinal é uma função no domínio dos números reais, e discreto, onde ele pertence ao domínio dos inteiros, podendo ser uma indexação de uma sequência real ou complexa. Abaixo é ilustrado a diferença da representação gráfica de cada tipo de sinal.

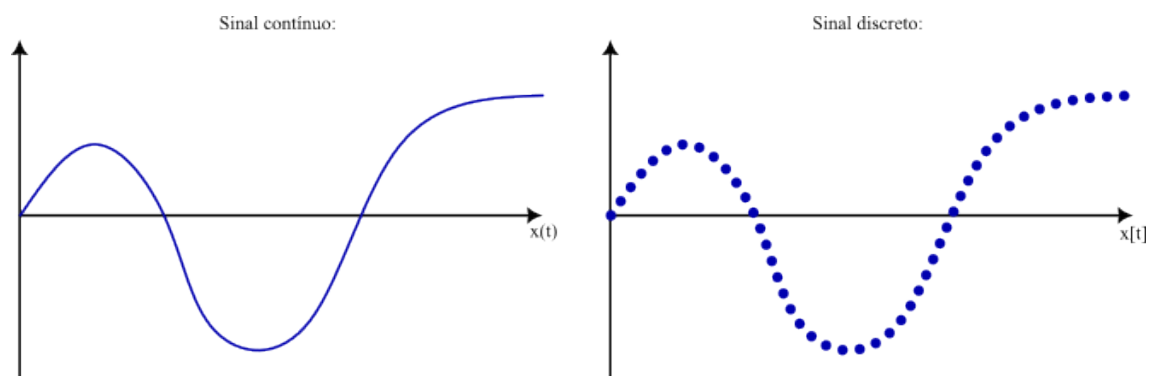


Figura 1: Representação de um sinal contínuo e um discreto.

Fonte: Autoria própria.

2.3 Sistemas

Sistemas podem ser definidos como processos que resultam na transformação de um sinal (Oppenheim, 1982), por exemplo, em uma caixa de som você pode reduzir ou aumentar o volume do áudio, isso seria uma alteração no sinal original. Um sistema também pode ser classificado como contínuo ou discreto, e nesse aspecto ele segue as mesmas regras que os sinais. Um exemplo ilustrativo de um sistema é fornecido abaixo.

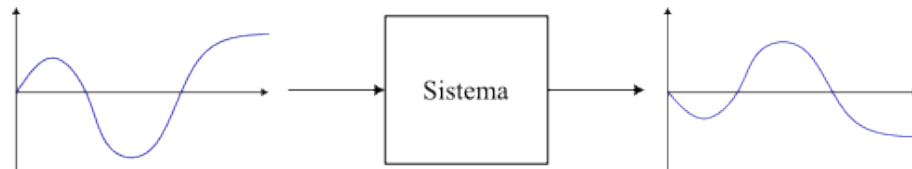


Figura 2: Bloco representando um sistema.

Fonte: Autoria própria.

Sistemas podem ser conectados em blocos, formando estruturas complexas de processamento que ajuda a quebrar operações mais avançadas em problemas menores. As ligações entre sistemas podem ser feitas em série, onde a saída de um sistema alimenta diretamente a entrada de outros sistemas, ou em paralelo, onde dois sistemas recebem a mesma entrada. As saídas de sistemas em paralelo podem ser consolidadas em um único sinal por meio de operações como soma ou multiplicação. Outra conexão importante que pode ser realizada é a de *retroalimentação*, onde a saída de um sistema A é conectado na entrada de um sistema B, e a saída do sistema B é conectado na entrada do sistema A, essa estrutura é bastante presente em circuitos elétricos e na construção de filtros. Abaixo se tem possíveis representações do diagrama de blocos das ligações discutidas.

2.4 REVERBERACAO ARTIFICIAL

2.5 Reverberação com Filtros passa-tudo

O primeiro algoritmo de reverberação artificial foi elaborado na década de 60, Schroeder (1961) definiu uma série de condições que um reverberador artificial deve cumprir: uma resposta plana na faixa de frequência, os grupos de ressonância do reverberador devem se sobrepor e cobrir toda a faixa de frequência do áudio, o tempo de reverberação das ressonâncias devem ser iguais ou quase iguais para manter um tempo de decaimento semelhante entre eles, a densidade do eco após um pequeno período deve ser alta o suficiente para o ouvido não identificar ecos individuais e a resposta do eco deve ser livre de periodicidades como vibrações.

Essas cinco condições vem do estudo que Schoreder fez sobre a acústica dos quartos e são focadas nas características do efeito que o reverberador artificial deve replicar.

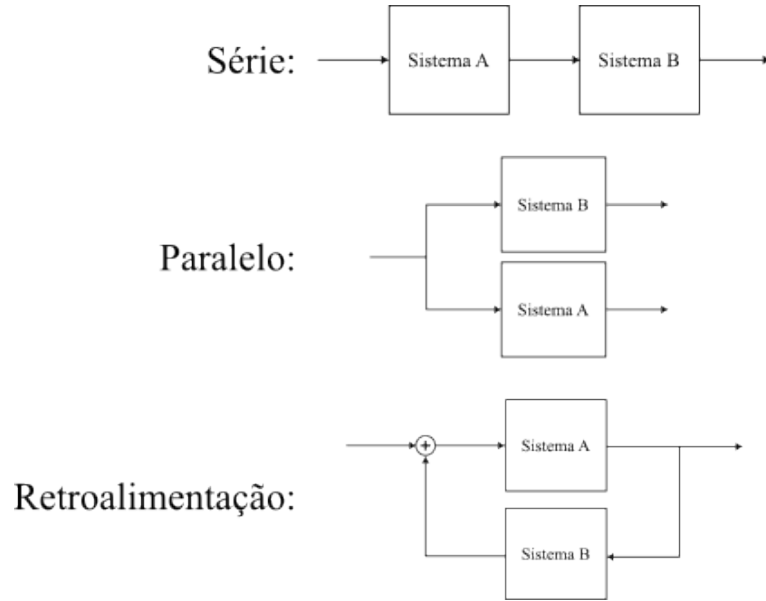


Figura 3: Possíveis ligações entre sistemas.

Fonte: Autoria própria.

Porem ele inclui uma sexta condição, que é uma falha comum de reverberadores digitais que deve ser evitada, a resposta de amplitude-frequência não deve possuir periodicidades, tais repostas quando vistas em um espectrograma possuem um formato semelhante a um pente e dão uma tonalidade metálica para o som que tende a não ser agradável.

A sexta condição de Schroeder vem da análise do reverberador mais simples, um único bloco de atraso que retorna um eco após um tempo τ , a resposta de impulso desse bloco é dada por

$$h(t) = \delta(t - \tau) \quad (1)$$

onde $\delta(t)$ é um impulso ideal representado pela função delta de Dirac, para aumentar a densidade de ecos desse reverberador sem precisar acrescentar blocos de atrasos é adicionado uma retroalimentação na saída. Essa solução quebra as condições impostas por Schroeder, pois sua resposta de amplitude-frequência é dependente da frequência, gerando um filtro pente na saída.

Em cima desse sistema Schroeder define sua solução, um filtro passa-tudo onde na saída possui uma mistura do sinal sem atraso com o sinal atrasado de forma que se tenha um ganho unitário para todas as frequências, para ter essa proporção na saída o sinal sem atraso é multiplicado por um fator $-g$, enquanto o sinal atrasado é multiplicado por $1 - g^2$. A resposta de impulso desse reverberador é dada por

$$h(t) = -g\delta(t) + (1 - g^2) * [\delta(t - \tau) + g\delta(t - 2\tau) + \dots] \quad (2)$$

Na figura 4 é possível observar o diagrama de blocos desses elementos fundamentais estabelecidos por Schroeder, e como eles se relacionam, com o reverberador sendo uma evolução do filtro pente proposto.

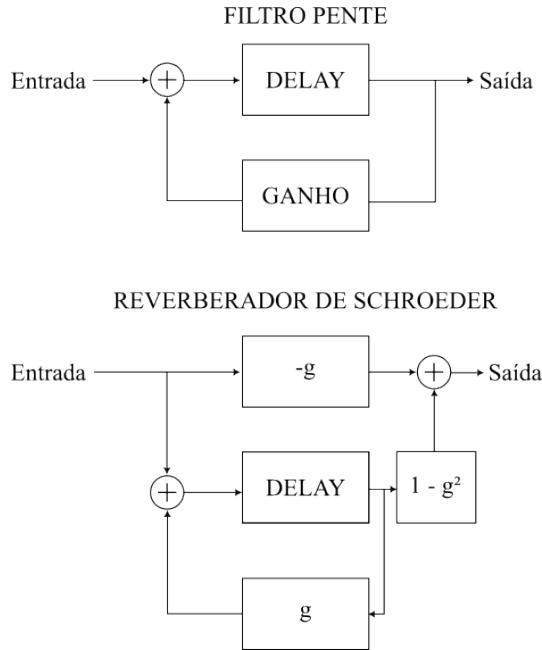


Figura 4: Filtro pente do reverberador simples e filtro passa-tudo de Schroeder.

Fonte: Autoria própria.

Com isso a tonalidade metálica no filtro pente é reduzida, porém, essa solução ainda não atende todas as condições propostas por Schroeder, pois além dela não alcançar uma densidade de ecos alta o suficiente para caracterizar uma reverberação, também há periodicidades na resposta dos ecos gerando vibrações desagradáveis no efeito. Para solucionar esses problemas, Schroeder propõe conectar cinco blocos desse reverberador em série, onde cada bloco possui um atraso τ diferente, com isso há uma quebra na periodicidade dos ecos na saída final, reduzindo os problemas de flutuações na resposta da saída e também um aumento na densidade de ecos, gerando uma tonalidade mais natural no reverberador.

2.6 Melhorias no Algoritmo de Schroeder

O trabalho de Schroeder com seus reverberadores com estruturas de filtros passa-tudo estabeleceu a base para o desenvolvimento de reverberadores digitais. No entanto, sua solução final ainda possuía limitações na apresentação do efeito, Gardner (2002) compila essas deficiências em: resposta inicial do reverberador possui uma tonalidade muito discreta, gerando um efeito com uma qualidade granulada para sons com bastante ata-

que, por exemplo, uma caixa de bateria; a amplitude das últimas reflexões apresenta ondulações não naturais; com reverberações mais longas tende a surgir uma tonalidade metálica no efeito e a densidade de ecos não é suficiente e não incrementa com o passar do tempo.

Moorer foi uns dos primeiros a buscar melhorias para o reverberador de Schroeder, em seu trabalho ele realizou um compilado de quatro modelos que estavam em uso em Stanford e no IRCAM, que construíam em cima do reverberador de Schroeder. Segundo Moorer (1979) inserir um filtro pente cuja frequência oscila dentro do filtro passa-tudo possui bons resultados tonais, porem esse método ainda perde para o modelo que Moorer focou em seu trabalho, que envolve incluir um filtro FIR dentro do filtro passa-tudo. Ele argumenta que a inclusão desse filtro procura simular perceptualmente a absorção do ar, além de analisar o bloco unitário de reverberação Moorer também propõe uma nova estrutura após estudar as respostas ao impulso de salas de apresentações, onde se têm N blocos de atrasos que simulam as primeiras reflexões com o sinal original, cada etapa de atraso é enviada para um reverberador $R(z)$ acrescentado no decaimento inicial com um ganho g . Um dos pontos importantes dessa estrutura é que ela garante que a densidade dos ecos iniciais é repetida diversas vezes com os blocos de atrasos de seis filtros pentes, gerando um resultado próximo da acústica de uma sala. Na figura 5 se tem o diagrama generalizado do sistema proposto por Moorer, ilustrando como variar a quantidade de filtros pentes para afinar a densidade de repetições.

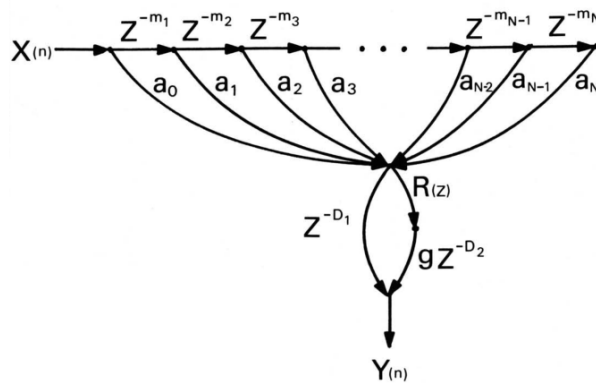


Figura 5: Estrutura de reverberação de Moorer.

Fonte: MOORER, James (1979, p. 25)

Outro autor influencial para o aprimoramento das estruturas de reverberação com filtro passa-tudo é Gardner, seu reverberador estabelece um sistema unitário de filtro passa-tudo que garante uma evolução exponencial da densidade dos ecos, simulando o que acontece com o som dentro dessas salas. O bloco que ele propõe é um filtro passa-tudo com outro passa-tudo aninhado no seu bloco de atraso. Uma das vantagens dessa

implementação é que independente da quantidade de filtros aninhados ou em cascata, a matemática de seu comportamento garante que a resposta sempre será passa-tudo.

A partir desse bloco unitário, Gardner implementa uma estrutura genérica de reverberação, ilustrada na figura 6, onde os filtro passa-tudo aninhados são conectados em série, cada saída dos blocos é somada com um peso a_N na saída do sistema. Algumas das saídas dos filtros são adicionadas a entrada após passar por um bloco de atraso moderado com retroalimentação e um filtro passa-baixas. Segundo Gardner (1992), essa retroalimentação colabora reduzindo de forma significativa as tonalidades mais metálicas e agressivas dos filtros passa-tudo, e que essa característica é resultado do aumento da densidade de ecos com a retroalimentação externa do sistema. Tal trajeto do reverberador funciona como um filtro pente com um passa-baixas dentro.

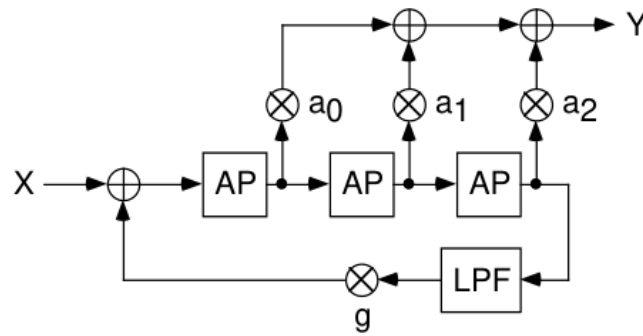


Figura 6: Estrutura de reverberação de Gardner.

Fonte: GARDNER, William (1992, p. 14)

2.7 Simulador de reverberador de placa digital de Dattorro

O trabalho realizado por Dattorro é significativo por quebrar algumas convenções estabelecidas por Schroeder, seu objetivo foi construir uma solução baseada nas implementações comerciais de Griesinger e Blesser, famosos pelos seus algoritmos utilizados em módulos digitais de reverberação feitos pela Lexicon e EMT. Segundo Dattorro (1997), a estrutura elaborada possui diversas vantagens como fácil acesso aos parâmetros como difusão e decaimento, além de ser eficiente e flexível. Um diferencial do reverberador de Dattorro é que, enquanto Schroeder e seus contemporâneos focavam em uma reverberação sem "coloração" do som, ele investe em adicionar cor ao som, dando uma tonalidade única a esse reverberador, simulando o timbre de um reverberador de placa eletromecânica. Essa característica tornou o reverberador de Dattorro bastante popular, presente desde dos antigos módulos de efeitos da Ensoniq até soluções atuais como o módulo Clouds da Mutable Instruments e em software pelo Plateau da Valley, que forneceu o diagrama de sua implementação, presente na figura 7, na sua página.

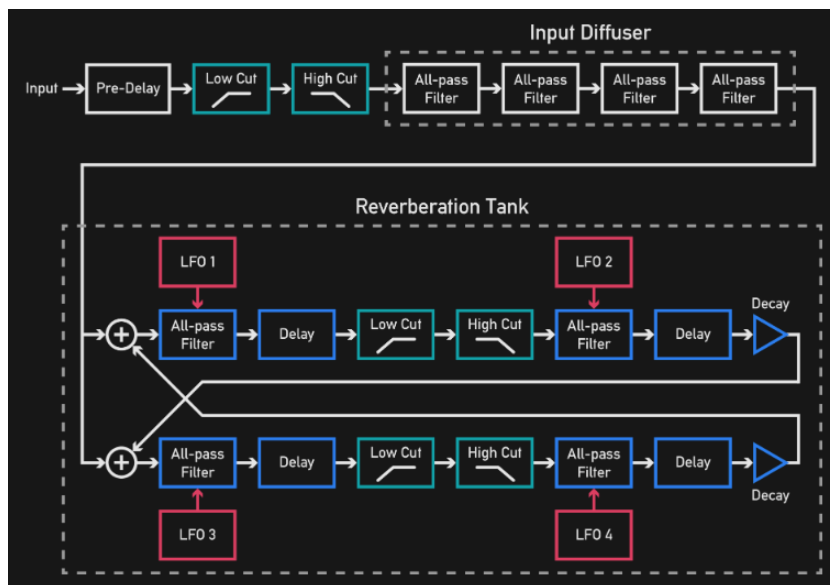


Figura 7: Implementação simplificada do algoritmo de Dattorro feito pela Valley.

Fonte: <https://valleyaudio.github.io/rack/plateau/>

A estrutura elaborada por Dattorro pode ser quebrada em duas etapas, uma é o difusor do sinal de entrada e a outra representa um tanque de reverberação, realçando sua inspiração original nos reverberadores de placa.

O difusor de entrada é composto por 4 blocos de filtros passa-tudo que seguem a estrutura de uma treliça, o objetivo dessa etapa é randomizar o sinal e a fase da entrada, reduzindo os elementos mais fortes e os transientes mais agressivos da entrada, Dattorro explica que isso é necessário, pois na etapa do tanque essas características tendem a realçar a natureza cíclica dos seus blocos de atrasos, com esse tratamento o efeito de reverberação é mais efetivo com elementos percussivos no áudio de entrada.

Na etapa do tanque temos quatro difusores, circulando entre si formando a estrutura de um oito. O objetivo dessa etapa é prender o som e circular por seus blocos, quando os coeficientes de decaimento se aproximam de 1 o som tende a se repetir infinitamente dentro do tanque. Essa característica realça a natureza circular do tanque e o cuidado que se deve ter com os coeficientes para evitar repetições aurais no som. Outro aspecto importante que ajuda a reduzir a sensação de repetição dentro do tanque são os 4 difusores, não só eles processam o som incrementalmente, eles também são modulados utilizando osciladores, adicionando mais variedade e tonalidade ao efeito.

2.8 Reverberação com rede de atraso com retroalimentação

Com o avanço da tecnologia, reverberadores com estruturas de filtros passa-tudo ligados em série e paralelo atingiram um impasse. Embora Schroeder tivesse como objetivo desenvolver um reverberador sem "coloração", em geral, essas estruturas tendem a possuir o timbre metálico característico desses filtros. Com exceção do reverberador de Dattorro, que possui característica timbrais específicas que o torna requisitado mesmo após décadas desde sua criação, reverberadores de Schroeder, Moorer ou Gardner não são bastante utilizados nos módulos digitais de efeitos atuais. Um dos principais motivos para isso, além da qualidade sonora do efeito, é o aumento da necessidade de reverberadores de multi-canais, produção musical em estéreo se tornou o padrão da indústria e em alguns setores quatro ou mais canais é essencial, como a produção de trilhas sonoras.

O começo do estudo de reverberadores de multi-canais iniciou com Gerzon na década de 70, ele focou em dois desafios de reverberação na época, simular o efeito de som que se distribui pela sala, em vez de se limitar a algumas fontes discretas, e simular o efeito de fontes de áudio ocupando locais diferentes da sala. Para isso ele desenvolveu uma técnica utilizando uma matriz ortogonal de retroalimentação.

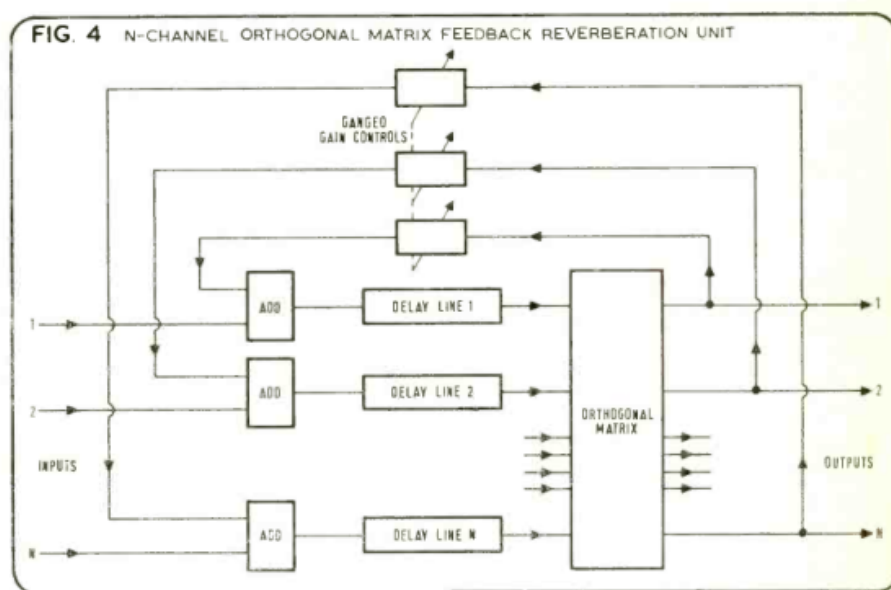


Figura 8: Reverberador multi-canais de Gerzon.

Fonte: GERZON, Michael (1971, p. 634)

A característica interessante dessa implementação é o *cross-talking* entre os dois canais estéreos de entrada, embora seja possível montar uma solução semelhante ao tanque de Dattorro com dois blocos de difusão que circulam o áudio entre eles, a matriz proposta por Gerzon permite um controle mais granular no tanto que um canal influencia no outro através dos coeficientes da matriz ortogonal.

Segundo Gerzon (1971), uma matriz de N entradas e N saídas é dita ortogonal quando a energia combinada das N saídas é igual à energia combinada das N entradas, essa característica da matriz gera algumas observações feita por Gerzon no efeito. Quando os coeficientes não possuem valores baixos, os múltiplos canais tendem a se cruzarem, gerando uma resposta bem uniforme entre os canais, o que nem sempre é desejado. Afinando os coeficientes é possível simular o efeito de múltiplas fontes sonoras em localizações diferentes da sala. Essa implementação inicial do reverberador multi-canais ainda possui um sinal de saída com bastante "coloração", em 1972 Gerzon fornece opções para reduzir essa "coloração" inspirado no trabalho de Schroeder e Logan.

Tomando o trabalho de Gerzon como base, Stautner e Puckette em 1982 desenvolvem um reverberador de quatro canais utilizando uma matriz. Segundo Gardner (2002), a estrutura elabora por eles pode ser vista como uma generalização do reverberador de Schroeder com filtros passa-tudo em paralelo, que seria um caso de uma matriz de retroalimentação com coeficientes diagonais.

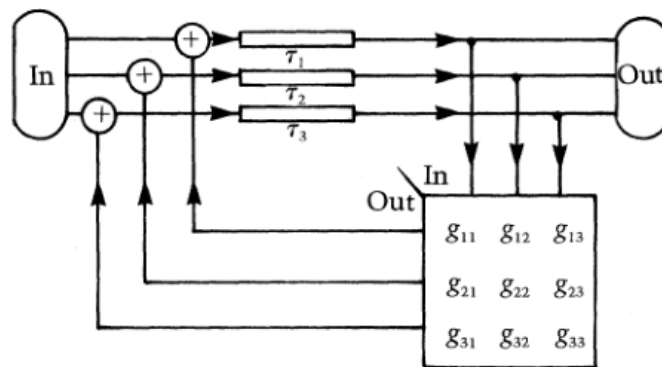


Figura 9: Generalização do filtro pente para uma matriz de retroalimentação.

Fonte: STAUTNER; PUCKETTE (1982, p. 53)

O trabalho de Stautner e Puckette foi essencial para popularizar a matriz ortogonal de retroalimentação na indústria de reverberadores algorítmicos, eles estabelecem uma base importante em como escolher os coeficientes da matriz e elevam a estrutura básica de Gerzon com melhorias. Na implementação final do reverberador de quatro canais eles incluem filtros para simular a absorção de sinal pelo ar, para combater a "coloração" apontada por Gerzon em seu artigo de 1971, os autores sugerem variar o tamanho dos blocos de atrasos aleatoriamente, após perceberem vibrações no decaimento final do reverberador.

Atualmente a estrutura básica da matriz de retroalimentação está consolidada como padrão da indústria para reverberadores algorítmicos, trata-se de uma solução bastante flexível, visto que ela generaliza as possíveis soluções de reverberadores com filtros

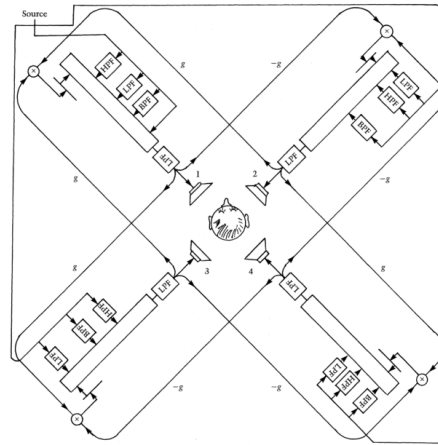


Figura 10: Reverberador de quatro canais de Stautner e Puckette.

Fonte: STAUTNER; PUCKETTE (1982, p. 55)

passa-tudo. As diferentes implementações do algoritmo em soluções comerciais atuais focam em afinar os aspectos tonais do reverberador e adicionar novos parâmetros como modulação dos blocos de atraso, gerando um efeito que oscila entre *chorus* e vibrato. A facilidade de adaptar o efeito para sistemas de áudio de múltiplos canais, conforme indicado na figura 10, torna esse reverberador uma boa opção para contexto cinemáticos que geralmente utilizam 5 ou mais canais de áudio.

3 METODOLOGIA

Nesse trabalho é proposto a implementação de um efeito de áudio que acrescenta uma tonalidade espacial em tempo real no sinal de entrada, com base em métodos de atraso e reverberação propostos na literatura. O objetivo é desenvolver um sistema original que, em vez de replicar algoritmos existentes, aproveita elementos previamente estabelecidos em uma única aplicação de processamento em tempo real que fornece controle de várias características do efeito ao usuário, para que ele molde o timbre resultante para melhor se conformar ao seu trabalho.

3.1 TRABALHANDO COM ÁUDIO DIGITAL

Todo o desenvolvimento realizado durante o projeto foi focado em áudio digital. Com isso surge certas metodologias específicas dentro do campo de processamento de sinais digitais, principalmente quando se considera que o sistema proposto deve performar em tempo real e utilizar padrões já estabelecidos na indústria para ser suportado nativamente pelas ferramentas profissionais de produção musical.

3.2 Ambiente de Desenvolvimento

O projeto foi desenvolvido no computador pessoal do pesquisador, cujo hardware é composto de um processador *AMD Ryzen 7 3700X*, placa de vídeo *Nvidia GeForce RTX 2060 Ti*, 16gb de memória RAM, SSD com capacidade de 1tb e sistema operacional Windows 10 versão 22H2.

Do lado do software, o objetivo é utilizar o padrão VST estabelecido pela *Steinberg*, um formato de aplicação integrado na maioria das ferramentas de produção musical atuais, padronizado na indústria. Para isso foi utilizada o *framework* JUCE atualmente mantido pela *Raw Material Software*, a versão utilizado foi a 7.0.9, e a linguagem de desenvolvimento utilizada foi C++23.

O *pipeline* padrão de compilação fornecido pelo JUCE obriga o desenvolvedor a utilizar ambientes de desenvolvimento específicos, tal limitação acrescentou dificuldades durante o desenvolvimento e, em geral, é bastante inflexível. Como alternativa foi utilizado um *template* desenvolvido por Jan Wilczek, composto por *CMake* versão 3.29.0-rc2 e *CPM*, seu gerenciador de pacotes integrado, como sistema de *build*. O código foi desenvolvido no editor de texto *Visual Studio Code* versão 1.87.2. Tal ambiente permite um maior controle do versionamento do *framework* e da linguagem de programação, maior facilidade na adição e gerenciamento de outras bibliotecas, e é flexível, podendo ser utilizado com qualquer editor de código ou compilador.

3.3 Trabalhando no Domínio do Tempo

No campo de processamento de sinais é possível trabalhar com dois domínios, o da frequência e o do tempo. Esse projeto opera principalmente no domínio do tempo, não sendo utilizada nenhuma transformada para alternar entre domínios. Em termos de áudio digital, isso significa que, em vez de realizar operações de processamento de harmônicos, foi utilizado operações com blocos de atraso e manipulações numéricas na amplitude do sinal em um dado instante de tempo.

3.4 Taxa de Amostragem

No centro dessa metodologia de processamento temos o conceito de taxa de amostragem, valor que representa a quantidade de amostras contidas em 1 segundo. Esse valor é definido pela interface de áudio do sistema do usuário e fornecido pela *DAW* onde será executado a aplicação, o usuário tem controle sobre parâmetro e isso deve ser considerado durante a implementação.

Em geral, aplicações VST possuem dois estados principais de execução, e um deles é a etapa de preparação onde o desenvolvedor tem a oportunidade de realizar as configurações do estado inicial do sistema antes de realizar o processamento do sinal, nessa etapa é definida a taxa de amostragem para o processamento dos sinais. Com esse parâmetro é possível utilizar valores em segundos nos parâmetros expostos ao usuário, convertendo o valor para quantidade de amostras conforme a fórmula abaixo:

$$\text{Quantidade de amostras} = \text{Tempo em segundo} * \text{Taxa de amostragem} \quad (3)$$

Trabalhar com segundos ou milissegundos é mais intuitivo para o usuário, no entanto, algoritmos de áudio digital no domínio do tempo operam com quantidade de amostra em seus cálculos, visto que os instantes no tempo são representados por valores inteiros, característica de sinais discretos.

3.5 Processamento de Sinais de Áudio em Blocos

Outro aspecto importante ao desenvolver aplicações de processamento de áudio digital é o processamento em blocos do sinal, representado pelo parâmetro de tamanho do bloco fornecido pela interface de áudio do sistema do usuário. Na prática, esse valor indica o tempo de atraso em amostras entre o sinal de entrada e o sinal de saída, geralmente representado por uma potência de 2. Quando convertemos esse valor para

segundos obtém-se uma variável conhecida como *latência*, algo que interfere diretamente na qualidade da experiência do usuário.

Quando consideramos um instrumento acústico, assim que o músico toca uma nota, ela é imediatamente reproduzida pelo instrumento. No entanto, em um equipamento digital essa nota precisa ser gerada ou processada por um algoritmo, e cada instrução leva um tempo para ser executada. Em geral, o músico deseja minimizar a latência, pois um atraso de alguns milissegundos é perceptível para o ouvido humano e causa um certo desconforto durante a performance.

As interfaces de áudio voltadas para produção musical fornecem ao músico a opção de definir o tamanho do bloco de áudio em suas opções, acrescentando certas imposições no desenvolvimento do algoritmo. Quando a *DAW* fornece o bloco de áudio que será processado, em paralelo ela também está coletando as amostras do próximo bloco. Com isso o algoritmo tem um limite de tempo pré-definido, geralmente uma fração de milissegundos, e precisa concluir o processamento antes da *DAW* repassar o próximo bloco, caso contrário a aplicação irá gerar ruídos e estralos durante a execução. Quanto menor o tamanho do bloco, menor será esse limite de tempo.

3.6 Processamento com Múltiplos Canais

Na época em que música era reproduzida por meio de mídias físicas analógicas, como os primeiros vinis e cilindros de cera, seu sinal era monoaural, ou seja, possuía apenas uma única faixa de sinal para ser reproduzida. Com o avanço da tecnologia e com o surgimento de mídias digitais, surgiu oportunidades para separar a reprodução da música em diversos canais, como meio de representar de forma mais fiel à noção de espaço de uma gravação.

Atualmente o formato mais comum de sinal multi-canal na área de áudio é o estéreo, onde temos um canal que será reproduzido em um auto-falante na esquerda e outro posicionado a direita. Esse modelo fornece um bom balanço entre reproduzir a música com uma noção de espaço e distância entre seus elementos, e ser acessível no quesito de equipamento necessário para a reprodução desse formato, sendo necessário apenas duas caixas de som ou um fone de ouvido. Além disso, a maioria dos equipamentos pessoais, como celulares e computadores, já possuem o *hardware* necessário para decodificar sinais digitais estéreos e converter para sinais analógicos, tornando esse o formato mais ubíquo atualmente.

No entanto, ainda há demanda para processamento em mais de um ou dois canais na indústria, principalmente no campo de trilhas sonoras, visto que sistemas de áudio de cinemas possuem configurações que podem variar de 5 até 10 ou mais canais diferentes, como meio de realçar a imersão do usuário durante o filme. Com isso, o framework JUCE

possui uma flexibilidade para trabalhar com um número variável de canais, tanto para suporte para diferentes sistemas de reprodução quanto para técnicas de processamento de áudio que podem utilizar canais auxiliares de entrada e saída, algo que deve ser levado em consideração durante o desenvolvimento da aplicação.

Se o objetivo for trabalhar com mais de dois canais, deve-se considerar quais algoritmos de processamento serão utilizados. Por exemplo, tratando-se de reverberação, redes de retroalimentação como as propostas por Gerzon ou Puckette são facilmente adaptáveis a contextos com múltiplos canais, no entanto, o algoritmo do reverberador de placa digital proposto por Datorro é mais específico para canais monoaurais ou estéreos, e adaptar sua lógica para múltiplos canais requer um esforço maior ou uma etapa que consolide todos os canais de entrada em um único sinal e replique o resultado do processamento em todos os canais de saída. Essa técnica remove a informação de espaço de alguns elementos, mas é utilizada até para casos de sinais estéreos, pois processar um único canal possui um custo de processamento bem menor do que processar múltiplos canais. Em casos de reverberadores que replicam a tonalidade de equipamentos antigos dos anos 80, essa otimização pode ser vantajosa tanto em termos de processamento quanto de timbre.

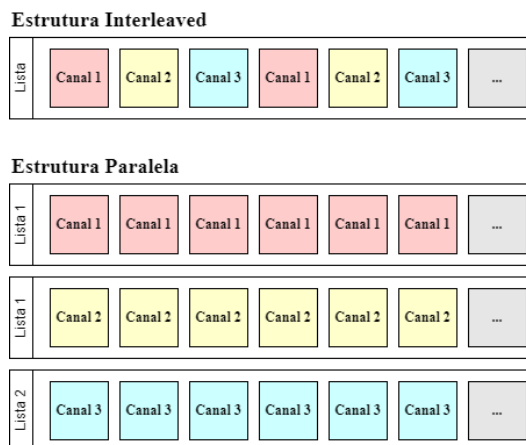


Figura 11: Comparação da estrutura paralela e *interleaved* de sinais multi-canais.

Fonte: Autoria própria.

É importante destacar que algoritmos e ferramentas podem trabalhar com estruturas diferentes de representação dos múltiplos canais, representadas na figura 11. JUCE utiliza a estrutura mais intuitiva, onde cada bloco de áudio recebido pela *DAW* possui uma lista de canais, e cada canal possui uma lista de amostras, com isso basta iterar por uma lista de duas dimensões para realizar seu processamento. No entanto, também é possível encontrar casos em que os canais são representados da forma *interleaved*, onde a amostra de cada canal é alternada em sequência em uma única lista, fica de responsabilidade do desenvolvedor checar com qual método que seu algoritmo opera, e realizar as

conversões se for necessário.

3.7 DIAGRAMA DO SISTEMA

Simplificando a topologia do sistema para uma análise de alto nível, podemos reduzi-lo em quatro blocos de processamento: o estágio de *preamp* inspirado nos pré-amplificadores de módulos analógicos de atrasos, o bloco de ecos com múltiplos *taps*, o bloco de reverberação com um algoritmo de difusão, e por fim, o bloco de saída com o nivelamento do sinal processado pelo sistema. Conforme indicado no diagrama da figura 12.



Figura 12: Diagrama de blocos resumido do sistema.

Fonte: Autoria própria.



Figura 13: *Stereo Memory Man with Hazarai* produzido pela *Eletro-Harmonix*.

Fonte: <https://www.ehx.com/products/stereo-memory-man-with-hazarai/>

Esse sistema foi feito inspirado em um módulo de efeito para guitarra produzido pela *Eletro-Harmonix*, chamado *Stereo Memory Man with Hazarai*, ilustrado na figura 13. Dentre seus três modos de operação, ele possui uma opção de eco com múltiplos *taps*, onde com um único controle chamado *repeats* o usuário manipula a quantidade de *taps* presentes no efeito, a quantidade de reverberação também pode ser manipulada facilmente via um único controle chamado *decay*. Essa estrutura é interessante, pois, embora seja bastante flexível, permitindo replicar uma variedade de efeitos, indo desde ecos tradicionais até reverberação, ela possui uma interface intuitiva para o usuário, facilitando ele produzir o timbre que deseja.

O sistema desenvolvido aproveita a estrutura de um eco digital *multi-tap* seguido de um estágio simples de reverberação, e sua interface onde um único controle manipula uma variedade de parâmetros ao mesmo tempo. No entanto, o objetivo não é replicar o módulo da *Eletro-Harmonix*. Além da diferença dos algoritmos utilizados na implementação do efeito, a aplicação também possui mais controles em cada estágio, aumentando a complexidade do efeito mas também tornando-o mais flexível. Permitindo efeitos como ecos mais complexos, movimentos no campo estéreo e modulações que geram efeitos como *chorus* e *vibrato*.

3.8 Preamp

O primeiro bloco de processamento do sistema tem o objetivo de simular, funcionalmente, o pré-amplificador de módulos antigos de eco, por exemplo, o *Space Echo* da Roland, cujo pré-amplificador é representado na figura 14. Em geral, tirando os modelos de fita, eco é um efeito digital, porém alguns deles possuem um circuito analógico de entrada, cujo objetivo era nivelar o sinal do instrumento antes de processá-lo. No entanto, por ser um circuito analógico, ao aumentar o ganho de entrada o sinal tinha tendência de saturar esse estágio de pré-amplificação, gerando harmônicos que resultam num timbre que agradam muitos músicos.



Figura 14: Pré-amplificador do *Space Echo* produzido pela *Roland*.

Fonte: <https://catalinbread.com/blogs/kulas-cabinet/roland-re-201-space-echo>

Por outro lado, saturação no domínio digital é considerado um efeito desagradável, pois ao contrário do equivalente analógico, o sinal é bruscamente cortado quando atinge o limite da amplitude, gerando harmônicos considerados abrasivos e, geralmente, indesejáveis.

Para evitar esse comportamento de sinais digitais foi implementado um estágio de saturação, simulando perceptualmente o comportamento analógico. O objetivo dessa etapa é evitar os cortes bruscos do sinal, quando ele atinge o limite da amplitude, aplicando o valor de cada amostra do sinal de entrada na fórmula apresentada abaixo.

$$y = \tanh(x^3 + e^x - 1) \quad (4)$$

Nessa equação, a tangente hiperbólica cumpre o papel de limitar o sinal entre -1 e 1, impedindo que ele assuma um valor fora dos limites permitidos pelo *framework*, além disso, ela também suaviza as bordas de transição quando o sinal se aproxima da saturação, evitando o corte brusco de uma saturação digital. Os termos presentes dentro da função *tanh* procura simular, em parte, as não-linearidades de um circuito analógico.

Para controlar os harmônicos gerados pelo bloco de saturação, o sinal resultante é processado por um filtro passa-baixas de primeira ordem, a implementação foi feita utilizando a biblioteca de processamento de sinais inclusa no *framework* JUCE, utilizando um filtro IIR cuja frequência de corte pode ser um valor entre 800 e 20000 hertz. Essa etapa utiliza outra metodologia de processamento de sinal fornecida pelo JUCE, o estágio de saturação é feito iterando cada amostra de cada canal e aplicando a fórmula apresentada, no entanto, o estágio de filtragem é feito utilizando o processamento por contexto.

Esse método envolve criar um bloco de áudio com o *buffer* de entrada, repassar esse bloco para um objeto de contexto de processamento e, após concluir as alterações, substituir os valores do buffer pelo contexto. Esse método não pode ser utilizado durante o processamento de amostras, pois o contexto realiza uma cópia de todos os canais do *buffer* no instante que é chamado, o que gera conflitos durante as iterações das amostras. Por fim o usuário possui um controle do volume do sinal final desse estágio, a adição de harmônicos leva a um incremento no volume do áudio, o que torna necessário um controle de ganho, fornecido pela aplicação. O sistema completo da etapa de saturação pode ser representado pelo diagrama de blocos da figura 15.



Figura 15: Diagrama de blocos do estágio de saturação do sistema.

Fonte: Autoria própria.

3.9 Bloco de Ecos

O objetivo de um módulo de eco é repetir o sinal de entrada após um tempo de atraso definido pelo usuário. Em termos de processamento de áudio, o bloco simples de atraso serve de base para todos os efeitos que envolvem uma alteração em função do tempo. Estruturas complexas de atraso podem gerar efeitos como transpor o tom de um sinal ou replicar modelos físicos de cordas e superfícies. Também é possível construir em cima do bloco de atraso em si, e criar um efeito de eco digital complexo, fornecendo controle do

timbre das repetições geradas. Na figura 16 é representado a estrutura proposta, com os três *taps* de atraso e seus elementos.

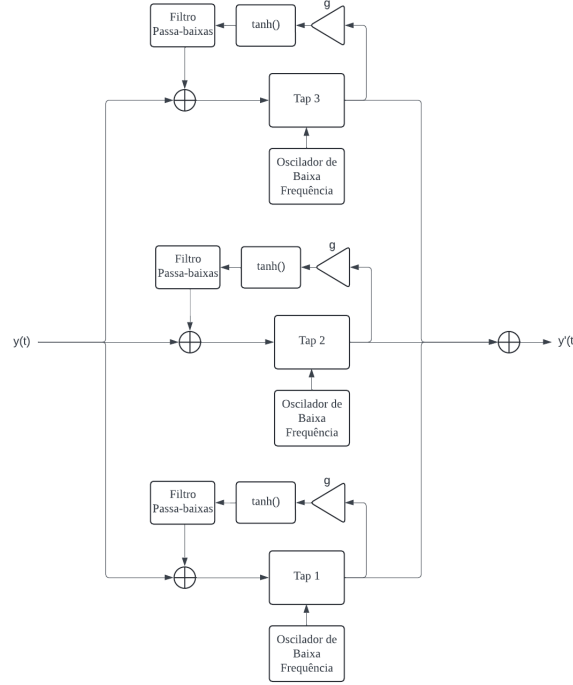


Figura 16: Diagrama de blocos do eco com múltiplos taps.

Fonte: Autoria própria.

O segundo estágio do sistema é composto por um eco com uma estrutura *multi-tap*, onde um *tap* é composto por um bloco de atraso com retroalimentação. O eco em si possui 3 *taps* diferentes, totalizando um atraso de 3 segundos no máximo, essa estrutura de eco permite uma maior flexibilidade no ritmo das repetições e consegue cobrir outras estruturas de eco digital, como por exemplo, o eco *ping-pong*, onde os atrasos alternam entre os dois canais estéreo da saída.

Cada *tap* é composto por um sistema de atraso complexo. Para controlar a ressonância gerada na retroalimentação do atraso, foi incluso um limitador composto por uma tangente hiperbólica, evitando que o acúmulo das repetições superem o limite de amplitude permitido pelo *framework*. Além disso, antes do sinal resultante da retroalimentação ser somado à entrada do bloco de atraso, ele é processado por um filtro passa-baixas, reduzindo a energia do sinal, e limitado por um ganho, definido pelo usuário dependendo da quantidade de repetições que ele deseja.

Cada *tap* também conta com um oscilador de baixa frequência que varia o tempo de atraso. No entanto, esse tipo de modulação gera valores fracionários para serem acessados do *buffer* do atraso, com isso para implementar efetivamente a modulação de tempo de

atraso é necessário utilizar técnicas de interpolação entre as amostras do atraso. No caso do JUCE, essas interpolações já estão inclusas no módulo *DelayLine*, bastando o desenvolvedor definir o método de interpolação, no caso desse projeto foi utilizado a interpolação de Thiran de primeira ordem, que apresenta bons resultados para variações de baixa frequência. O resultado é uma variação de tom do sinal, que pode ser utilizado para replicar efeitos como *chorus* e um leve *vibrato*.

3.10 Bloco de Reverberação

Complementando o efeito do eco, tem-se o estágio de difusão, onde se foi implementado uma estrutura de reverberação, representada em blocos na figura 17. Inspirado pelos tanques do reverberador de placa digital de Datorro, o projeto possui duas etapas semelhantes de difusão, conectadas em um sistema de retroalimentação, o que aumenta a densidade das reflexões do áudio. Cada etapa possui um filtro passa-tudo com um oscilador de modulação, o que adiciona variações no decaimento do efeito. As etapas foram inspiradas nos sistemas propostos por Gardner, com um filtro passa-tudo em retroalimentação.

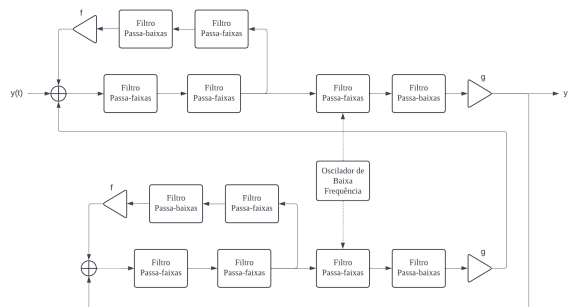


Figura 17: Diagrama de blocos do reverberador.

Fonte: Autoria própria.

O bloco primário do sistema é o filtro passa-tudo, desenvolvido seguindo a definição proposta por Schroeder, composta de um atraso com uma retroalimentação com ganho $-g$ e uma alimentação na saída com ganho g . Durante a implementação foi incluso um método que permite o usuário definir a modulação do atraso do filtro manualmente, e para sinais estéreos a fase do oscilador de modulação é invertida, com isso conforme a amplitude do oscilador incrementa, a sensação de espaço que o sinal ocupa aumenta junto. Concluindo o sistema tem-se a inclusão de filtros passa-baixas nas retroalimentações e na saída de cada etapa, simulando o efeito de absorção do ar que reverberações naturais possuem.

3.11 Bloco de Saída e Conclusão do Sistema

Encerrando o sistema tem-se a etapa de saída do áudio, composta por um controle de quantidade do efeito, que transita linearmente entre somente o sinal de entrada e somente o sinal processado. Conforme demonstrado na figura 18.

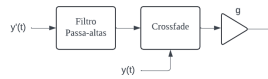


Figura 18: Diagrama de blocos do estágio de saída do sistema.

Fonte: Autoria própria.

Também foi incluso um filtro passa-altas, para evitar o acúmulo de frequências baixas na saída, evitando que o timbre do sinal processado torne-se turvo ou inchado, reduzindo a clareza do áudio. Por fim tem-se um controle de ganho, permitindo o usuário de gerenciar o volume final do áudio processado.

Para a interface da solução foi utilizado o editor genérico fornecido pelo JUCE, facilitando a prototipagem e os testes do algoritmo desenvolvido, cuja aparência pode ser vista na figura 19.

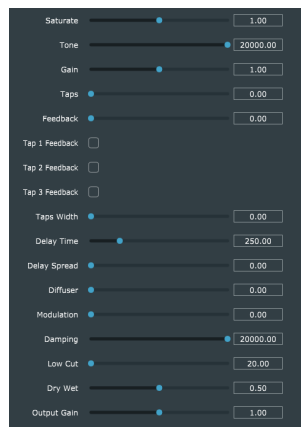


Figura 19: Interface da aplicação utilizando o editor genérico do JUCE.

Fonte: Autoria própria.

4 APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

Nessa seção será apresentado o resultado de cada bloco de efeito, separado entre bloco de ecos, reverberação e saturação.

Iniciando pelo bloco de ecos alimentado com um impulso, conforme se pode observar na figura 20, teve-se um bom resultado com as repetições, os *taps* mantiveram um período constante entre eles e refletem de forma bem exata os parâmetros definidos pela interface, tanto de tempo de atraso quanto de alternância entre os canais de áudio.

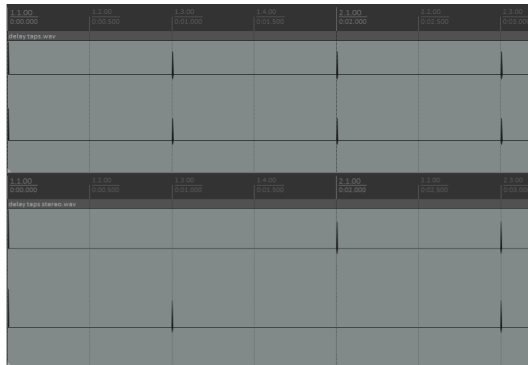


Figura 20: Áudio processado com atraso e espaçamento entre *taps* de 1s. Diagrama abaixo mostra o resultado com o parâmetro de alternância de canal no máximo.

Fonte: Autoria própria.

Incrementando a retroalimentação dos ecos com os múltiplos *taps* e a alternância de canais, foi possível gerar repetições com padrões interessantes de ritmos, exemplificado na figura 21. A interface fornece ao usuário bastante flexibilidade na edição das repetições, dando acesso a uma grande variedade de timbres e texturas.

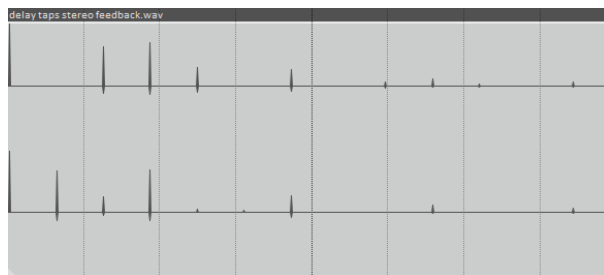


Figura 21: Áudio processado com atraso e espaçamento entre *taps* de 200ms, retroalimentação em 0.56 e alternância de canais no máximo.

Fonte: Autoria própria.

No bloco de reverberação foi possível obter um efeito de difusão com um bom espaçamento entre os dois canais de áudio estéreo. No entanto, o sistema proposto possui

limitações comparado a soluções comerciais, sendo o principal as reflexões iniciais, que demoram para acumular e dão um aspecto granular indesejável ao reverberador. Em sinais com transientes mais suaves como pianos, o difusor apresenta um resultado satisfatório, no entanto, para sinais com transientes agressivos como percussão a característica granular do reverberador é realçada, gerando um efeito desagradável.

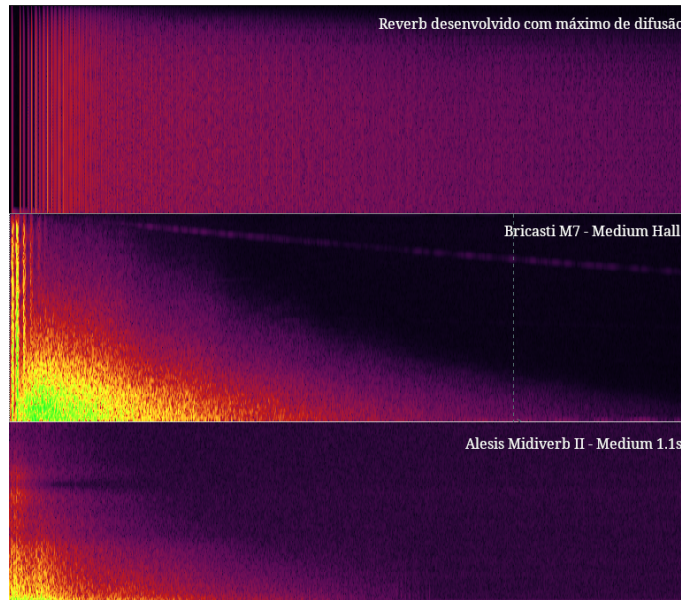


Figura 22: Comparação por espectrograma do reverberador implementado com soluções comerciais.

Fonte: Autoria própria.

Na figura 22 é possível observar a comparação com as opções comerciais, feita gravando a resposta a um impulso unitário do reverberador implementado e comparando o espectrograma com a resposta de impulso dos reverberadores comerciais. Foi possível observar o aspecto granular das primeiras reflexões e que também há oportunidades de melhorias no decaimento das últimas reflexões do efeito.

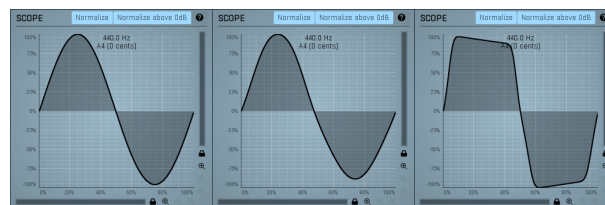


Figura 23: Efeito do bloco de saturação em uma senoide de 440hz pura representada na esquerda, com saturação em 50% no diagrama do meio e em 100% no diagrama da direita.

Fonte: Autoria própria.

No bloco de saturação foi possível obter um bom resultado em termos de timbre,

conforme demonstrado na figura 23, o áudio não apresenta alterações para valores pequenos e mesmo em valores extremos de saturação tem-se um acréscimo de harmônicos que mantém a clareza do sinal de entrada. No entanto, para frequências altas o efeito gera artefatos digitais de *aliasing*, demonstrado na figura 24, em sua saída, gerando ruídos e harmônicos indesejados.

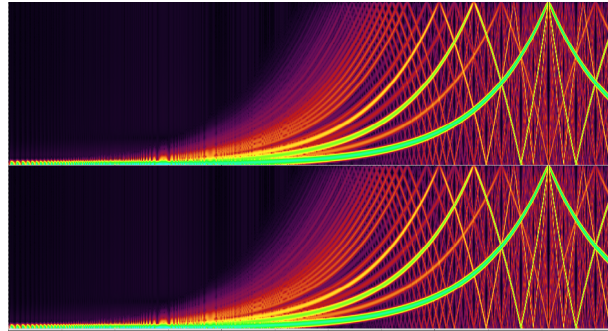


Figura 24: Espectrograma da resposta a uma senoide variando de 0hz até 22000hz, com artefatos comprovando a existência de *aliasing*.

Fonte: Autoria própria.

Também foi realizada uma comparação de desempenho da solução proposta com alternativas da indústria, conforme indicado pela tabela 1 é possível observar a necessidade de otimizações na implementação do sistema. Para calcular esse consumo, cada aplicação foi executada em cima de uma faixa de áudio de uma DAW, nesse caso o Reaper versão 6.77, e seu desempenho foi monitorado pelo gerenciador da própria DAW. O valor na tabela representa o máximo que o consumo do processador alcançou e o ideal é reduzi-lo.

Tabela 1: Comparação de desempenho com soluções já existentes na indústria

Empresa	Produto	Consumo
Native Instruments	Raum	0.17%
Unfiltered Audio	Sandman Pro	0.35%
Noise Engineering	Imitor	0.37%
-	Solução Proposta	2.2%

Consolidando o que foi discutido, a solução proposta é uma prova de conceito que demonstra que a estrutura do de reverberação com um bloco de eco multi *taps* apresenta características timbrais desejáveis, especialmente para reverberações mais dramáticas ou atmosféricas. No entanto, a implementação necessita de melhorias para poder chegar no padrão de qualidade esperado pela indústria, principalmente em termos de desempenho e em alguns aspectos de qualidade de áudio.

5 CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS

Tecnologia faz parte do processo de produção musical desde dos anos 80, incluindo a parte de sequenciamento de faixas e efeitos. Muitas das técnicas estabelecidas na indústria, que servem de base para o desenvolvimento de novos efeitos, surgiram nas décadas de 60 ou 70. O campo de processamento digital de áudio possui uma base sólida de literatura e engloba várias áreas da computação como otimização e circuitos embarcados.

No entanto, um desenvolvedor que deseja entrar na área nesse momento, encontrará dificuldades em termos de documentação e padronização. A discussão de processamento digital de áudio continua limitada a artigos com foco na teoria matemática do assunto, os exemplos práticos de implementação estão limitados a alguns artigos em *blogs* e comentários em fóruns na internet. Essa característica se faz presente inclusive na documentação do *framework* JUCE utilizado no desenvolvimento desse projeto, com exemplos utilizando módulos desatualizados e quebrando o padrão de projeto utilizado pela própria tecnologia VST.

Um dos pontos principais é a falta de um padrão para organização para projetos mais complexos, muitas das implementações disponíveis online são compostas de uma única pasta com uma abundância de arquivos sem padronização, dificultando o estudo dos códigos. Uma exceção é o trabalho feito pela equipe do sintetizador Surge XT após a abertura do seu código, onde os módulos são bem definidos e organizados. Também é possível ver as vantagens dessa abordagem no próprio histórico do projeto que, teve um grande acréscimo de funcionalidades e também ramificações como implementações em outras linguagens, uma aplicação consolidada só com os efeitos desenvolvidos para o sintetizador, dentre outros projetos menores.

Com a finalização desse projeto foi possível construir uma prova de conceito que demonstra o valor de um efeito composto por um bloco de atraso com múltiplos *taps* e um bloco de reverberação. A variedade de ritmos unido a sensação de espaço promove uma grande flexibilidade de texturas e timbres. A estrutura cobre efeitos como atrasos ping-pong, um *looper* básico, reverberador com um pré-atraso, dentre outros. Em termos subjetivos tem configurações do efeito que trazem um resultado bastante positivo.

Na parte da implementação prática é onde pode ser feito uma análise mais objetiva e encontrar os aspectos onde existe oportunidades de melhorias. Primeiramente o consumo de processamento da solução é muito alta para o padrão da indústria, onde temos outras soluções bem mais complexas que possuem um consumo menor que um terço da que foi desenvolvida. Outro ponto é o algoritmo proposto de reverberação que, embora original, possui limitações graves. Oportunidades de melhorias incluem experimentar com metodologias modernas e afinar os parâmetros do reverberador. Outra limitação relevante

é o *aliasing* gerado pela etapa de saturação, que pode ser tratado com técnicas como algoritmos de limitação de banda ou filtros com anti-derivadas. Na parte de usabilidade, a aplicação se beneficiaria de uma interface customizada e com mais legibilidade, em vez de utilizar o editor genérico do JUCE, com opções fornecidas pelo próprio JUCE ou uma das bibliotecas de interface gráficas disponíveis para C++.

Em termos de tecnologia também existem diversas aberturas para experimentação, embora VST seja basicamente o padrão da indústria no momento, novas soluções estão surgindo. Um exemplo é o formato Clap encabeçado por uma coletânea de grandes nomes da indústria, que visa trazer uma abordagem modernizada para o VST. Mesmo em VST tem oportunidades para experimentar com outros *frameworks* como iPlug2 e NIH-plug que talvez ajudem a reduzir o *overhead* do JUCE.

Em geral, o campo de processamento digital de áudio possui uma diversidade de oportunidades para pesquisa e desenvolvimento. Com a abertura do código de grandes projetos de áudio, a frequente produção de novos artigos e a incorporação de inteligência artificial, a barreira de entrada para a área foi democratizada e a demanda de efeitos criativos continua em alta. Com a internet a quantidade de músicos e produtores independentes cresceu exponencialmente, embora a área de processamento de áudio pode ser considerada um pouco saturada, ainda se tem uma gama de possibilidades para serem exploradas fora dos *trends* da indústria.

REFERÊNCIAS

SABINE, Paul. **ACOUSTICS AND ARCHITECTURE**. New York: McGraw-Hill, 1932.

WHITE, Paul. **CREATIVE RECORDING PART 1: EFFECTS AND PROCESSORS**. London: MPG Books, 1999.

OPPENHEIM, Allan. **SIGNALS AND SYSTEMS**. Saddle River: Prentice Hall PTR, 1982.

DOYLE, Peter. **ECHO AND REVERB: FABRICATING SPACE IN POPULAR MUSIC RECORDING 1900-1960**. Middletown: Wesleyan University Press, 2005.

D. REISS, Joshua; P. McPHERSON, Andrew **AUDIO EFFECTS: THEORY, IMPLEMENTATION AND APPLICATION**. Boca Raton: CRC Press, 2015.

GARDNER, William. **REVERBERATION ALGORITHMS**. In: Mark Kahrs (Org.). *Applications of Digital Signal Processing to Audio and Acoustics*. New York: Springer, 2002.

STAUTNER, John; PUCKETTE, Miller. Designing Multi-Channel Reverberators. **Computer Music Journal**, Vol. 6, No. 1, pp. 52-65, 1982.

DATTORRO, Jon. Effect design, part 1: Reverberator and other filters. **Journal of the Audio Engineering Society**, Vol. 45, No. 9, p. 660-684, 1997.

SCHROEDER, Manfred R.; LOGAN, Benjamin F. "Colorless" artificial reverberation. **IRE Transactions on Audio** , No. 6, p. 209-214, 1961.

MOORER, James A. About this reverberation business. **Computer music journal**, p. 13-28, 1979.

SEAWEED FACTORY. **Alesis Midiverb II and Lexicon Alex Impulse Response Packs**. Disponível em: <https://seaweedfactory.blogspot.com/2016/12/alesis-midverb-ii-and-lexicon-alex.html>. Acesso em: 06 de maio de 2024.

SAMPLICITY. **Bricasti IRs version 2023-10**. Disponível em: <https://samplercity.com/bricasti-m7-impulse-response-files/>. Acesso em: 06 de maio de 2024.