

Identificação Caixa-Cinza de Modelo de Wiener-Hammerstein para Pedal de Distorção

Humberto Neto * Samaherni Dias * Kurios Queiroz *

* *Laboratório de Automação, Controle e Instrumentação (LACI), UFRN, Natal, RN, Brasil, (<https://laci.ufrn.br>)*

Abstract: The advancement of electronics allowed the development of several types of audio effects, mostly applied to musical instruments. One of these effects is distortion, which shaped the sound of electric guitar. Equipments that provided such effects became more robust and compact, combined with a greater diversity of tones. The digital electronics made possible equipments that have these effects, called multi-effect pedals, and unities that can model effects. One of the challenges in the development of these equipments is to truly replicate famous distortion tones. For that purpose, it is possible to model the desired effect through full knowledge of its electronic circuit or through modeling based on the identification of the system in question. This work proposes the digital modeling of the distortion pedal BOSS Blues Driver based on the identification of the used parametric model. The used model is based on a Wiener-Hammerstein and its parameters were optimized by a genetic algorithm. The results of the simulations were evaluated by time-error calculus and a blind hearing test with 30 people.

Resumo: O avanço da eletrônica permitiu o desenvolvimento de vários tipos de efeitos de áudio, sobretudo aplicados à instrumentos musicais. Um desses efeitos é a distorção, que moldou o som da guitarra elétrica. Equipamentos que forneciam tal efeito foram se tornando mais robustos e compactos, aliados a uma maior diversidade de timbres. A eletrônica digital possibilitou equipamentos que contêm estes efeitos, chamados de pedais multi-efeitos, e unidades que podem modelar efeitos. Um dos desafios no desenvolvimento destes equipamentos é replicar com fidelidade o som de distorções famosas. Para tal objetivo, pode-se modelar o efeito desejado através do conhecimento total do seu circuito eletrônico ou através da modelagem a partir da identificação do sistema em questão. Este trabalho propõe a modelagem digital do pedal de distorção BOSS Blues Driver a partir da identificação do modelo paramétrico utilizado. O modelo utilizado é baseado em um modelo de Wiener-Hammerstein e seus parâmetros foram otimizados por um algoritmo genético. Os resultados das simulações foram avaliados pelo cálculo de erro no tempo e por um teste auditivo cego envolvendo 30 pessoas.

Keywords: System identification; Non-Linear systems; Audio; Signal processing; Distortion pedals.

Palavras-chaves: Identificação de sistemas; Sistemas não-lineares; Áudio; Processamento de sinais; Pedais de distorção.

1. INTRODUÇÃO

Os primeiros efeitos de distorção voltados para guitarras elétricas foram concebidos por acidente por volta da década de 50. A sonoridade saturada era obtida ao colocar o volume dos amplificadores em níveis muito altos ou danificando acidentalmente a integridade física do aparelho, principalmente quando os amplificadores utilizados eram os valvulados. Os sons, para a época, soaram bastante revolucionários, e muitos músicos buscavam replicar os timbres saturados. Somente na metade da década de 60 que os primeiros pedais de distorção começaram a ser comercializados, ao mesmo tempo em que as fabricantes de amplificadores desenvolviam novos métodos de atingir um som saturado e empresas de desenvolvimento de pedais de efeitos surgiam (Herbst, 2017).

Com o avanço da eletrônica, maiores possibilidades de distorção foram alcançadas em circuitos cada vez mais

compactos. Com a eletrônica digital e o avanço dos micro-controladores, passa-se a adotar técnicas de processamento digital de sinais para não só criar novos timbres de distorção como também replicar distorções já consagradas em contextos digitais, como pedais multi-efeitos e *softwares* voltados para timbres de guitarra.

Em geral, a réplica dos efeitos de distorção pode ser feita de duas formas:

- Modelagem do sistema digital a partir do esquema do circuito do amplificador ou pedal de distorção;
- Modelagem do sistema digital a partir da identificação do sistema real.

As técnicas de identificação de sistemas aplicadas ao processamento de áudio vêm tendo boa aplicação comercial, até mesmo com músicos mais consagrados, que visam soluções mais práticas ao transporte dos seus grandes amplificadores para realização de shows e gravações. Um

dos exemplos é o *Kemper Profiler*, que consegue modelar de maneira fiel qualquer amplificador e qualquer pedal de distorção.

Uma das formas de representar sistemas não-lineares, como circuitos eletrônicos com saturação, é através de modelos de blocos interconectados. Estes modelos são compostos de uma parte dinâmica linear e uma parte estática não linear, conforme de Paulo (2016). Essas partes podem ser combinadas de formas distintas, onde alguns dos modelos mais conhecidos são os modelos de Hammersstein, Wiener, e Wiener-Hammerstein. Os blocos possuem variáveis atribuídas aos modelos, que, em um processo de identificação, são parâmetros a serem otimizados. No modelo de Wiener-Hammerstein, têm-se dois blocos dinâmicos lineares e invariantes no tempo e, entre eles, o bloco não linear estático, conforme Schoukens and Tiels (2016).

Segundo Thede (2004), um Algoritmo Genético busca um espaço de solução para a solução ótima de um problema. Essa busca ocorre de uma maneira que imita a operação de evolução: uma população de possíveis soluções é formada, e então novas soluções são formadas cruzando as melhores soluções dos membros da população para formar uma nova geração. Algoritmos genéticos são úteis para problemas onde é difícil ou impossível obter soluções exatas, como em sistemas não-lineares descritos por modelos que possuem parâmetros a serem otimizados. Além disso, são algoritmos altamente customizáveis.

Em Yeh et al. (2007) e Batista and Silva (2015), é feita a modelagem simplificada de pedais de distorção a partir de informações físicas. Neste caso, é necessário o entendimento do circuito eletrônico de tais pedais. A abordagem garante resultados bastante precisos, mas a necessidade de informações sobre o circuito mostra-se um agente dificultador.

Em Eichas and Zölzer (2016), é feita a modelagem caixa-preta de três diferentes circuitos de distorção através da aplicação de um bloco linear (filtro) e um bloco não-linear, que é representado por funções de mapeamento paramétricas. Para a modelagem da parte linear, foi utilizado uma varredura de frequência senoidal de baixa amplitude. Utiliza-se a técnica de convolução com um filtro inverso, o que resulta na resposta ao impulso do sistema. Para a otimização paramétrica do bloco não-linear, o algoritmo Levenberg-Marquadt é utilizado. A abordagem fornece um modelo bastante generalizado, porém o custo disso é a grande quantidade de parâmetros a serem otimizados.

Em Schuck Jr et al. (2019), é desenvolvida uma função paramétrica de transferência não-linear com base na análise de circuitos típicos de pedais de distorção. Os parâmetros são otimizados através de um algoritmo de Levenberg-Marquadt. Esta abordagem "semiuniversal" garante bons resultados principalmente para pontos de partida, mas podem não descrever com muita precisão algumas características físicas de circuito.

O objetivo deste trabalho consiste em aplicar técnicas de identificação de sistemas a fim de realizar a modelagem digital de um efeito de distorção real, mais precisamente, do timbre do pedal *BOSS Blues Driver*. O pedal em questão fornece a distorção do tipo *overdrive* e possui controles de ganho (*gain*), amplitude da saída (*level*) e tom (*tone*). O

resultado deste trabalho é uma série de parâmetros, baseados em um modelo de Wiener-Hammerstein e otimizados por um algoritmo genético, que podem ser utilizados para processamento *offline* em ambientes de programação.

Este trabalho está organizado da seguinte forma: a seção 2 apresenta o identificador proposto; a seção 3 descreve como o identificador proposto será aplicado em dois cenários distintos; já na seção 4, os resultados da aplicação dos parâmetros obtidos pelo identificador serão apresentados e discutidos; por fim, na seção 5, as conclusões do trabalho são listadas.

2. IDENTIFICADOR PROPOSTO

A arquitetura do identificador proposto neste trabalho, tem o objetivo de ajustar os parâmetros de um modelo não linear para que este possa reproduzir a dinâmica de um pedal de distorção. Para tanto, serão utilizados o modelo não linear Wiener-Hammerstein (WH) associado a um algoritmo de otimização global, o Algoritmo Genético (AG).

Segundo o relatório da Systems (2013), o paradigma fundamental dos tons de guitarras elétricas é definido como uma distorção entre dois filtros. A função do primeiro filtro é definir qual faixa de frequência sofrerá mais efeito da distorção, enquanto o segundo filtro é responsável por definir a tonalidade final do som.

Dessa forma, pode-se considerar o Wiener-Hammerstein (Ver Figura 1) adequado para esta aplicação, pois o mesmo se trata de uma função não linear estática entre duas funções lineares invariantes no tempo (*Linear Time-Invariant - LTI*), onde as funções LTI serão consideradas os filtros e a função não-linear a distorção.

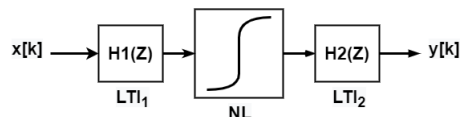


Figura 1. Diagrama de bloco do modelo Wiener-Hammerstein.

Segundo Batista and Silva (2015), o primeiro bloco (H1) do modelo Wiener-Hammerstein (Figura 1) deve ser ajustado para um filtro *shelving* passa-faixas (ver Figura 2). Sua implementação é feita filtrando o sinal de entrada com um filtro passa-faixas de frequências de corte f_{c1} e f_{c2} e somando o sinal original com o sinal filtrado escalonado por um ganho g_{bp} , conforme a Figura 2.

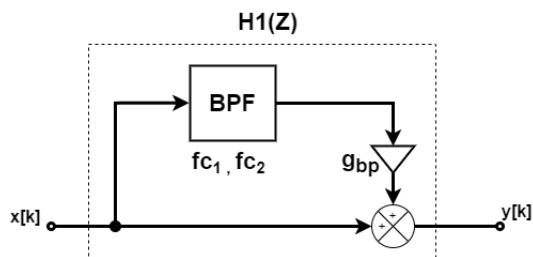


Figura 2. Diagrama de Blocos do filtro *shelving* passa-faixas.

O segundo bloco (ver Figura 3) do modelo Wiener-Hammerstein (Figura 1), utilizando uma função não linear adaptada do trabalho de Eichas et al. (2015), deve ser ajustado para

$$y[k] = f(x[k]) = g_{pre} \cdot (a \tanh(bx[k])) \cdot g_{post}, \quad (1)$$

em que $x[k]$ é o sinal de entrada e g_{pre} , g_{post} são ganhos.

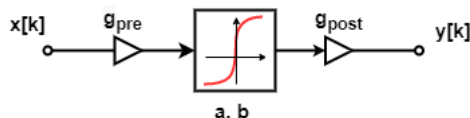


Figura 3. Diagrama de Blocos da função não-linear.

O terceiro bloco do modelo Wiener-Hammerstein (Figura 1), deve ser ajustado para um filtro passa-baixas, com frequência de corte f_{c3} , seguido de um filtro passa-altas, com frequência de corte f_{c4} , conforme a Figura 4.

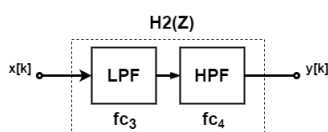


Figura 4. Diagrama de Blocos do filtro passa-baixas.

Dessa forma, os parâmetros a serem otimizados no identificador proposto serão f_{c1} , f_{c2} , f_{c3} , f_{c4} , g_{bp} , g_{pre} , g_{post} , a e b . Todos os filtros dos blocos lineares (1 e 3) são *Finite Impulse Response* (FIR) com ordem 6 baseados em janelas de Hamming.

A função não-linear utilizada no mapeamento (1) é a tangente hiperbólica, com a qual se é possível alcançar o efeito desejado de saturação das distorções. Na Figura 5, tem-se em detalhes a reposta da tangente hiperbólica de acordo com os ajustes dos parâmetros a e b .

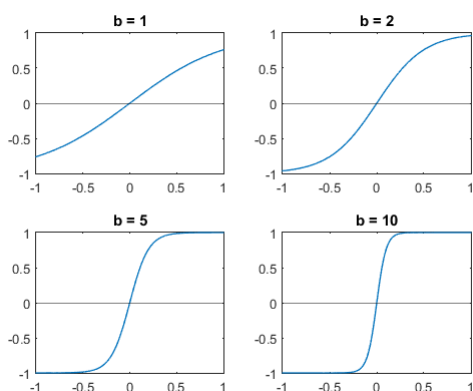


Figura 5. Curva característica da tangente hiperbólica para diferentes valores de b e $a = 1$

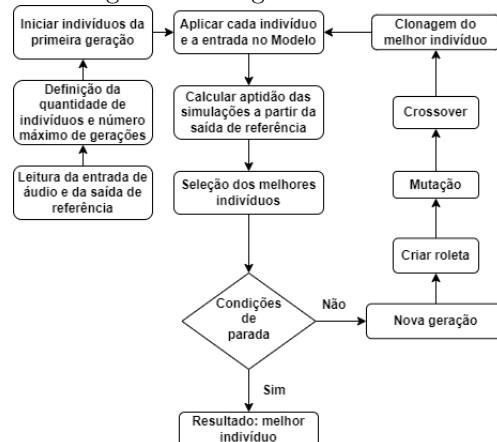
Como pode ser observado na Figura 5, o parâmetro a expressa a amplitude da saída da tangente hiperbólica, enquanto o parâmetro b influencia diretamente o ajuste da curva de saturação.

2.1 Algoritmo genético

Para minimizar o erro entre a resposta do modelo Wiener-Hammerstein simulado e o áudio resultante do efeito

de distorção, neste trabalho será utilizada a técnica de algoritmo genético (AG) com fluxograma detalhado na Figura 6.

Figura 6. Fluxograma do Algoritmo Genético.



O objetivo do AG é ajustar os parâmetros do modelo Wiener-Hammerstein adequadamente, de tal forma, que o modelo consiga reproduzir a dinâmica do pedal de distorção. Desta forma, o algoritmo utiliza como sinal de entrada o mesmo sinal aplicado ao pedal. Além do sinal de entrada, o AG para ajustar os parâmetros do modelo, também faz uso do sinal de saída do pedal de distorção.

Assim, para o caso da distorção do som de uma guitarra, o sinal de entrada é o som da guitarra sem o efeito de distorção, enquanto a saída de referência é o som da guitarra com o efeito. Os indivíduos deste AG são definidos pelo cromossomo $[g_{pre} \ g_{post} \ a \ b \ f_{c1} \ f_{c2} \ f_{c3} \ f_{c4} \ g_{bp}]$.

Para o AG, define-se a função de custo como uma combinação ponderada dos erros no tempo e na frequência. O erro no tempo e_t foi calculado pelo RMSE (*Root Mean Square Error*)

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}, \quad (2)$$

sendo n a quantidade de amostras no sinal, y_i o sinal original e \hat{y}_i o sinal simulado.

O erro na frequência e_f foi definido como

$$e_f = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (Y_i(z) - \hat{Y}_i(z))^2, \quad (3)$$

sendo n a quantidade de amostras no sinal, $Y_i(z)$ a Transformada rápida de Fourier (*Fast Fourier Transform* - FFT) do sinal de saída original e $\hat{Y}_i(z)$ a FFT do sinal de saída simulado.

O método utilizado para seleção de indivíduos é o Método da Roleta. Neste método, define-se os melhores indivíduos de uma geração através de um sorteio de roleta. Os indivíduos são representados proporcionalmente aos seus índices de aptidão. Por fim, gira-se a roleta até que a próxima geração seja toda preenchida.

Finalmente, define-se o algoritmo de mutação como o valor atual de um certo indivíduo somado a um valor aleatório entre $\pm 10\%$ do máximo da faixa de valores iniciais desse mesmo indivíduo.

3. APLICAÇÃO DO IDENTIFICADOR PROPOSTO

Esta seção apresenta a aplicação do identificador proposto em dois cenários. O primeiro cenário é a identificação de um pedal de distorção simulado por um banco de dados profissional e o segundo cenário é a identificação de um pedal de distorção real. É importante destacar que foram realizados cortes, como remoção de silêncio, e sincronização nas faixas de áudio a serem processadas para garantir a identificação de forma correta e ambos os cenários representam áudios diferentes.

3.1 Dados entrada/saída gerados por software profissional

Os dados do pedal de distorção simulado foram obtidos do software TonePedia¹. Nele é possível testar diversos pedais de efeitos para guitarra provenientes de um banco de dados de gravações reais. O efeito escolhido, distorção *Boss Blues Driver*, foi configurado para aproximadamente 49% de ganho, 44% de nível e 0% de tom.

3.2 Dados entrada/saída gerados por sistema real

Os dados do pedal de distorção real foram obtido através de gravação em estúdio, onde foram gravados, ao mesmo tempo, o som da guitarra com e sem o efeito *Blues Driver* contido no pedal multiefeitos BOSS GT-1. A configuração de gravação encontra-se descrita na Figura 7.

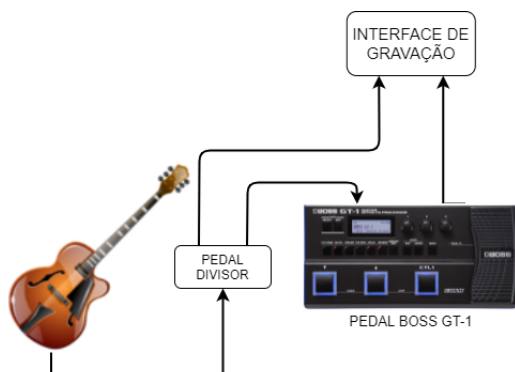


Figura 7. Configuração de gravação.

No pedal multiefeitos BOSS GT-1, o efeito *Blues Driver* foi configurado conforme a figura 8. Além disso, neste pedal, o controle de tom é dividido em duas faixas. Para ambas as faixas, o seletor de configuração foi deixado em posição neutra (valor zero).

Figura 8. Configuração do efeito no pedal multiefeitos BOSS GT-1.



¹ <https://www.tonepedia.com/>

3.3 Configuração do identificador proposto

Os parâmetros de execução do Algoritmo Genético para estimar o modelo do *Blues Driver* provenientes do software profissional (TonePedia) e do pedal real estão expressos na Tabela 1.

Tabela 1. Parâmetros de execução do Algoritmo Genético.

Simulação	Fonte de dados	Indivíduos	Gerações	Taxa de Mutação
G1BD1	Software	40	200	5%
G1BD2	Software	40	200	7%
G1BD3	Software	25	100	7%
G2BD1	Pedal real	40	200	8%
G2BD2	Pedal real	30	150	8%
G2BD3	Pedal real	25	100	8%

Com base em experiências anteriores de criação de efeitos digitais de distorção, uma faixa inicial de valores aleatórios para os parâmetros a serem otimizados é definida em:

- g_{pre} : a fim de não pegar faixas que não excitam pouco a saturação ou que saturem demais o som, a faixa é definida de 1 a 10.
- g_{post} : como os valores digitais absolutos de áudio são, no máximo, 1, a faixa é definida de 0,2 a 1;
- a : mesmas faixa e lógica do item anterior;
- b : mesmas faixa e lógica de g_{pre} ;
- f_{c1} : para a primeira frequência de corte do filtro passa-faixas, a faixa de valores é definida entre 60 Hz e 200 Hz, a fim de não pegar baixíssimas frequências e nem distanciar o filtro das frequências médio-graves.
- f_{c2} : a segunda frequência de corte do filtro passa-faixas deve ser maior que f_{c1} , e, a fim de permitir uma boa faixa de frequência e liberdade pro algoritmo, possui a faixa de valores de 500 Hz a 3 kHz;
- f_{c3} : para não estipular valores baixos de frequência, a faixa de valores é definida de 1 kHz a 5 kHz;
- f_{c4} : para não estipular valores altos de frequência, a faixa de valores é definida de 30 Hz a 200 Hz;
- g_{bp} : a fim de garantir um bom ganho a faixa de frequência, os valores estão entre 1 e 15.

Por fim, para os testes realizados, as condições de parada foram estagnação do melhor indivíduo por 50 gerações ou alcance do número máximo de gerações. O número de indivíduos e de gerações e a taxa de mutação variou em cada teste feito. Também houve mudanças na função de custo em cada um dos testes.

4. RESULTADOS

Após a execução do identificador proposto de acordo com cada um dos cenários da Tabela 1, os parâmetros para o modelo Wiener-Hammerstein estão expressos nas Tabelas 2 e 3.

Em todas as seis simulações escolhidas, utilizou-se como função de custo apenas o Erro em Frequência (3), tendo em vista que esta análise desconsidera possíveis erros de sincronia, sobretudo para os dados entrada/saída gerados por sistema real.

Para a análise dos resultados obtidos pelo identificador proposto, foram utilizadas duas métricas, uma objetiva e

uma outra subjetiva. A métrica objetiva utiliza as equações (2) e (3) como ponderadores de qualidade. Já a métrica subjetiva apresenta resultados de um teste cego entre indivíduos não-praticantes e praticantes de guitarra.

4.1 Métricas Objetivas

Os valores de erro entre as simulações e a referência (áudio do efeito real) estão expressos conforme a Tabela 4.

Através dessas métricas objetivas, é possível apontar a simulação com menores índices de erro em relação ao áudio real. A simulação com menor erro em tempo e em frequência para o pedal do software profissional é o G1BD3 (ver Figuras 9 e 10). Já para o pedal real, é o G2BD1 (ver Figuras 11 e 12).

4.2 Métricas Subjetivas

Como as métricas objetivas nem sempre representam a percepção auditiva humana às diferenças no som, uma avaliação mais subjetiva, como um teste cego, fez-se necessário.

O teste foi conduzido através de um formulário online, onde os três sons com efeito simulado e o som obtido do pedal do *software* profissional e do pedal real foram dispostos em duas pastas, uma para cada pedal de distorção. Na primeira parte do teste, os participantes têm a informação de que um ou mais efeitos em cada pasta são simulados e um ou mais efeitos em cada pasta são reais. Com isso, devem avaliar cada uma das oito faixas de áudio em “Real” ou “Simulado”.

Após essa etapa, os efeitos reais são revelados e os 30 participantes então têm que, para cada grupo, definir qual

Tabela 2. Resultados da execução do Algoritmo Genético - Ganhos.

Simulação	g_{pre}	g_{post}	a	b	g_{b_p}
G1BD1	6,9265	0,4585	0,5883	0,2845	2,0691
G1BD2	1,7755	0,2881	0,8814	1,2334	2,1133
G1BD3	9,2667	0,6037	0,3994	1,0513	-0,3120
G2BD1	4,1017	0,3624	0,3645	2,8777	1,6926
G2BD2	1,4155	0,2777	0,6585	6,6427	1,5998
G2BD3	3,4708	0,2106	0,7108	4,0508	6,2294

Tabela 3. Resultados da execução do Algoritmo Genético - Frequências de corte.

Simulação	f_{c1}	f_{c2}	f_{c3}	f_{c4}
G1BD1	71	529	4724	156
G1BD2	130	571	4810	50
G1BD3	82	2189	1817	63
G2BD1	187	3262	4141	151
G2BD2	111	3276	4200	105
G2BD3	171	1597	1022	169

Tabela 4. Erros no tempo e na frequência dos resultados obtidos.

Simulação	e_t	e_f
G1BD1	0,1962	738,7649
G1BD2	0,1974	751,8046
G1BD3	0,1915	710,7787
G2BD1	0,1365	2134,0465
G2BD2	0,1665	3340,7735
G2BD3	0,1638	3236,0727

dos três efeitos simulados mais se assimila ao efeito real e atribuir uma nota de zero a dez para a semelhança sonora entre o áudio escolhido e o real.

O número de escolhas de cada efeito como mais semelhante e a nota atribuída encontram-se nas Tabelas 5 e 6, bem como um coeficiente de escolha e o *score* final. O coeficiente é o resultado da divisão do número de escolhas por 15 e o *score* é a multiplicação do coeficiente de escolha pela nota de semelhança.

Tabela 5. Resultados do teste cego - 15 Não-praticantes de guitarra.

Simulação	Escolhas	Semelhança	Coeficiente	Score
G1BD1	2	8,50	0,13	1,13
G1BD2	3	8,67	0,20	1,73
G1BD3	10	8,97	0,67	5,98
G2BD1	9	7,40	0,60	4,44
G2BD2	2	8,50	0,13	1,13
G2BD3	4	9,38	0,27	2,50

Tabela 6. Resultados do teste cego - 15 Praticantes de guitarra.

Simulação	Escolhas	Semelhança	Coeficiente	Score
G1BD1	3	8,33	0,20	1,67
G1BD2	1	8	0,07	0,53
G1BD3	11	8,64	0,73	6,34
G2BD1	7	7,57	0,47	3,53
G2BD2	4	7,75	0,27	2,07
G2BD3	4	8,25	0,27	2,20

Através da pesquisa dos formulários *online*, é possível notar que, para o pedal do *software* profissional, o efeito simulado utilizando-se o modelo Wiener-Hammerstein, com parâmetros ajustados pelo identificador proposto, considerado mais semelhante ao real pelos os entrevistados foi o G1BD3. Sendo que este resultado foi o mais escolhido tanto pelo grupo de praticantes de guitarra quanto pelos não-praticantes. Além disso, a simulação em questão recebeu avaliação de semelhança de 8,97 em uma escala de 0 até 10.

Para o pedal real, há uma certa divergência na escolha da maior similaridade entre o áudio real e o áudio simulado pelo modelo Wiener-Hammerstein, sobretudo para o grupo de praticantes de guitarra. O efeito simulado mais escolhido, tanto para o grupo de praticantes de guitarra quanto para os não-praticantes, foi a simulação G2BD1.

Com a concordância de resultados entre as métricas objetivas e subjetivas, tem-se como as melhores simulações G1BD3, para o pedal de distorção simulado por *software* profissional, e G2BD1, para o pedal de distorção real. Entretanto, o *score* final e a nota de semelhança da simulação G2BD1 são significativamente inferiores aos mesmos parâmetros da G1BD3, indicando maior fidelidade desta simulação.

Por impressão auditiva, apoiada pelos resultados do teste cego, o timbre da simulação G1BD3 é bastante fiel ao efeito original.

5. CONCLUSÕES

Modelos de Wiener-Hammerstein, dados os paradigmas fundamentais dos tons de guitarra elétrica, conseguem

com bastante eficácia emular um efeito de distorção. O modelo definido neste trabalho, dada sua parametrização, pôde ser otimizado por um Algoritmo Genético. Para a avaliação de resultados, faz-se necessário também o uso de métricas mais subjetivas, como testes de audição, tendo em vista que as métricas objetivas nem sempre representam a percepção auditiva às diferenças no som.

Para simulações estáticas em termos de parâmetros do pedal real e com sinal da guitarra sem efeitos prévios, o modelo resultou em simulações com sons bastante fidedignos ao som do pedal *Blues Driver*.

Com isso, vê-se que a modelagem do sistema a partir da identificação do sistema real é bastante eficiente para replicar efeitos de distorção, não necessitando ter em mãos o esquema do circuito eletrônico do pedal.

Figura 9. Visualização no domínio do tempo do som sem efeito, com o efeito real e com o efeito simulado (G1BD3).

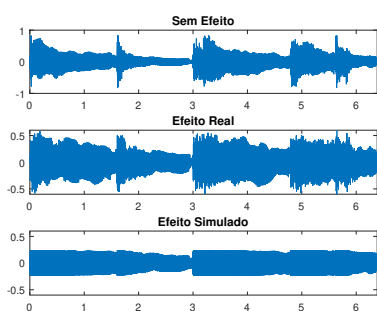


Figura 10. Visualização no domínio da frequência do som sem efeito, com o efeito real e com o efeito simulado (G1BD3).

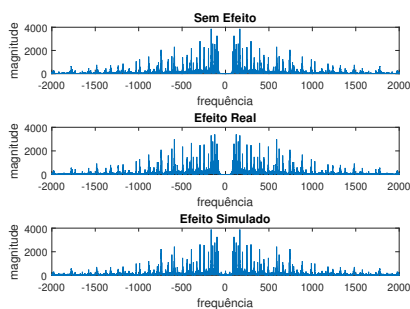


Figura 11. Visualização no domínio do tempo do som sem efeito, com o efeito real e com o efeito simulado (G2BD1).

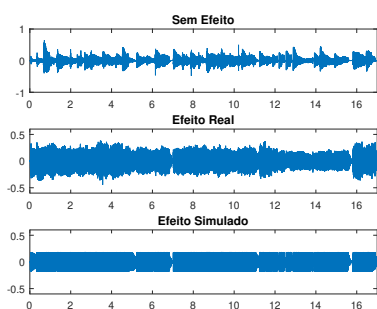
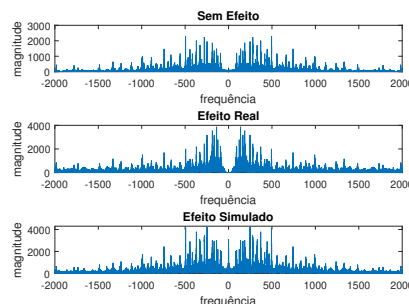


Figura 12. Visualização no domínio da frequência do som sem efeito, com o efeito real e com o efeito simulado (G2BD1).



AGRADECIMENTOS

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001.

REFERÊNCIAS

- Batista, E. and Silva, G. (2015). Sobre a implementação digital de um pedal de efeito de Áudio do tipo overdrive. In *Anais do XXXIII Simpósio Brasileiro de Telecomunicações (SBRT2015)*. doi:10.14209/sbrt.2015.72.
- de Paulo, M.V. (2016). *Identificação de Modelos de Hammerstein e Wiener para Sistemas Não Lineares Multivariáveis Utilizando Métodos de Subespaços*. Master's thesis, Universidade Federal de Minas Gerais, Escola de Engenharia.
- Eichas, F., Möller, S., and Zölzer, U. (2015). Block-oriented modeling of distortion audio effects using iterative minimization. In *Proc. of the 18th Int. Conference on Digital Audio Effects (DAFx-15)*.
- Eichas, F. and Zölzer, U. (2016). Black-box modeling of distortion circuits with block-oriented models. In *Proceedings of the 19th International Conference on Digital Audio Effects (DAFx-16)*.
- Herbst, J.P. (2017). Historical development, sound aesthetics and production techniques of the distorted electric guitar in metal music. *Metal Music Studies*, 3(1), 23–46. doi:doi:10.1386/mms.3.1.23_1.
- Schoukens, M. and Tiels, K. (2016). Identification of nonlinear block-oriented systems starting from linear approximations: A survey. *CoRR*, abs/1607.01217.
- Schuck Jr, A., Ferreira, L., Husemann, R., and Bodmann, B. (2019). *A Simple Non-linear Transfer Function for a Wiener-Hammerstein Model to Simulate Guitar Distortion and Overdrive Effects*, 425–436. doi:10.1007/978-3-030-16077-7_33.
- Systems, F.A. (2013). Multipoint iterative matching & impedance correction technology (mimic™). White Paper.
- Thede, S. (2004). An introduction to genetic algorithms. *Journal of Computing Sciences in Colleges*, 20.
- Yeh, D., Abel, J., and Smith, J. (2007). Simplified, physically-informed models of distortion and overdrive guitar effects pedals. *Proceedings of the 10th International Conference on Digital Audio Effects, DAFX 2007*.