

Universidade Federal do Espírito Santo (**UFES**)
Centro Universitário Norte do Espírito Santo (**CEUNES**)
Bacharelado em Ciência da Computação

Trabalho I — Processamento Digital de Sinais
Sistema Reverberador

João Victor do Rozário Recla

Novembro 2022

Conteúdo

1	Introdução	2
1.1	Objetivos	2
1.2	Sistema Proposto	2
2	Sinal de Áudio	2
2.1	Aquisição do Sinal	2
2.2	Representações do Sinal	3
2.3	Frequência de Amostragem	4
2.4	Classificação do Sinal	5
3	Sistema Reverberador	5
3.1	Sistema	5
3.1.1	1º Método de Schroeder	5
3.1.2	2º Método de Schroeder	6
3.1.3	Filtro Universal	7
3.2	Respostas do Sistema	8
3.2.1	Respostas a Função Impulso $\sigma[n]$:	8
3.2.2	Respostas a Função Degrau $u[n]$:	10
3.3	Propriedades do Sistema	11
4	Resultados	12
5	Referências	13

1 Introdução

1.1 Objetivos

O objetivo deste trabalho é propor um sistema **LTI**, ou ainda **LIT** (**Linear e Invariante no Tempo**), e aplicá-lo no processamento de um sinal de áudio mono, no formato *.wav*, usando a linguagem de programação **Python**.

1.2 Sistema Proposto

“**Sistema Reverberador**” é o nome do sistema proposto para este trabalho. A sua modelagem se baseia na aplicação do efeito de reverberação [4] em um sinal de áudio. A partir de um sinal de entrada, a saída esperada para o sistema no processamento digital é um sinal de áudio reverberado.

2 Sinal de Áudio

2.1 Aquisição do Sinal

Após importar um arquivo de áudio, com formato *.wav*, para dentro da pasta do projeto, o sinal do áudio foi obtido através do comando `.read()` da biblioteca **soundfile**, que recebe o caminho do arquivo no projeto e retorna o sinal e a frequência de amostragem relacionados ao áudio (Conforme a **figura 1**).

```
18 import soundfile as Sound
19 #####
20
21
22 #
23 # Obtencao do sinal de audio.
24 #####
25 Sinal, Freq = Sound.read("Audios/Audio_01_82bpm.wav") # Audio 01.
26 # Sinal, Freq = Sound.read("Audios/Audio_02_88bpm.wav") # Audio 02 (Processameto mais lento).
27 # Sinal, Freq = Sound.read("Audios/Audio_03_130bpm.wav") # Audio 03 (Processamento mais lento).
28
```

Figura 1: Aquisição do sinal e frequência de amostragem do áudio.
(Arquivo *Main.py*)

2.2 Representações do Sinal

O sinal do áudio pode ser representado tanto em função do tempo (**Figura 2**) como em função da frequência, sendo a frequência apresentada como o espectro de amplitude do sinal (**Figura 3**) e como o espectro de fase do sinal (**Figura 4**).

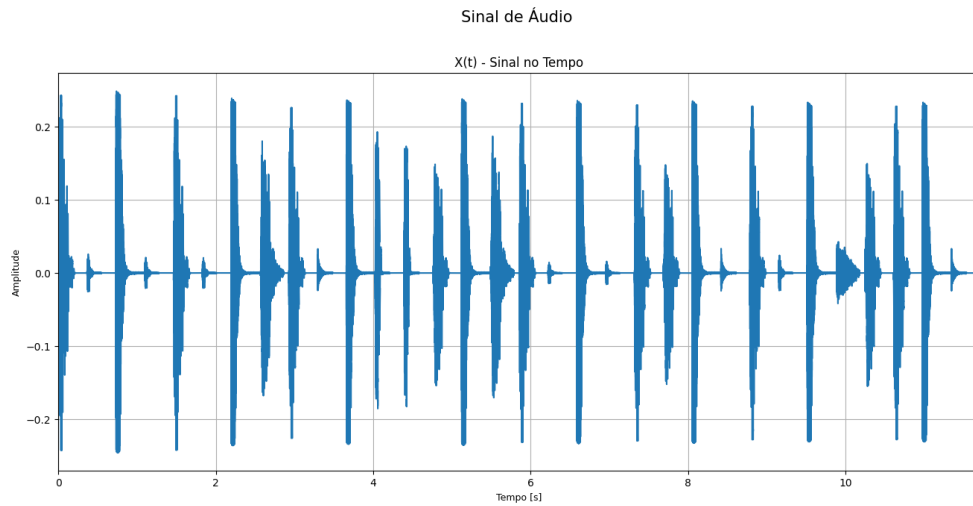


Figura 2: Representação do sinal no tempo.

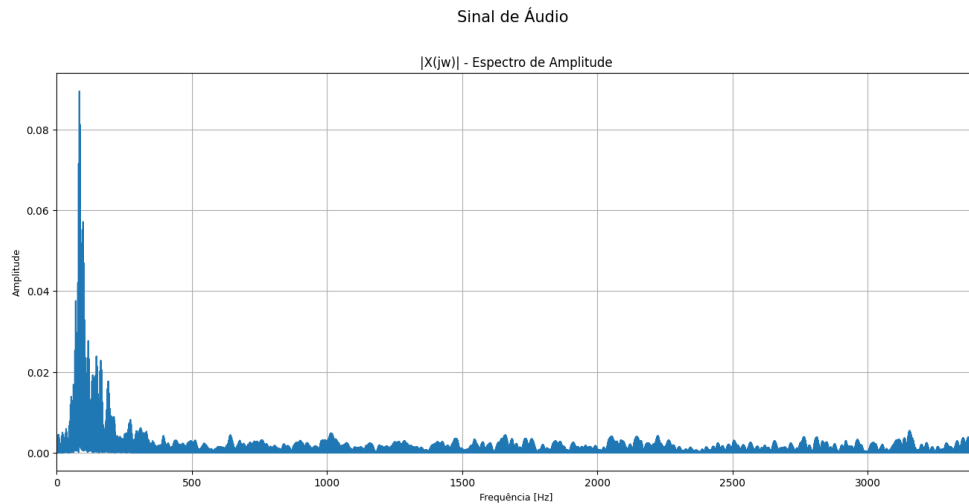


Figura 3: Espectro de amplitude do sinal.

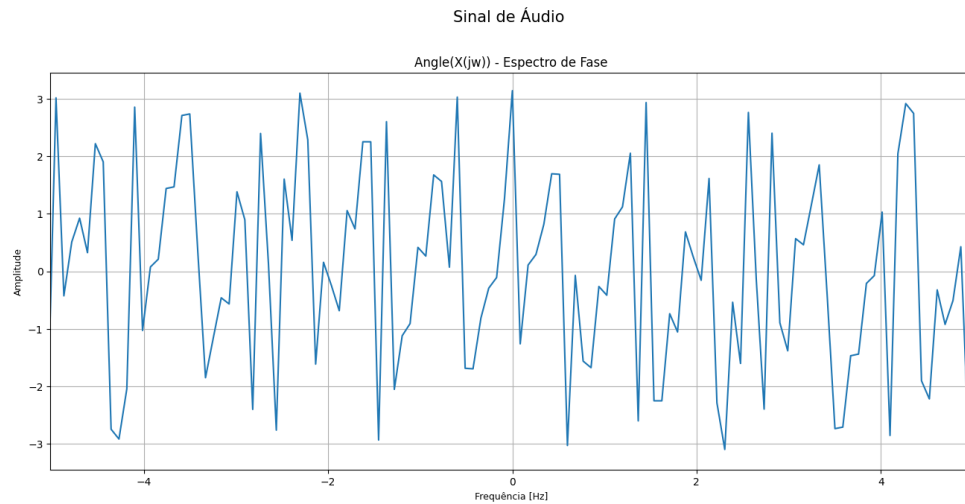


Figura 4: Espectro de fase do sinal.

2.3 Frequência de Amostragem

Para representar digitalmente o sinal do áudio no tempo é necessário obter a sua frequência de amostragem, que já é retornado pelo comando `.read()` (Conforme a figura 1). Após obter essa informação podemos usá-la para: (1) calcular a taxa, ou período, de amostragem do sinal (Dado por $T_s = 1 / \text{Freq}$), (2) extrair o tempo de duração do áudio, em segundos, ($\text{Duração} = \text{Amostras} * T_s$) e (3) representar o sinal em tempo discreto.

```
/Trabalho I - Sistema LTI/Main.py"

Canal de áudio:           Mono
Quantidade de amostras:   516293
Frequencia de amostragem: 44100
Taxa de amostragem:       2.2675736961451248e-05
Tempo de áudio (s):       11.71
```

Figura 5: Informações do sinal de áudio.

2.4 Classificação do Sinal

Observando as representações do sinal do áudio no tempo (**Figura 2**) e na frequência (**Figura 3 e 4**), podemos analisar o sinal e classificá-lo como sendo:

- **Contínuo** — O Sinal é analógico;
- **Causal** — O sinal é definido a partir do instante de tempo $t = 0s$;
- **Real** — O sinal apresenta valores reais em qualquer instante t ;
- **Aleatório** — O sinal apresenta valores aleatórios em qualquer instante t ;
- **Aperiódico** — O sinal não satisfaz a equação $x(t) = x(t + Ts)$.

3 Sistema Reverberador

A implementação do “**Sistema Reverberador**” é baseada em dois algoritmos apresentados por *Schroeder* [3] em seu artigo: “**Natural Sounding Artificial Reverberation**” [1]. Nesse artigo o objetivo geral descrito pelo autor é a simulação de um efeito artificial de reverberação, por meios digitais, que seja indistinguível do efeito natural de reverberação em um ambiente fechado.

Além da aplicação desses algoritmos, o sistema implementado tem como base outro método que permite a configuração do efeito artificial a partir do ajuste de alguns parâmetros, que podem ser modificados de tal modo que é possível representar outros efeitos apenas com algumas mudanças.

3.1 Sistema

3.1.1 1º Método de Schroeder

O primeiro algoritmo abordado no artigo — e o que será utilizado como base nesse relatório — consiste na passagem de um sinal de áudio por um conjunto de filtros **All-pass** em série (**Figura 6 e 7**), sendo de **4-5** a quantidade de filtros necessários para se obter um sinal reverberado com boa qualidade.

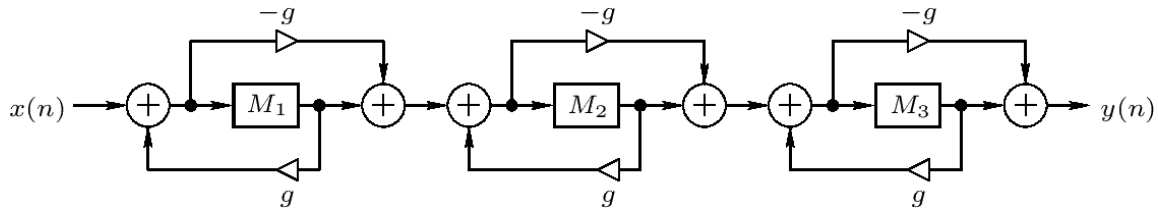


Figura 6: Filtros All-pass em série.
(1º Método de Schroeder)

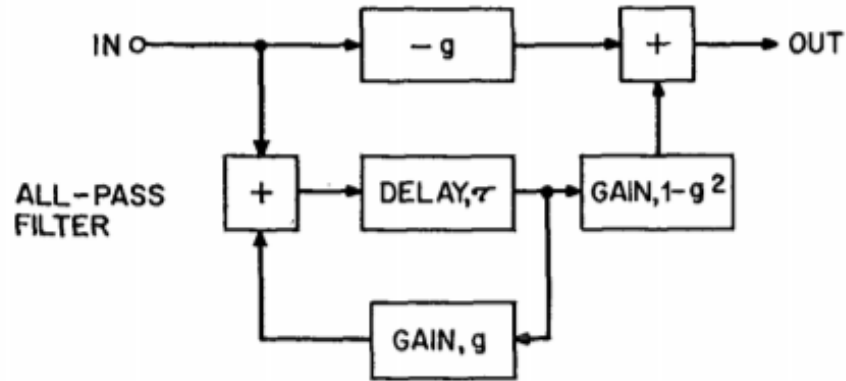


Figura 7: Estrutura do filtro All-pass.

3.1.2 2º Método de Schroeder

O segundo algoritmo abordado no artigo é um sistema que consiste na passagem de um sinal de áudio por um conjunto de 4 filtros “Comb” em paralelo, seguido da passagem por um conjunto de 2 filtros All-pass em série, obtendo-se assim um sinal reverberado (**Figura 8**). Para esse método o filtro “Comb” utilizado por Schroeder [3] é um filtro do tipo IIR que aplica um efeito de *delay* no sinal de entrada (**Figura 9**).

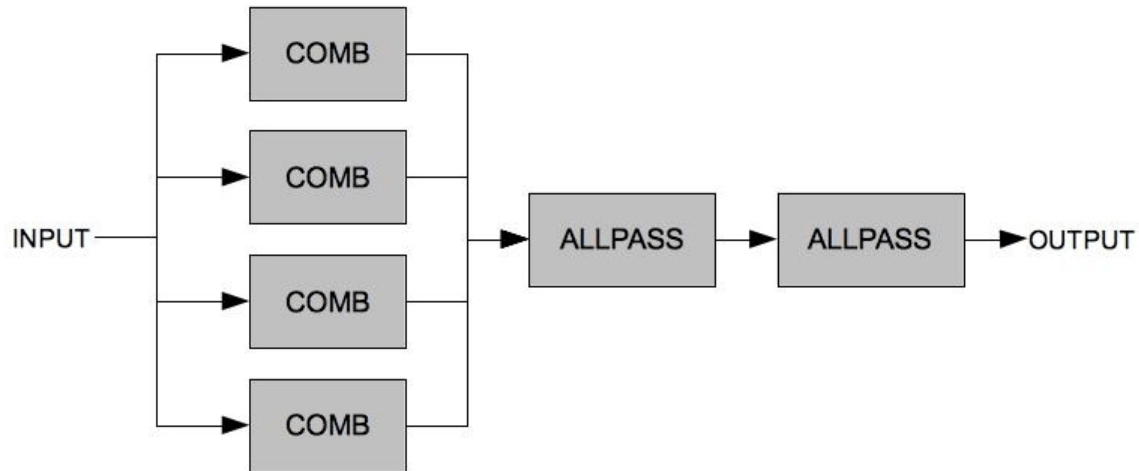


Figura 8: Reverberador de Schroeder.
 (2º Método de Schroeder)

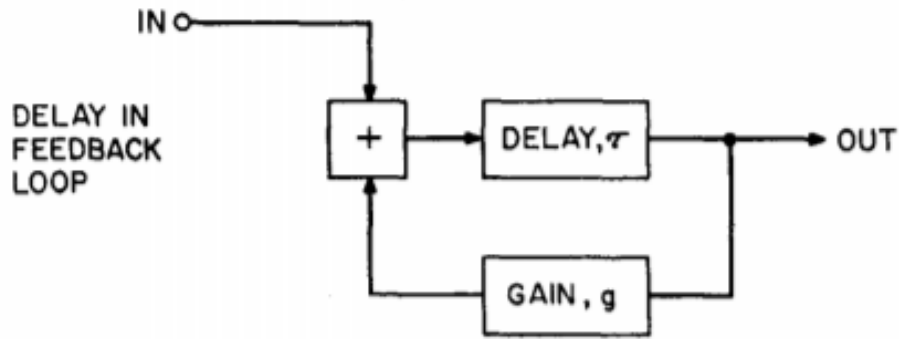


Figura 9: Estrutura do filtro de delay.
 (Comb-filter IIR)

3.1.3 Filtro Universal

Tomando como base o artigo “**Implementação de efeito de áudio: atraso e reverberação.**” [2] e o filtro universal (Figura 10), construído a partir da junção de um filtro **IIR** com um filtro **FIR**, é possível reproduzir tanto os métodos de Schroeder, quanto criar outros efeitos apenas configurando alguns parâmetros, conforme a figura 11, e combinando os filtros com a equação (1).

$$y[n] = \mathbf{BL} * x[n] + \mathbf{FF} * x[n - M] + \mathbf{BL} * \mathbf{FB} * y[n - M] \quad (1)$$

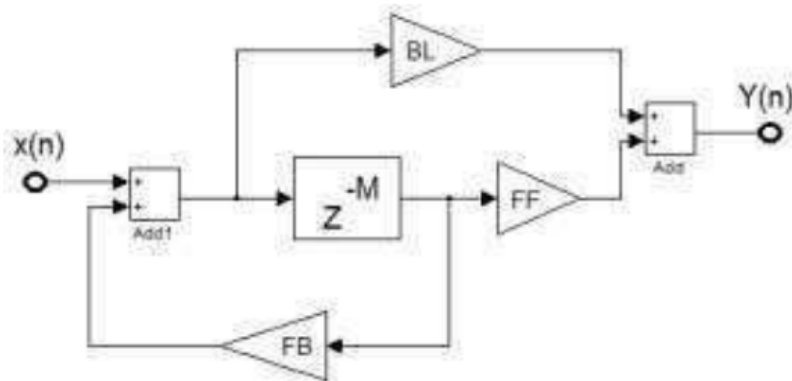


Figura 10: Estrutura do filtro universal.

	BL	FB	FF
Filtro FIR	1	0	Gd
Filtro IIR	1	Gd	0
Filtro passa-tudo	Gd	-Gd	1
Delay puro	0	0	1

Figura 11: Parâmetros de configuração do filtro universal.

3.2 Respostas do Sistema

Para o primeiro método de Schroeder (**Figura 6**), abordado nesse relatório, obtemos as seguintes respostas do sistema às funções “*Impulso*” e “*Degrau*”:

3.2.1 Respostas a Função Impulso $\sigma[n]$:

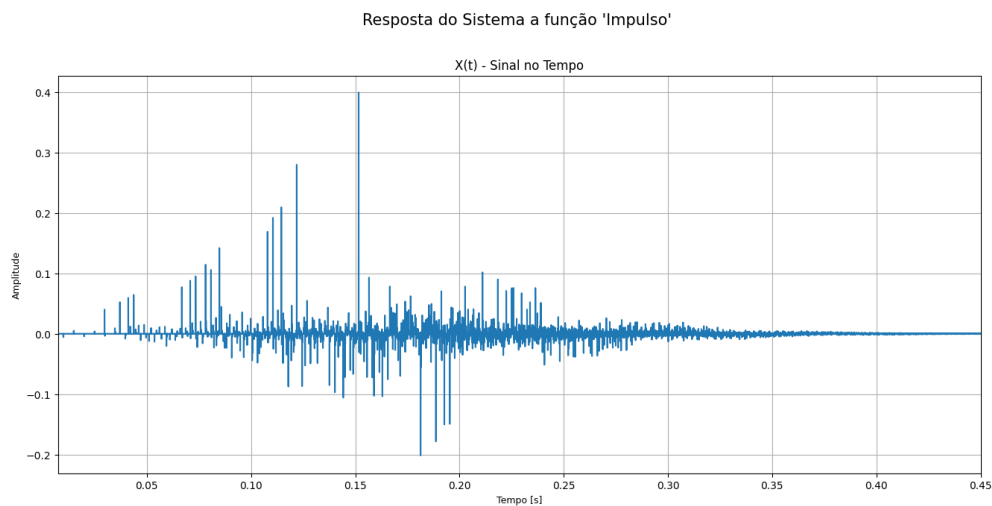


Figura 12: Resposta ao Impulso no tempo.

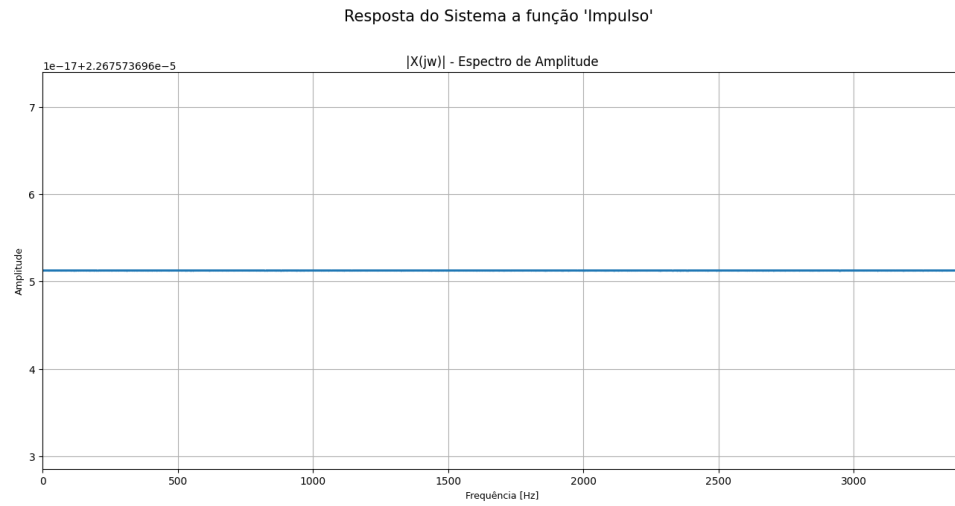


Figura 13: Espectro de amplitude em resposta ao Impulso.

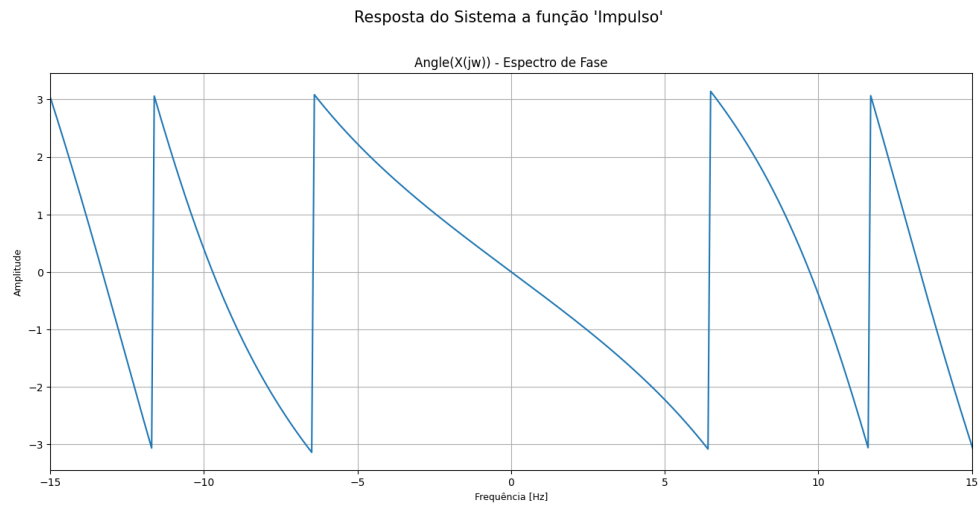


Figura 14: Espectro de fase em resposta ao Impulso.

3.2.2 Respostas a Função Degrau $u[n]$:

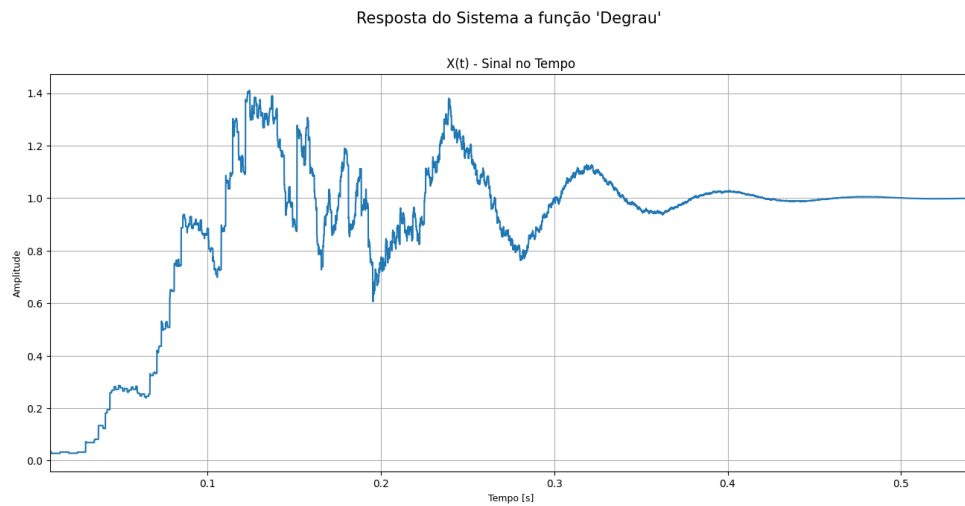


Figura 15: Resposta ao Degrau no tempo.

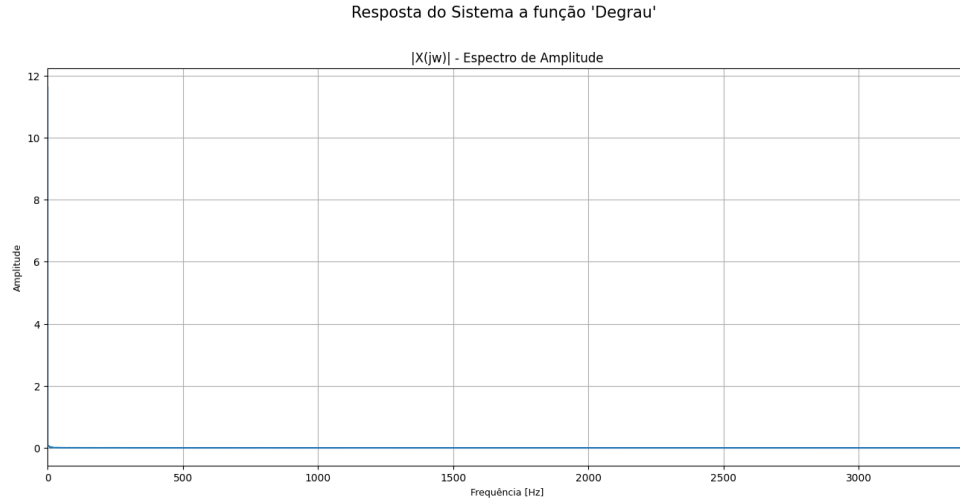


Figura 16: Espectro de amplitude em resposta ao Degrau.

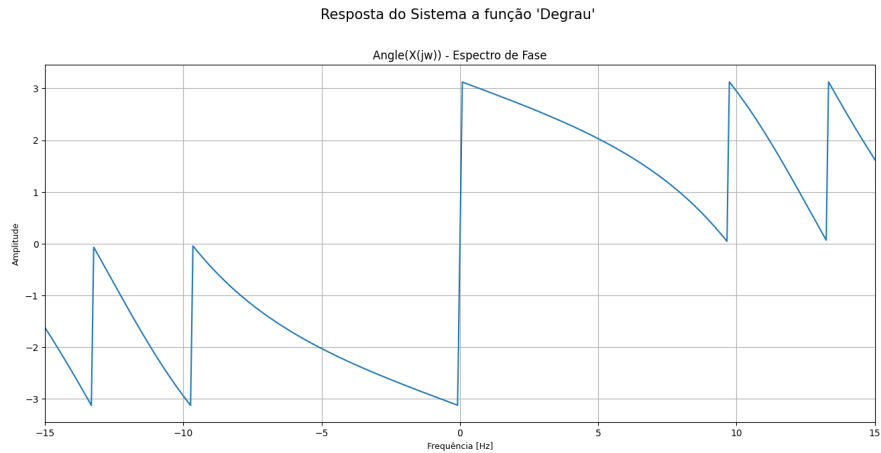


Figura 17: Espectro de fase em resposta ao Degrau.

3.3 Propriedades do Sistema

O “**Sistema Reverberador**”, com base no 1º Método de Schroeder (**Figura 6**) e na configuração do filtro universal pela equação (1), pode ser classificado conforme as seguintes propriedades:

- **Com memória:**

O sistema depende de valores do sinal de entrada no *passado*, ou seja, de pontos deslocados no tempo com base em um delay;

- **Estável:**

A saída do sistema não diverge, enquanto o sinal de entrada não for divergente;

- **Causal:**

A saída do sistema depende somente de valores do sinal de entrada no *presente* ou no *passado*;

- **Linear:**

O sistema satisfaz os princípios da superposição de *aditividade* e *mudança de escala*;

- **Invariante:**

A saída do sistema apresenta o mesmo deslocamento no tempo aplicado no sinal de entrada.

4 Resultados

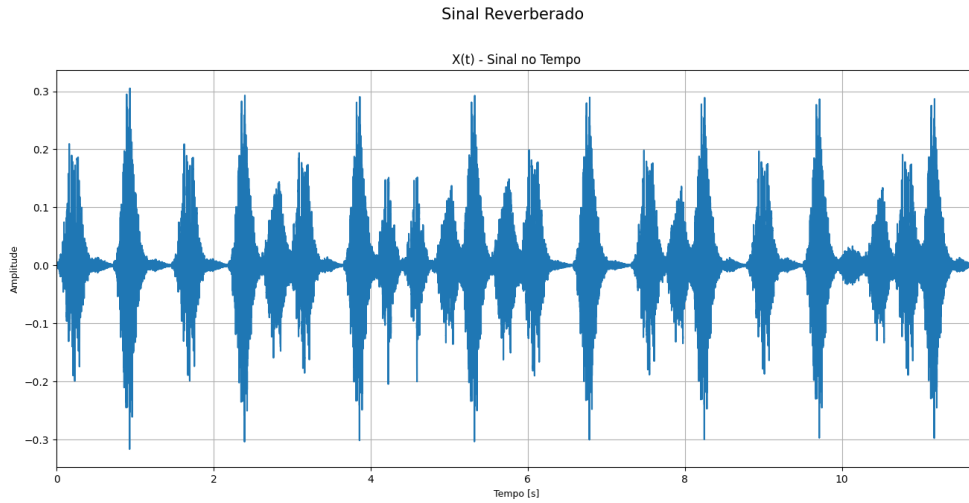


Figura 18: Resposta ao sinal no tempo.

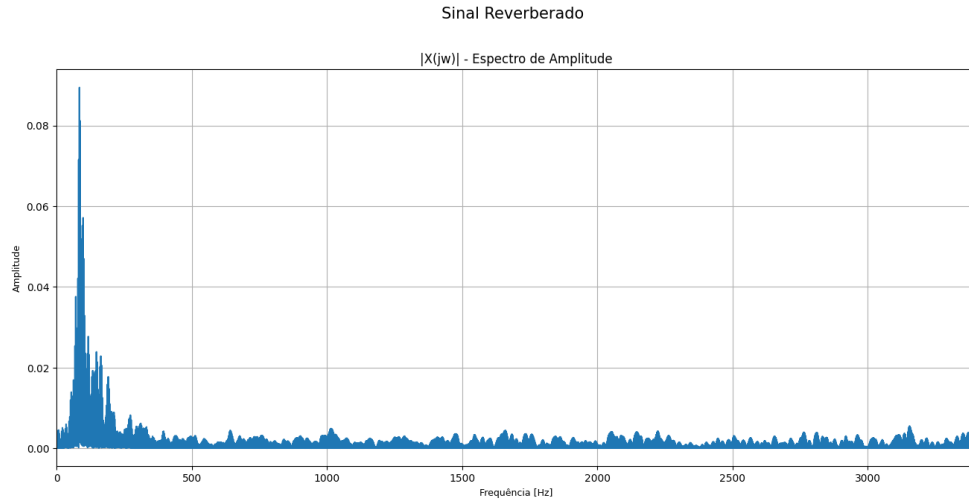


Figura 19: Espectro de amplitude em resposta ao Sinal.

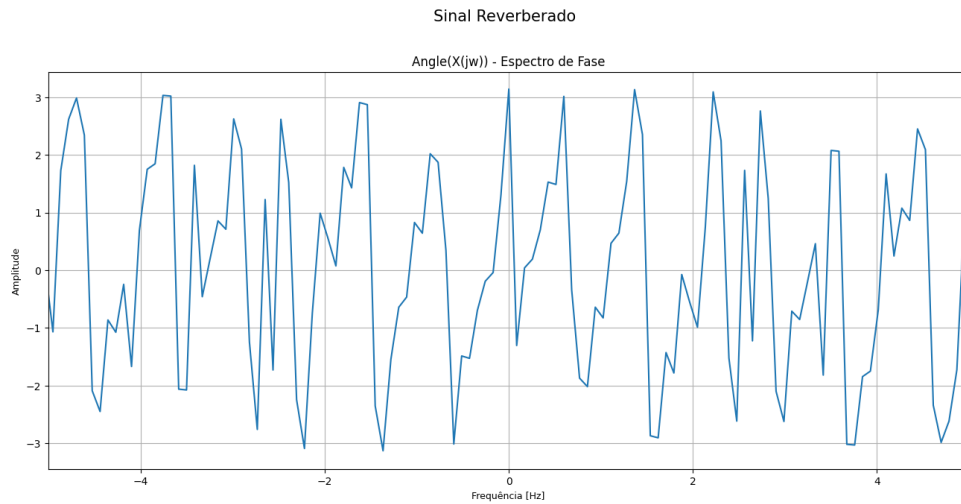


Figura 20: Espectro de fase em resposta ao Sinal.

5 Referências

- [1] Manfred R. Schroeder. «Natural Sounding Artificial Reverberation». Em: *Journal of the Audio Engineering Society* 10.3 (jul. de 1962), pp. 219–223. URL: <http://www.aes.org/e-lib/browse.cfm?elib=849>.
- [2] Pedro Merencio Primo PASSOS et al. «Implementação de efeito de áudio: atraso e reverberação.» Em: (2015).
- [3] *Manfred R. Schroeder*. Jul. de 2021. URL: https://en.wikipedia.org/wiki/Manfred_R._Schroeder.
- [4] *Reverberação*. Nov. de 2022. URL: <https://pt.wikipedia.org/wiki/Reverbera%C3%A7%C3%A3o>.