

Teste Automatizado de Sinais Acústicos utilizando MATLAB

Vithória dos Santos Barbosa, Paula Araujo Marães

Fundação Centro de Análise, Pesquisa e Inovação Tecnológica – (FUCAPI)
CEP 69075-351 – Manaus – AM – Brasil

{vithoriavh,paulamaraes14}@gmail.com

Abstract. *This work proposes the application of software to automate the functional testing of speakers using the Digital Signal Processing techniques. For analysis and validation, the sampled signal will be captured in the time domain, transformed into the frequency domain and then filtered with the aid of Butterworth filter to eliminate unwanted frequencies, normalize signal amplitude and thus obtain the graph of the signal processed to make proper comparisons and observations about the signal obtained. The results show the efficiency of Butterworth filter and the acoustic signal collection system, totaling 86.6% of products that passed on the functional test based on tweeter and woofer parameter analysis.*

Resumo. *Este trabalho propõe a aplicação de um software para automatizar o teste funcional de caixas acústicas utilizando as técnicas de Processamento Digital de Sinais. Para a análise e validação, o sinal amostrado será capturado no domínio do tempo, transformado para o domínio da frequência e em seguida filtrado com o auxílio do filtro de Butterworth para eliminar as frequências indesejadas, normalizar a amplitude do sinal e assim obter o gráfico do sinal processado para que sejam feitas as devidas comparações e observações a respeito do sinal obtido. Os resultados mostram a eficiência do filtro de Butterworth e do sistema coletor de sinal acústico totalizando 86,6% de produtos aprovados no teste funcional baseado na análise dos parâmetros do tweeter e do woofer.*

1. Introdução

Na indústria de caixas acústicas, a busca incessante por sistemas capazes de tornar ainda mais eficiente o processo produtivo não é apenas um diferencial na qualidade do produto, mas também uma questão de aprimorar o domínio sobre os fatores que influenciam no resultado técnico do produto.

O processo de fabricação de caixas acústicas apresenta cuidados em determinadas etapas, em especial, a etapa de teste. Esta é extremamente importante para o desempenho final do produto, pois um equívoco na avaliação das características técnicas compromete o resultado sonoro da caixa acústica.

Um sistema acústico pode ser designado como mostra a Figura 1 (TAN *et al.*, 2018). Existem dois *drivers* de alto-falante, o *woofer* responsável pelas baixas frequências e o *tweeter* responsável pelas altas frequências. Neste sistema, o sinal de áudio digital recebido é dividido em duas bandas usando um filtro passa baixa e um filtro passa alta em paralelo. Em seguida, os sinais de áudio são amplificados e enviados para os respectivos *drivers* de alto-falante correspondentes.

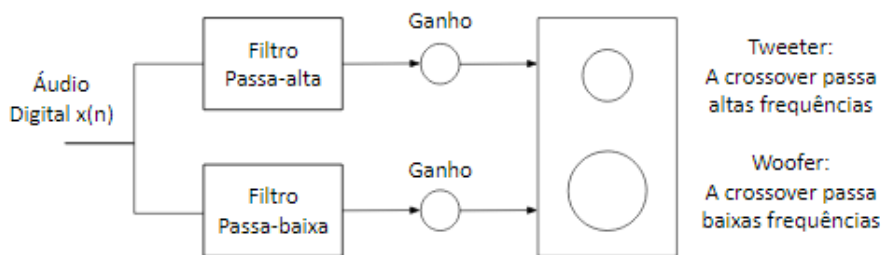


Figura 1. Diagrama Geral de Blocos de um Sistema de Som.

Durante a fase de teste as caixas acústicas podem apresentar falhas como a transposição dos parâmetros. Porém, utilizando ferramentas que auxiliem no processamento dos sinais emitidos nesta etapa podemos contribuir de forma significativa na qualidade do produto final. A obtenção de um meio seguro que possibilite ao operador de teste conhecer a resposta em frequência de um determinado sistema é uma das grandes dificuldades que as empresas que fabricam este tipo de produto enfrentam. Muitas vezes, os responsáveis técnicos não incorporam as restrições inerentes aos sinais emitidos por sua estrutura, como os sinais de frequência e o range do *tweeter* e do *woofer*, fazendo ajustes que se baseiam em critérios pessoais que variam de acordo com a sua sensibilidade acústica.

Quando tratamos da análise de sinais acústicos é necessário saber em que faixa de frequências se encontra os sinais emitidos pelas caixas acústicas para definir o resultado de um teste, pois estes resultados podem exceder os limites dos parâmetros definidos ou gerar valores diferentes do esperado. A partir dessa perspectiva cria-se a necessidade de se implantar uma ferramenta que atenda a necessidade dos usuários que trabalham com este tipo de produto para tornar acessível à visualização de um resultado mais preciso.

No teste de caixas acústicas o desempenho técnico do produto é avaliado sob os parâmetros da frequência de ressonância (F_s) e do *range* (faixa de atuação). Quando um destes parâmetros técnicos está fora dos limites de controle, o produto passa por um retrabalho onde na maioria das vezes é necessário refugar a peça com falha técnica e substituí-la por outra.

O problema apresentado neste trabalho surgiu a partir da observação realizada em uma empresa do Polo Industrial de Manaus (PIM) cujos testes funcionais das caixas acústicas não possuíam o auxílio de nenhuma ferramenta automatizada para avaliar os parâmetros de referência. Este trabalho consiste em implantar um sistema coletor de sinal para automatizar o teste funcional de forma significativa, uma vez que o resultado do teste do produto é definido a partir do sinal que é emitido. Obtendo dessa forma as seguintes contribuições: 1) comparar os sinais emitidos pelos alto-falantes com os parâmetros do teste funcional, 2) avaliar se os parâmetros da caixa acústica estão conforme as especificações e 3) propor um teste prático para obter uma padronização e unificação de serviços em uma única ferramenta.

2. Referencial Teórico

Esta seção tem o propósito de apresentar os principais conceitos sobre os temas abordados nesta pesquisa, especialmente sobre a Acústica, Processamento Digital de Sinais e Filtro de Resposta ao Impulso Infinita.

2.1. Acústica

A acústica caracteriza-se como um conjunto de fenômenos ondulatórios decorrentes de diversos objetos e que se propagam através de vários estados físicos da matéria. Ela também pode ser representada como um conjunto de sinais gerados pelas caixas acústicas sofrendo interferências do ambiente até chegarem aos nossos ouvidos. Podem-se dividir as vibrações acústicas que ouvido humano recebe, em dois tipos: som e ruído.

Segundo a literatura de Brüel & Kjær (1984) o “som” é como uma vibração mecânica, ou seja, uma variação de pressão, num meio elástico, tal como o ar ou a água, percebida pelo ouvido humano. Para Fernandes (2002), o ruído é um som de grande complexidade, resultante da superposição desarmônica de sons provenientes de várias fontes. Seu espectro de frequências sempre será uma confusa composição de harmônicas sem qualquer classificação ou ordem de composição.

As frequências audíveis são divididas em três faixas: baixas frequências ou sons graves, médias frequências ou sons médios e altas frequências ou sons agudos. Tratando-se de caixas acústicas, o *woofers* se caracteriza por reproduzir as baixas frequências, que requerem os mais elevados níveis de potência, deslocando grandes volumes de ar. Já as altas frequências utilizam alto-falantes de pequeno diâmetro, os chamados *tweeters*, que exigem menor potência e, conseqüentemente, menores deslocamentos de volume de ar.

A frequência de amostragem comumente usada para sinais de áudio é de 44.1kHz, pois esta permite a reconstrução apropriada de sinais até 22.5kHz, que está acima da faixa audível para os humanos. Dick Blandford (2013) afirma que na prática, os sinais existem no domínio do tempo que é uma representação de valores reais que ocorrem em um determinado intervalo de tempo. Contudo, a melhor representação destes sinais pode ser obtida no domínio da frequência. A análise no domínio da frequência mostra que sinais periódicos são representados por uma série infinita de senoidais em frequências discretas.

2.2. Processamento Digital de Sinais (PDS)

O PDS tem sido amplamente aplicado para problemas em uma variedade de campos, incluindo processamento de som e imagem, processamento de vídeo, radar, sonar, entre outros.

Uma das formas mais comuns de utilizarmos o processamento de sinais consiste no uso de filtros em relação às frequências do sinal o que o torna bastante eficiente para aplicações e análises de sinais de áudio. É diante desse contexto que o processamento do sinal de áudio vem se tornando cada vez mais importante.

De acordo com Proakis e Manolakis (1996), um processador digital de sinais pode ser um computador altamente avançado que permite ser programado para realizar diversas tarefas ou um simples microprocessador criado para realizar uma tarefa específica, fazendo com que seja uma alternativa mais barata se comparado a um processador analógico.

2.3. Filtro de Resposta ao Impulso Infinita (IIR)

Um conjunto de dados pode ser analisado por um espectro de frequências, ou pela Transformada de Fourier. Segundo Dick Blandford (2013) um conjunto de algoritmos

usados para calcular a Transformada de Fourier de um sinal é comumente conhecido como Transformada Rápida de Fourier ou FFT (do inglês, *Fast Fourier Transform*).

O objetivo da FFT é transformar o sinal discreto (amostrado) em sua correspondente versão no domínio da frequência. Com o sinal no domínio da frequência é necessário utilizar um filtro para remover partes indesejadas, como ruído aleatório, ou extrair partes úteis, como componentes situados em uma determinada faixa de frequência. Diniz *et al.* (2014) afirmam que em geral os filtros de resposta ao impulso infinita - IIR (do inglês, *Infinite Impulse Response*) são capazes de aproximar uma resposta na frequência prescrita com um número de multiplicações menor que os filtros de resposta ao impulso finita - FIR (do inglês, *Finite Impulse Response*).

Os IIR podem ser mais adequados para algumas aplicações práticas especialmente aquelas envolvendo processamento de sinais em tempo real. Neste ponto, o Matlab contém várias bibliotecas para aplicação de filtragem (CARUSO *et al.*, 2016). Os métodos clássicos para aproximação de filtros analógicos são as aproximações de *Butterworth*, de *Chebyshev* e elíptica.

3. Métodos e Procedimentos

O diagrama em bloco da Figura 2 apresenta as etapas da metodologia proposta para realizar a verificação do sinal acústico que são definidas como: determinação dos dados de entrada, aplicação experimental, análise e validação dos resultados.

No bloco a) da Figura 2, apresenta-se o conjunto de dados de entrada do sinal amostrado que é composto pela oscilação dos sinais emitidos pelo *tweeter* e *woofer* respectivamente.

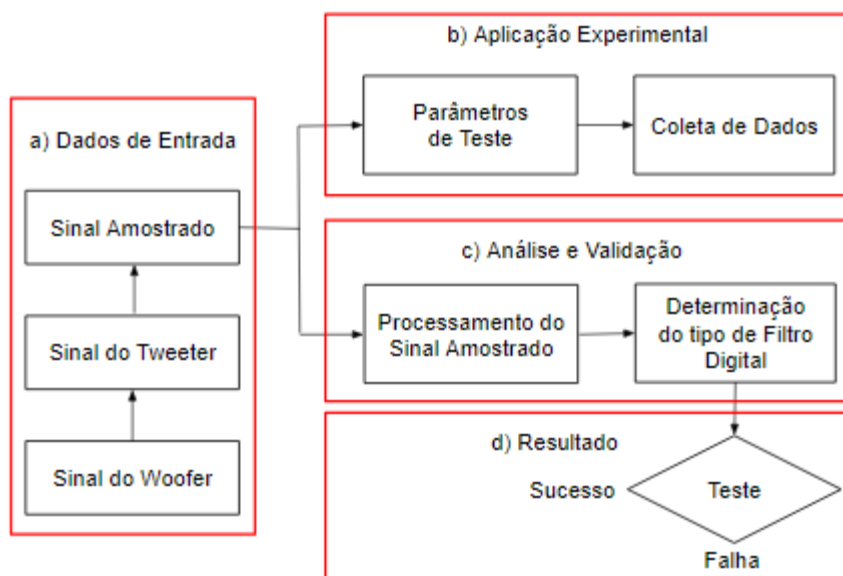


Figura 2. Metodologia da proposta para análise de sinais acústicos.

No bloco b) apresenta-se a metodologia utilizada para a verificação dos sinais acústicos. Nesta etapa, a definição dos parâmetros de teste, apresentada na Tabela 1, foi realizada com base na análise de uma situação real de testes.

Tabela 1. Conjunto de parâmetros utilizados no teste funcional das caixas acústicas passivas.

	<i>Tweeter</i>	<i>Woofers</i>
Frequência	70 a 100 Hz	70 a 100 Hz
Range	X100	X1

A coleta dos dados foi feita com o auxílio de duas pontas de provas, que quando conectadas ao *borne* emitiam os sinais dos alto-falantes, e de um gravador de áudio para gravar os sinais emitidos pelas caixas acústicas assim como mostra a Figura 3.



Figura 3. Aquisição do sinal do *Woofers* e do *Tweeter* a partir do *borne* da caixa acústica.

No bloco c) é apresentada a metodologia de análise e validação. Nesta etapa utilizou-se o Matlab, que fornece uma variedade de ferramentas aplicáveis à equalização de áudio permitindo a criação de funções, *scripts* e modelos que podem ser implementados em uma variedade de tópicos relacionados a diferentes áreas de estudo.

Algumas funções como *audiorecorder*, *audioread*, *plot(x,y)*, *length* dentre outras foram utilizadas com os parâmetros de frequência, amplitude e atenuação específicos do teste das caixas acústicas. Esses programas foram feitos com o objetivo de verificar o comportamento e a reprodução dos sinais acústicos. Após esta etapa foi possível iniciar o criação do *software* para realizar as tarefas específicas pretendidas por este projeto. O modelo de verificação do sistema é representado na Figura 4:

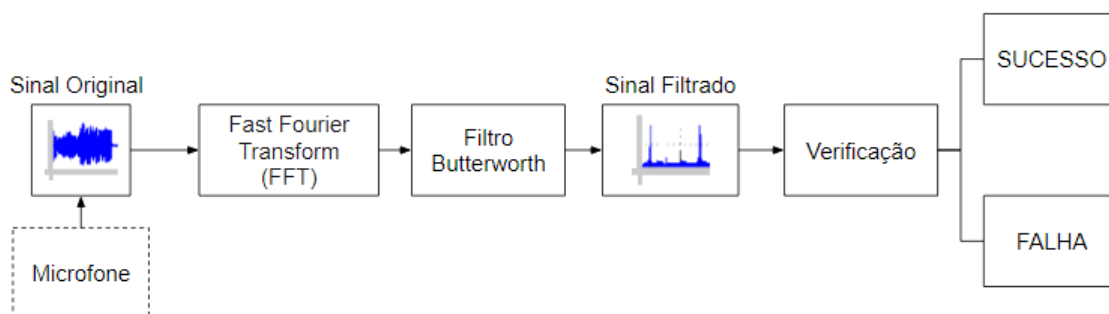


Figura 4. Diagrama do modelo de verificação do Sistema de Teste automatizado de Sinais Acústicos.

O sinal de áudio foi gravado utilizando a função *audiorecorder* do Matlab. Os parâmetros solicitados por esta função são a frequência de amostragem, o número de

bits e de canais. O sinal de áudio digital gerado passa pelos parâmetros descritos anteriormente. A sintaxe da função é:

$$x = \text{audiorecorder}(Fs, nbits, NumChannels)$$

Essa função permite gravar dados de áudio capturados pela placa de som do Windows através do microfone. Um vetor contendo os dados amostrados de entrada foi criado na frequência de amostragem específica de 44.1kHz . O parâmetro *nbits* é onde são definidos os bits podendo ser escolhido entre *double* (16bits) e *single* (8bits). E por último é definido *NumChannels* que é onde será definido se o som é mono ou estéreo. Os parâmetros que serviram como base para este projeto foram projetados para ter o tempo de gravação de 8 segundos, *double* e estéreo. Para a leitura da gravação prévia utilizou-se a função *audioread* do Matlab:

$$[y, Fs] = \text{audioread}(filename)$$

Essa função permite ler os dados do arquivo chamado *filename* e em seguida retornar os dados amostrados em *y* e uma taxa de amostragem para os dados *Fs*.

A partir desse momento se inicia a etapa de manipulação do sinal de áudio. Para que os sinais originais e os sinais filtrados tivessem suas respectivas representações no domínio da frequência foi utilizada a transformada de Fourier, pois observando o espectro no domínio da frequência é possível determinar quais frequências ruidosas devem ser eliminadas.

Uma das formas utilizadas para a implementação do filtro digital IIR no Matlab foi utilizando a função *butter*. Esta função projeta um filtro *Butterworth* e é representada abaixo:

$$[b, a] = \text{butter}(n, Wn, ftype)$$

Os parâmetros da função *butter* são os termos “*n*”, “*Wn*” e “*ftype*”. Representando respectivamente a ordem, a frequência de corte e o tipo do filtro. Este pode ser especificado como passa-baixa, passa-alta, passa-banda ou rejeita banda. Os filtros passa-baixa e passa-alta usam um vetor com dois elementos para a frequência de corte sendo um deles o limite inferior e o outro o limite superior.

No bloco d) apresenta-se o resultados das avaliações que foram utilizadas na etapa final da análise dos resultados, que consistem em verificar se as frequências coincidiam com os parâmetros presentes na tabela 1, apresentando assim, se houve sucesso ou falha no teste funcional da caixa acústica.

4. Avaliação Experimental

Os experimentos foram realizados em uma empresa do PIM com o auxílio de um microfone dedicado de reprodução a 16-bit/44.1kHz para gravar os sinais emitidos pelas caixas acústicas. Após a etapa de teste e coleta de dados o tratamento dos sinais acústicos foram passados para um computador com o sistema operacional Ubuntu de 64bits e posteriormente processado no Matlab.

Na Figura 5 são apresentados os gráficos das etapas de processamento de sinal de áudio. O gráfico do “Espectro de Frequência do Sinal Filtrado” possui a maior contribuição para a resposta do teste das caixas acústicas. Analisando a ordem do processamento de sinais, a primeira parte tem como objetivo obter o sinal do áudio desejado no domínio do tempo e no domínio da frequência. Nesta etapa o microfone atua como uma interface entre o sinal acústico e a placa de som do computador assim

como explica DHAR *et al.* (2008), dessa forma ele atua como um transdutor para converter o sinal mecânico em sinal elétrico analógico.

Na etapa de captura do sinal será exibida a mensagem “*Start*” durante a gravação de áudio e a mensagem “*End of recording*” ao final da amostragem. No final da gravação o programa irá gerar o gráfico do sinal amostrado no domínio do tempo, composto pela somatória do sinal que contém a informação desejada e dos ruídos. Neste momento o sinal se encontra na sua forma bruta, sem qualquer tipo de processamento. Em seguida obtemos o gráfico com os mesmos parâmetros, porém no domínio da frequência após ter passado pela transformada de Fourier.

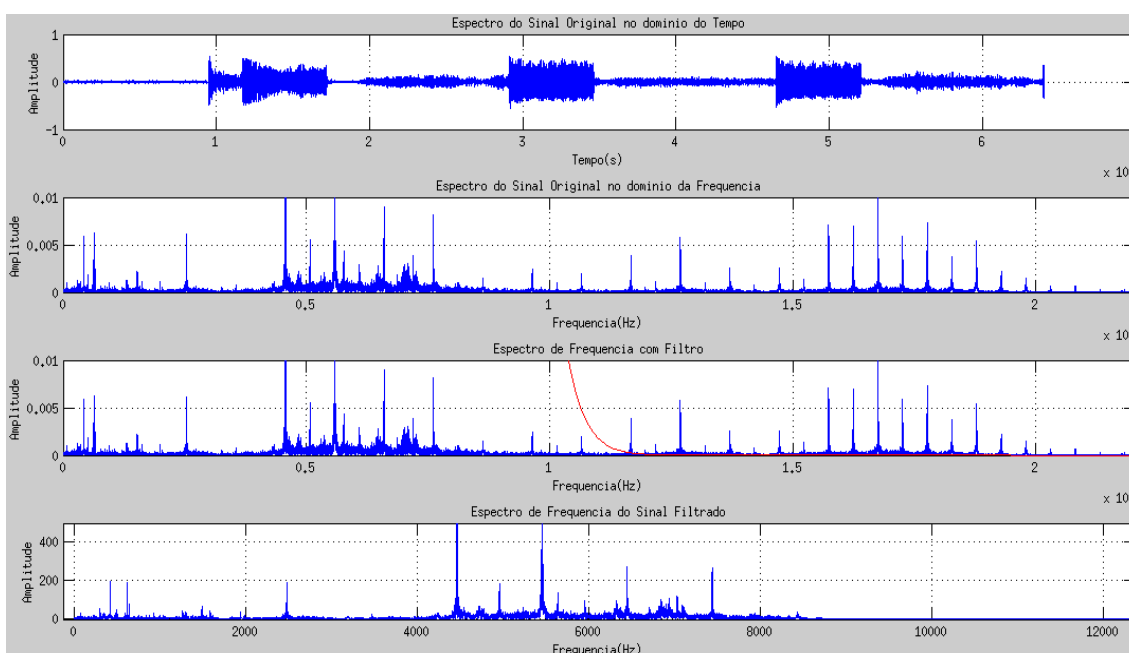


Figura 5. Processo de verificação do processamento de sinal acústico.

A partir do momento que se tem a representação do sinal no domínio da frequência, o filtro digital atua para obtermos o sinal filtrado. O terceiro gráfico “Espectro de Frequência com Filtro” mostra o sinal obtido anteriormente com a curva do filtro digital de Butterworth projetado para ser do tipo passa-baixa ou passa-alta. Na última etapa, com o gráfico “Espectro de Frequência do Sinal Filtrado” obtemos o sinal filtrado. Com esta etapa concluída foi possível verificar quais frequências devem ser eliminadas levando em consideração os parâmetros da tabela 1.

A fase de testes consiste em um conjunto de ensaios com a finalidade de verificar se o sinal está dentro da faixa de frequência ou não. Tendo isto como base foi necessária uma análise voltada à frequência do sinal filtrado levando em consideração as faixas de frequências do *Tweeter* e do *Woofers*. Ao comparar os resultados dos sinais emitidos durante a fase de teste das caixas acústicas uma análise foi obtida para confirmar o sucesso do teste. As figuras 6 e 7 mostram o resultado de um teste positivo, do *Tweeter* e do *Woofers*, respectivamente, com as frequências dentro das faixas de especificação:

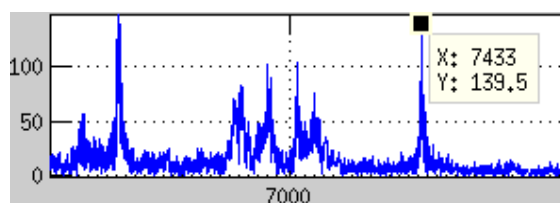


Figura 6. Frequência do *Tweeter* dentro da faixa de especificação.

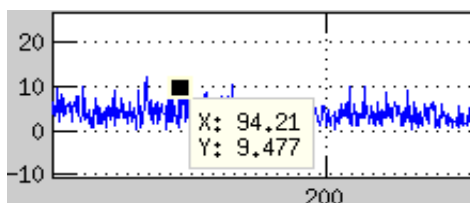


Figura 7. Frequência do *Woofer* dentro da faixa de especificação.

A eficiência dos filtros digitais também é verificada durante os testes negativos que normalmente apresentam defeitos como: áudio defasado no *tweeter* ou no *woofer*, ausência de áudio, presença de ruídos etc. A Figura 8 demonstra o resultado obtido de um teste cujo resultado foi “Falha”, pois a frequência do *tweeter* está fora da banda de passagem. Neste mesmo teste é possível verificar a frequência do *woofer* dentro da banda de passagem, assim como mostra a Figura 9, porém o resultado do teste é avaliado em conjunto, ou seja, o sinal de ambos os alto-falantes precisam estar dentro dos parâmetros especificados.

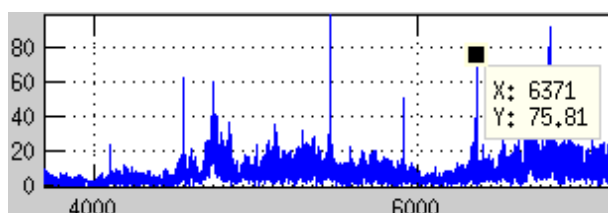


Figura 8. Frequência do *Tweeter* fora da faixa de especificação.

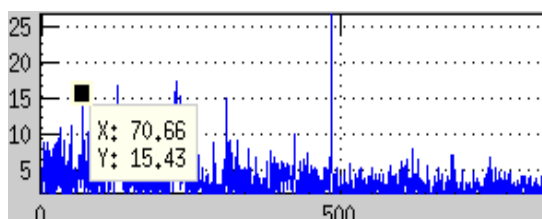


Figura 9. Frequência do *Woofer* dentro da faixa de especificação.

5. Resultados

A validação dos testes foi realizada observando as frequências emitidas dos sinais acústicos comparando-as com as frequências abordadas na Tabela 1. Com os dados que foram gerados após o procedimento de filtragem e considerando o limite inferior e superior do *tweeter* e do *woofer* foi feita uma análise das faixas de frequência. Ou seja, se a frequência dos sinais filtrados de ambos os alto-falantes estiver fora da banda de passagem é possível verificar se o resultado do teste teve sucesso ou falha.

Durante essa fase também foi necessário verificar se o sinal de entrada é alterado sobre as condições iniciais zero, ou seja, sem a presença de qualquer ruído. Para a análise deste parâmetro o sinal de entrada foi reproduzido seguido pelo sinal de saída, e

em seguida pelo sinal de entrada novamente. Foi possível afirmar que não houve diferença de som, indicando que o sinal não foi afetado. Nesses casos, se o sinal for alterado sob essas condições, cada teste subsequente iria fornecer dados incompletos.

Tabela 2. Resultados obtidos dos testes da Avaliação Experimental.

<i>SI.No.</i>	<i>Frequência do Tweeter (Hz)</i>	<i>Frequência do Woofer (Hz)</i>	<i>Resultado</i>
1	7.436	72.67	Sucesso
2	7.438	69.31	Sucesso
3	7.433	94.21	Sucesso
4	6.371	70.66	Falha
5	8.193	51.81	Falha
6	8.193	84.11	Sucesso
7	7.738	81.42	Sucesso
8	8.429	87.48	Sucesso
9	8.529	132.6	Falha
10	7.930	72.00	Falha

A tabela 2 acima demonstra os resultados de 10 testes obtidos após a aplicação do filtro *Butterworth* do tipo passa-baixa e passa-alta, utilizados para verificar as frequências emitidas pelo *woofer* e pelo *tweeter*, respectivamente, e o resultado do teste final da caixa acústica. É importante enfatizar que os resultados dos testes coincidiram com os resultados dos testes funcionais feitos durante o processo. Nesse estudo, foram avaliados 30 testes de caixas acústicas. Os resultados mostram que 86,6% tiveram sucesso e apenas 13,3% dos produtos foram reprovados. Estes foram separados e encaminhados para a bancada teste para uma verificação e substituição dos componentes eletrônicos. Após essa etapa foi necessário refazer o teste funcional do produto para redefinir o seu resultado.

6. Conclusão e Trabalhos Futuros

Este trabalho fornece uma metodologia simples e interativa para projeto e verificação de sinais suportados pelo Matlab. A aplicação mostrada pode ser estendida a toda gama de produtos passivos de áudio onde é necessária uma análise de alta resolução, hertz a hertz, ou simplesmente uma avaliação de rotina. Com essa proposta, um projetista pode verificar durante a fase de teste do projeto se o sinal das caixas acústicas irá apresentar o comportamento esperado, levando em consideração o meio de trabalho e a limitação de recursos.

A partir dos resultados apresentados anteriormente, concluí-se que os ensaios mostram a utilidade dos programas no processo de armazenamento, filtragem e análise. Além de analisar a eficiência do filtro de *Butterworth* na filtragem de sinais acústicos, quando comparado aos outros tipos de filtros de reposta ao impulso infinita, especificamente para os sinais emitidos pelo *tweeter* e pelo *woofer*. As contribuições desse estudo podem ser divididas em três principais categorias: a análise do processo de teste considerando tempo e técnica na verificação do sistema de caixas acústicas; a análise e avaliação da implementação de um sistema integrado levando em consideração

variáveis e parâmetros que podem afetar seu desempenho e uma nova metodologia de verificação para projetos mais seguros de caixas acústicas.

Em trabalhos futuros pretende-se intercalar o uso desta ferramenta com um *JIG* de teste, pois ela representa uma alternativa confiável se comparada às ferramentas tradicionais usadas no processo convencional. Também é possível utilizar o Raspberry Pi para embarcar a aplicação e tornar o teste funcional mais acessível para outras bancadas de teste além de possibilitar a implementação de uma interface amigável onde o responsável pelo teste possa definir o momento certo de captura do sinal e visualizar o resultado de forma rápida e eficiente.

Referências

- Caruso, Wesley C., et al. (2016). "Implementation of a Multi-band Equalizer in MATLAB and Simulink Using Algorithm Manipulation". School of Engineering, Computing & Construction Management.
- Brüel & Kjør (1984), "Measuring Sound".
- Dick, B. J. P. (2013). "Introduction to Digital Signal Processing". Upper Saddle River: Pearson, Print, 1ª Edição.
- Diniz, Paulo SR; da Silva, Eduardo AB; Netto, Sergio L. "Processamento Digital de Sinais – Projeto e Análises de Sistemas", Rio de Janeiro: Editora Bookman, 2014. 976p, 2ª Edição.
- Dhar, Pranab Kumar; JUN, Hee-Sung; KIM, Jong-Myon. (2008). "Design and implementation of digital filters for audio signal processing". IEEE Third International Forum on Strategic Technologies. 2008, p. 332-335.
- Fernandes, João Candido. (2002). "Acústica e ruídos. Bauru: Unesp", v. 102.
- Proakis, J. G.; Manolakis, D. G. (1996). "Digital Signal Processing: Principles, Algorithms and Applications". Prentice-Hall, New York, 3º Edição.
- Tan, Lizhe; Jiang, Jean. (2018). "Digital signal processing: fundamentals and applications". Academic Press.