

ESTUDO E CARACTERIZAÇÃO DE OPERAÇÃO DE AMPLIFICADORES DE ÁUDIO CLASSE-D

Lizandra Nunes Oliveira¹, Éder Alves de Moura¹

1 - Universidade Federal de Uberlândia, Faculdade de Engenharia Elétrica, Patos de Minas – MG,
lizandraufu@gmail.com, edermoura@gmail.com

Resumo – Este trabalho objetiva analisar as características de operação e o funcionamento dos amplificadores de áudio classe D. Este interesse justifica-se porquê, em comparação com os amplificadores lineares, os amplificadores classe D possuem alta eficiência, baixo peso e dimensões, além da baixa dissipação de calor. Essas características são muito importantes, por exemplo, para a fabricação de dispositivos móveis, como celulares, smartphones e tablets. Para o fim proposto, o trabalho irá apresentar o princípio de funcionamento e caracterizar cada estágio dos amplificadores classe D, além de apresentar simulações para exemplificação de conceitos e avaliação de desempenho.

Palavras-Chave – amplificadores de áudio, amplificadores classe d, modulação pwm, filtros de saída.

STUDY AND CHARACTERIZATION OF OPERATION OF CLASS-D AUDIO AMPLIFIERS

Abstract - This work aims to analyze the characteristics and operation principles of Class D audio amplifiers. This interest is justified by the high efficiency, low weight and dimensions, and the low heat dissipation of the class D, when compared with linear amplifiers. These characteristics are very important, for instance, to manufacturers of mobile devices such as mobile phones, smartphones and tablets. In the way to explain how it operates and their advantages, this work will characterize each stage of these audio amplifiers, and present simulations to clarification of concepts and performance evaluation.

Keywords – audio amplifiers, class d amplifiers, pwm modulation, output filters.

I. INTRODUÇÃO

A aquisição e reprodução de áudio está entre as primeiras aplicações de circuitos eletrônicos [1]. Os sistemas de áudio estão presentes e são essenciais para várias classes de aplicações. A título de exemplo, é possível citar os aparelhos de televisão e rádio, os sistemas de telefonia móvel e fixa,

notebooks, tablets, entre muitos outros.

Dentro da variedade de sistemas de áudio disponíveis, as aplicações móveis tem crescido em diversidade e em importância [2] e nessa classe de equipamentos, os amplificadores Classe D apresentam destaque devido ao seu alto nível de eficiência [3].

Nesta classe os amplificadores são chaveados e operam no modo PWM (*Pulse Width Modulation* – Modulação por Largura de Pulso) [3], como exemplificado pela Figura 1. Neste esquema, o sinal de entrada é comparado com uma onda triangular que gera em sua saída uma onda chaveada cujo valor médio é proporcional ao sinal de entrada.

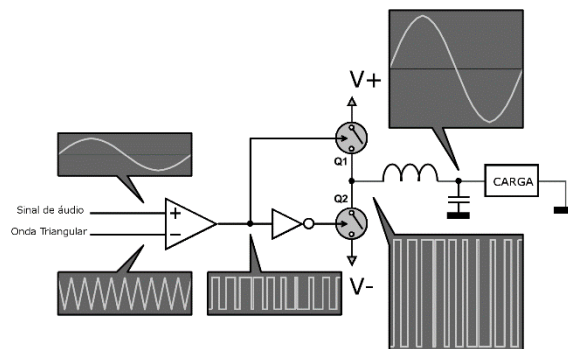


Fig. 1. Diagrama de funcionamento dos amplificadores de áudio Classe D.

Neste caso, o sinal de áudio de entrada modulado via PWM é transmitido à carga através das chaves eletrônicas. Entre as chaves eletrônicas e a carga, é colocado um filtro passivo LC (filtro com indutor L e capacitor C) para eliminar as componentes de alta frequência e suavizar o sinal. Em alguns casos onde o tamanho e peso representam fatores limitantes, os elementos LC podem ser retirados, com algum prejuízo, e passam a ser classificados como *filterless*.

Nos amplificadores Classe D, as chaves estão operando sempre no modo de corte ou saturação e esta configuração permite a esta classe de amplificador atingir eficiência próxima de 100% [3], com valores médios girando em torno de 80%, em contrapartida aos amplificadores Classe A, B e AB, cuja potência média não ultrapassa 50% [4].

A despeito das vantagens relativas à sua eficiência, os amplificadores Classe D apresentam problemas de não linearidade e distorção harmônica [5], que prejudicam a



qualidade do som. Estes problemas são decorrentes da natureza não linear do sinal PWM que é aplicado aos alto-falantes e tem como consequência a geração de harmônicas de diversas ordens.

Parte desses problemas são resolvidos pela resposta natural do ouvido humano, que comporta-se como um filtro passa banda de 20 Hz – 20 kHz [3] e da característica de resposta em frequência dos alto-falantes. Contudo, para uma boa performance, alta fidelidade e diminuição das emissões eletromagnéticas, o projeto do filtro de saída é de especial relevância e envolve muitos fatores, como tamanho, topologia, ordem, etc.

II. PRINCÍPIOS E FUNCIONAMENTO

Nesta seção, as características dos amplificadores de áudio serão traçadas e, em seguida, o funcionamento dos amplificadores Classe D será discutido detalhadamente.

A. Tipos de amplificadores de áudio

As principais características buscadas no projeto de um amplificador de áudio são a linearidade da resposta e o alto rendimento energético. Assim, de acordo com o arranjo e o modo de operação do circuito, pode-se obter uma dessas características em detrimento da outra e, em alguns casos, um bom equilíbrio entre ambas sob a perspectiva da aplicação. Os tipos de amplificação de áudio podem ser classificados da seguinte forma [2]:

- *Classe A:* apresenta, teoricamente, a melhor linearidade entre todas as classes, mas também o pior rendimento (não passa de 50%) porque seus transistores de saída estão sempre em condução.
- *Classe B:* não tem corrente de polarização nos transistores de saída, aumentando o rendimento, idealmente para 78,5%. Todavia ocorre a distorção crossover porque cada transistor (configuração *push pull*) é responsável por um semi-ciclo do sinal de saída.
- *Classe AB:* intermediária entre as classes A e B, minimizando a distorção de crossover através da polarização do estágio de saída.
- *Classe D:* conhecidos como amplificadores chaveados porque seus transistores de saída não operam continuamente, utilizam o princípio da Modulação por Largura de Pulso - PWM (*Pulse Width Modulation*). Possui um rendimento alto (casa dos 90%), mas apresenta distorções não tendo a qualidade de um amplificador contínuo das classes.

B. Amplificadores Classe D

Pode-se definir como um amplificador Classe D qualquer circuito cujo estágio de potência opere com chaves de estado sólido na região de corte e saturação, onde a largura do pulso de comando é controlada pelo sinal de áudio [8].

A modulação PWM ocorre com o sinal de entrada sendo comparado com um sinal de referência, uma onda triangular que também é chamada de portadora, com frequência bem maior que a máxima frequência do sinal de áudio. Esse processo gera uma onda quadrada na saída com largura proporcional à amplitude do sinal original, como ilustrado na Figura 2. Depois de modulado o sinal chega ao estágio de

potência composto pelos transistores, preferencialmente do tipo FET ou MOSFET para maior eficiência do chaveamento. O sinal modulado é aplicado ao alto-falante em conjunto com o circuito de filtragem, caso exista. Esse processo, quando bem projetado, permite reconstruir o sinal original na saída do alto-falante, onde o filtro tem a função de ‘retirar’ o sinal da portadora e suas harmônicas, diminuir o ruído eletromagnético e melhorar a qualidade do sinal sonoro.

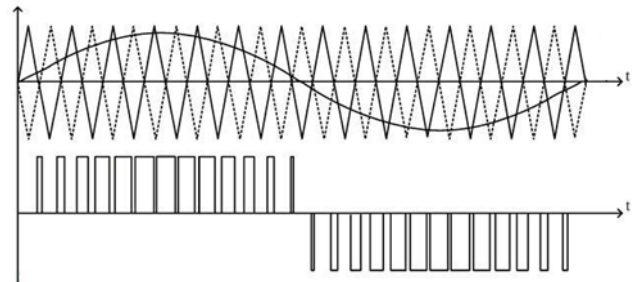


Fig. 2. Modulação por Largura de Pulso

Para além do estágio de modulação, os amplificadores Classe D diferirão em modo de operação, topologia de saída, presença ou não de filtros, entre outras problemáticas [4].

C. Amplificadores com e sem filtros

Dentre todas as vantagens dos amplificadores Classe D, o custo e tamanho do filtro LC [7] representam impeditivos para sua utilização em alguns casos. Seus componentes, especialmente os indutores, ocupam muito espaço na placa e também aumentam o preço final do dispositivo.

Em amplificadores de alta potência, o custo total do sistema é ainda competitivo, porque o custo do filtro LC é compensado por grandes economias em sistemas para refrigeração. Mas, em aplicações de baixa potência e sensíveis aos custos, a despesa do indutor pode se tornar excessiva.

Para solucionar este problema técnicas de projeto permitem a construção de amplificadores sem o filtro de saída, ou *filterless*. Entretanto, a retirada do filtro tem um custo. A ausência deste implica no aumento da interferência eletromagnética (EMI) e da dissipação de energia de alta frequência, que podem alcançar níveis inaceitáveis [7].

Esse efeito pode ser minimizado com um alto falante muito indutivo que fique bem próximo do amplificador, a fim de utilizar o coeficiente de auto indução inerente ao alto-falante para diminuir a ondulação de corrente na saída [6].

Fica clara a importância do projeto do filtro de saída para o desempenho global do sistema, em dispositivos que o utilizam. Entretanto, diversas topologias podem ser adotadas [10]. As Figuras 3, 4, 5 e 6 representam algumas dessas possíveis configurações de filtros para amplificadores Classe D.

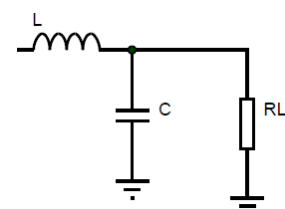


Fig. 3. Passa-baixa simples.

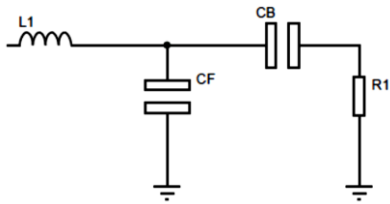


Fig. 4. Passa-baixa com capacitor de bloqueio DC.

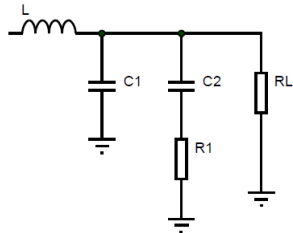


Fig. 5. Passa-baixa de segunda ordem com rede Zobel.

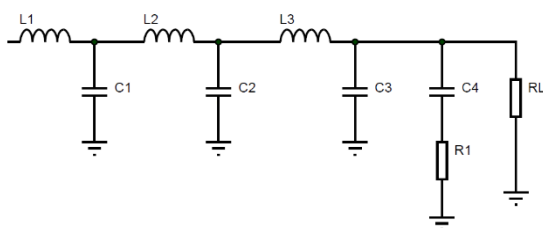


Fig. 6. Passa-baixa de quarta ordem com rede Zobel.

D. Modulação PWM e características de emissão eletromagnética

Dadas as características de modulação por meio do chaveamento em alta frequência, os amplificadores Classe D apresentam grande geração de harmônicas e em consequência, radiação eletromagnética. Este efeito natural do processo de chaveamento causa grande interferência na operação de outros dispositivos.

Este problema pode ser resolvido por meio de diversas técnicas, entre elas, a inserção de filtros de saída representa a maneira mais fácil de se obter a minimização dos ruídos eletromagnéticos provocados por esse sistema. Entretanto, no caso de dispositivos móveis, dispositivos em que o tamanho e peso sejam relevantes, ou no caso dos amplificadores *filterless*, os filtros não podem ser utilizados, ou, ainda, não apresentam a eficiência esperada. Outra metodologia empregada é a utilização de frequências de modulação elevadas, minimizando a intermodulação e os níveis de distorção harmônica total (THD – *Total Harmonic Distortion*) e consequente aumento da linearidade.

Em dispositivos mais recentes, a modulação PWM está sendo feita com vias de se obter o espalhamento espectral do sinal modulado. Esse procedimento visa minimizar os níveis de interferência eletromagnética em dispositivos próximos e tem obtido bons resultados [12, 13 e 15].

E. Topologias Half-Bridge e Full-Bridge

A conexão do alto-falante com as fontes de alimentação pode ser feita de duas formas distintas, *Half-Bridge* e *Full-Bridge*, mostradas nas Figuras 7 e 8 respectivamente.

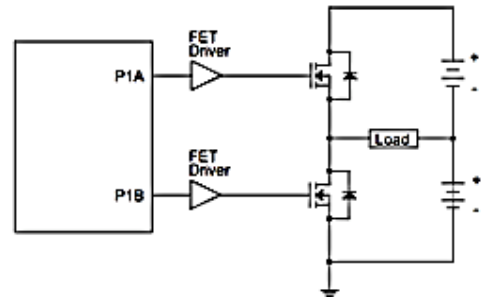


Fig. 7. Topologia Half-Bridge.

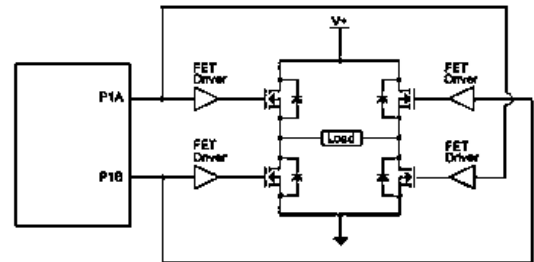


Fig. 8. Topologia Full-Bridge.

A topologia *half-bridge* necessita de fontes simétricas para o seu funcionamento e gera fluxos de corrente contínua no alto falante. Já a topologia *full-bridge* necessita de mais chaves eletrônicas [9].

Muitos amplificadores Classe D preferem a saída em ponte completa, ou *full-bridge*, dado que, além da eliminação da corrente CC, essa configuração fornece duas vezes a amplitude de tensão de saída gerando uma potência de saída teórica quatro vezes o valor para uma mesma estrutura em meia ponte, ou *half-bridge*. A desvantagem da *full-bridge* está no custo e perdas deste sistema [11].

III. SIMULAÇÕES E DISCUSSÕES

Esta seção será dedicada a apresentar algumas análises feitas a partir da simulação de funcionamento dos amplificadores classe D, a fim de comparar as diferentes abordagens possíveis de projeto.

A. Simulação de Modulação PWM

O primeiro desenvolvimento consistiu em simular a operação dos amplificadores Classe D em *half-bridge* e *full-bridge*. Para este e para os testes que se seguem, foi utilizado um sinal analógico de teste, gerado no Matlab, com as seguintes características:

- Sinal de teste composto por senóides de frequência: 20 Hz, 500 Hz, 5 kHz, 10 kHz, 15 kHz e 20 kHz;
- Sinal de teste normalizado para amplitude modular máxima de 1 [V].

Este sinal visou avaliar o comportamento dos sinais que estão dentro da faixa audível. A Figura 9 apresenta uma amostra de 20 milissegundos do sinal e a Figura 10 apresenta uma amostra de menor duração do sinal para melhor visualização das características da onda.

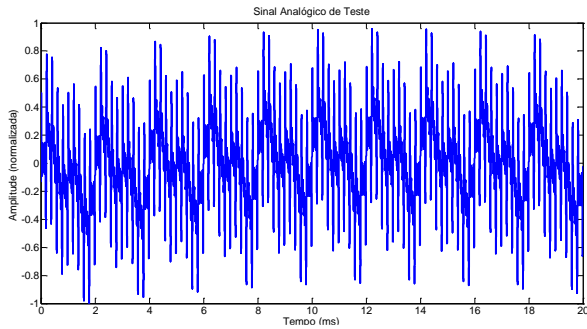


Fig. 9. Amostra do sinal analógico usado, duração de 20 [ms].

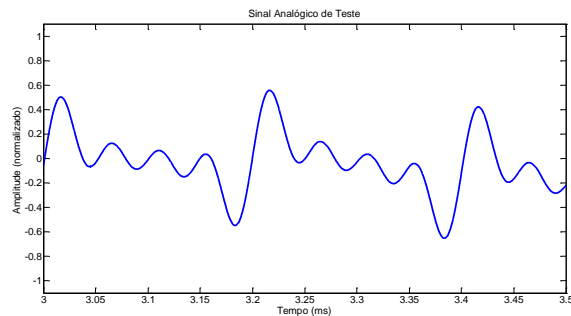


Fig. 10. Amostra do sinal analógico entre 3 e 3,5 [ms].

A Figura 11 apresenta uma avaliação do espectro de frequência do sinal apresentado nas Figuras 9 e 10. Nela é possível identificar se atingiu as características desejadas de componente de frequência, para um sinal dentro da faixa audível.

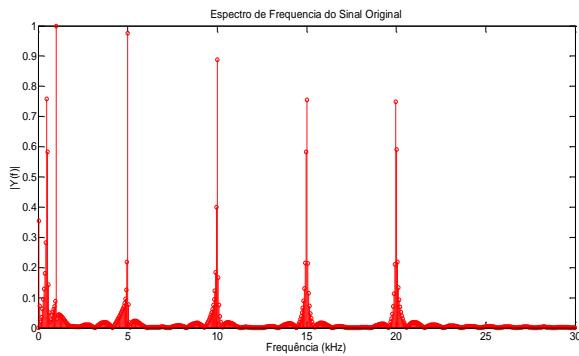


Fig. 11. Espectro de frequência do sinal analógico de teste.

Como já elucidado, o primeiro estágio de um amplificador Classe D é a modulação PWM que pode seguir a topologia *half-bridge*, ver Figura 12, ou *full-bridge*, ver Figura 13. Esses gráficos representam a saída do sinal modulado sobre o alto-falante nas condições indicadas. Para esse situação foi utilizada uma onda triangular com frequência de 300 [kHz].

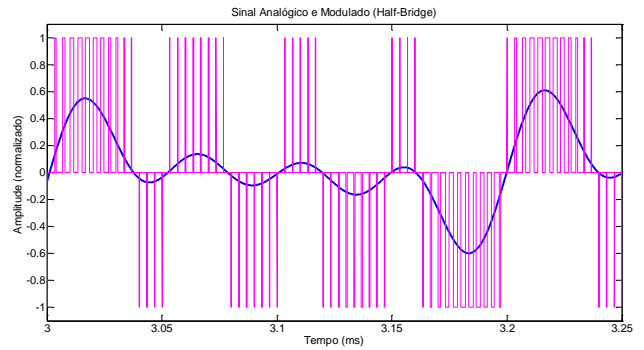


Fig. 12. PWM do sinal analógico pela topologia de *half-bridge*.

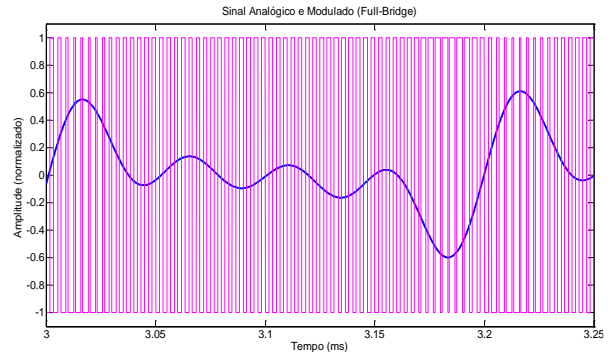


Fig. 13. PWM do sinal analógico pela topologia de *full-bridge*.

Os efeitos na frequência de cada topologia podem ser vistos na Figura 14 e na Figura 15. Comparando-as com a Figura 11, nota-se que após a modulação aparecem frequências que antes não existiam. Estas frequências representam cópias do espectro do sinal original em torno da frequência da onda triangular e de seus múltiplos sendo responsáveis pela geração de interferências eletromagnéticas e pela distorção do sinal ouvido devido à intermodulação.

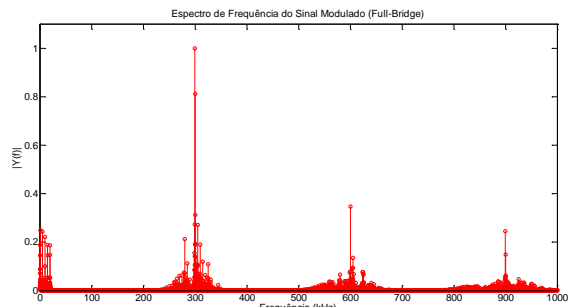


Fig. 14. Espectro do sinal modulado pela topologia de *half-bridge*.

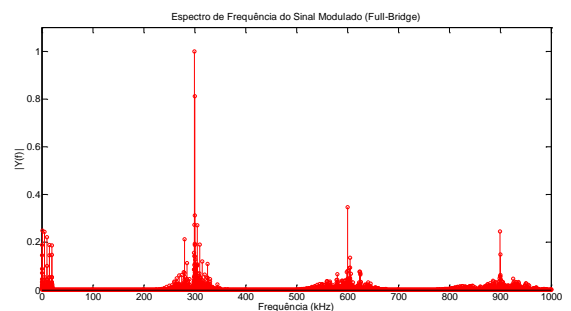


Fig. 15. Espectro do sinal modulado pela topologia de *full-bridge*.

B. Efeitos da frequência da onda do modulador PWM

É importante analisar os efeitos de variação do sinal em função da frequência do modulador. Para tanto, foi simulado um amplificador *half-bridge* com frequências da portadora iguais à 50 [kHz] (Figura 16-A), 500 [kHz] (Figura 16-B) e 900 [kHz] (Figura 16-C).

Neste exemplo é possível ver que a medida em que se aumenta a frequência do sinal modulador, os sinais resultantes do processo de intermodulação ficam cada vez mais distantes do espectro do sinal original analógico. No caso de amplificadores *filterless*, é importante afastar o máximo possível os sinais provenientes da intermodulação da faixa audível.

Hoje existem moduladores que trabalham na casa dos mega-hertz, o que minimiza os efeitos das harmônicas, dada a natureza de filtragem passa-baixa dos elementos de saída.

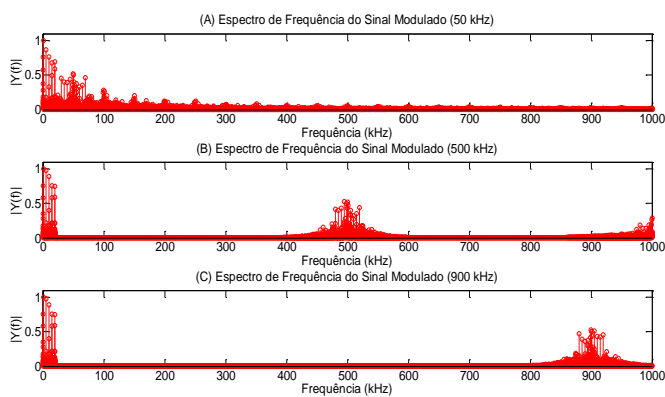


Fig. 16. Espectro do sinal modulado pela topologia de *full-bridge*.

C. Avaliação do estágio de saída de um amplificador

Para amplificadores que possuem o filtro de saída, muitos fatores influenciam a resposta. A ordem do filtro e o tipo de resposta em frequência podem modificar a qualidade de resposta.

A primeira estrutura a ser estudada é o filtro LC apresentado na Figura 3, cuja resposta em frequência é apresentada na Figura 17.

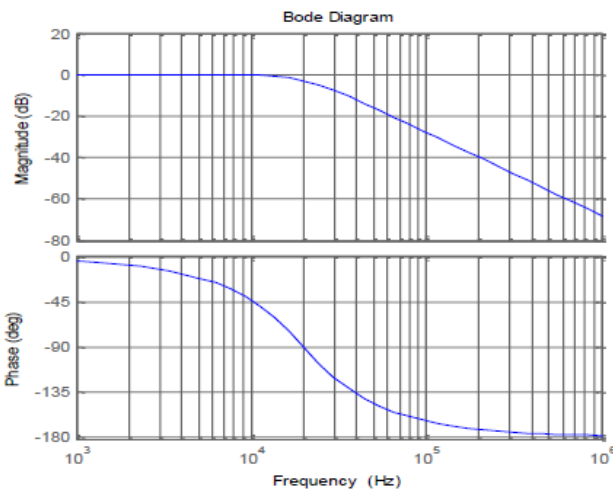


Fig. 17. Resposta em frequência do filtro LC com frequência de corte estabelecida em 20 [kHz].

A Figura 18 apresenta a simulação do sinal PWM após a

passagem pelo filtro. Apesar de menos criteriosa que a análise em frequência, é possível ver que o sinal recuperado apresenta boa semelhança com o sinal original.

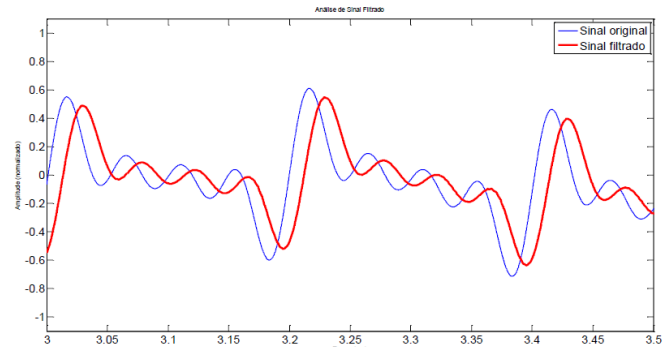


Fig. 18. Comparação do sinal de teste original (em azul) com o sinal modulado após o filtro LC (em vermelho) com frequência de corte estabelecida em 20 [kHz].

Outra estrutura de filtro muito utilizada para esta aplicação são os filtros *Zobel*, Figura 5 e Figura 6, devido à resposta plana na faixa de passagem larga. As respostas em frequência e no tempo estão apresentadas na Figura 19 e na Figura 20.

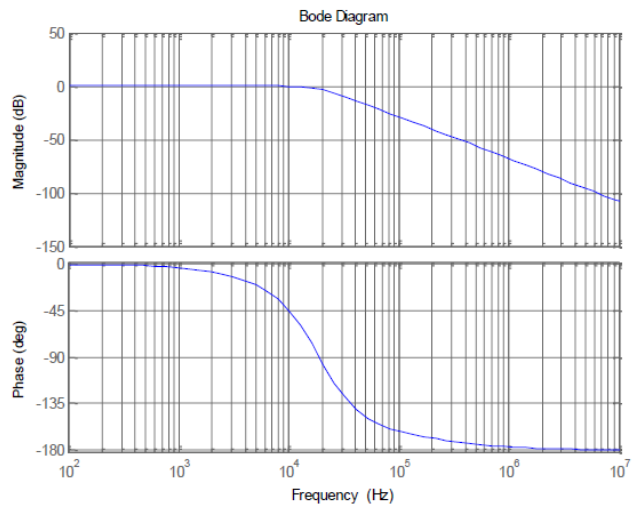


Fig. 19. Resposta em frequência do filtro LC com frequência de corte estabelecida em 20 [kHz].

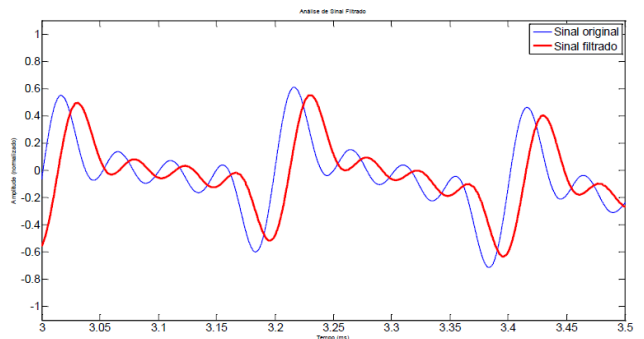


Fig. 20. Comparação do sinal de teste original (em azul) com o sinal modulado após o filtro LC (em vermelho) com frequência de corte estabelecida em 20 [kHz].

A resposta de ambos os filtros apresentados mostra grandes semelhanças, mas a segunda estrutura necessita de mais

componentes físicos para ser montada, pois trata-se de um filtro de quarta ordem, o que o torna mais difícil de ser implementado.

IV. CONCLUSÕES

Este artigo dedicou-se a analisar várias características dos amplificadores de áudio Classe D. Foram analisadas diferentes topologias, os efeitos na frequência devido à modulação PWM, além da importância do filtro de saída em suas possíveis formas. Pelas simulações observou-se que a frequência de modulação deve ser a maior possível para minimizar as distorções de intermodulação, além de facilitar o processo de filtragem.

O processo de chaveamento dos amplificadores Classe D permite maior eficiência energética que os amplificadores lineares, pois, minimiza a dissipação de potência em elementos que não os de saída.

O estágio final do processo de amplificação de áudio, que contém o filtro, é determinante para o custo total do circuito, para a linearidade da resposta do sistema e para o grau de interferência eletromagnética. Assim, o projeto do filtro de saída deve receber especial atenção pela quantidade de problemas que podem surgir caso não seja bem feito.

Sistemas *filterless* também são possíveis, mas esbarram na qualidade final, dada a não-linearidade, distorção harmônica total e na emissão de radiações eletromagnéticas.

Por fim, essa tecnologia tem ganhado grande destaque pela eficiência energética permitida, peso final, preço de fabricação e mais recentemente. No entanto, novas técnicas que minimizem ainda mais as perdas energéticas, aumente a linearidade do sistema e diminuam a interferência eletromagnética ainda devem ser estudadas, dado que a aplicação dos amplificadores de áudio Classe D tem um grande mercado para dispositivos móveis e sistemas embarcados e também podem ocupar um bom espaço na classe de dispositivos de maior potência.

REFERÊNCIAS

- [1] A. Rocha & P. Mendes (2007), *Evolução dos Circuitos Integrados*. Acedido em 15 de Maio de 2014, em: <http://evolucaoic.com.sapo.pt/trabalhopraticoticevolcircuitosintegrados.pdf>.
- [2] R. Bortoni (2009), *Amplificadores de Potência*, Studio R – São Paulo. Acedido em 17 de Maio de 2014, em: http://www.studior.com.br/amp_avan.pdf
- [3] C. Jin, M. T. Tan e K. Y. See, *High-efficiency Filterless Class D Amplifier with Peak Detector*. 8th International Caribbean Conference on Devices, Circuits and Systems (ICDCS), 2012. Pp. 1-4. Print ISBN: 978-1-4577-1116-9.
- [4] R. Cellier, G. Pillonnet, A. Nagari, N. Abouchia, *An Review of Fully Digital Audio Class D Amplifiers Topologies*. Joint IEEE North-East Workshop on Circuits and Systems and TAISA Conference, 2009. NEWCAS-TAISA '09. Pp. 1-4 Print ISBN: 978-1-4244-4573-8.
- [5] D. Guilherme, J. Guilherme e N. Horta, *Automatic Topology Selection and Sizing of Class-D Loop-Filters for Minimizing Distortion*. Xith International Workshop on Symbolic and Numerical Methods, Modeling and Applications to Circuit Design (SM2ACD), 2010. Pp. 1-4. Print ISBN: 978-1-4244-6816-4.
- [6] C. Ferreira, B. Borges, L. Sá, *Filtragem de Saída em Amplificadores de Classe D*. 2008. 10º Encontro de Engenharia de Áudio da AES Portugal, Lisboa, 12 e 13 de Dezembro, 2008. Acedido em 24 de Novembro de 2014, em: http://www.it.pt/papconf_pdf_p.asp?ID_paperconferen=6923&id=4
- [7] E. Gaalaas, *Class D Audio Amplifiers: What, Why, and How*. 2006. Acedido em: 22 de Agosto de 2014, em: http://www.analog.com/library/analogdialogue/archives/40-06/class_d.pdf
- [8] F.W. Heerdt, *Amplificadores chaveados para aplicações em áudio*. 1997. Acedido em 6 de Julho de 2014, em: <http://repositorio.ufsc.br/xmlui/handle/123456789/77342>
- [9] J. Honda e J. Adams, *Application Note AN-1071 – Class D Audio Amplifier Basics*. International Rectifier, 2005. Acedido em 11 Julho de 2014, em: <http://www.irf.com/technical-info/appnotes/an-1071.pdf>.
- [10] J. Widder e Y. T. Zhao (2006), *Understanding Output Filters for Class-D Amplifiers*. Acedido em 13 de Julho de 2014, em: http://www.eetimes.com/document.asp?Doc_id=1274877.
- [11] Maxim Integrated Products, Inc (2007). *Class D Amplifiers: Fundamentals of Operation and Recent Developments*. Acedido em 7 de Julho de 2014 em: <http://www.maximintegrated.com/en/app-notes/index.mvp/id/3977>
- [12] T. Karaca, M. Auer, G. Winkler, B. DEUTSCHMANN *Impact Of Spread Spectrum Emi-Reduction on Audio Performance of Filterless Class-D Amplifiers*. Microelectronics (Austrochip), 22nd Austrian Workshop on, 2014. Pgs 1 – 6.
- [13] Kendal & Hunt (2001), *The Class-D Amplifier: Introduction to Electroacoustics and Audio Amplifier*. Acedido em 15 de Agosto de 2014, em: http://www.ee.ucr.edu/~rlake/EE135/Class_D_amp_note_s_AL.pdf
- [14] X. Ming, Z. Chen, Z. Zhou, B. Zhang, *An Advanced Spread Spectrum Architecture Using Pseudorandom Modulation to Improve EMI in Class D Amplifier*. Power Electronics, IEEE Transactions on, 2010 – rev 2011. Volume: 26.