



UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
CENTRO TECNOLÓGICO
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA E ELETRÔNICA

Implementação de Efeito de Reverberação com Circuito Integrado

Trabalho de Conclusão de Curso submetido ao curso de Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Santa Catarina como requisito para aprovação da disciplina EEL7890 - Trabalho de conclusão de Curso (TCC).

Arthur Rodrigues e Souza

Orientador: Sidnei Noceti Filho

Florianópolis, 12 de fevereiro de 2019.

ARTHUR RODRIGUES E SOUZA

**IMPLEMENTAÇÃO DE EFEITO DE
REVERBERAÇÃO COM CIRCUITO
INTEGRADO**

Trabalho de Conclusão de Curso
submetido ao curso de Engenharia
Elétrica da Universidade Federal de
Santa Catarina como requisito para
aprovação da disciplina EEL7890
- Trabalho de conclusão de Curso
(TCC)

Orientador: Sidnei Noceti Filho.

**FLORIANÓPOLIS
2019**

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor,
através do Programa de Geração Automática da Biblioteca Universitária da UFSC.

Souza, Arthur Rodrigues e
Implementação de efeito de reverberação com
circuito integrado / Arthur Rodrigues e Souza ;
orientador, Sidnei Noceti Filho, 2019.
96 p.

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) -
Universidade Federal de Santa Catarina, Centro
Tecnológico, Graduação em Engenharia Elétrica,
Florianópolis, 2019.

Inclui referências.

1. Engenharia Elétrica. 2. Reverberação. 3.
Efeitos de Áudio. 4. Eletrônica. I. Noceti Filho,
Sidnei. II. Universidade Federal de Santa Catarina.
Graduação em Engenharia Elétrica. III. Título.

Arthur Rodrigues e Souza

**IMPLEMENTAÇÃO DE EFEITO DE REVERBERAÇÃO
COM CIRCUITO INTEGRADO**

Este Trabalho de Conclusão de Curso foi julgado adequado no contexto da disciplina EEL7890 - Trabalho de conclusão de Curso (TCC), e aprovado em sua forma final pelo Departamento de Engenharia Elétrica e Eletrônica da Universidade Federal de Santa Catarina.

Florianópolis, 8 de fevereiro de 2019.



Prof. Jean Vianei Leite, Dr.

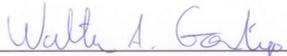
Coordenador do Curso de Engenharia Elétrica

Banca examinadora:



Prof. Sidnei Noceti Filho, Dr.

Universidade Federal de Santa Catarina



Walter Antonio Gontijo, M. Eng.



Rosalfonso Bortoni, Dr.

Este trabalho é dedicado aos meus amigos, professores e pais, que me deram a motivação necessária para a sua realização.

Agradecimentos

Agradeço imensamente a todos que conheci e contribuíram de alguma maneira com minha formação durante minha jornada na Universidade Federal de Santa Catarina. Em especial, meus professores, principalmente meu orientador, Prof. Dr. Sidnei Noceti Filho, sempre solícito e prestativo para quaisquer dúvidas que eu pudesse apresentar. Aos meus amigos, tanto os que fiz ao longo da trajetória da graduação quanto os que me acompanharam durante todas as outras etapas da minha vida. Em especial Augusto, Carolina, Luana, Laís, Daniel, Guilherme, Giulia, Luíza e Isabella, que me ajudaram nos momentos mais difíceis. Aos meus pais e irmã, que sempre me deram todo o amor, suporte e confiança necessários para que eu alcançasse meus objetivos. Finalmente, à minha namorada, Laís, que sempre me motivou ao máximo e esteve lá em todos os momentos em que precisei.

RESUMO

O presente trabalho de conclusão de curso apresenta o estudo teórico e a implementação do efeito de reverberação com o uso do circuito integrado PT2399. São apresentados os conceitos físicos por trás do efeito de reverberação e maneiras de simular tal efeito digitalmente, bem como a implementação de alguns algoritmos clássicos. São discutidos, também, teorias e postulados estabelecidos ao longo do tempo primando por uma sonoridade mais natural na implementação da reverberação digital. Além disso, é apresentado o funcionamento do circuito integrado PT2399. Finalmente, são apresentados e analisados os resultados obtidos com o circuito proposto.

Palavras-chave: Processamento Digital de Sinais. Reverberação. PT2399.

ABSTRACT

This course completion project presents theoretical study and the implementation of the reverberation effect obtained by using the integrated circuit PT2399. Physical concepts behind the reverberation effect and ways of simulating it digitally are presented, as well as classic reverberation algorithm implementations. Theories and postulates regarding natural sounding reverberation effects are also presented. Also presented is how the integrated circuit PT2399 works. Finally, results obtained by using the proposed circuit are analyzed and shown.

Keywords: Digital Signal Processing. Reverberation. PT2399

Lista de Figuras

- 1 - Curvas de nível de pressões sonoras de amplitudes iguais no plano $z=0$ em uma sala para modo normal com $l=3$ e $m=2$ - página 9
- 2 - Resposta ao impulso genérica de uma sala fechada - página 12
- 3 - Diagrama de blocos básico de um filtro comb - página 16
- 4 - Resposta ao impulso do filtro comb básico, no domínio do tempo - página 16
- 5 - Resposta em frequência do filtro comb - página 18
- 6 - Diagrama de blocos genérico de uma ligação de múltiplos filtros comb em paralelo - página 19
- 7 - Diagrama de blocos genérico da implementação de um reverberador All Pass - página 21
- 8 - Diagrama de blocos genérico da implementação de um reverberador Low Pass Comb Filter - página 22
- 9 - Diagrama de blocos genérico da implementação de um Reverberador de Schroeder - página 23
- 10 - Diagrama de blocos genérico da implementação de um Reverberador de Moorer - página 25
- 11 - Diagramas de blocos da implementação dos três Reverberadores de Gardner, com configurações de salas pequena, média, e grande. - página 27

- 12 - Diagramas de blocos genérico da implementação do reverberador de Dattorro - página 28
- 13 - Exemplo de implementação de Feedback Delay Network com duas linhas de atraso - página 29
- 14 - Pinout do PT2399 - página 31
- 15 - Circuito de aplicação do PT2399: efeito de eco. - página 32
- 16 - Estágio de alimentação do circuito proposto. - página 32
- 17 - Diagrama de blocos interno do PT2399 - página 33
- 18 - Esquemático de uma configuração de amplificador operacional com múltiplas realimentações - página 34
- 19 - Esquemático do circuito de aplicação com dois estágios do PT2399 - página 38
- 20 - Estágio de alimentação do circuito de aplicação com dois estágios do PT2399 - página 39
- 21 - Estágio de entrada do circuito de aplicação com dois estágios do PT2399 - página 40
- 22 - Estágio de chaveamento do circuito de aplicação com dois estágios do PT2399 - página 41
- 23 - Estágio de Atraso Curto do circuito de aplicação com dois estágios do PT2399 - página 42
- 24 - Estágio de Atraso Longo do circuito de aplicação com dois estágios do PT2399. - página 44
- 25 - Estágio de saída do circuito de aplicação com dois estágios do PT2399 - página 45
- 26 - Esquemático completo do circuito proposto. - página 46
- 27 - Diagrama de blocos completo do circuito proposto. - página 47
- 28 - Estágio de alimentação do circuito proposto - página 48
- 29 - Estágio de entrada do circuito proposto. - página 49
- 30 - Filtro passa-baixas na configuração MFB e referências para cálculo da frequência de corte. - página 50
- 31 - Primeiro estágio de atraso do circuito proposto. - página 51
- 32 - Esquemático referente ao segundo e terceiro estágios do circuito proposto. - página 53
- 33 - Esquemático do Estágio de Atraso 4 do circuito proposto. - página 55
- 34 - Estágio de saída do circuito proposto. - página 56

- 35 - Layout da Placa de Circuito Impresso feito através do Altium Designer - página 57
- 36 - Placa de Circuito Impresso utilizada no projeto já montada com seus devidos componentes - página 60
- 37 - Saída do segundo bloco de atraso do circuito com dois estágios de PT2399 para valores teóricos de resistência - página 61
- 38 - Saída do quarto bloco de atraso do circuito completo para valores teóricos de resistência - página 62
- 39 - Saída do circuito com dois estágios de PT2399 para valores teóricos de resistência - página 63
- 40 - Saída do circuito proposto para valores teóricos de resistência - página 64
- 41 - Saída do segundo bloco de atraso do circuito de dois estágios de atraso para valores práticos de resistência - página 65
- 42 - Saída do quarto bloco de atraso do circuito completo para valores práticos de resistência - página 66
- 43 - Saída do circuito de dois estágios de atraso para valores práticos de resistência - página 67
- 44 - Saída do completo para valores práticos de resistência - página 67

Lista de Tabelas

1 - Valores sugeridos para a implementação do reverberador de Morer - página 23

2 - Relação entre resistência no controle do VCO e atraso proporcionado pelo PT2399 - página 41

Sumário

1	Introdução	1
1.1	Objetivos	3
1.1.1	Objetivo Geral	3
1.1.2	Objetivos Específicos	3
1.2	Motivações	4
1.3	Metodologia	4
1.4	Recursos	5
1.5	Estrutura	5
2	Fundamentação Teórica	7
2.1	Reverberação	7
2.1.1	Equação da Onda	7
2.1.2	Modos Normais	8
2.1.3	Densidade de Ecos	9
2.1.4	Propagação do Som Numa Sala Real	11
2.1.5	Tempo de Reverberação	12
2.1.6	Requisitos para Uma Reverberação Sonoramente Natural	13
2.2	Métodos de Reverberação	15
2.2.1	Filtro <i>Comb</i>	15
2.2.2	Filtros <i>Comb</i> em Paralelo	18

2.2.3	Reverberador <i>All Pass</i>	20
2.2.4	Reverberador <i>Low Pass Comb</i>	21
2.3	Reverberadores Clássicos	22
2.3.1	Reverberador de Schroeder	22
2.3.2	Reverberador de Moorer	24
2.3.3	Reverberador de Gardner	26
2.3.4	Reverberador de Dattorro	28
2.3.5	Feedback Delay Network	29
2.4	PT2399	30
2.4.1	Circuitos de aplicação do PT2399	31
3	Desenvolvimento	37
3.1	Circuito de Aplicação com Dois Estágios de PT2399	37
3.1.1	Bloco de Alimentação	39
3.1.2	Bloco de Entrada	40
3.1.3	Bloco de Chaveamento	41
3.1.4	Bloco de Atraso Curto	42
3.1.5	Bloco de Atraso Longo	43
3.1.6	Bloco de Saída	44
3.2	O Circuito Proposto	45
3.2.1	Estágio de Alimentação	48
3.2.2	Estágio de Entrada	48
3.2.3	Estágio de Atraso 1	49
3.2.4	Estágios de Atraso 2 e 3	52
3.2.5	Estágio de Atraso 4	53
3.2.6	Estágio de Saída	55
3.3	Softwares	56
3.3.1	Altium Designer	56
3.3.2	Audacity	58
4	Análise de Resultados	59
4.1	Placa de Circuito Impresso	59
4.2	Valores de Atraso Teóricos	60
4.3	Valores de Atraso Práticos	64
5	Conclusão	69
	Referências bibliográficas	71

CAPÍTULO 1

Introdução

A reverberação sonora é um fenômeno físico que ocorre em decorrência da reflexão de ondas sonoras. As ondas que são captadas pelo ouvido do ouvinte diretamente da fonte sonora são referidas como som direto. As ondas refletidas e processadas brevemente depois pelo ouvinte são chamadas de reflexões iniciais, ocorrendo entre 10ms e 100ms após o som direto [3]. Finalmente, as reflexões tardias ocorrem passados 100ms. Devido à maior distância percorrida por tais ondas ao compararmos com as ondas de incidência direta, o maior intervalo de tempo que leva para as reflexões iniciais serem interpretadas pelo ouvinte dá uma certa noção espacial referente ao tamanho e natureza do ambiente em que o som está sendo propagado.

Como as ondas sonoras refletem não apenas uma, mas várias vezes até chegarem aos nossos ouvidos, a interpretação da soma resultante de todas as reflexões, iniciais e finais, que são processadas pelo ouvido humano traz uma sensação de um som contínuo, que continua a soar por um tempo após o cessar da transmissão da fonte sonora original. A este efeito damos o nome de reverberação [2].

O eco é um fenômeno acústico que, assim como a reverberação, ocorre devido às reflexões das ondas sonoras num dado ambiente. O

efeito de eco consiste na percepção de diferentes repetições de um som transmitido por dada fonte sonora. O ouvido humano consegue distinguir sons que acontecem num intervalo aproximado de 100 milissegundos. Dada a velocidade de propagação do som no ar de aproximadamente 340 metros por segundo, chega-se à conclusão de que para que ocorra, de fato, a distinção entre as repetições de um determinado som, sua fonte sonora deve estar a 17 metros de distância do obstáculo que fará com que as ondas sonoras sejam refletidas. A reverberação, por sua vez, ocorre quando a onda sonora refletida é interpretada pelo ouvinte menos de 100 milissegundos após do som direto. Em resumo, pode-se afirmar que a diferença entre o eco e o efeito de reverberação se encontra na possibilidade ou não da distinção entre as repetições do som. [4].

Desde o começo do século XX, engenheiros buscaram desenvolver maneiras de simular artificialmente a maneira com que o som se propaga em ambientes distintos, implementando o efeito de reverberação primeiramente de maneira analógica, e com o desenvolvimento da tecnologia, de maneira digital. [5].

As primeiras tentativas de implementação artificial da reverberação se deram no uso em transmissões. Foram construídas salas de eco, com o objetivo de evitar superfícies paralelas, impedindo o eco de vibração. Um alto falante posicionado estrategicamente nos cantos da sala tinha a função de gerar ressonância. Eram utilizados microfones em diferentes posicionamentos para capturar o efeito de reverberação. Esta forma de implementação não é de uso comum devido aos altos custos envolvidos.

Outro meio de simulação artificial do efeito de reverberação, este muito mais difundido, consiste no uso de molas. Um sistema contendo certo número de transdutores eletromecânicos provocam vibrações nas molas variando de acordo com um sinal elétrico. Até hoje este tipo de reverberação analógica é muito utilizado, sendo implementado em amplificadores de guitarra com o objetivo de alcançar uma sonoridade vintage. Este método possui sonoridade bem particular, com grande número de circuitos digitais modernos tentando emular suas características sonoras.

Em seu importante artigo “Natural Sounding Artificial Reverberation”, Schroeder (1962) propôs o desenvolvimento do efeito de reverberação artificial por meio de processamento computacional, utilizando,

entre outros artifícios, o filtro *comb* para auxiliar na obtenção do efeito sonoro desejado. [6]

1.1 Objetivos

1.1.1 Objetivo Geral

- Aprimoramento de circuitos de reverberação já feitos com o circuito integrado PT2399, anteriormente feitos com dois estágios de atraso, visando diminuir os custos de implementação da reverberação, mantendo uma qualidade satisfatória de áudio.

1.1.2 Objetivos Específicos

- Estudar diferentes tipos de algoritmos de reverberação já existentes;
- Aprimoramento de circuitos já existentes de reverberação feitos com dois estágios de atraso utilizando o circuito integrado PT2399;
- Layout da PCI;
- Montagem e testes do protótipo;
- Fazer a documentação das implementações, testes e resultados obtidos.

1.2 Motivações

O estudo da implementação artificial do efeito de reverberação permite a obtenção de efeito sonoro de ambiência. Tal efeito pode ser definido como a persistência de um som após a extinção de sua emissão por sua fonte sonora, ocorrendo em locais fechados ou parcialmente fechados [1].

Aplicações comuns do efeito de reverberação consistem em adição do mesmo em filmes, por exemplo, emulando a sonoridade característica de um diálogo em uma caverna, criando maior sensação de ambiência para o espectador. Pode-se também aplicar o efeito com o uso de alto-falantes em sala pequena, tentando reproduzir a sensação de se estar em outra localidade [2].

Seu uso também é deveras comum no contexto musical, sendo usado para realçar a voz humana em uma gravação ou obter sonoridade mais ambiente para uma guitarra, ou a caixa de uma bateria, por exemplo.

Dados inúmeros contextos, além dos apresentados, para o uso da reverberação artificial, é relevante o estudo da implementação de menor custo do efeito, objetivo este que pode ser alcançado com o uso do circuito integrado PT2399.

1.3 Metodologia

O trabalho será desenvolvido em quatro etapas distintas. A primeira etapa se dá pela revisão da bibliografia e literatura. Serão utilizados dados encontrados na CAPES (Web of Science), e analisadas diversas formas de implementação do efeito de reverberação ao longo dos anos, tanto digital quanto analogicamente. Será também exposta a teoria do comportamento da propagação de uma onda sonora e a teoria acerca da definição física do conceito de reverberação.

A segunda etapa será a de simulação do circuito proposto através de programas computacionais apropriados, buscando aprimorar e verificar o devido funcionamento do sistema.

A terceira etapa será a prototipagem, primeiramente em protoboard, verificando a implementação correta do sistema e possíveis melhorias no circuito, e em um segundo momento em placa de circuito impresso, conferindo maior qualidade ao protótipo final.

Finalmente, na quarta etapa, serão apresentados e discutidos os resultados obtidos no decorrer do desenvolvimento do trabalho.

1.4 Recursos

Este trabalho foi realizado na Universidade Federal de Santa Catarina sob a orientação do professor Sidnei Noceti Filho, Dr.

As implementações foram realizadas fisicamente utilizando o circuito PT2399, com o auxílio do software Audacity para o tratamento dos áudios. Ainda foi utilizado o software Altium Designer para o projeto da PCI e a confecção do esquemático eletrônico. Foram também utilizados uma protoboard e uma fonte de tensão regulável para testes práticos com o protótipo, além de diversos componentes eletrônicos básicos, como resistores, capacitores, jumpers e conectores.

1.5 Estrutura

Para uma maior coesão do trabalho, a divisão da estrutura do texto foi feita em cinco partes. Sendo elas: introdução, fundamentação teórica, desenvolvimento, resultados e considerações finais.

A fundamentação teórica consiste na apresentação de conceitos chave para o entendimento dos assuntos relevantes para o desenvolvimento do projeto. Na seção destinada ao desenvolvimento são discutidos o circuito proposto e como ele foi projetado, bem como a análise de circuitos de aplicação do PT2399. A seção de resultados apresenta os procedimentos de teste realizados e os resultados obtidos, gráfica e sonoramente. Finalmente, são feitas as considerações finais pertinentes ao projeto desenvolvido.

2.1 Reverberação

2.1.1 Equação da Onda

Uma fonte sonora pontual vibrando numa frequência ω tem número de onda $k = \frac{\omega}{c}$, com c sendo a velocidade do som no meio de propagação em questão. Para tal, temos que para dada distância r grande o suficiente ($r \gg \frac{1}{k}$), a velocidade de partícula do ar tem comportamento radial, em fase com a pressão sonora. Em tais condições, podemos aproximar a propagação da transmissão a uma onda plana. Já para distâncias r menores, há uma forte componente de velocidade em quadratura com a pressão sonora, gerando energia reativa, que não irradia. Sendo assim, perto da fonte, a onda sonora é tratada como sendo esférica. [7]

Para fins de reverberação, podemos considerar válida a aproximação por onda plana, proporcionando um processo de reverberação linear e invariante no tempo, desprezando-se mudanças de temperatura e umidade. [8]

A equação que rege o comportamento da onda plana é dada por:

$$\psi = \psi_0 \cos \omega t - k * r + \phi \quad (1)$$

com ω sendo a frequência angular, k o vetor de onda, r o vetor radial, ψ a amplitude da onda, ψ_0 a amplitude máxima da onda e ϕ a fase da onda [9].

2.1.2 Modos Normais

A propagação do som em ambientes fechados ocorre de maneira diferente em relação a espaços abertos. Isso se deve às inúmeras reflexões nas diversas superfícies de um espaço fechado. Salas reais possuem características próprias quanto à propagação do som relativas às suas frequências de ressonância, também conhecidas por modos normais. Os modos normais são resultado das superposições das reflexões sofridas pelas ondas sonoras através de sua propagação, gerando interferências, sendo elas destrutivas ou construtivas.

Os níveis de pressão sonora em um determinado ponto de um ambiente fechado correspondem à superposição do som propagado de forma direta e do som refletido. O fato de ondas refletidas e do som direto chegarem em fase ou defasadas em dado ponto de uma sala gera interferências, fazendo com que os sinais sofram atenuação, quando a interferência é destrutiva, ou ganho, se construtiva, em relação ao nível sonoro médio em certas zonas de uma sala. Este fenômeno de ressonância é mais facilmente percebido em espaços cúbicos, por exemplo [10].

Os modos normais de uma sala são a principal característica acústica de um ambiente. É através deles que é feita a análise do comportamento de uma sala no domínio da frequência. Os valores das frequências dos modos normais de um espaço fechado são calculados com base em suas dimensões [10].

$$f_{lmn} = \frac{c}{2} \sqrt{\left(\frac{l}{L_x}\right)^2 + \left(\frac{m}{L_y}\right)^2 + \left(\frac{n}{L_z}\right)^2} \quad (2)$$

Com f_{lmn} sendo a frequência do modo, c a velocidade de propagação do som no meio, L_x, L_y, L_z as dimensões da sala, e l, m, n números inteiros não-negativos de ordenação dos modos.

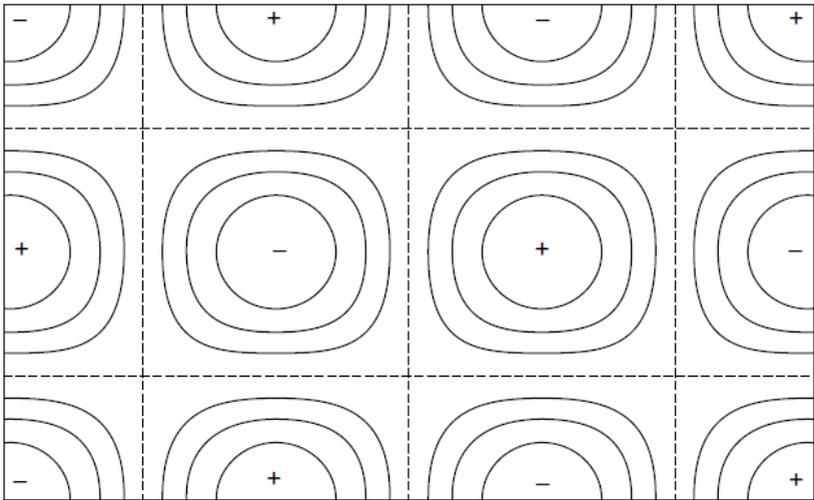
A distância entre frequências ressonantes diminui com o quadrado da frequência, então, a identificação de modos normais individuais é quase impossível para valores acima da frequência crítica, valor para qual a densidade de modos é tão alta que muitos dos modos normais se sobrepõem. A frequência crítica é dada por:

$$f_c = 2000\sqrt{\frac{T}{V}} \quad (3)$$

Com T sendo o tempo de reverberação da sala e V o seu volume. A frequência crítica também é conhecida por Frequência de Schroeder [12].

A Figura 1 ilustra um exemplo da disposição dos modos normais em uma sala retangular. Nesta imagem ficam claros os pontos de interferência construtiva e destrutiva no espaço fechado.

Figura 1 - Curvas de nível de pressões sonoras de amplitudes iguais no plano $z=0$ em uma sala para modo normal com $l=3$ e $m=2$.



Fonte: [12]

2.1.3 Densidade de Ecos

A densidade de ecos representa, quando falando de reverberação, o comportamento transitório da onda sonora em espaços fechados. Este conceito é definido pelo número de repetições percebido pelo ouvinte

por segundo em uma dada posição. Uma densidade de ecos menor gera ao ouvinte percepção de um som trêmulo, enquanto uma maior densidade proporciona sensação de ambiência reverberacional [13].

Mostra-se que, para salas típicas, a densidade de eco aumenta de maneira proporcional a t^2 , com t sendo o tempo.

$$\text{Densidade de eco} = \left(\frac{4\pi c^3}{V}\right)t^2 \quad (4)$$

Com V sendo o volume da sala.

Dito isso, após passado certo tempo, a densidade de eco aumenta, de forma com que possa ser modelada como processo estocástico amostrado uniformemente sem diminuir a percepção de fidelidade. Baseado nos limites de percepção auditiva, podemos separar a resposta ao impulso de uma sala em duas partes: reflexões iniciais e reverberação tardia. O primeiro segmento consiste dos primeiras repetições, mais esparsas. A reverberação tardia, por sua vez, é composta por uma alta densidade de ecos, sendo sua resposta ao impulso melhor caracterizada de maneira estatística [13],[14].

O tempo para qual a resposta ecoante ao impulso passa a ser considerada estatisticamente desordenada depende da duração do pulso de excitação no sistema, dado por Δt . O tempo crítico t_c , para qual repetições individuais passam a se sobrepor se dá por

$$t_c = 5 * 10^{-5} \sqrt{\frac{V}{\Delta t}} \quad (5)$$

Após este tempo a resposta passa a ter comportamento estatístico, com as respostas individuais perdendo sentido prático. [14]

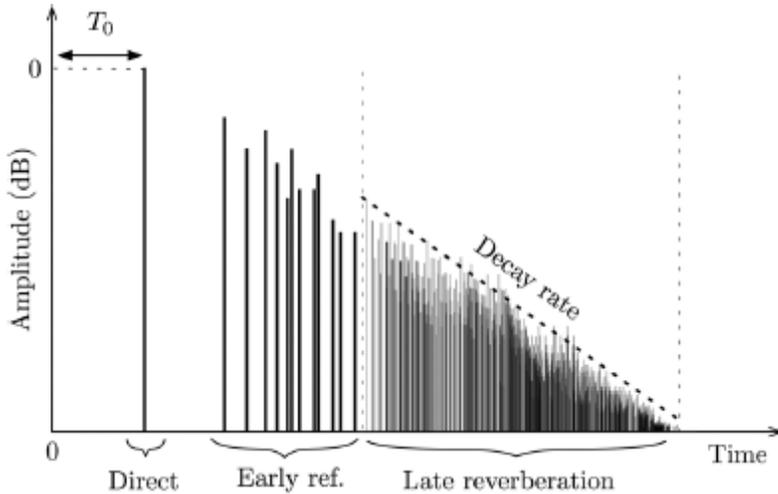
Schroeder (1962) determinou que para haver reverberação artificial com sonoridade natural é necessário uma densidade de aproximada mil ecos por segundo, valor este que garante que o ouvido humano não consiga distinguir as repetições. Este valor pode ser atingido por meio de múltiplas unidades reverberadoras realimentadas ligadas em paralelo, com o objetivo de um aumento de repetições. Esta abordagem pode, no entanto, comprometer a estabilidade do sistema, bem como modificar sua resposta em frequência [6]

2.1.4 Propagação do Som Numa Sala Real

Durante a propagação de um som as ondas sonoras interagem com o ambiente, seja em forma de reflexão ou absorção. Boa parte dos objetos cotidianos são altamente refletivos, tendo influência direta na forma com que o som chega a nossos ouvidos. O som pode alcançar o ouvinte de forma direta ou através de reflexões. O receptor é alcançado primeiro pelo som direto da fonte, já que esta componente percorre menor distância. É nesta porção do som propagado que podemos ter noções da direção do local de emissão. As primeiras reflexões tem amplitude moderadamente reduzidas, e em decorrência de uma maior trajetória percorrida, são registradas pelo ouvinte num intervalo de aproximadamente 50ms e 80ms após a emissão inicial nos dão maior percepção espacial, como o o formato ou os materiais nela presentes [5] [12].

O último estágio, das reverberações tardias é fundamental para a percepção de ambiência, tornando possível dar uma noção do tamanho do ambiente ao auditor. Esta etapa das reverberações tardias é caracterizada principalmente pela maior densidade de eco e pelo decaimento da amplitude do som, que ocorre devido aos materiais presentes no espaço não terem natureza totalmente refletiva. Tal decaimento é caracterizado por distribuição Gaussiana e é conhecido por Tempo de Reverberação, ou T_{60} [5] [14].

Figura 2 - Resposta ao impulso genérica de uma sala fechada.



Fonte: [5]

2.1.5 Tempo de Reverberação

O tempo de reverberação, T_{60} , é o parâmetro mais importante para a avaliação da qualidade acústica de uma sala. Salas para diferentes propósitos podem ter diferentes valores de T_{60} . Uma sala de concertos projetada especificamente para apresentações musicais, por exemplo, deve ter um tempo reverberação maior do que uma sala de aula, onde a compreensão da fala tem mais importância do que a ambiência sonora. Para um auditório utilizado para ambas apresentações musicais e palestras o valor ótimo de T_{60} está na faixa compreendida entre 1,5 e 2,5 segundos [15] [12].

O tempo de reverberação é medido em segundos e é definido como o tempo que se leva para a pressão sonora de determinado som decair 60dB, após o cessar da emissão pela fonte. A medida é dada em intensidade relativa pelo fato do tempo do parâmetro medido em questão variar de acordo com a intensidade da emissão sonora [15].

Ainda que o valor de intensidade relativa utilizado para a medição do tempo de reverberação seja arbitrário, há um bom motivo para o uso do valor de 60dB. O "crescendo" mais intenso de uma orquestra tocando

tem intensidade aproximada de 100dB, enquanto a intensidade do ruído de fundo de uma sala apropriada para concertos é de aproximadamente 40dB. Desse modo, o tempo de reverberação padrão é o tempo que se demora para que o som de uma orquestra tocando com intensidade se dissipe até o ruído de fundo da sala [15].

O valor do parâmetro depende diretamente dos coeficientes de absorção dos materiais, α , e das superfícies presentes no ambiente. Os valores para o coeficiente de absorção podem variar entre 0 e 1, sendo 0 o valor equivalente para uma reflexão total e 1 o valor equivalente para absorção total. É normal que o α de dado material varie com a frequência, ou seja, o tempo de reverberação depende, também, da frequência [16].

Existem algumas diferentes maneiras para o cálculo do valor de T_{60} . No entanto, a mais comum, até hoje, é a proposta por Wallace Sabine (1898). A fórmula de Sabine relaciona o tempo de reverberação com o volume, área de superfície e coeficiente de absorção da sala. Podemos ver tal relação em [11].

$$T_{60} = 0.161 \frac{V_r}{S_r A_r} \quad (6)$$

Com V_r sendo o volume da sala, A_r a média dos coeficientes de absorção para as superfícies e S_r a superfície da sala em metros quadrados.

2.1.6 Requisitos para Uma Reverberação Sonoramente Natural

Schroeder (1961) estabeleceu alguns critérios a serem cumpridos para que se possa garantir uma reverberação artificial de sonoridade suficientemente natural [14]:

- A resposta de frequência do reverberador deve ser plana quando medida para ruídos de banda estreita, com a largura de banda correspondendo ao transiente do som a ser reverberado. Ou seja, para esta condição, todas as faixas de frequência devem apresentar a mesma amplitude.
- Os modos normais do sistema reverberante devem se sobrepor e cobrir todo o espectro do som a ser reverberado.

- Os tempos de reverberação para cada modo individualmente devem ser tão próximos quanto possível, garantindo mesma taxa de decaimento para diferentes componentes do som.
- Um breve período após a excitação do sistema, a densidade de eco deve ser alta o suficiente para que as repetições não sejam distinguidas pelo ouvido humano.
- A resposta de eco deve ser livre de periodicidades, evitando assim uma sonoridade tremulante.
- A resposta de frequência/amplitude não deve aparentar indícios de periodicidade, dado que respostas de frequência periódica contribuem com um aspecto "metálico" à sonoridade da reverberação. Esta é uma condição um tanto problemática, devido ao fato de tempos de reverberação maiores serem usualmente alcançados por meio de realimentações no sistema, trazendo periodicidades inerentes ao modelo.

2.2 Métodos de Reverberação

Existem três maneiras básicas de se implementar o efeito de reverberação: através de redes de atrasos, podendo operar em conjunto com etapas de filtragem, algoritmos convolucionais e, finalmente, computação acústica. Cada um destes métodos tem uso em diferentes aplicações, ocorrendo um grande *tradeoff* entre qualidade e custo computacional [5].

Boa parte dos algoritmos mais utilizados se apoiam no método das redes de atraso, graças ao fato deste exigir menor esforço computacional. Nesta seção abordaremos algumas diferentes formas de se implementar uma reverberação artificial e como o efeito se comporta para cada uma delas.

2.2.1 Filtro *Comb*

Filtros *comb* são filtros digitais ou analógicos amostrados que tem como função a geração de ecos a partir de uma entrada, através de realimentação. Sua estrutura é constituída de uma linha de atraso realimentada com um ganho g [6].

Um eco simples de atraso τ_0 pode ser produzido por uma linha de atraso, com uma fita magnética ou dispositivo similar. Sua resposta a um impulso δ é dada por:

$$H(t) = \delta(t - \tau_0) \quad (7)$$

Através da transformada de Fourier podemos obter o espectro do impulso atrasado:

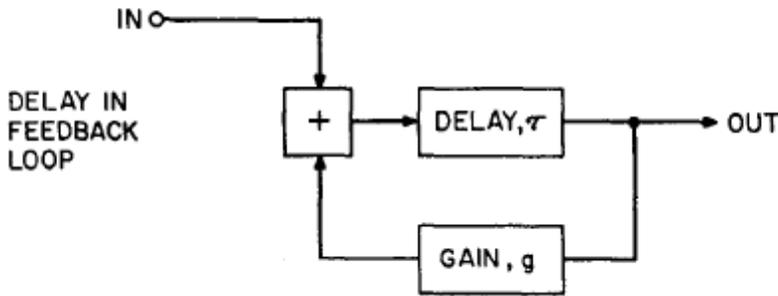
$$H(\omega) = e^{-j\omega\tau_0} \quad (8)$$

Percebe-se que a expressão apresenta módulo unitário, ou seja, todas as frequências passam pelo bloco da mesma maneira, sem apresentar ganhos ou perdas. A topologia do filtro *comb* é baseada neste conceito. A partir de uma realimentação na linha de atraso com um ganho g são produzidos múltiplos ecos a fim de gerar sensação reverberante. Para garantir a estabilidade do sistema o ganho da realimentação deve ser menor que um [6]. Para altos valores de τ_0 , a resposta ao impulso

$h(n)$ do filtro é percebida como ecos individuais pelo ouvinte, já para valores menores a sensação de reverberação é registrada [5].

O diagrama de blocos de um filtro *comb* básico pode ser visto na Figura 3.

Figura 3 - Diagrama de blocos básico de um filtro *comb*.

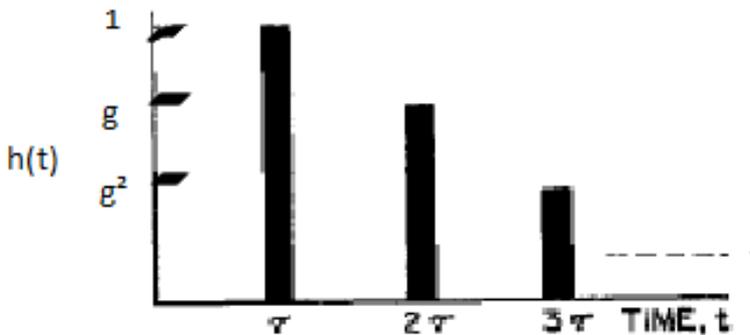


Fonte: [6]

A resposta ao impulso do filtro *comb* pode ser vista na Figura 4, e passa a se comportar como um trem de impulsos decaindo de acordo com o ganho de realimentação g , com seus impulsos sendo espaçados de acordo com o atraso inicial τ_0 , podendo ser expressa por (9):

$$h(t) = \delta(t - \tau_0) + g\delta(t - 2\tau_0) + g^2\delta(t - 3\tau_0) + \dots \quad (9)$$

Figura 4 - Resposta ao impulso do filtro *comb* básico, no domínio do tempo.



Fonte:[6], adaptada.

Através da aplicação da transformada de Fourier em (9) obtemos a expressão para o espectro do modelo:

$$H(\omega) = \frac{e^{-j\omega t}}{1 - g e^{-j\omega t}} \quad (10)$$

O trem de impulsos resultante da realimentação da linha de atraso com decaimento tem módulo expresso por (11):

$$|H(\omega)| = \frac{1}{\sqrt{1 + g^2 - 2g \cos(\omega\tau_0)}} \quad (11)$$

Fica evidente em (11) que a amplitude não mais independe da frequência. Sendo assim, o sistema não apresenta resposta de frequência plana, violando um dos requisitos propostos por Schroeder para a obtenção de um efeito de reverberação sonoramente natural [6].

De (11) podemos ver que para $g > 0$, temos ponto de máxima amplitude no espectro em $\omega = \frac{2\pi n}{\tau_0}$ correspondendo a:

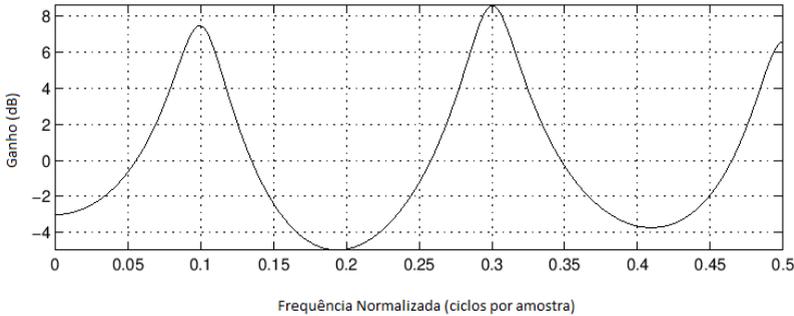
$$H_{max} = \frac{1}{1-g} \quad (12)$$

Em $\omega = \frac{(2n+1)\pi}{\tau_0}$ ocorre ponto de mínima amplitude, correspondendo a:

$$H_{min} = \frac{1}{1+g} \quad (13)$$

Devido à periodicidade da relação entre máximos e mínimos no espectro, a resposta de frequência do filtro *comb* tem formato similar ao de um pente, com cada ponto de amplitude máxima representando uma frequência de ressonância, como pode ser visto na Figura 5 [14]. Estes picos para determinadas frequências são responsáveis por trazer um indesejado aspecto "metálico" para a sonoridade do efeito.

Figura 5 - Resposta em frequência do filtro *comb*.



Fonte: [17]

2.2.2 Filtros Comb em Paralelo

Um aumento na densidade de eco pode ser obtido usando-se múltiplos filtros *comb* em paralelo, tendo seus resultados somados na saída. Isto faz com que as respostas em frequência se sobreponham. Este fato torna necessário certo cuidado para a escolha dos valores de atraso para cada filtro individualmente, sendo que valores matematicamente relacionados proporcionam sonoridade "metálica" ao efeito [18].

É interessante que os ganhos de cada filtro sejam iguais, permitindo que seus impulsos tenham mesma taxa de decaimento, garantindo um som mais natural na implementação do efeito. Diferentes ganhos para os filtros individualmente são responsáveis pela geração de sonoridade "metálica" na reverberação. A relação entre o ganho, o valor escolhido para o atraso de cada filtro, o período de amostragem e o tempo de reverberação, T_{60} , é mostrada em (14), enquanto o diagrama de blocos com a ligação dos múltiplos filtros *comb* em paralelo pode ser vista na Figura 6 [18].

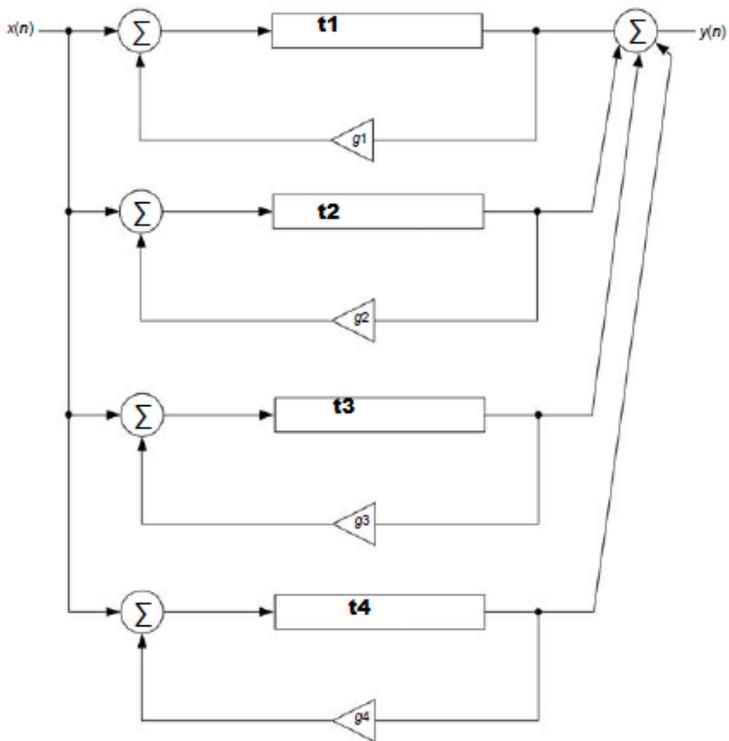
$$g = 10^{\frac{-3\tau_0 T}{T_{60}}} \quad (14)$$

Com T sendo o período de amostragem.

Há um evidente *tradeoff* entre o ganho de realimentação e o tempo de reverberação desejados. Pode-se aumentar o ganho do sistema a fim de aumentar o tempo de reverberação, porém com a elevação do

ganho pode se chegar em região de instabilidade do sistema, com os pólos se aproximando do círculo unitário. Uma relação parecida é dada entre o tempo de atraso τ_0 e T_{60} , com um aumento no atraso podendo aumentar o valor de T_{60} , mas também possibilitando a distinção entre repetições quando valores mais altos forem utilizados [18].

Figura 6 - Diagrama de blocos genérico de uma ligação de múltiplos filtros *comb* em paralelo.



Fonte: [18]- Adaptada.

2.2.3 Reverberador *All Pass*

Schroeder (1961) descobriu que a soma do sinal puro e do sinal atrasado realimentado, dada certa razão, proporciona uma resposta em frequência plana para o reverberador, deixando passar todas as frequências com mesmo ganho. Isto se deve à reciprocidade dos raios dos pólos e zeros do sistema. Graças a esta característica, esta nova implementação do efeito de reverberação ficou conhecida como Reverberador *All Pass* [18] [14].

A resposta ao impulso, por sua vez, continua sendo caracterizada por uma sequência de repetições decaindo com o passar do tempo. Contudo, ao compararmos com o filtro *comb*, temos no reverberador *All Pass* um decaimento mais rápido [18].

Segundo Schroeder (1961), para a obtenção de uma resposta plana, o sinal puro deve ser multiplicado por um ganho $-g$, enquanto o sinal atrasado múltiplas vezes deve ser multiplicado por $1 - g^2$, resultando na resposta ao impulso dada por (15) [14].

Ainda que seja suposta uma resposta em frequência plana para o *All Pass*, é necessário que uma condição seja cumprida para que tal comportamento seja observado: o atraso implementado deve ser menor que o tempo de integração do ouvido humano. A falha em atingir este critério resulta em sonoridade "metálica" no efeito final [7].

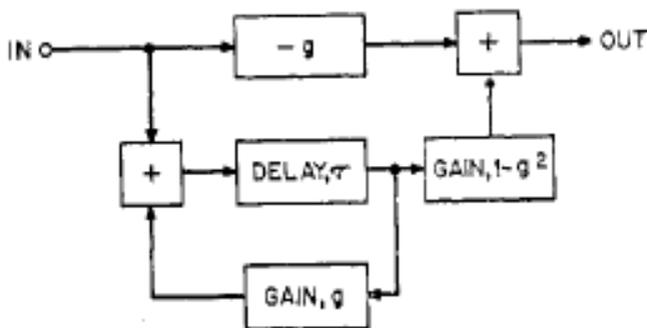
$$h(t) = -g\delta(t) + (1 - g^2)[\delta(t - \tau_0) + g\delta(t - 2\tau_0) + \dots] \quad (15)$$

Com resposta em frequência correspondendo a:

$$\frac{e^{-j\omega\tau_0} - g}{1 - ge^{-j\omega\tau_0}} \quad (16)$$

O diagrama de blocos da implementação do reverberador *All Pass* pode ser vista na Figura 7:

Figura 7 - Diagrama de blocos genérico da implementação de um reverberador *All Pass*.



Fonte: [14]

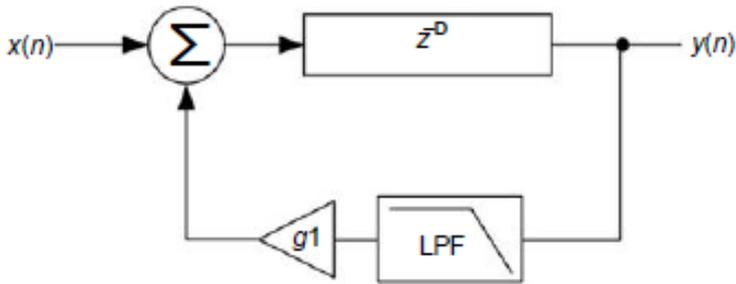
2.2.4 Reverberador *Low Pass Comb*

Ainda que consiga obter resposta em frequência plana, o reverberador de Schroeder não reproduz de maneira fiel o comportamento de uma reverberação em uma sala real. Isso acontece devido aos diferentes valores para T_{60} em diferentes faixas de frequência, com a região de alta frequência apresentando taxa de decaimento significativamente maior que a de baixa. Para corrigir esta imperfeição na implementação do efeito foi proposta a inserção de um filtro passa-baixas logo antes do ganho realimentado na estrutura do reverberador [19].

Além da filtragem de altas frequências introduzidas pelo filtro passa-baixas, o inserção do bloco também influencia a resposta ao impulso geral do sistema, com os ecos filtrados sendo realimentados pela estrutura do reverberador [19].

A Figura 8 mostra o diagrama de blocos básico do reverberador *Low Pass Comb*.

Figura 8 - Diagrama de blocos genérico da implementação de um reverberador *Low Pass Comb Filter*.



Fonte: [19]

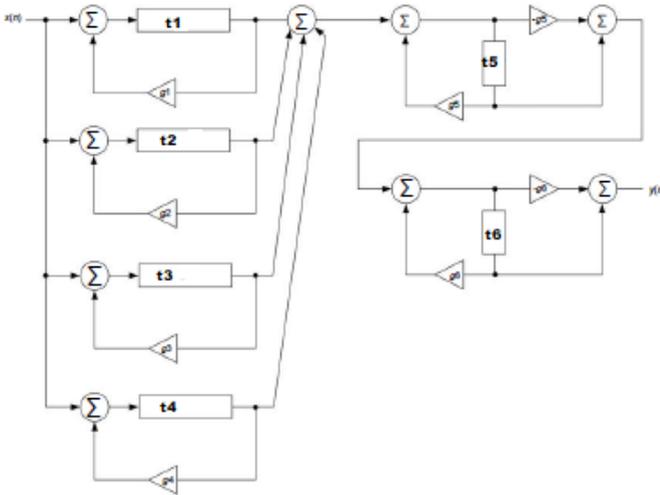
2.3 Reverberadores Clássicos

Ao longo de vários anos de pesquisa alguns algoritmos de reverberação se consolidaram e são usados até hoje como referência na literatura. Entre eles se destacam os reverberadores de Schroeder, Jot, Dattorro, Moorer, sendo todos estes baseados em linhas de atraso. Estes algoritmos em questão serão analisados individualmente em ordem cronológica nesta seção.

2.3.1 Reverberador de Schroeder

Os estudos de Manfred Schroeder foram importantíssimos para os avanços na área de reverberação artificial e até hoje são citados em diversos artigos sobre o tema. Além de diversos conceitos apresentados ao longo deste trabalho, Schroeder foi responsável por um dos mais referenciados algoritmos de reverberador já feitos, combinando diversos estágios de filtros *comb*, somando suas saídas e colocando sua saída resultante em série com estágios de reverberadores *All Pass*. A Figura 9 mostra o diagrama de blocos desta configuração.

Figura 9 - Diagrama de blocos genérico da implementação de um Reverberador de Schroeder.



Fonte: [19]

A densidade de eco de um reverberador do tipo *All Pass* pode ser aumentada ao se conectar múltiplos blocos em série. Ao supor que o atraso de cada bloco fosse de um terço do atraso do bloco anterior, Schroeder estabeleceu os ganhos de cada bloco sendo ajustados em 0,7. Isto faz com que a densidade de eco na saída do primeiro estágio seja de $\frac{1}{\tau_1}$, na saída do segundo estágio, $\frac{3}{\tau_1}$ e assim por diante, facilitando com que o número de 1000 ecos por segundo estipulado seja atingido. Novamente, a escolha do valor dos atrasos deve ser preferencialmente dada de modo com que os valores não sejam relacionados matematicamente para que não ocorra cancelamento de ecos, evitando-se a razão de 3, dada no exemplo, entre os estágios [6].

A razão sugerida entre o menor e o maior atrasos é de 1:1,5 com os atrasos sendo especificados numa faixa que abrange de 30 a 45 milissegundos. Já os reverberadores *All Pass* devem ter ganhos iguais entre si num intervalo entre 0,5 e 0,707, possuindo ainda valores de atraso muito menores que os definidos para os blocos de filtros *comb*, com algo em torno de 5 milissegundos [18][6].

2.3.2 Reverberador de Moorer

O algoritmo desenvolvido por Moorer pode ser considerado uma extensão do trabalho de Schroeder. Moorer tinha como objetivo o aprimoramento dos trabalhos já feitos relacionando blocos computacionais simples, como estágios de filtragem e linhas de atraso no sistema à propagação sonora de uma sala real. Sua maior contribuição foi a inserção de filtros passa-baixa em seu reverberador, a fim de emular os efeitos de absorção sonora do ar e perdas relativas às reflexões [7].

O reverberador de Moorer tem sua estrutura baseada em diversos blocos *Low Pass Comb* em paralelo, com apenas um estágio de reverberador *All Pass* inserido em série com sua saída, como pode ser visto na Figura 10. É importante que o número de *Low Pass Combs* seja maior do que o de filtros *comb* utilizados no reverberador de Schroeder para garantir que o tempo de reverberação atingido seja o mesmo, como forma de compensar a perda de energia para frequências mais altas [7] [18].

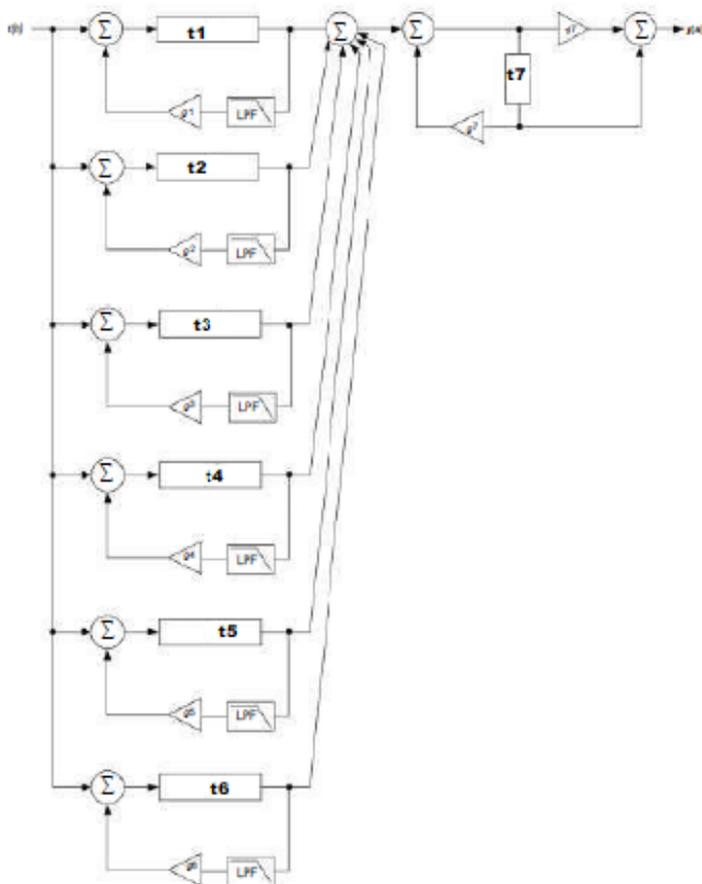
Moorer ainda estipulou uma tabela com valores sugeridos de atrasos e ganho em cada linha para a implementação de seus reverberador, respeitando as condições postuladas por Schroeder relativas a razão entre maior e menor atraso e diferença entre os atrasos de um bloco *All Pass* ou filtro *comb*. Os valores estabelecidos por Moorer podem ser encontrados na Tabela 1 [18].

Tabela 1: Valores sugeridos para a implementação do reverberador de Moorer.

Filtro Comb	Atraso (msec)	g_{COMB} (48 kHz)	g_{LPF} (48 kHz)
1	50	0.46	0.4482
2	56	0.47	0.4399
3	61	0.475	0.4350
4	68	0.48	0.4316
5	72	0.49	0.4233
6	78	0.50	0.3735
All-Pass Filter	Atraso (mSec)	g	-
1	6	0.7	-

Fonte: [19] - Adaptada

Figura 10 - Diagrama de blocos genérico da implementação de um Reverberador de Moorer.



Fonte: [19] - Adaptada

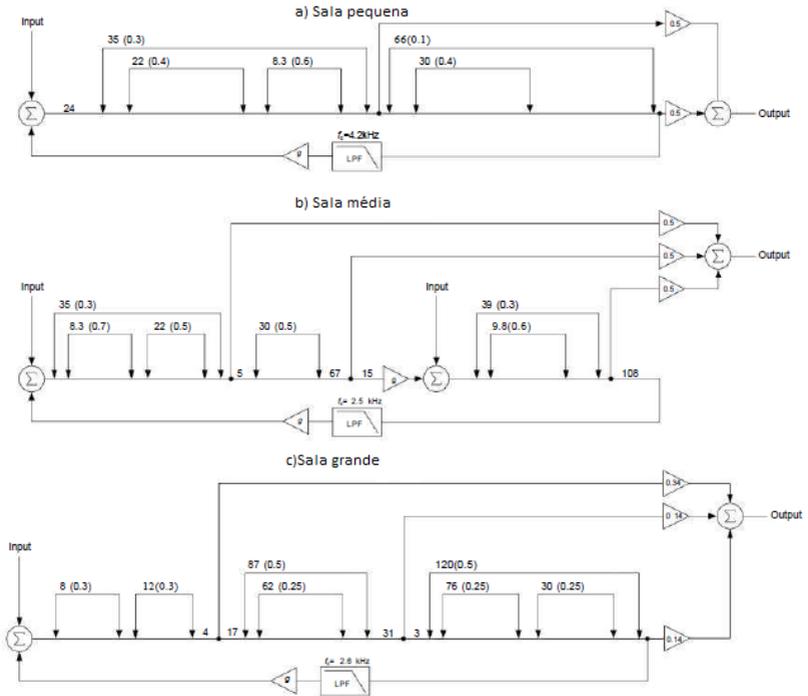
2.3.3 Reverberador de Gardner

O reverberador proposto por Manfred Schroeder utilizava blocos de reverberadores *All Pass* somente em uma configuração em série. Os resultados obtidos geravam sonoridade "metálica" ao efeito de reverberação artificial, com uma demora até atingir densidade de eco satisfatória. Gardner propôs três diferentes implementações de reverberadores, simulando o efeito para uma sala pequena, média ou grande. Para os três casos, o sistema era composto por múltiplos blocos *All Pass* numa única linha de atraso [18].

O projeto de Gardner se baseava em gerar camadas de ecos, que ao se sobrepor, gerariam efeito reverberante. Sua implementação garante a geração de uma densidade de eco mais alta com o passar do tempo, ainda que o sistema possa apresentar instabilidade [18][19].

Na Figura 11 podemos ver a estrutura básica de um reverberador de Gardner.

Figura 11 - Diagramas de blocos da implementação dos três Reverberadores de Gardner, com configurações de salas pequena (a), média (b) e grande (c).



Fonte: [19]

A estrutura do reverberador consiste em um sistema que conta com a soma dos atrasos de diferentes blocos de reverberadores *All Pass* realimentado com um filtro passa-baixas e um ganho de amplitude menor que a unidade. Mesmo com as melhorias propostas, o reverberador de Gardner ainda tem sonoridade considerada "metálica"[19][18].

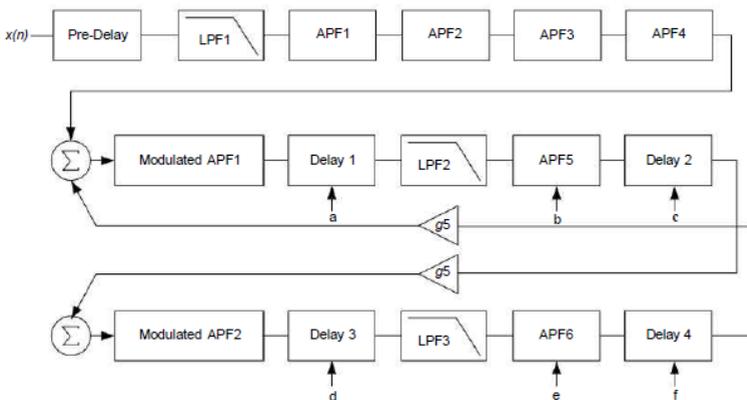
2.3.4 Reverberador de Dattorro

O algoritmo criado por Jon Dattorro é considerado um reverberador com sonoridade mais natural em comparação com outros. Dattorro obteve êxito ao implementar efeito de reverberação sem a mesma sonoridade "metálica" presente em reverberadores de placa ou de mola. Uma característica importante deste algoritmo é possuir entrada mono e saída estéreo [18].

O reverberador de Dattorro permite ao usuário uma configuração mais interativa, podendo ele variar parâmetros como a proporção entre o sinal com efeito e o som puro, a taxa de decaimento e a taxa de amortecimento das altas frequências [18].

O algoritmo é composto de um elaborado diagrama de blocos, que pode ser visto na Figura 12. Primeiro, há um estágio de pré-delay, seguido de quatro reverberadores *All Pass*, que tem como função o aumento na densidade de eco do efeito. O sinal é então passado para uma estrutura chamada "tanque", onde fica circulando, com suas saídas sendo obtidas de diferentes partes dela. O tanque tem sua estrutura separada em duas partes, separadas em lado esquerdo e direito, contendo atrasos, filtros passa-baixa e blocos *All Pass* modificáveis, responsáveis pela configuração dos parâmetros mencionados [18].

Figura 12 - Diagramas de blocos genérico da implementação do reverberador de Dattorro.



Fonte: [19]

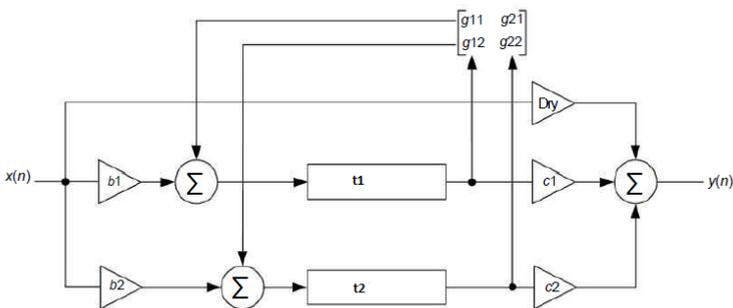
2.3.5 Feedback Delay Network

Puckette e Stautner (1982) introduziram uma estrutura de reverberação baseada em linhas de atraso interconectadas em um laço realimentado através de matriz. Este tipo de estrutura é chamado *Feedback Delay Network*, ou, em tradução livre, Rede de Atrasos Realimentada, sendo também chamada pela sigla FDN. A estrutura é baseada na generalização de um filtro *comb* recursivo, com uma linha de atraso de determinado número de amostras sendo substituída por inúmeras linhas de atraso de diferentes tamanhos, com o ganho g sendo substituído pela matriz de ganho realimentado \mathbf{G} [7]. A matriz \mathbf{G} proposta por Stautner e Puckette pode ser vista em (17):

$$\frac{g}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} 0 & 1 & 1 & 0 \\ -1 & 0 & 0 & -1 \\ 1 & 0 & 0 & -1 \\ 0 & 1 & -1 & 0 \end{pmatrix} \quad (17)$$

Um exemplo de como a matriz de ganhos pode ser aplicada num FDN de duas linhas de atraso pode ser visto na figura 13.

Figura 13 - Exemplo de implementação de Feedback Delay Network com duas linhas de atraso



Fonte: [19] alterada

Alguns reverberadores relevantes tem sua implementação feita através do uso de FDNs. O de Smith, por exemplo, ampliou o conceito para o uso de guias de onda consistentes em duas linhas de atraso em direções opostas. O de Jot se baseia numa estrutura chamada filtro *Absorbent All Pass*, que é composto por um bloco *All Pass* normal com um filtro passa baixas no caminho do sinal. Jot tinha como objetivo um efeito que soasse natural partindo de uma estrutura econômica. O reverberador de Chemistruck, por sua vez, utiliza algoritmos genéticos para gerar coeficientes para os valores de atraso e filtros utilizados no sistema [19].

2.4 PT2399

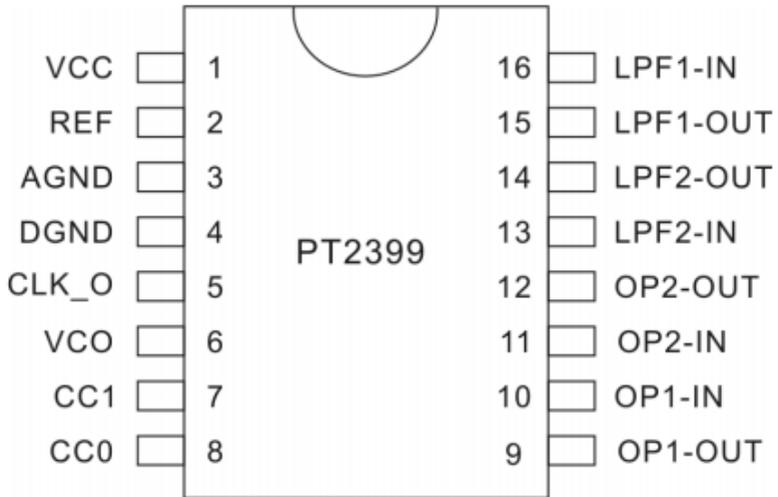
O projeto proposto neste trabalho se baseia na utilização de quatro estágios do circuito integrado PT2399 para a implementação de reverberação artificial, utilizando-se de realimentação entre os blocos para aumentar a densidade de eco, proporcionando melhor sonoridade ao efeito. A escolha do PT2399 como objeto de estudo se deve ao custo relativamente barato deste circuito integrado. Nesta seção será feita uma análise do comportamento do PT2399.

O PT2399 é um circuito integrado processador de eco que utiliza tecnologia CMOS (Complementary Metal-Oxide-Semiconductor). Conta com um Conversor Analógico-Digital na entrada e um Conversor Digital-Analógico na saída acoplado com um filtro passa baixas, tendo capacidade de armazenamento RAM de 44Kbits. Cada PT2399 tem atraso mínimo de 30ms e máximo de 340ms, valores estes que podem ser modificados através da variação de tensão em seu VCO (Voltage Controlled Oscillator, ou Oscilador Controlado por Tensão). O *pinout* do circuito integrado em questão pode ser visto na figura 14 [20].

O pino 1, VCC, recebe a tensão de alimentação do circuito integrado, enquanto o pino 2, REF, disponibiliza a tensão de referência do sistema. Os pinos 3 e 4 são os pinos de terra digital e analógico, respectivamente. A saída de *clock* do CI está alocada no pino 5, enquanto o ajuste de frequência no VCO tem sua entrada no pino 6. Os pinos 7 e 8 tem função de controle de corrente. O PT2399 conta com dois amplificadores operacionais que podem assumir diferentes usos de acordo com o projetista, com suas saídas estando disponíveis nos pinos

9 e 12, e as entradas nos pinos 10 e 11. Já outros dois amp-ops atuam como parte de filtros passa-baixas e têm suas saídas alocadas nos pinos 14 e 15, com as entradas nos pinos 13 e 16.

Figura 14 - *Pinout* do PT2399

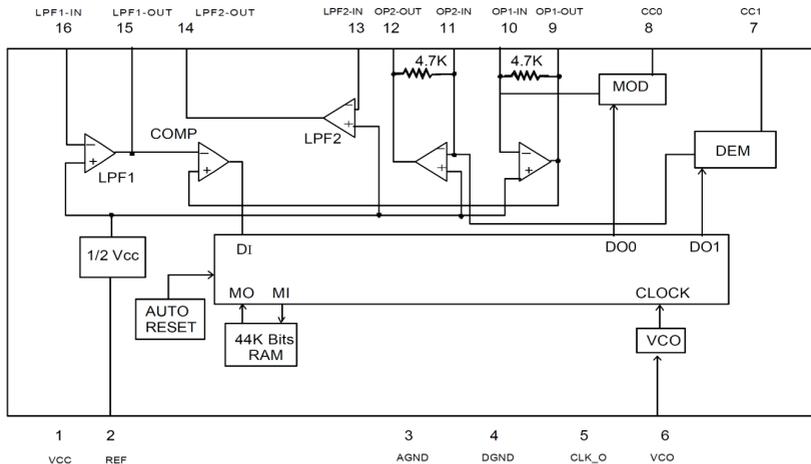


Fonte: [20]

2.4.1 Circuitos de aplicação do PT2399

O *datasheet* do componente apresenta dois possíveis circuitos de aplicação do PT2399. O primeiro deles, referente a uma implementação de efeito de eco, será analisado a seguir, para proporcionar um melhor entendimento do funcionamento do circuito integrado. O segundo circuito disponível no *datasheet* tem como função a implementação de um atraso simples e não terá sua análise feita aqui, por fugir do escopo do projeto. A figura 15 apresenta o circuito de aplicação para implementação de efeito de eco mencionado.

Figura 17 - Diagrama de blocos interno do PT2399



Fonte: [20]

A tensão no pino 2 é a tensão de referência analógica do circuito, dada por $V_{cc}/2$. Este valor de tensão é utilizado como terra virtual dentro do CI, nas entradas dos amplificadores operacionais. O $V_{cc}/2$ serve também de referência para o VCO.

Os pinos 3 e 4, AGND e DGND, são os terras analógico e virtual do PT2399. Há uma resistência medida de 10 ohms entre estes dois terminais.

O pino 5 é responsável pela saída de clock do circuito. A frequência de clock do sistema é gerada através do VCO, que é configurado através de sua entrada no pino 6. É através do pino 5 que é medido o atraso efetivo sendo implementado pelo efeito. Este pino não possui função prática para a implementação do efeito do circuito de aplicação analisado, portanto, pode permanecer sem nenhuma ligação sem prejudicar o funcionamento do sistema.

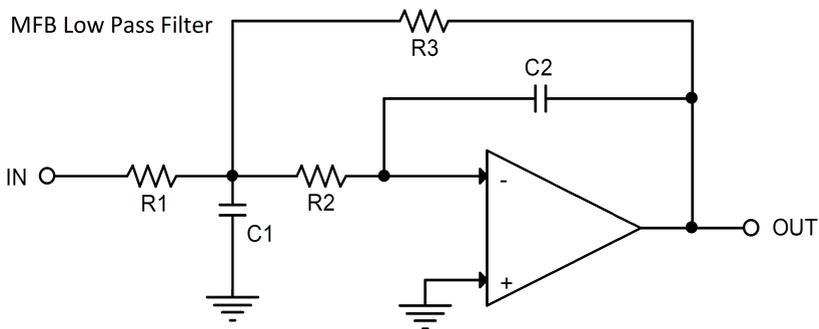
O pino 6 ajusta a frequência do VCO através de uma resistência de entrada ligada ao barramento de terra. A frequência do VCO é usualmente variada entre 2 e 22MHz, gerando atrasos entre 342ms e 31ms quando utilizados resistores dentro de uma faixa que vai de $27.6k\Omega$ a 0.5Ω . Atrasos maiores podem ser gerados, porém injetando alta distorção harmônica, descartando assim o uso para esta configuração. Ainda

que atrasos dentro da faixa que vai de 31ms a 38ms possam ser implementados através de baixos valores de resistência conectados ao pino 6, esta prática não é recomendada pelo fabricante, podendo causar danos ao funcionamento do circuito.

Os pinos 7 e 8 tem função única de controle de corrente. Usualmente esses pinos tem capacitores conectados diretamente ao terra.

O estágio de entrada do circuito integrado conta com três amplificadores operacionais, sendo que dois deles são utilizados como parte do Conversor Analógico-Digital, tendo sua configuração limitada. Um destes tem sua saída e sua entrada disponíveis nos pinos 9 e 10, respectivamente, sendo responsável pelo filtro passa-baixas do modulador da linha de atraso. O sinal a ser reverberado artificialmente entra no PT2399 através do pino 16, responsável pela entrada de um amplificador operacional de configuração livre, neste caso utilizado em configuração de múltiplas realimentações, visando reduzir a participação de harmônicas de ordens maiores no espectro resultante. Um exemplo desta configuração de múltiplas realimentações pode ser visto na Figura 18.

Figura 18 - Esquemático de uma configuração de amplificador operacional com múltiplas realimentações (Multiple Feedback Biquad ou MFB)



Fonte: [20]

Essa configuração apresenta dois pólos, gerando atenuação de -40dB por década na faixa de interesse. A saída deste amplificador operacional, disponível no pino 15, é então inserida na entrada inversora de um terceiro amplificador, operando como comparador, com a saída do

amp-op do filtro passa-baixas do modulador sendo injetada na entrada não-inversora deste.

O sinal de saída do comparador é inserido em um *latch* de dados que armazena a informação convertida durante um pulso de clock, cuja frequência foi configurada no pino 6. A saída deste *latch* é chamada Data Out 0. O amplificador operacional comparador é responsável pela conversão Analógico-Digital do sinal de áudio de interesse para a reverberação, com o processo de conversão sendo feito bit a bit de acordo com a direção da corrente no circuito interno. O sinal Data Out 0 vai para a memória do PT2399, com a tensão da entrada inversora do comparador sendo comparada com a saída do modulador, filtrada pelo filtro passa-baixas. A diferença entre as duas entradas do amplificador operacional de comparação é responsável por configurar o bit de saída em nível lógico alto, ou baixo. A saída então é armazenada na memória do CI.

O estágio de saída do PT2399 possui outros dois amplificadores operacionais, sendo um deles parte do filtro do demodulador, servindo como filtro *anti-aliasing*, e o outro podendo ser configurado com maior liberdade, dependendo do objetivo do projetista. Para a implementação do efeito de reverberação, este, a exemplo de sua contraparte no estágio de entrada do circuito também opera na configuração MFB. A entrada e saída do amplificador operacional relativo ao filtro do demodulador se encontram nos pinos 11 e 12 do PT2399, respectivamente. O segundo amplificador, operando na configuração MFB tem a função de dar mais definição ao sinal de saída, tendo sua entrada localizada no pino 13, com a saída no pino 14 [20]. O sinal após percorrer a linha de atraso sofre ação do demodulador e então é filtrado por um estágio de filtragem passa-baixas prevenindo o ocorrimto do *aliasing*. Ocorre então, finalmente, um último estágio de filtragem passa-baixas com o objetivo de reduzir o nível de ruído no sinal de saída, disponível no pino 14. A saída é, por fim, realimentada na entrada, no pino 16, com a finalidade de gerar mais repetições, criando assim o efeito de eco. É através desta aplicação que poderemos implementar o efeito de reverberação com o circuito proposto, discutido na próxima seção.

CAPÍTULO 3

Desenvolvimento

O circuito de aplicação do PT2399 para implementação de efeito de eco, analisado na seção anterior, serve de ponto de partida para o projeto do efeito de reverberação artificial proposto no presente trabalho. O módulo de eco com um estágio do circuito integrado nos possibilita um entendimento maior do funcionamento do PT2399, permitindo projetar um sistema de maior porte. Nesta seção serão apresentados dois diferentes circuitos: o circuito completo proposto e um outro circuito com apenas dois estágios, para fins didáticos.

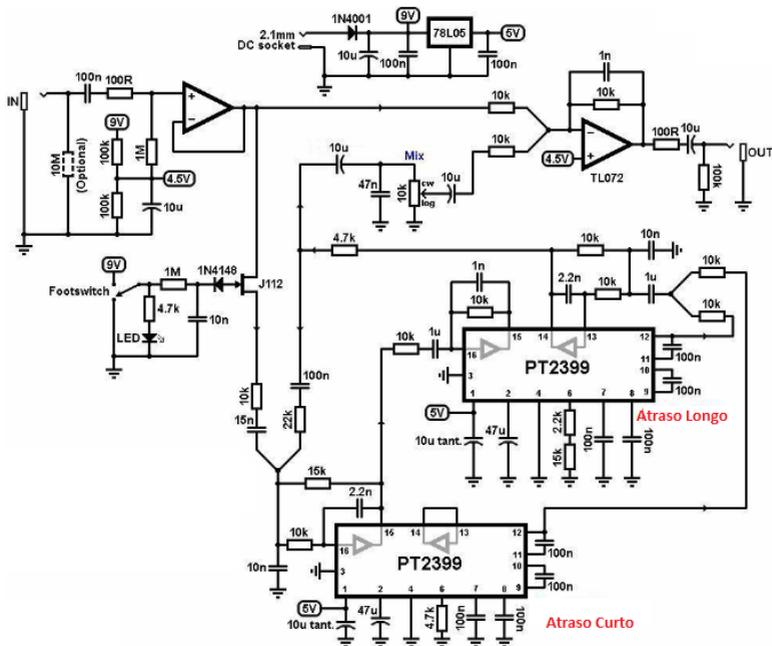
3.1 Circuito de Aplicação com Dois Estágios de PT2399

Há alguns exemplos de implementações de efeito de reverberação artificial construídos a partir de dois estágios do circuito integrado PT2399. Estes sistemas tem como premissa o uso de dois módulos de eco de um estágio trabalhando em paralelo, com seus VCOs operando em diferentes frequências, de modo com que diferentes valores de atraso sejam gerados. Ao se somar a saída dos módulos teremos como consequência o aumento da densidade de eco. Tendo um valor suficientemente alto para este parâmetro, o efeito sonoro passa a ter característica rever-

berante, não sendo mais possível distinguir as repetições entre si. Os resultados obtidos para estes circuitos de reverberação com dois estágios não são muito satisfatórios, apresentando sonoridade "metálica" e uma densidade de eco com valor muito abaixo do que é necessário para que se atinja a desejada sonoridade natural para o efeito.

Para o projeto do circuito proposto para o presente Trabalho de Conclusão de Curso, um circuito de reverberação com dois estágios de PT2399 foi analisado com maior minúcia, servindo de base para a implementação do sistema completo. O circuito a seguir é uma das mais simples implementações do efeito de reverberação a partir do uso do PT2399 disponível. Seu esquemático conta com apenas um potenciômetro, responsável por controlar a razão entre o sinal limpo e o reverberado. O esquemático deste circuito pode ser conferido na figura abaixo.

Figura 19 - Esquemático do circuito de aplicação com dois estágios do PT2399.

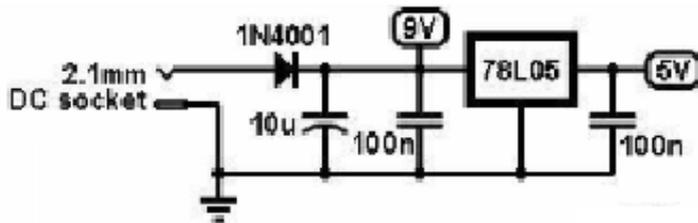


Fonte: [24]; modificado pelo autor.

Para um melhor entendimento, este circuito pode ser separado em seis blocos distintos. São eles: alimentação, entrada, saída, chaveamento, atraso curto e atraso longo.

3.1.1 Bloco de Alimentação

Figura 20 - Estágio de alimentação do circuito de aplicação com dois estágios do PT2399.

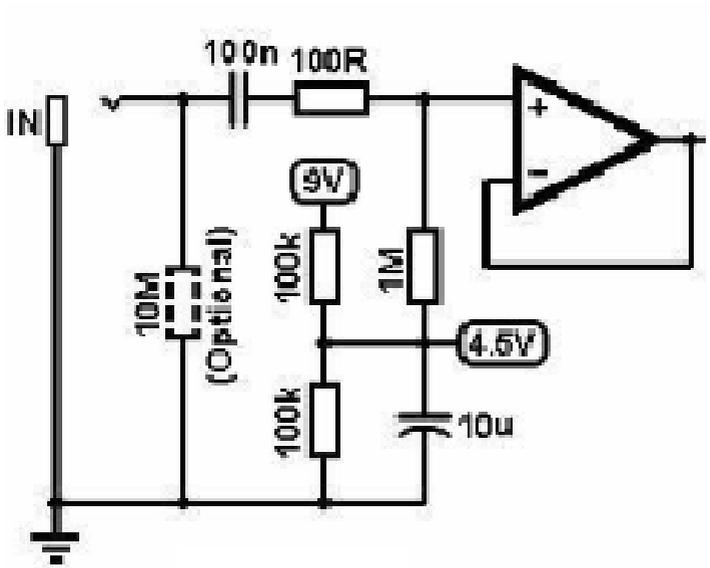


Fonte: [24]; modificado pelo autor.

O estágio de alimentação do circuito é bastante simples. Como exposto anteriormente, o PT2399 suporta uma tensão de apenas 5V em sua entrada. Para adaptarmos o projeto para o uso de uma fonte convencional para pedais de guitarra de 9V, é necessário o uso de um regulador de tensão, neste caso o 78L05, mantendo a tensão de saída deste bloco na tensão desejada de 5V. Para prevenir alimentação inversa, é inserido um diodo na entrada do regulador de tensão. Os capacitores na entrada e saída do 78L05 se fazem necessários para evitar ondulações indesejadas.

3.1.2 Bloco de Entrada

Figura 21 - Estágio de entrada do circuito de aplicação com dois estágios do PT2399.

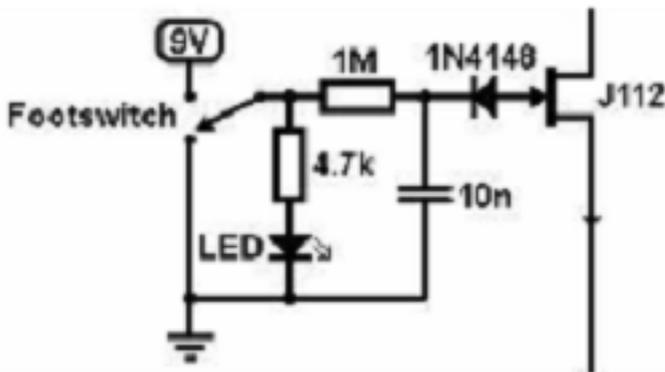


Fonte: [24]; modificado pelo autor.

O estágio de entrada do circuito também apresenta alta simplicidade. O sinal de áudio é inserido no sistema através de um jack do tipo p10 na entrada. Um divisor de tensão simples é utilizado para se obter a tensão desejada nas entradas não inversoras em ambos os amplificadores operacionais contidos no encapsulamento do TL072. Um dos dois amp-ops do circuito integrado é utilizado neste bloco de entrada como buffer, inserindo o sinal na cadeia de efeito.

3.1.3 Bloco de Chaveamento

Figura 22 - Estágio de chaveamento do circuito de aplicação com dois estágios do PT2399.

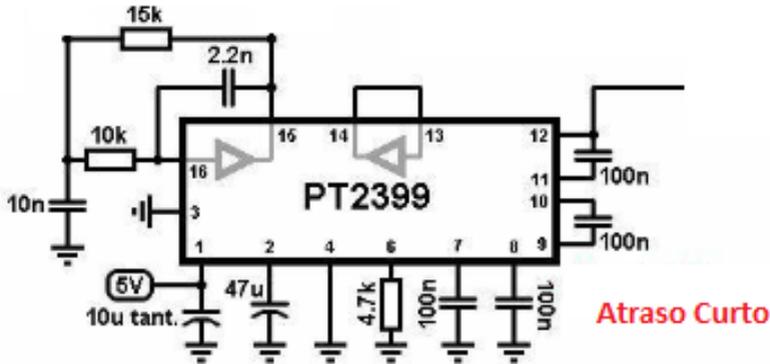


Fonte: [24]; modificado pelo autor.

O bloco de chaveamento é controlado por um Footswitch do tipo DPDT. Seu acionamento faz com que o transistor J112 opere como uma chave fechada, possibilitando que o sinal inserido na cadeia pelo buffer no estágio de entrada circule pelos dois estágios do PT2399. O acionamento do Footswitch ainda acende o LED, que tem como função indicar o ativamento do efeito. Com o footswitch desativado, o J112 opera como chave aberta, fazendo com que o sinal de entrada vá diretamente do buffer para o estágio de saída, sem passar pelos dois estágios do PT2399 responsáveis pela implementação do efeito.

3.1.4 Bloco de Atraso Curto

Figura 23 - Estágio de Atraso Curto do circuito de aplicação com dois estágios do PT2399.



Fonte: [24]; modificado pelo autor.

O bloco de atraso curto recebe o sinal do buffer de entrada e insere num filtro passa-baixas de entrada, na configuração MFB. A saída do filtro, no pino 15, envia o sinal para o estágio de atraso longo do circuito, que opera em paralelo com o de atraso curto. O sinal passa então pelo Conversor Analógico-Digital do PT2399 e sofre a ação de atraso do processador do circuito interno. Ocorre então o atraso controlado pelo VCO, com valor de 83ms para este estágio. Para que isto aconteça, deve ser conectado um resistor de $4.7k\Omega$ na entrada do controle do VCO, de acordo com a tabela disponibilizada no datasheet do PT2399. Esta tabela pode ser vista abaixo:

Tabela 2 - Relação entre resistência no controle do VCO e atraso proporcionado pelo PT2399.

R	27.6K	21.3K	17.2K	14.3K	12.1K	10.5K	9.2K	8.2K
fck	2.0M	2.5M	3.0M	3.5M	4.0M	4.5M	5.0M	5.5M
td	342ms	273ms	228ms	196ms	171ms	151ms	136.6ms	124.1ms
THD	1.0%	0.8%	0.63%	0.53%	0.46%	0.41%	0.36%	0.33%

R	7.2K	6.4K	5.8K	5.4K	4.9K	4.5K	4K	3.4K
fck	6.0M	6.5M	7.0M	7.5M	8.0M	8.5M	9.0M	10M
td	113.7ms	104.3ms	97.1ms	92.2ms	86.3ms	81ms	75.9ms	68.1ms
THD	0.29%	0.27%	0.25%	0.25%	0.23%	0.22%	0.21%	0.19%

R	2.8K	2.4K	2K	1.67K	1.47K	1.28K	1.08K	894
fck	11M	12M	13M	14M	15M	16M	17M	18M
td	61.6ms	56.6ms	52.3ms	48.1ms	45.8ms	43ms	40.6ms	38.5ms
THD	0.18%	0.16%	0.15%	0.15%	0.15%	0.15%	0.14%	0.14%

R	723	519	288	0.5
fck	19M	20M	21M	22M
td	36.6ms	34.4ms	32.6ms	31.3ms
THD	0.14%	0.13%	0.13%	0.13%

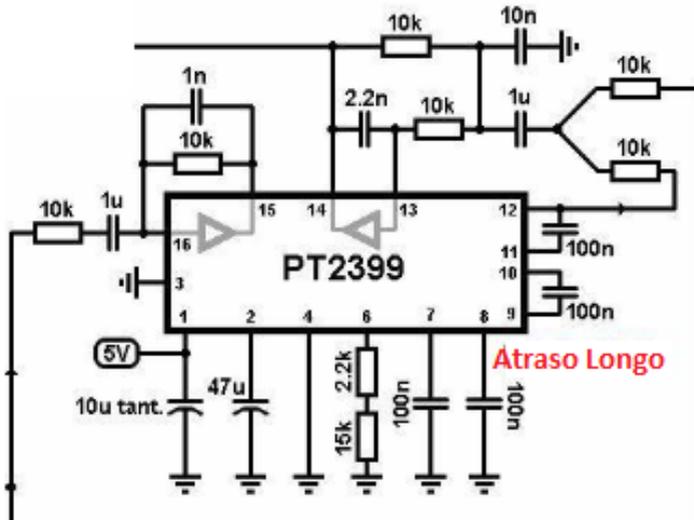
Fonte: [20]

O sinal atrasado então é convertido de volta pelo Conversor Digital-Analógico interno, passando pelo demodulador e um filtro anti-aliasing. Por fim, é disponibilizado na saída através do pino 12. O amplificador operacional dos pinos 13 e 14 não é utilizado no primeiro PT2399 do sistema, visto que a filtragem de saída somente ocorre no segundo estágio de atraso neste circuito.

3.1.5 Bloco de Atraso Longo

O sinal que vem da saída do filtro de entrada do primeiro estágio de atraso entra no bloco de atraso longo através de um filtro passa-baixas no pino 16. O sinal vai então para o Conversor Analógico Digital, sofrendo, de acordo com a tabela 2, um atraso de 228ms devido ao resistor equivalente de $17.2k\Omega$ conectado ao controle do VCO do circuito integrado, no pino 6. Após passar pelo Conversor Digital-Analógico, a informação passa por uma demodulação e um estágio de filtragem anti-aliasing, estando disponível no pino 12. O sinal que sai do pino 12 é somado com o que vem do primeiro estágio do PT2399, intercalando os diferentes valores de atraso e aumentando assim a densidade de eco resultante. A soma dos dois sinais passa por um estágio de filtragem passa-baixas na configuração MFB usando o amplificador operacional disponível entre os pinos 14 e 13. O esquemático do bloco de atraso longo pode ser conferido abaixo, na Figura 24.

Figura 24 - Estágio de Atraso Longo do circuito de aplicação com dois estágios do PT2399.

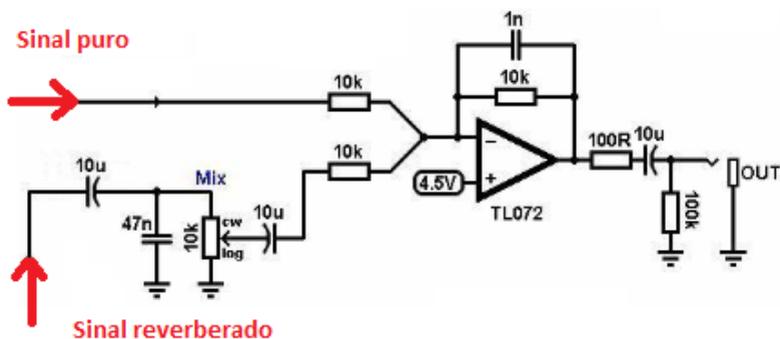


Fonte: [24]; modificado pelo autor.

3.1.6 Bloco de Saída

Após passar pelos dois blocos de atraso o sinal passa por dois caminhos, sendo realimentado de volta para o estágio de atraso curto, e, também, para a saída do circuito. No estágio de saída do sistema ocorre a soma do sinal reverberado e o puro do som de entrada, com um potenciômetro sendo utilizado para controlar a proporção entre ambos. Finalmente, é realizada mais uma filtragem no estágio de saída, moldando o timbre desejado, de forma a evitar uma sonoridade "metálica" para então disponibilizar o resultado no jack p10 de saída. O bloco de saída pode ser visto na figura abaixo.

Figura 25 - Estágio de saída do circuito de aplicação com dois estágios do PT2399.



Fonte: [24]; modificado pelo autor.

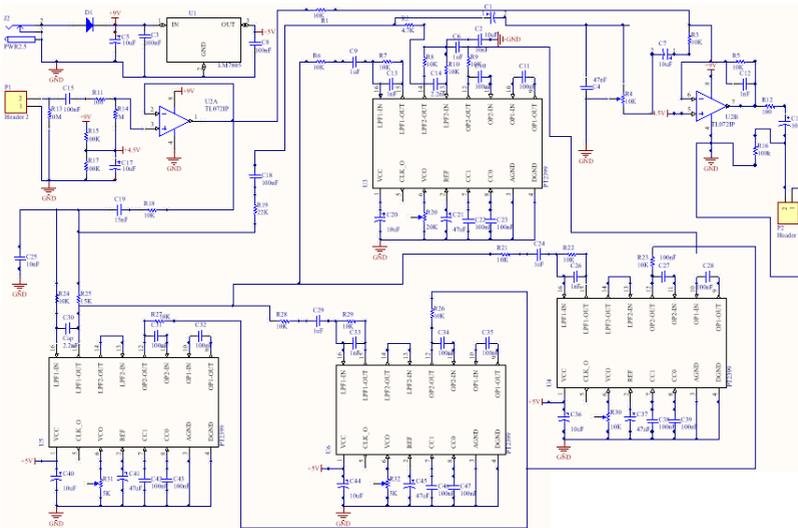
3.2 O Circuito Proposto

Como discutido previamente, um circuito com apenas dois estágios de atraso construídos a partir do PT2399 não consegue atingir densidade de eco suficientemente alta para a obtenção de um efeito de reverberação artificial de sonoridade natural. O presente trabalho propõe uma topologia baseada em quatro estágios do circuito integrado PT2399 para a implementação do efeito de reverberação, com o objetivo de aumentar consideravelmente a densidade de ecos, trazendo assim melhorias na sonoridade do efeito.

O reverberador projetado por Schroeder conseguiu atingir um alto valor para a densidade de eco, utilizando-se de filtros *comb* em paralelo e somando os resultados. Um filtro *comb* realimentado com um ganho menor que o valor unitário resulta num eco com decaimento, atuando de maneira similar ao resultado que pode ser alcançado com o uso do PT2399. O reverberador de Schroeder é composto por, além dos filtros *comb* operando em paralelo, dois módulos de reverberadores *All Pass* em série, com a saída sendo somada ao sinal puro para a devida obtenção do efeito, causando sensação de ambiência. Moorer desenvolveu a ideia de Schroeder, trocando filtros *comb* simples por unidades

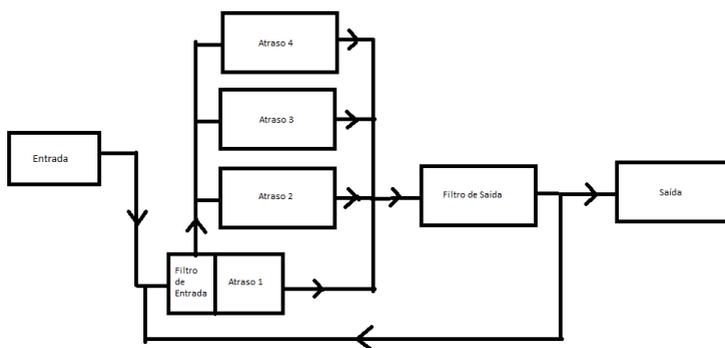
Low Pass Comb, trazendo uma sonoridade mais natural ao efeito, por levar em consideração o decaimento mais acentuado para altas frequências numa sala real. O sistema proposto neste trabalho foi projetado partindo do que foi proposto anteriormente por Moorer, utilizando-se de blocos de atraso realimentados com filtros passa-baixas em paralelo para construção de maior densidade de eco. Diferentemente do trabalho de Moorer, o sistema aqui apresentado não conta com um bloco *All Pass*, devido à dificuldade de se obter uma resposta plana ao trabalhar-se com o PT2399. O esquemático do circuito completo pode ser visto na figura 26. Um diagrama de blocos do circuito proposto pode ser visto na Figura 27, com a finalidade de ilustrar de maneira mais didática o funcionamento do sistema e o caminho do sinal.

Figura 26 - Esquemático completo do circuito proposto.



Fonte: Autor

Figura 27 - Diagrama de blocos completo do circuito proposto.



Fonte: Autor

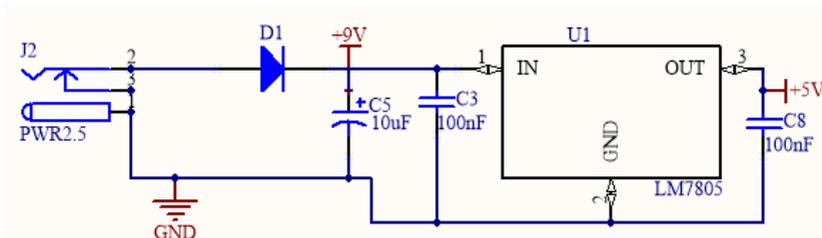
O circuito pode ser separado em sete blocos para uma análise mais didática. São eles: alimentação, entrada, atraso 1, atraso 2, atraso 3, atraso 4 e saída. No diagrama acima o bloco de alimentação é ocultado. Já o bloco de filtragem de saída ilustrado faz parte do quarto bloco de atraso, porém incluído separadamente na figura por fins didáticos. O sistema é baseado nas ideias de Moorer e Schroeder, sendo constituído por 4 blocos de atraso em paralelo somados e realimentados com filtros passa-baixa, porém sem o bloco do reverberador *All Pass* utilizado nos trabalhos citados.

Nas subseções a seguir, serão analisadas as atuações de cada bloco do sistema. As análises que seguem serão feitas de forma mais simplificada, visto que o funcionamento de cada bloco muito se assemelha ao que foi discutido na seção anterior para o circuito de aplicação com dois estágios do PT2399.

3.2.1 Estágio de Alimentação

Funcionando exatamente como descrito na subseção 3.1.1, o bloco de alimentação depende de um regulador de tensão para entregar os 5V necessários à entrada de tensão de cada estágio do PT2399, localizada no pino 1 de cada um dos circuitos integrados. Para este sistema o regulador de tensão utilizado é o LM7805.

Figura 28 - Estágio de alimentação do circuito proposto.

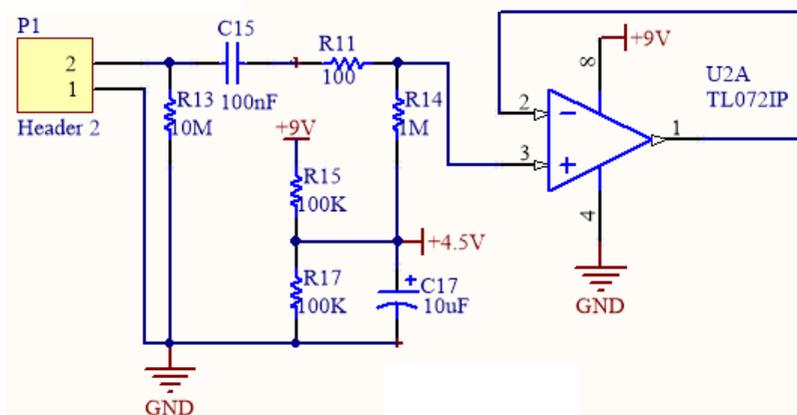


Fonte: Autor

3.2.2 Estágio de Entrada

A exemplo do estágio de alimentação, o estágio de entrada do circuito proposto funciona exatamente da mesma maneira do que ocorre no circuito de aplicação para dois estágios do PT2399. O sinal é inserido no jack p10 de entrada, simbolizado no esquemático da Figura 29 pelo designador P1, e é levado ao resto do circuito através do buffer de entrada, formado pela realimentação da entrada inversora do amplificador operacional TL072. Um divisor de tensão é utilizado para disponibilizar a tensão correta na entrada não-inversora do Amp-Op. A Figura 29 mostra o esquemático do estágio de entrada do circuito proposto neste trabalho.

Figura 29 - Estágio de entrada do circuito proposto.

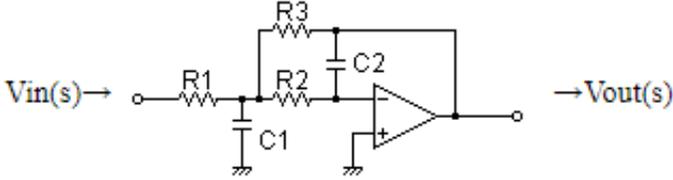


Fonte: Autor

3.2.3 Estágio de Atraso 1

O sinal chega ao primeiro estágio de atraso através do filtro de entrada, que opera em configuração MFB, com entrada no pino 16 e saída no pino 15. O sinal filtrado é utilizado na conversão analógico-digital interna do PT2399, bem como transmitido aos estágios de atraso seguintes. A Figura 30 mostra o esquemático do filtro de entrada do primeiro estágio de atraso com a identificação de cada componente para o cálculo da frequência de corte. A figura 30 retrata o esquemático do Estágio de Atraso 1 do circuito proposto neste trabalho.

Figura 30 - Filtro passa-baixas na configuração MFB e referências para cálculo da frequência de corte.



Fonte: [25]

A função de transferência do filtro acima é dada por:

$$\frac{V_{out}}{V_{in}} = \frac{-1}{s^2 + s \frac{1}{C_1} \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} \right) + \frac{1}{C_1 C_2 R_3 R_2}}; \quad (18)$$

Para o presente circuito, temos que $R_1 = R_2 = R_3 = 10k\Omega$, $C_1 = 10nF$ e $C_2 = 2.2nF$, nos resultando uma função de transferência igual a

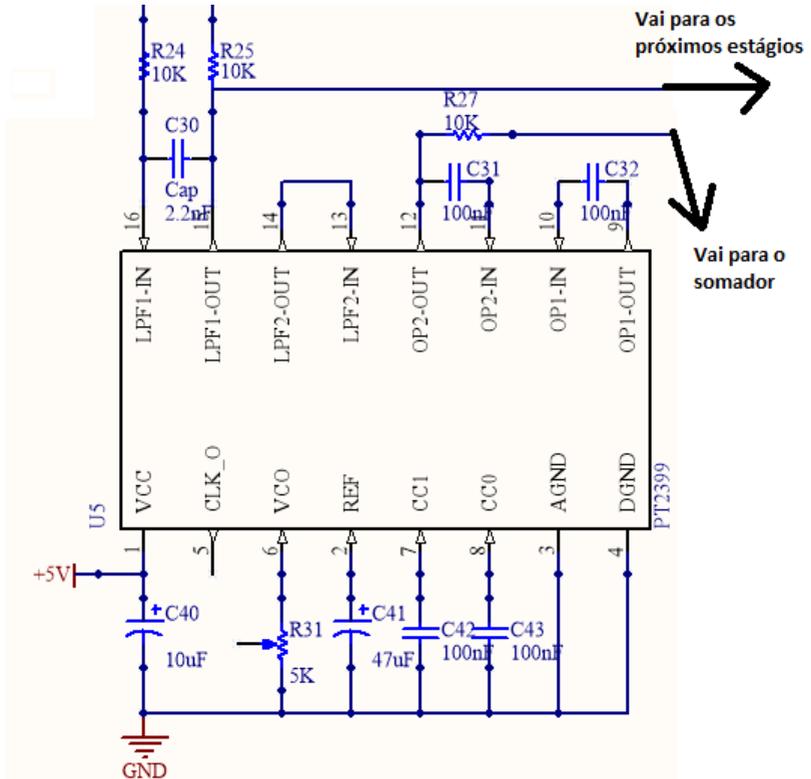
$$G(s) = \frac{-454545454.54545}{s^2 + 30000s + 454545454.54545}$$

A resposta do filtro apresenta frequência de corte em 3.4kHz, valor de quase o triplo da maior frequência fundamental de uma guitarra, garantindo ainda a preservação de uma significativa parte dos harmônicos do sinal.

Schroeder afirmou que a razão ideal entre o maior e o menor atraso deveria ser de 1,5:1 e que os valores de atraso deveriam não ter relação matemática entre si, evitando sobreposições. Levando isto em consideração, o controle do VCO para o circuito proposto é feito através de um trimpot conectado entre o pino 6 e o terra, ao invés de um resistor de valor fixo, como no circuito de aplicação antes discutido. Serão testadas duas configurações distintas: a primeira, obedecendo as relações impostas por Schroeder. A segunda, utilizando valores de atraso similares aos de outros circuitos de reverberação já difundidos entre projetistas. Para a primeira configuração, o valor de atraso desejado é

de aproximadamente 86,3ms, necessitando resistência de $4,9k\Omega$ no controle do VCO, de acordo com a Tabela 2. Para este primeiro estágio, o segundo caso de análise terá o mesmo atraso configurado.

Figura 31 - Primeiro estágio de atraso do circuito proposto.



Fonte: Autor

Após ocorrer o atraso o sinal passa pelo Conversor Digital-analógico, sendo então demodulado. Em seguida, o sinal sofre passa pelo *anti-aliasing* localizado entra os pinos 11 e 12, para então ser direcionado à sua saída, que leva até o somador, no último estágio de atraso.

O amplificador operacional com entrada no pino 13 e saída no pino 14 não é utilizado.

3.2.4 Estágios de Atraso 2 e 3

O segundo e terceiro estágios de atraso são exatamente idênticos, a não -ser pelo valor da resistência localizada entre o pino 6 e o terra de cada um dos circuitos integrados. Para o primeiro caso a ser analisado, seguindo as relações postuladas por Schroeder, o atraso do segundo estágio será configurado para 97,1ms, com o valor relativo ao terceiro estágio sendo fixado em 113,7ms, necessitando de resistências de $5,8k\Omega$ e $7,2k\Omega$ para cada bloco, respectivamente. O segundo caso de análise terá os valores de atraso fixados em 124,1ms e 151ms implicando no uso de resistores de $8,2k\Omega$ para o segundo estágio de atraso, e $10,5k\Omega$ para o terceiro.

Para estes dois estágios de atraso, temos um filtro passa-baixas ativo na entrada. Este filtro tem sua frequência de corte determinada pela equação 19:

$$f_c = \frac{1}{2\pi R_f C} \quad (19)$$

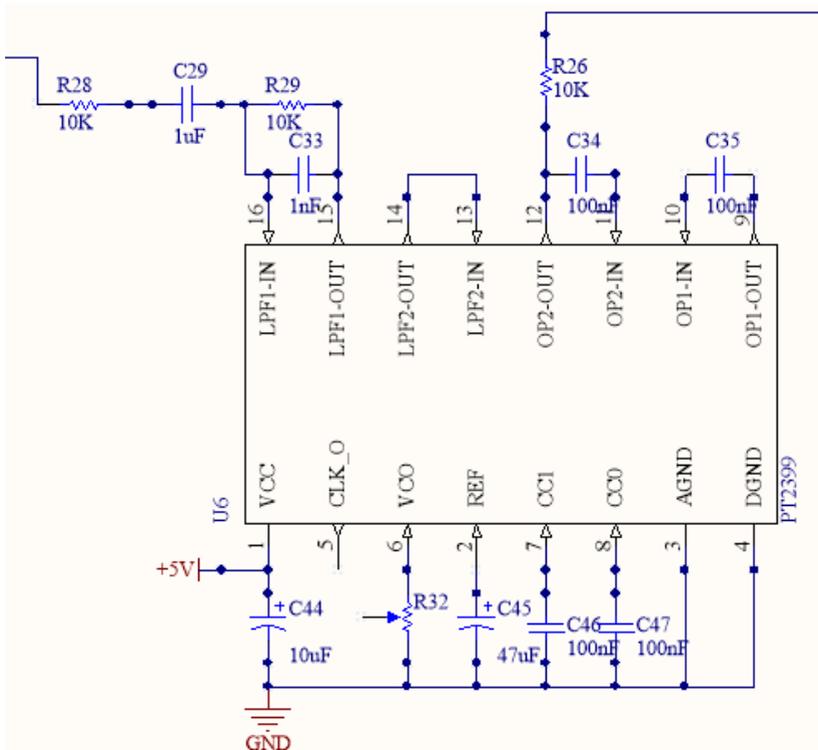
Que para os valores de $R_f = 10k\Omega$ e $C = 1nF$ nos dá a frequência de corte de 15,9kHz. Após filtrados, os sinais de cada estágio se submetem a uma conversão analógica-digital, para sofrer atuação do atraso.

Ambos os estágios tem, após realizados os atrasos e conversões digital-analógicas, suas saídas passando por filtro *anti aliasing*, sendo então enviadas ao somador no último estágio de atraso para assim aumentar a densidade de eco e serem realimentadas de volta ao primeiro estágio.

Os blocos de atraso 2 e 3 também não fazem uso do amplificador operacional localizado entre os pinos 13 e 14.

O esquemático referente ao segundo e terceiro estágios de atraso pode ser visto na Figura 32, com R32 representando o trimpot referente a cada estágio.

Figura 32 - Esquemático referente ao segundo e terceiro estágios do circuito proposto.



Fonte: Autor

3.2.5 Estágio de Atraso 4

O quarto e último estágio de atraso conta com um filtro passa-baixas idêntico ao dos estágios 2 e 3, com frequência de corte de aproximadamente 15,9kHz, na entrada do circuito. Após esta primeira etapa de filtragem, como nos outros casos, ocorre a conversão analógico-digital, para que então haja o atraso do sinal. Neste estágio, para o primeiro caso de análise, seguindo as condições estabelecidas por Schroeder, o controle do VCO será fixado num valor que forneça um atraso 50% maior do que o do primeiro estágio, resultando numa resistência de 8,7k Ω e um atraso de 130,5ms, segundo a Tabela 2. Para o segundo

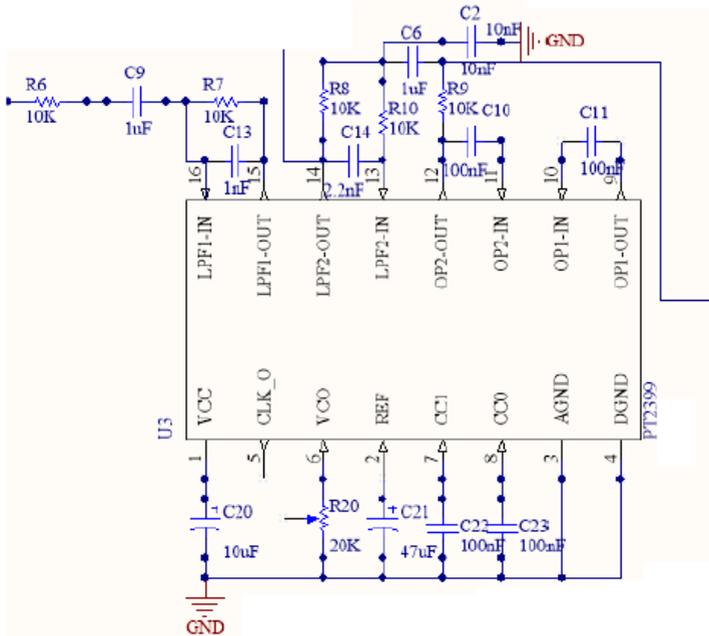
caso de análise, utilizando valores similares aos encontrados em outros circuitos de aplicação do PT2399, o valor utilizado será de $17,2\text{k}\Omega$, gerando atraso de 228ms.

Após ser realizado o atraso ocorre a conversão digital-analógica, a filtragem *anti-aliasing* e a soma do sinal atrasado do quarto estágio com o restante dos sinais atrasados. Os sinais somados passam então por novo estágio de filtragem passa-baixas na configuração MFB. Seguindo a referência adotada na Figura 30 e a equação 18, temos a função de transferência deste filtro representada por:

$$G(s) = \frac{-454545454.54545}{s^2 + 30000s + 454545454.54545}$$

proporcionando novamente uma frequência de corte de 3,4kHz, mesmo valor obtido no filtro de entrada do primeiro estágio de atraso. A saída deste estágio de filtragem encaminha o sinal para duas direções: realimentando de volta para o primeiro estágio e inserindo o sinal reverberado no bloco de saída do sistema. O esquemático do quarto estágio de atraso do sistema proposto é mostrado na Figura 33.

Figura 33 - Esquemático do Estágio de Atraso 4 do circuito proposto.

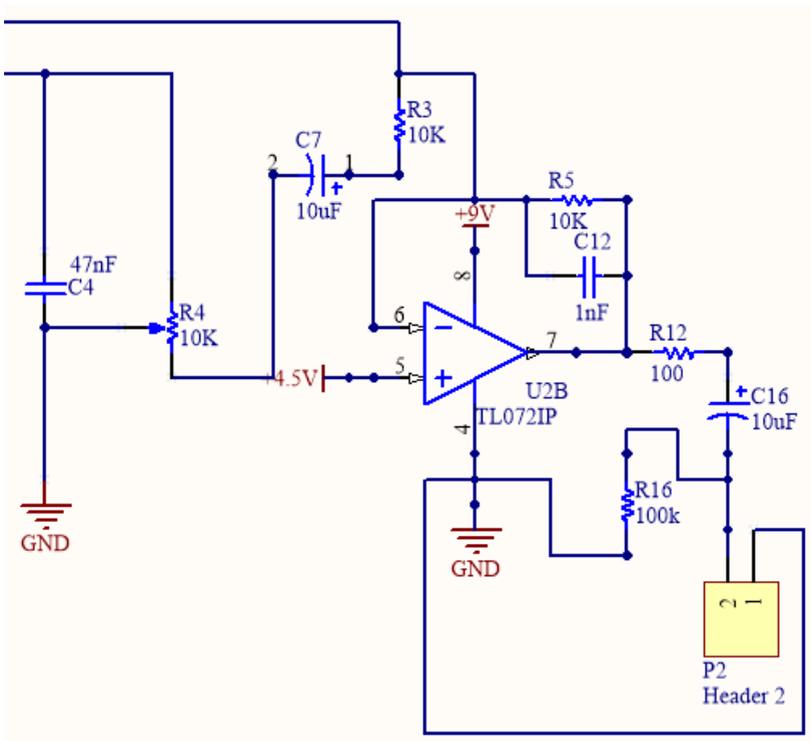


Fonte: Autor

3.2.6 Estágio de Saída

No bloco de saída ocorre a soma do sinal puro com o sinal reverberado resultante dos quatro estágios de atraso somados. Um potenciômetro é utilizado para efetuar o controle da razão entre eles. Ocorre então um último estágio de filtragem, com configuração equivalente ao que é visto nos filtros de entrada dos estágios 2, 3 e 4, proporcionando um filtro passa-baixas com frequência de corte de 15,9kHz. Finalmente, o sinal é disponibilizado no jack p10 de saída. O esquemático referente ao bloco de saída do sistema proposto é mostrado na Figura 34.

Figura 34 - Estágio de saída do circuito proposto.



Fonte: Autor

3.3 Softwares

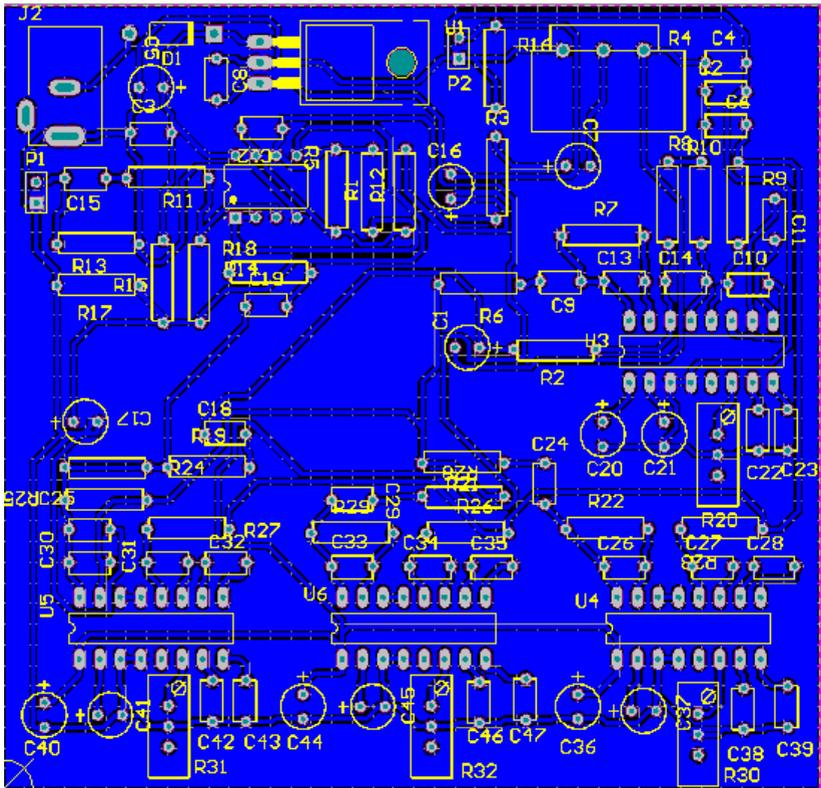
Para a implementação e avaliação do efeito de reverberação gerado foi necessário o uso de alguns softwares. Nesta seção serão apresentados os programas utilizados para o desenvolvimento do presente Trabalho de Conclusão de Curso.

3.3.1 Altium Designer

O Altium Designer é uma ferramenta utilizada por diversos engenheiros, projetistas e hobbistas. O software é utilizado, entre outras finalidades, para a confecção de esquemáticos eletrônicos e layouts para

Placas de Circuito Impresso. Através de um esquemático criado dentro do Altium Designer, é possível conectar os elementos do projeto diretamente a um projeto de layout de PCI. Neste projeto, o programa foi utilizado para a criação do esquemático do circuito proposto a ser apresentado em seguida, bem como o layout da PCI, que é ilustrado na Figura 35 [22].

Figura 35 - Layout da Placa de Circuito Impresso feito através do Altium Designer.



Fonte: Autor

3.3.2 Audacity

O Audacity é um programa de gravação e edição de áudio, com suporte para múltiplas faixas. Desenvolvido na Carnegie Mellon University, em 1999, o Audacity é amplamente utilizado por engenheiros em medições e iniciantes na área de gravação por sua simplicidade e eficiência. No presente trabalho, o software foi utilizado com a finalidade de gravar os resultados obtidos para análise qualitativa [23].

CAPÍTULO 4

Análise de Resultados

Este capítulo abordará a análise dos resultados obtidos a partir da implementação do circuito proposto. Serão analisadas duas situações base, como mencionado no capítulo anterior. A primeira delas consiste na escolha dos valores de atraso de cada estágio a partir da razão teorizada por Schroeder em seu trabalho. A segunda, na escolha dos valores partindo dos utilizados em outros projetos de reverberadores já existentes, com modificações sendo feitas de maneira empírica e os valores sendo ajustados de acordo com a sonoridade obtida. Ambas as situações comentadas serão analisadas em duas distintas configurações: com dois e com quatro estágios de atraso.

Para todos os resultados apresentados a seguir o potenciômetro que controla a razão entre sinal puro e reverberado está configurado no seu valor máximo, garantindo que os resultados tenham sido obtidos com os mesmos parâmetros.

4.1 Placa de Circuito Impresso

A placa de circuito impresso utilizada na implementação do efeito foi confeccionada na empresa Digicart, sediada em Nova Trento, Santa

Catarina. A placa possui apenas uma camada de cobre, com os componentes sendo alojados na face oposta. A Figura 36 mostra a PCI utilizada no sistema já com os componentes soldados.

Figura 36 - Placa de Circuito Impresso utilizada no projeto já montada com seus devidos componentes



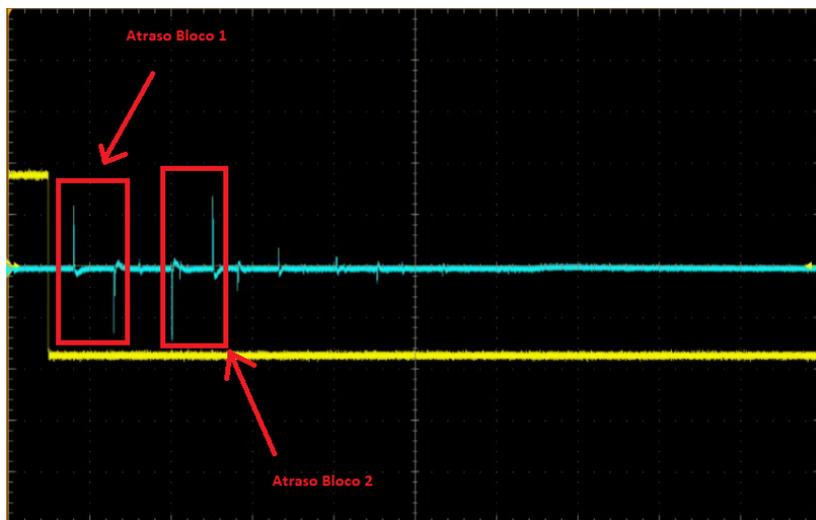
Fonte: Autor

4.2 Valores de Atraso Teóricos

A figuras 37 e 38 mostram os resultados obtidos para a primeira situação de análise, com os valores dos atrasos gerados em cada bloco sendo ajustados de acordo com a razão estipulada por Schroeder, de 1:1,5 do menor para o maior atraso, com valores intermediários não correlacionados matematicamente. A Figura 37 retrata os valores obtidos para o circuito com apenas dois estágios de atraso, enquanto a Figura 38 representa o resultado encontrado para o circuito completo, com quatro estágios de atraso. Ambas as figuras mostram o comportamento encontrado no pino 14 do último estágio de atraso, no filtro de saída

após a soma dos sinais vindos de todos os estágios. Os resultados mostrados nas figuras 37 e 38 apresentam escalas de 40mV por divisão para o canal 1, em amarelo, e 100mV por divisão pro canal 2, em azul, no eixo y. No eixo x, temos uma escala de 10 microssegundos por ponto.

Figura 37 - Saída do segundo bloco de atraso do circuito com dois estágios de PT2399 para valores teóricos de atraso

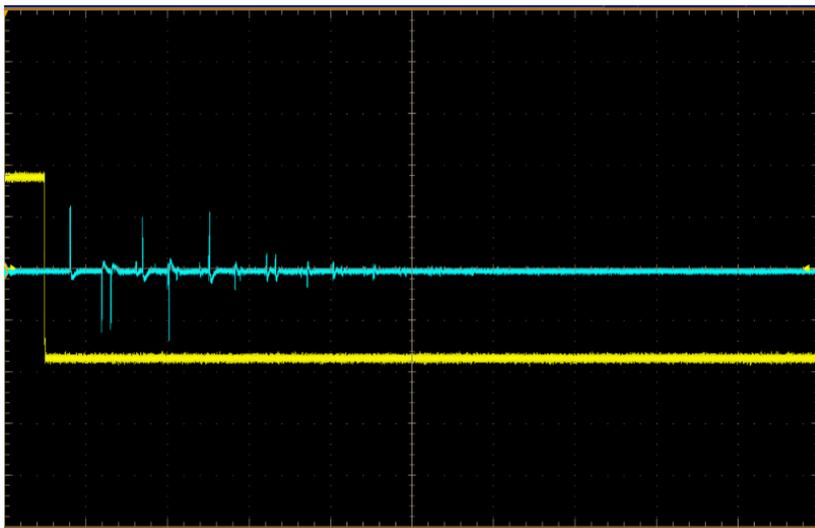


Fonte: Autor

Através da figura é possível ver a contribuição individual de cada bloco de atraso separadamente, com dois atrasos de maior amplitude aparecendo de maneira mais proeminente. Estes primeiros dois atrasos correspondem às duas primeiras amostras, não realimentadas, portanto antes de sofrer atenuação significativa.

Percebe-se que as amostras relativas ao primeiro estágio de atraso são defasadas em 180 graus em relação às geradas pelo segundo estágio. Isto se deve a um estágio adicional de filtragem na entrada de cada bloco que utiliza-se de realimentação negativa no amplificador operacional alocado entre os pinos 16 e 15 do PT2399, e desta forma, invertendo a fase do sinal. Esta mesma análise pode ser expandida para os casos a seguir.

Figura 38 - Saída do quarto bloco de atraso do circuito completo para valores teóricos de atraso



Fonte: Autor

Pela impossibilidade de se obter uma resposta ao impulso pura para um sistema real, o sistema foi excitado com uma onda quadrada de 1Hz com duty cycle de 5%, fazendo com que o sistema responda a um curto pulso e tendo tempo relativamente suficiente para que a energia se dissipe antes que o pulso seguinte ocorra. A baixa frequência também nos possibilita enxergar com mais clareza a atuação de cada atraso separadamente.

Através das figuras 37 e 38 fica evidente que o circuito proposto, com mais estágios de atraso, possui uma densidade de repetições significativamente maior que o circuito com apenas dois blocos de atraso. Este resultado pode ser conferido, ainda que sutilmente, na sonoridade do efeito implementado, com o circuito proposto apresentando reverberação mais natural.

Os valores de atraso implementados no circuito proposto neste trabalho foram de 86,3ms, 97,1ms, 113,7ms e 130,5ms, garantindo a razão 1:1,5 do menor para o maior atraso, com valores numericamente não correlacionados, como estabelecido por Schroeder. Os valores de resistência utilizados para a geração de tais atrasos, segundo a Tabela 2, são

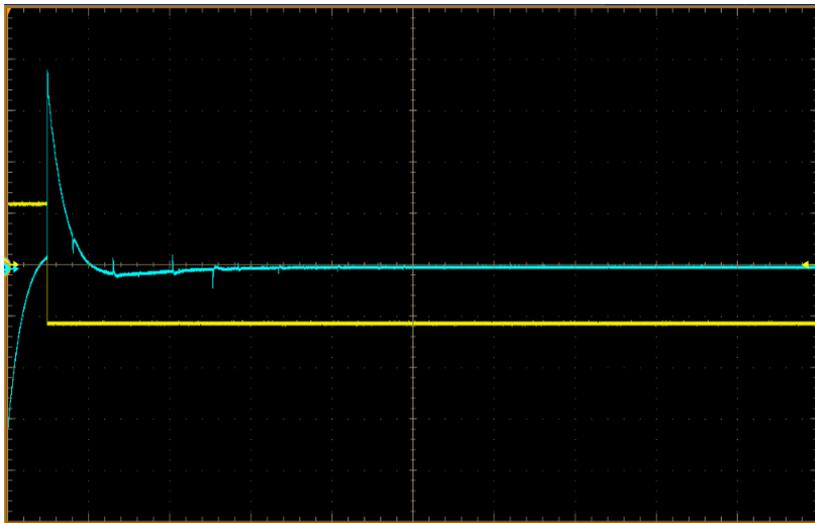
de $4,9\text{k}\Omega$, $5,8\text{k}\Omega$, $7,2\text{k}\Omega$ e $8,7\text{k}\Omega$. Para o circuito com dois estágios de atraso foram utilizados somente os atrasos de $86,3\text{ms}$ e $130,5\text{ms}$, ainda assim cumprindo com a relação teórica estipulada por Schroeder. As figuras 39 e 40 mostram a saída de áudio do circuito. Nelas fica visível a rapidez com que o sinal é atenuado em suas realimentações, gerando um efeito de reverberação sutil, ainda que com sonoridade natural e agradável.

Figura 39 - Saída do circuito com dois estágios de PT2399 para valores teóricos de atraso



Fonte: Autor

Figura 40 - Saída do circuito proposto para valores teóricos de atraso



Fonte: Autor

As duas figuras acima demonstram, assim como as duas anteriores, contribuições maiores de cada atraso para o circuito com dois blocos de atraso, enquanto o circuito proposto apresenta maior densidade de eco, com cada atraso apresentando amplitude ligeiramente menor. Este comportamento foi identificado também na sonoridade do efeito. Para as figuras 39 e 40, foram utilizadas as escalas de 60mV por divisão no canal 1, em amarelo, e 300mV por divisão no canal 2, em azul. No eixo x temos escala de 10 microssegundos por ponto de divisão.

4.3 Valores de Atraso Práticos

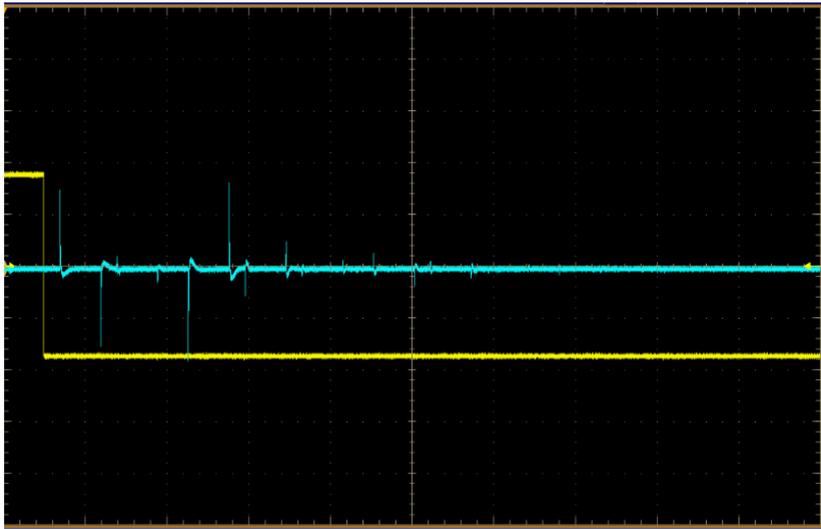
Para a segunda configuração em análise, as escolhas dos valores das resistências que controlam o tempo de atraso das unidades do circuito integrado foram feitas com base em projetos de reverberadores já existentes, como o circuito de aplicação apresentado no capítulo anterior, e modificados empiricamente de forma a melhorar a sonoridade resultante. Os valores estabelecidos fogem à razão estabelecida teoricamente por Schroeder.

O bloco de atraso 1 do circuito proposto gera atraso de 86,3ms, acarretando no uso de uma de resistência 4,9k Ω . O segundo bloco de

atraso foi configurado para gerar atraso de 124,1ms, com o potenciômetro de controle tendo seu valor fixado em 8,2k Ω . O terceiro e quarto blocos foram ajustados para gerar atrasos de 151ms e 228ms, respectivamente. Para tal, tiveram suas resistências ajustadas para 10,5k Ω e 17,2k Ω .

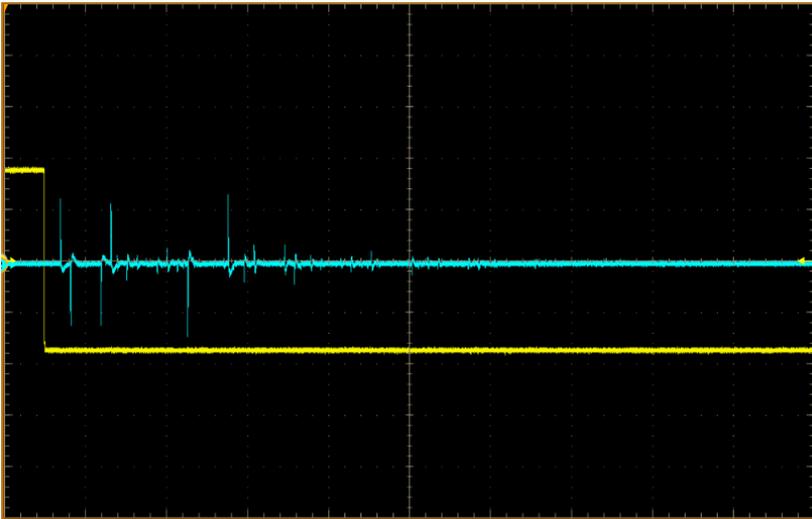
As Figuras 41 e 42 mostram a saída do último estágio de atraso para essa configuração, com todos os atrasos individuais somados, no pino 14. O circuito com dois estágios de atraso conta somente com os valores de 86,3ms e 228ms. Os resultados mostrados nas figuras 41 e 42 apresentam escalas de 40mV por divisão para o canal 1, em amarelo, e 100mV por divisão pro canal 2, em azul, no eixo y. No eixo x, temos uma escala de 10 microssegundos por ponto.

Figura 41 - Saída do segundo bloco de atraso do circuito de dois estágios de atraso para valores práticos de atraso.



Fonte: Autor

Figura 42 - Saída do quarto bloco de atraso do circuito completo para valores práticos de atraso



Fonte: Autor

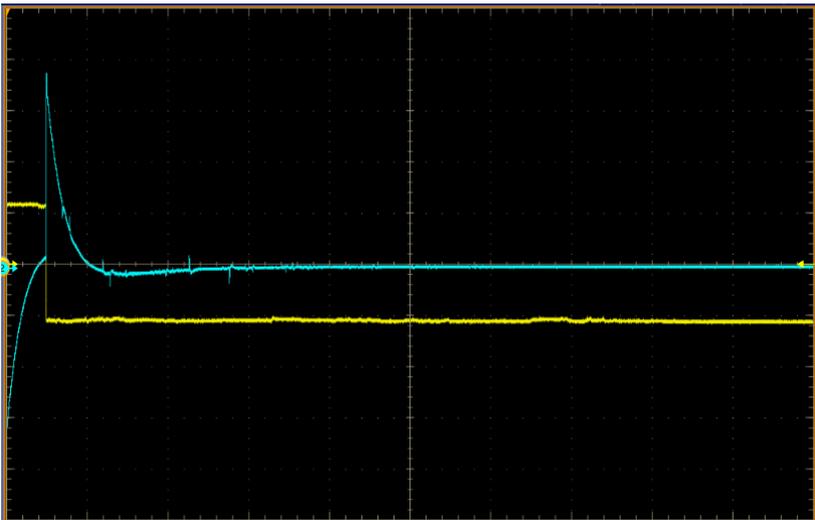
As figuras 43 e 44 demonstram o comportamento da saída do circuito, no jack p10. Nelas, foram utilizadas as escalas de 60mV por divisão no canal 1, em amarelo, e 300mV por divisão no canal 2, em azul. No eixo x temos escala de 10 microssegundos por ponto de divisão.

Figura 43 - Saída do circuito de dois estágios de atraso para valores práticos de atraso



Fonte: Autor

Figura 44 - Saída do completo para valores práticos de atraso



Fonte: Autor

Mais uma vez, as figuras 41 e 42 nos mostram melhores resultados para o circuito proposto, com mais estágios de atraso. É visível o aumento na densidade de eco para o sistema completo.

Os resultados obtidos para esta segunda configuração apresentam densidade de eco comparável com a apresentada para a obtida utilizando a relação de Schroeder. A atenuação do sinal, contudo, é menos proeminente, gerando uma reverberação mais acentuada, ainda que muito pouco. Esta configuração apresenta sonoridade ligeiramente mais agradável em comparação com a primeira discutida, porém o efeito continua a aparecer de maneira sutil.

CAPÍTULO 5

Conclusão

Neste trabalho foi apresentada uma implementação de efeito de reverberação com circuito integrado, baseada em quatro estágios do PT2399, um circuito processador de eco. Para tal, foi analisada a reverberação enquanto fenômeno acústico, bem como seu comportamento físico, proporcionando maior entendimento de como implementar um efeito de reverberação artificial com sonoridade natural. Foram também estudados diversos algoritmos clássicos de implementação do efeito, correlacionando os estudos teóricos com a aplicação prática.

Foi apresentado o circuito integrado PT2399, com todo seu funcionamento interno sendo analisado. Foram também estudados dois circuitos de aplicação do circuito em questão, o primeiro implementando efeito de eco com apenas um estágio do circuito integrado com sua saída sendo realimentada em sua entrada, com o segundo produzindo efeito reverberante utilizando dois estágios do PT2399. A partir destas análises, foi projetado um circuito com quatro estágios de atraso, com o objetivo de aumentar a densidade de eco do sistema, fazendo desta forma com que o efeito obtivesse uma sonoridade mais natural.

Comparando com outras implementações de efeito de reverberação envolvendo o circuito integrado PT2399, o sistema proposto apresentou

sonoridade mais natural, porém mais sutil, com um tempo de reverberação menor.

Fica como desafio para trabalhos futuros a tentativa de implementação de um sistema mais robusto de reverberação a partir do uso de PT2399, como o algoritmo apresentado por Dattorro, com saída estéreo.

Referências bibliográficas

1. DONOSO, José Pedro. Apostila de acústica . [20-]. Disponível em:
<http://www.gradadm.ifsc.usp.br/dados/20132/FCM0208-1/Apostila%20Acustica%20_2.pdf>. Acesso em: 04 jul. 2018.
2. HASS, Jeffrey. What is reverberation? . 2017. Disponível em:
<http://www.indiana.edu/emusic/etext/acoustics/chapter1_reverb.shtml>. Acesso em: 04 jul. 2018.
3. NOCETI FILHO, Sidnei. Efeitos de Áudio Digitais e Analógicos : Aspectos Práticos. [S.l.: s.n.], [19-]. 63 p.
4. REFLECTION: Echo vs. Reverberation. Disponível em:
<<http://www.physicsclassroom.com/mmedia/waves/er.cfm>>. Acesso em: 04 jul. 2018.
5. VALIMAKI, V. et al. Fifty Years of Artificial Reverberation, p. 142'-1448, Julho 2012
6. SCHROEDER, Manfred. Natural Sounding Artificial Reverberation. Journal Of The Audio Engeneering Society: [s.n.], 1962. Disponível em:
<<http://charlesames.net/pdf/MRSchroeder/artificial-reverb.pdf>>. Acesso em: 04 jul. 2018.
7. ZOLZER, U. **DAFX - Digital Audio Effects**. West Sussex: John Wiley & Sons, Ltd, 2002.

8. BAI, H.; RICHARD, G.; DAUDET, L. Late Reverberation Synthesis: From Radiance Transfer to Feedback Delay Networks. **IEEE/ACM Transactions on Audio, Speech and Language Processing**, Dezembro 2015
9. BEKEFI, G. and BARRETT, A. H. **Electromagnetic Vibrations, Waves, and Radiation**. Cambridge, MA: MIT Press, pp. 150-154, 1987.
10. ROCHA, S. **Influência do Tempo de Reverberação no Isolamento Sonoro Entre Espaços**. Faculdade de Engenharia Universidade do Porto. Porto. 2014
11. FAHY, Frank. **Foundations of Engineering Acoustics**. San Diego: Elsevier Academic Press, 2001. 443 p.
12. KUTTRUFF, Heinrich. **Acoustics: An Introduction**. Londres: Taylor & Francis, 2007.
13. Smith, J.O. Physical Audio Signal Processing, Disponível em: <http://ccrma.stanford.edu/jos/pasp/>, online book, 2010 edition, Acesso em 20 out. 2018.
14. SCHROEDER, M. F.; LOGAN, B. F.. "Colorless" Artificial Reverberation. **Journal Of Audio Engineering Society**, New York, v. 9, n. 1, p.209-214, nov. 1961.
- RAICHEL, Daniel. Differences in dealing with the acoustics of large outdoor and indoor listening spaces. *The Journal Of The Acoustical Society Of America*, New York, v. 120, n. 3052, out. 2006.
16. NAVE, Rod. **Modeling Reverberation Time**. Disponível em:
<<http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/Acoustic/revmod.html>>. Acesso em: 20 out. 2018.
17. SMITH, Julius O.. Analysis of a Digital Comb Filter. Disponível em:
<https://ccrma.stanford.edu/jos/fp/Analysis_Digital_Comb_Filter.html>. Acesso em: 20 out. 2018.
18. PIRKLE, Will. **Designing Audio Effect Plug-Ins In C++**. Burlington: Focal Press, 2013.
19. GARDNER, W. G. **Reverberation algorithms in Applications of Digital Signal Processing to Audio and Acoustics**, M. Kahrs and K. Brandenburg, Eds. Boston, MA: Kluwer, 1997, pp. 85-131.

20. PRINCETON. **PT2399 Echo Processor IC Datasheet**.
Disponível em:
<http://www.princeton.com.tw/Portals/0/Product/PT2399_1.pdf>.
Acesso em: 1 jan. 2019.

- 21 - ELECTROSMASH. **PT2399 Analysis**. Disponível em:
<<https://www.electrosmash.com/pt2399-analysis>>. Acesso em: 18 set. 2018.
- 22 - ALTIUM. **About Altium**. Disponível em:
<<https://www.altium.com/company/about-altium/about-us>>. Acesso em: 18 out. 2018.
- 23 - AUDACITY. **About**. Disponível em:
<<https://www.audacityteam.org/about/>>. Acesso em: 24 out. 2018.
24. The Valve Wizard. **Equinox II: Reverb with Tails**. Disponível em:
<<http://www.valvewizard.co.uk/equinox.html>>. Acesso em: 20 set. 2018.
25. ELLIOTT, Rod. **Active Filters**. Disponível em:
<<http://sound.whsites.net/articles/active-filters.htm>>. Acesso em: 15 jan. 2019.