

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
ESCOLA DE ENGENHARIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA

MATHEUS OLIVEIRA DA SILVA

**Modelagem de Sistemas Não Lineares de Áudio
Através de Espaço de Estados e Filtros Digitais
Wave**

Porto Alegre

2017

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
ESCOLA DE ENGENHARIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA

MATHEUS OLIVEIRA DA SILVA

**Modelagem de Sistemas Não Lineares de Áudio Através
de Espaço de Estados e Filtros Digitais Wave**

Projeto de Diplomação apresentado ao Departamento de Engenharia Elétrica da Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como requisito parcial para Graduação em Engenharia Elétrica

Orientador: Prof. Dr. Adalberto Schuck Jr.

Porto Alegre

2017

MATHEUS OLIVEIRA DA SILVA

Modelagem de Sistemas Não Lineares de Áudio Através de Espaço de Estados e Filtros Digitais Wave

Projeto de Diplomação apresentado ao Departamento de Engenharia Elétrica da Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como requisito parcial para Graduação em Engenharia Elétrica

Prof. Dr. Adalberto Schuck Jr.
Orientador - UFRGS

Prof. Dr. Ály Ferreira Flores Filho
Chefe do Departamento de Engenharia Elétrica (DELET) - UFRGS

Aprovado em 15 de Janeiro de 2018.

BANCA EXAMINADORA

Banca 1
UFRGS

Banca 2
UFRGS

Banca 3
UFRGS

Atualizar
Chefe
do De-
parta-
mento

Atualizar
data
da
apre-
senta-
ção

*Aos que me apoiaram durante minha graduação,
e também aos que duvidaram de minha capacidade,
me dando forças para prová-los errados*

Agradecimientos

tbd

*We live in a society exquisitely dependent on science and technology,
in which hardly anyone knows anything about science and technology.*

Carl Sagan, The Demon-Haunted World

Resumo

Distorções em sistemas de áudio causadas por não linearidades são responsáveis pela sonoridade característica de alguns estilos musicais, por isso é importante seu estudo e compreensão. Estes "defeitos" são originalmente causados por sistemas valvulados analógicos, porém estes são de difícil mobilidade e grandes consumidores de energia. Com o poder computacional disponível atualmente é possível a reprodução destes sistemas analógicos digitalmente de forma ininteligível para o ouvido humano. Assim é atraente a ideia de simular estes com o objetivo de obter sistemas mais portáteis e econômicos.

Palavras-chave: Sistemas não lineares. Filtros Digitais Wave. Espaço de Estados.

Abstract

Keywords:

Lista de Figuras

Figura 1 – Funcionamento interno e símbolo de um resistor no domínio W	15
Figura 2 – Funcionamento interno e símbolo de um capacitor no domínio W . . .	16
Figura 3 – Fonte de tensão com resistor em série a ser modelada	17
Figura 4 – Funcionamento interno e símbolo de uma fonte de tensão com resistência série no domínio W	18
Figura 5 – Fonte de tensão com resistor em série a ser modelada	18
Figura 6 – Funcionamento interno e símbolo de uma fonte de corrente com resis- tência em paralelo no domínio W	19

Lista de Tabelas

Lista de Abreviaturas e Siglas

LIT *Linear Invariante no Tempo*

SNL *Sistema Não Linear*

FDO *Filtro Digital de Onda*

Sumário

1	INTRODUÇÃO	12
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	13
2.1	Filtros Digitais de Onda	13
2.1.1	Condições de realização	13
2.1.2	Transformação bilinear	13
2.1.3	Variáveis de onda	13
2.1.4	Componentes de uma porta no domínio W	14
2.1.4.1	Resistores	14
2.1.4.2	Capacitores	15
2.1.4.3	Fonte de tensão com resistência não nula	16
2.1.4.4	Fonte de corrente com resistência não nula	17
2.1.5	Conexões no domínio W	19
2.1.6	Amplificadores operacionais no domínio W	19
2.1.7	Não linearidades no domínio W	19
2.2	Espaço de Estados	19
3	METODOLOGIA EXPERIMENTAL	20
3.1	Pedais a serem modelados	20
3.2	Modelamento em filtro digital de onda	20
3.3	Código spice do circuito	20
4	RESULTADOS	21
4.1	Resultados circuito 1	21
4.2	Resultados circuito 2	21
5	CONCLUSÕES	22
6	PROPOSTAS DE TRABALHOS FUTUROS	23
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	24
	APÊNDICES	25
	ANEXOS	26

1 Introdução

Sistemas lineares invariantes no tempo (LIT) já foram amplamente estudados por autores conhecidos como Haykin e Veen (2003) e Oppenheim, Willsky e Nawab (1997), tanto são que esses autores já fazem parte da bibliografia básica de disciplinas de graduação. O grande atrativo para o estudo de sistemas LIT é a simplicidade com que se pode obter a saída esperada para uma entrada tendo a resposta impulsiva do sistema, já que as únicas alterações causadas por sistemas LTI são na fase e amplitude do sinal de entrada.

Sistemas não lineares (SNL) por outro lado, apresentam saídas mais complexas pois adicionam à saída do sinal componentes com frequências múltiplas às do sinal de entrada, que são conhecidas como harmônicas. De acordo com Zölzer e Amatriain (2002) efeitos não lineares são usados por músicos em diversos dispositivos como microfones amplificadores e sintetizadores.

O princípio do uso de SNLs para áudio foi com a construção de amplificadores baseados em válvulas termiônicas a partir da década de 1950 como indicado por Ferreira (2016). O problema destes componentes é seu peso e consumo de energia, assim foi natural sua substituição por componentes semicondutores mais leves, baratos e confiáveis, porém até hoje as distorções geradas por válvulas são vistas como superiores às geradas por semicondutores por audiófilos, um estudo sobre estas diferenças foi feito por Hamm (1973). Para tentar emular o som gerado por estas válvulas termiônicas em sistemas semicondutores passou a ser comum a construção de pedais de efeitos que são ligados em série com o sistemas de áudio, tendo esses a vantagem de serem mais baratos e de mais fácil transporte. O próximo passo nessa evolução é o uso de sistemas digitais para a modelagem dessas não linearidades com o objetivo de facilitar ainda mais o uso dessa tecnologia, essa enfim será a proposta deste trabalho.

Para o modelamento de SNLs são comuns 3 diferentes abordagens: modelamento de caixa branca, onde se tem total conhecimento do circuito sendo modelado; caixa cinza, onde se usa algum conhecimento do circuito para a modelagem; e caixa preta, onde não é utilizado nenhuma característica do circuito para a modelagem. Eichas, Möller e Zölzer (2015) propõem um modelo de caixa preta onde um ruído branco é injetado no SNL a ser modelado e a saída deste é comparada com a de um sistema paramétrico que é adaptado de maneira a minimizar o erro quadrático entre ambas.

2 Fundamentação Teórica

2.1 Filtros Digitais de Onda

2.1.1 Condições de realização

2.1.2 Transformação bilinear

$$s = \frac{1}{2.f_s} \cdot \frac{z - 1}{z + 1} \quad (2.1)$$

2.1.3 Variáveis de onda

Usando as equações de Kirchhoff componentes são descritos de acordo com sua resistência (ou impedância), a tensão entre seus terminais e a corrente que atravessa o mesmo, e a relação entre essas grandezas é dada pela lei de Ohm conforme indicado na Equação 2.2 e a descrição de um componente qualquer mostrada na Figura .

$$V = R.I \quad (2.2)$$

Deste ponto em diante neste trabalho, essas grandezas serão definidas como parte do domínio K (de acordo com as leis de Kirchhoff).

(FETTWEIS, 1986) Dentro da teoria de FDO é definido um novo domínio denominado W (do inglês Wave) onde componentes e suas conexões são definidos de acordo com ondas incidentes e refletidas de suas portas e pela resistência dessas portas. As variáveis de corrente e tensão do domínio K são mapeadas como onda de tensão incidente A e onda refletida B no domínio W conforme indicado pelas transformações lineares nas Equações 2.3 e 2.4, e a descrição de um componente qualquer no domínio W é indicada na Figura .

$$A = V + I.R_p \quad (2.3)$$

$$B = V - I.R_p \quad (2.4)$$

Sendo R_p a resistência da porta como será descrito na próxima seção.

Levando em consideração as variáveis de onda definidas nas Equações 2.3 e 2.4, é possível obter novamente os valores de tensão e corrente do domínio K a partir dos valores do domínio W de acordo com as Equações 2.5 e 2.6.

Adicionar
figura
de-
mons-
trando
como
fun-
ciona
um
com-
po-
nente
no do-
mínio
K

Adicionar
figura
mos-
trando
com-
po-
nente
no do-
mínio
W

$$V = \frac{A + B}{2} \quad (2.5)$$

$$I = \frac{A - B}{2.R_p} \quad (2.6)$$

Também é possível definir as variáveis onda levando em consideração ondas de corrente ou potência, porém este trabalho não fará essas definições já que de maneira geral a bibliografia encontrada costuma considerar apenas ondas de tensão. Caso o leitor deseje uma referência às definições de outros tipos de onda no domínio W é indicado o trabalho de Kubin (1985).

2.1.4 Componentes de uma porta no domínio W

Neste capítulo será definida a descrição no domínio W para resistores, capacitores, fontes de tensão com resistência em série e fontes de corrente com resistência em série, pois estes são os componentes relevantes para este trabalho. Essas formulações, e outras para componentes passivos de duas portas, são definidos em Yeh e Smith (2008) e um guia bastante didático para a obtenção destes valores é dado em Bogason (2017).

2.1.4.1 Resistores

Resistores são definidos no domínio K conforme indicado pela Equação 2.7

$$Z_r = \frac{V}{I} \quad (2.7)$$

Utilizando-se das relações entre tensão, corrente e as variáveis de onda do domínio W definidas nas Equações 2.5 e 2.6, pode-se obter os valores para A e B conforme indicado nas Equações 2.8 e 2.9.

$$Z_r = \frac{\frac{A+B}{2}}{\frac{A-B}{2.R_p}} \quad (2.8)$$

$$B = \frac{Z_r - R_p}{Z_r + R_p} . A \quad (2.9)$$

A Equação 2.9 pode ser escrita no domínio do tempo conforme a Equação 2.10

$$b[n] = \frac{Z_r - R_p}{Z_r + R_p} . a[n] \quad (2.10)$$

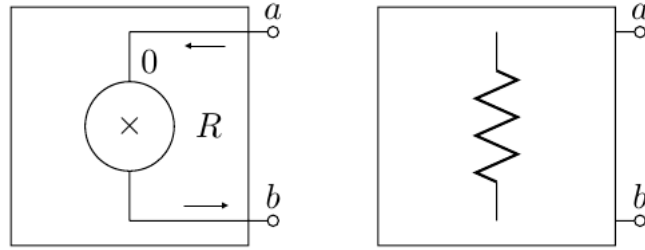
De acordo com a Equação 2.10 a onda refletida de um resistor no domínio W B é relacionada instantaneamente à onda incidente A por um fator $\frac{Z_r - R_p}{Z_r + R_p}$, é desejável que essa relação direta não exista de maneira a facilitar que a condição 1 de realização de filtros

digitais, conforme indicado na Seção 2.1.1, seja satisfeita, para isso se define a resistência de entrada R_p no domínio W como sendo igual a resistência Z_r do domínio K. Desta maneira um resistor é completamente definido no domínio W pelas Equações 2.11 e 2.12 e a Figura ?? mostra o funcionamento interno deste componente e seu símbolo.

$$B = 0 \quad (2.11)$$

$$R_p = Z_r \quad (2.12)$$

Figura 1 – Funcionamento interno e símbolo de um resistor no domínio W



Fonte: Modificado de (BOGASON, 2017)

É importante ressaltar que, mesmo não tendo nenhuma onda refletida, os resistores ainda afetam o comportamento dos circuitos ao alterar o coeficiente de reflexão de conexões série e paralelo com a resistência de sua porta de entrada conforme será mostrado na Seção 2.1.5.

2.1.4.2 Capacitores

Capacitores são definidos no domínio K em frequência conforme indicado na Equação

$$Z_c = \frac{1}{s.C} = \frac{V}{I} \quad (2.13)$$

Novamente utilizando-se das relações indicadas nas Equações 2.5 e 2.6 obtêm-se as relações para o domínio W conforme indicado nas Equações 2.14 e 2.15.

$$\frac{1}{s.C} = \frac{\frac{A+B}{2}}{\frac{A-B}{2.R_p}} \quad (2.14)$$

$$B = \frac{1 - s.C.R_p}{1 + s.C.R_p}.A \quad (2.15)$$

Utilizando a transformação bilinear dada na Equação 2.1 para digitalizar a Equação 2.15 tem-se as Equações 2.16 e 2.17

$$B = \frac{1 - \frac{1}{2.f_s} \cdot \frac{z-1}{z+1} \cdot C.R_p}{1 + \frac{1}{2.f_s} \cdot \frac{z-1}{z+1} \cdot C.R_p} \cdot A \quad (2.16)$$

$$B = \frac{(1 - 2.f_s.C.R_p) + (1 + 2.f_s.C.R_p).z^{-1}}{(1 + 2.f_s.C.R_p) + (1 - 2.f_s.C.R_p).z^{-1}} \cdot A \quad (2.17)$$

E finalmente, essa relação entre as ondas A e B pode ser descrita no domínio tempo conforme a Equação 2.18

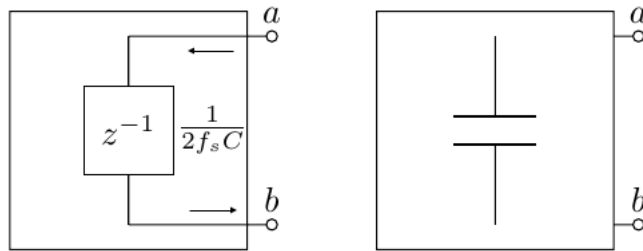
$$b[n] = \frac{((1 - 2.f_s.C.R_p).a[n] + (1 + 2.f_s.C.R_p).a[n - 1] - (1 - 2.f_s.C.R_p).b[n - 1])}{1 + 2.f_s.C.R_p} \quad (2.18)$$

Percebe-se pela Equação 2.18 que a onda refletida em um capacitor é relacionada instantaneamente à onda incidente por um fator $\frac{1-2.f_s.C.R_p}{1+2.f_s.C.R_p}$. Afim de anular essa reflexão instantânea se define a resistência R_p como sendo $\frac{1}{2.f_s.C}$. Assim um capacitor pode ser definido no domínio W conforme indicado nas Equações 2.19 e 2.20 e na Figura ?? e mostrado o funcionamento interno e o símbolo utilizado para capacitores no domínio W.

$$B = z^{-1} \cdot A \quad (2.19)$$

$$R_p = \frac{1}{2.f_s.C} \quad (2.20)$$

Figura 2 – Funcionamento interno e símbolo de um capacitor no domínio W



Fonte: Modificado de (BOGASON, 2017)

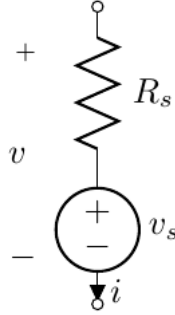
2.1.4.3 Fonte de tensão com resistência não nula

(YEH; SMITH, 2008) Fontes de tensão isolada tem, invariavelmente, uma relação instantânea entre onda incidente e onda refletida, para evitar esse efeito indesejado, é comum na literatura agrupar fontes de tensão com resistores em série conforme o circuito

da Figura ???. Esse circuito pode ser modelado no domínio K conforme o indicado na Equação 2.21.

$$V = V_s + R_s \cdot I \quad (2.21)$$

Figura 3 – Fonte de tensão com resistor em série a ser modelada



Fonte: Modificado de (BOGASON, 2017)

Utilizando-se das transformações lineares indicadas nas Equações 2.5 e 2.6 e resolvendo as equações de maneira similar à feita anteriormente para resistores e capacitores tem-se que a onde refletida para esse circuito é dada pela Equação

$$B = 2 \cdot \frac{R_p \cdot V_s}{R_p + R_s} - A \cdot \frac{R_p - R_s}{R_p + R_s} \quad (2.22)$$

Pode-se então definir $R_p = R_s$ de maneira a simplificar a equação e evitar a relação instantânea entre onde incidente e onda refletida. Então, uma fonte de tensão em série com um resistor pode ser descrita no domínio W conforme as Equações 2.23 e 2.24 e a Figura ?? mostra seu funcionamento e o símbolo utilizado para esse componente.

$$B = V_s \quad (2.23)$$

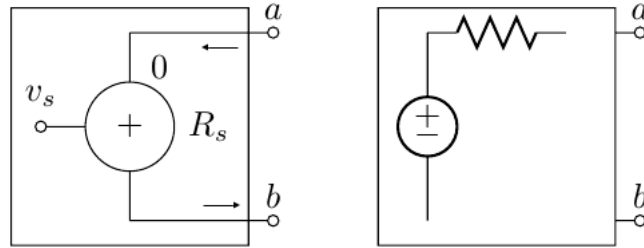
$$R_p = R_s \quad (2.24)$$

2.1.4.4 Fonte de corrente com resistência não nula

Assim como acontece para fontes de tensão, fontes de correntes independentes tem uma relação instantânea entre onda incidente e onda refletida. Por isso é interessante o uso de fontes de corrente em paralelo com resistores, conforme o circuito da Figura ???. As relações entre as grandezas no domínio K para esse circuito são dadas na Equação ??:

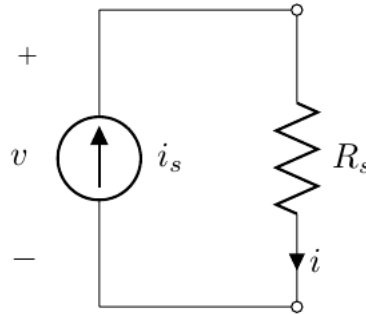
$$V = (I + I_s) \cdot R_s \quad (2.25)$$

Figura 4 – Funcionamento interno e símbolo de uma fonte de tensão com resistência série no domínio W



Fonte: Modificado de (BOGASON, 2017)

Figura 5 – Fonte de tensão com resistor em série a ser modelada



Fonte: Modificado de (BOGASON, 2017)

Novamente se utilizando das relações nas Equações 2.5 e 2.6 tem-se a relação entre onda incidente e onda refletida indicada na Equação 2.26 :

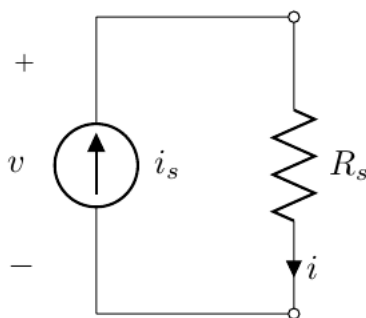
$$B = 2.I_s \cdot \frac{R_p \cdot R_s}{R_p + R_s} - a \cdot \frac{R_p - R_s}{R_p + R_s} \quad (2.26)$$

Novamente, para evitar uma relação instantânea entre onda incidente e onda refletida se define $R_p = R_s$ de maneira que essa fonte de corrente pode ser descrita no domínio W conforme as Equações 2.27 e 2.28 e na Figura ?? é mostrado seu funcionamento e o símbolo que será usado para este componente no domínio W.

$$B = I_s \cdot R_s \quad (2.27)$$

$$R_p = R_s \quad (2.28)$$

Figura 6 – Funcionamento interno e símbolo de uma fonte de corrente com resistência em paralelo no domínio W



Fonte: Modificado de (BOGASON, 2017)

2.1.5 Conexões no domínio W

2.1.6 Amplificadores operacionais no domínio W

2.1.7 Não linearidades no domínio W

2.2 Espaço de Estados

3 Metodologia Experimental

- 3.1 Pedais a serem modelados
- 3.2 Modelamento em filtro digital de onda
- 3.3 Código spice do circuito

4 Resultados

4.1 Resultados circuito 1

4.2 Resultados circuito 2

5 Conclusões

6 Propostas de Trabalhos Futuros

Referências Bibliográficas

BOGASON, O. *Wave Digital Notebook*. 2017. Disponível em: <https://github.com/multivac61/wave_digital_notebook/blob/master/WDFs_in_circuit_emulation.ipynb>. Citado 6 vezes nas páginas 14, 15, 16, 17, 18 e 19.

EICHAS, F.; MÖLLER, S.; ZÖLZER, U. Block-oriented modeling of distortion audio effects using iterative minimization. *Proc. Digital Audio Effects (DAFx-15)*, Trondheim, Norway, 2015. Citado na página 12.

FERREIRA, F. K. *Modelagem de sistemas de áudio não lineares a partir do método da varredura senoidal*. 2016. Citado na página 12.

FETTWEIS, A. Wave digital filters: Theory and practice. v. 74, p. 270 – 327, 03 1986. Citado na página 13.

HAMM, R. O. Tubes versus transistors-is there an audible difference. *Journal of the audio engineering society*, Audio Engineering Society, v. 21, n. 4, p. 267–273, 1973. Citado na página 12.

HAYKIN, S. S.; VEEN, B. V. *Signals and systems*. 2nd ed. ed. New York: Wiley, 2003. ISBN 0471164747 (cloth : alk. paper). Disponível em: <<http://www.loc.gov/catdir/description/wiley0310/2002027040.html>>. Citado na página 12.

KUBIN, G. Wave digital filters: Voltage, current, or power waves? In: *ICASSP '85. IEEE International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing*. [S.l.: s.n.], 1985. v. 10, p. 69–72. Citado na página 14.

OPPENHEIM, A.; WILLSKY, A.; NAWAB, S. *Signals and Systems*. Prentice Hall, 1997. (Prentice-Hall signal processing series). ISBN 9780138147570. Disponível em: <<https://books.google.com.br/books?id=LwQqAQAAAMAJ>>. Citado na página 12.

YEH, D.; SMITH, J. Simulating guitar distortion circuits using wave digital and nonlinear state-space formulations. 09 2008. Citado 2 vezes nas páginas 14 e 16.

ZÖLZER, U.; AMATRIAIN, X. *DAFX: digital audio effects*. Chichester: Wiley, 2002. ISBN 0471490784. Disponível em: <<http://www.loc.gov/catdir/description/wiley036/2002280336.html>>. Citado na página 12.

Apêndices

Anexos