

Estudo sobre a eficiência energética de amplificadores de áudio classe D empregando modulação PWM

Study on the energy efficiency of class D audio amplifiers using different modulation techniques

Daniel Gimenez Gomes¹, Vinicius Dario Bacon²

RESUMO

Este trabalho aborda a evolução dos amplificadores ao longo da história, desde métodos rudimentares até tecnologias avançadas. Também é destacado as principais classes de amplificação utilizados no áudio, sendo as classes A, B, AB e D, além disso, uma breve explicação do funcionamento e características de cada classe, no entanto, o foco principal do trabalho fica no amplificador classe D e suas características de operação, já que, devido a sua alta eficiência e tamanho reduzido, pode ser implementado em diversos lugares, como fones de ouvido bluetooth. Também é abordado a construção, sendo descrito as principais etapas de funcionamento, modulação do sinal, amplificação do sinal modulado e filtragem deste sinal, tanto na teoria quanto na prática mostrando os resultados obtidos através do osciloscópio. Também foi realizado os cálculos de ganhos de potência em relação a entrada e saída, potência em cima da carga, além disso, é apresentado os pontos positivos e negativos de um amplificador classe D.

PALAVRAS-CHAVE: Amplificação; Áudio; Sinal.

ABSTRACT

This work addresses the evolution of amplifiers throughout history, from rudimentary methods to advanced technologies. The main amplification classes used in audio are also highlighted, being classes A, B, AB and D, in addition, a brief explanation of the operation and characteristics of each class, however, the main focus of the work is on the class D amplifier and its operating characteristics, since, due to its high efficiency and small size, it can be implemented in different places, such as bluetooth headphones. Construction is also covered, describing the main operating steps, signal modulation, amplification of the modulated signal and filtering of this signal, both in theory and in practice, showing the results obtained through the oscilloscope. Calculations of power gains in relation to input and output, power over load were also carried out, in addition, the positive and negative points of a class D amplifier are presented.

KEYWORDS: Amplification; Audio; Signal.

INTRODUÇÃO

A música e o som fazem parte do cotidiano há milhares de anos e sempre buscam uma maneira de amplificá-los, por inúmeros motivos, desde comunicação nos antigos exércitos à festas. Sem a eletricidade, outras soluções eram implementadas, como na acústica da sala feita para amplificar a voz e em trompetes, porém, com o avanço da tecnologia foi se criando maneiras mais eficientes de se amplificar um som, saindo de maneiras rústicas, como o fonógrafo para os ipods.

Os amplificadores são equipamentos construídos para receber um sinal elétrico de pequena amplitude em sua entrada e amplificá-los em tensão e corrente, para poder acionar na sua saída uma carga, podendo ser um alto falante. Atualmente existem 4

¹.Bolsista da Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Universidade Tecnológica Federal do Paraná - Campus Apucarana, Paraná, Brasil E-mail:danielg@alunos.utfpr.edu.br

².Docente do curso de Engenharia Elétrica Universidade Tecnológica Federal do Paraná - Campus Apucarana, Paraná, Brasil. E-mail: viniciusbacon@utfpr.edu.br ID Lattes: 0702667817086590

classes de amplificadores e cada uma tem sua característica própria de condução do sinal. Classe A criada em 1917, Classe B criada em 1945, Classe C, inapropriada para áudio quando aplicada sozinha, Classe D criada em 1963 (PIRES, F. J. A. 2010). As outras classes existentes como AB, H, G são derivadas dessas 4 principais. Pode-se encontrar duas tecnologias bem distintas de amplificadores de áudio: Amplificadores lineares, que utilizam transistores ou válvulas como elementos ativos e operam em sua região ativa, ou seja, como fontes de corrente controladas, sendo as classes A, B, C, G, H; Amplificadores chaveados, que utilizam transistores MOSFET (e outros tipos de chaves), operando como chaves estáticas liga-desliga, sendo principalmente a classe D.

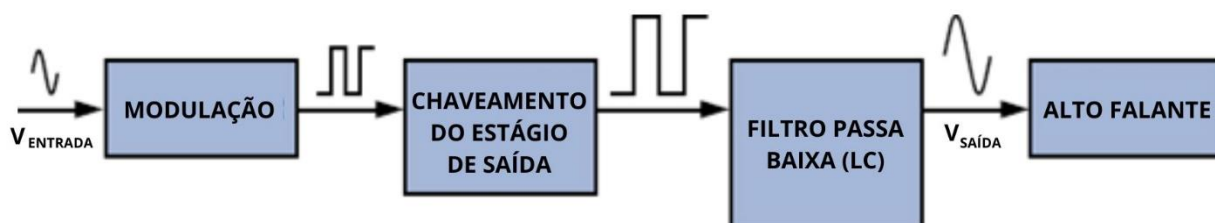
A classe A apresenta uma topologia linear de conduzir a senoide 360 graus, evitando que os transistores fiquem ligando e desligando e assim gerando uma distorção harmônica maior (Self 2013), essa característica apresenta uma alta linearidade, sua desvantagem é a baixa eficiência, cerca de 25% teóricos. Um exemplo de utilização são os consoles analógico e os pré-amplificadores de guitarra. A classe B se caracteriza por não ter corrente de polarização dos transistores, mantendo na região de corte até que um sinal seja aplicado, assim entrando na região de condução, o que faz aumentar o rendimento do circuito, idealmente, para 78,5% (Rosalfonso Bortoni 2007), porém ele só conduz 180 graus da senoide. Para resolver esse problema, um segundo transistor é adicionado para conduzir o semicírculo negativo, no entanto uma distorção harmônica é introduzida no sinal de saída, chamada de *crossover*, que é que quando os transistores estão passando da região de corte para condução, em torno de 1,4V. A classe AB é a junção da classe A com a B, e os transistores ficam polarizados um pouco acima dos 0,7V, para evitar a distorção de *crossover*. A classe C não é utilizada em áudio. Já a Classe D é totalmente diferente, pois não são lineares, o sinal de áudio é transformado em um pulso PWM, podendo ter vários tipos de modulação, e esse sinal modulado é amplificado por um inversor, e depois filtrado por um filtro passa baixa, sua eficiência teórica é de 100%, porém na prática não é atingido por perdas no circuito de chaveamento e filtro.

A proposta deste trabalho é implementar na prática um amplificador classe D e analisar seus pontos positivos e negativos.

METODOLOGIA E RESULTADOS

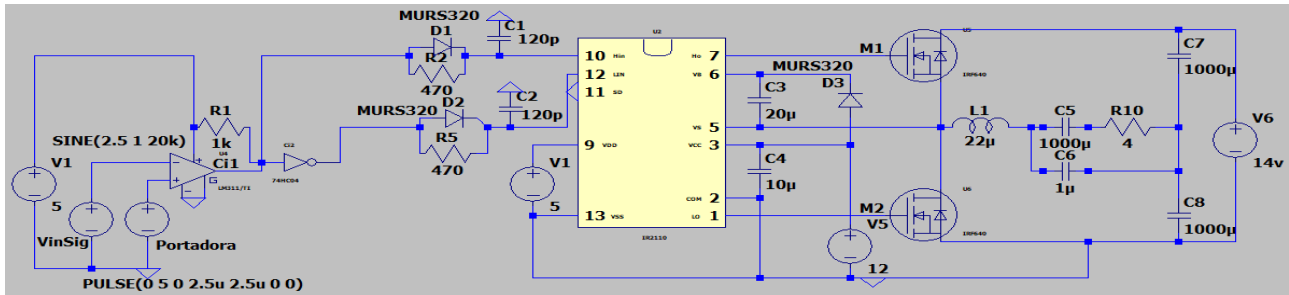
Para um melhor entendimento do funcionamento de um amplificador classe D é possível dividir o processamento do áudio em três etapas.

Figura 1- Diagrama de blocos amplificador classe D



Fonte: Eric Gaalaas 2006

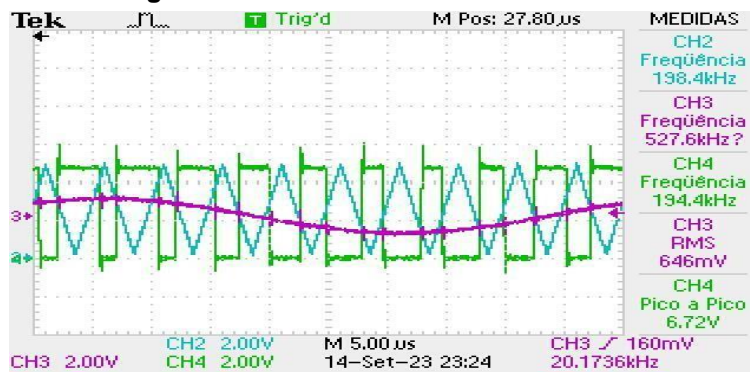
Figura 2- Esquema do circuito montado



Fonte: Autoria própria (2023).

Como é mostrado na figura 1, a primeira etapa é a de modulação do sinal, que consiste em transformar o sinal senoidal em um sinal modulado por pulsos. No esquema da figura 2, corresponde a fonte V1, R1, Ci1, VinSig e Portadora. Os quatro tipos básicos de modulação por pulsos são, PAM- *Pulse Amplitude Modulation* (Modulação por amplitude de pulso), PWM- *Pulse Width Modulation* (Modulação por largura de pulso), PPM *Pulse Position Modulation* (Modulação por posição de pulsos), PDM *Pulse Density Modulation* (Modulação por densidade de pulsos) (NIELSEN, 1998), sendo neste trabalho abordada a modulação PWM. Para modular o sinal, é preciso comparar o sinal de entrada com uma onda portadora, porém essa portadora deve ter no mínimo duas vezes a frequência da modulante, para ter uma amostragem suficiente de sinal. Como o ouvido humano ouve de 20 Hz a 20kHz, devemos ter no mínimo uma onda portadora de 40kHz, porém, para ter uma boa fidelidade, foi usado uma portadora de 200kHz. Para a modulação utilizou-se um comparador CI LM311, gerando o sinal PWM. Como foi utilizado fonte assimétrica 0 e 5V para o CI comparador, tanto a portadora como a modulante devem ter um *offset* de 2,5V, como mostrado na figura 2.

Figura 3- Resultado obtido com o circuito



Fonte: Autoria própria (2023).

A figura 3 apresenta a portadora, representada pelo sinal azul, o sinal de entrada em 20kHz pela cor roxo e o sinal PWM modulado em 200kHz na cor verde. Nota-se que o sinal modulado tem a amplitude da fonte de tensão usada 5V, o que era esperado. É possível observar também alguns transitórios (*Spike*) na modulação. Esses ruídos podem interferir na próxima etapa de amplificação. Além disso, pode-se ter a não linearidade na formação do sinal PWM, que é quando o modulador não consegue gerar o pulso a tempo para o estágio de comutação, assim, pulando um sinal de pulso, isso acontece devido a limitação de resolução e/ou instabilidade no tempo, gerando distorção harmônica (Jun Honda & Jonathan Adams, 2005).

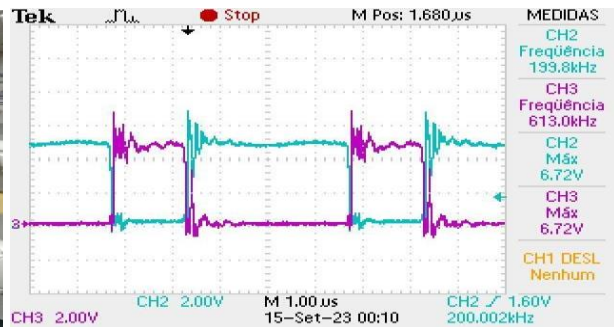
A segunda etapa é amplificar o sinal PWM. Há duas topologias para essa etapa: Meia ponte e ponte completa. As duas têm características diferentes, sendo que uma utiliza 2 e a outra 4 transistores, respectivamente. A ponte completa tem vantagens em relação à eficiência, menor distorção harmônica, elimina o nível DC da carga e não ocorre o fenômeno do *bus pumping*, que é quando uma carga indutiva devolve sua energia armazenada à fonte de alimentação, assim gerando flutuações de tensão. Esse fenômeno é mais evidente quando baixas frequência são reproduzidas, por exemplo abaixo de 100 Hz (Jun Honda & Jonathan Adams 2005). A topologia escolhida neste trabalho foi a meia ponte, por conta de necessitar menos componentes para sua implementação. No acionamento dos transistores tipo MOSFET, foi utilizado o driver IR2010, que necessita de um *dead time* e de um sinal complementar para funcionar corretamente. Para o acionamento do transistor superior é necessário usar o capacitor de *bootstrap* para criar a referência no source do transistor. O circuito é representado por C3, C4 e D3. A complementação do sinal foi feita com uma porta inversora 74HC04, em seguida, o circuito de *dead time* de 50ns foi implementado através dos componentes D1, D2, R2, R3, C1 e C2, como podemos comprovar nas figuras 4 A e B.

Figura 4 A – Dead time



Fonte: Autoria própria (2023).

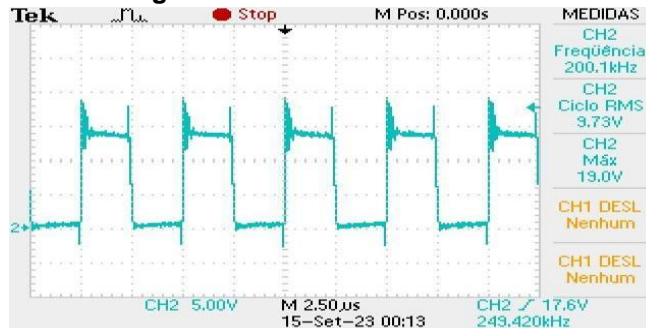
Figura 4 B – Sinal complementar na entrada IR



Fonte: Autoria própria (2023).

O sinal complementar que sai do IR2010 vai para os transistores, e o sinal obtido do chaveamento pode ser visto na figura 5. Os transistores utilizados foram os IFR630, com uma tensão de *gate* de 12V e fonte DC de 14V.

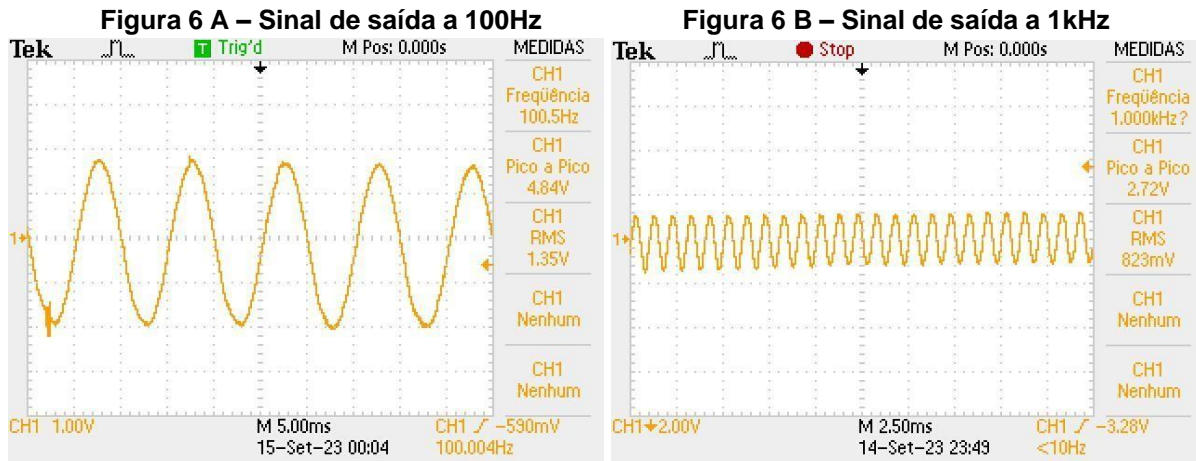
Figura 5 – Saída dos transistores



Fonte: Autoria própria (2023).

Como é possível ver na figura 5, tem bastante *spikes* no chaveamento, assim podendo gerar distorção harmônica.

A terceira etapa é o filtro de saída para reconstruir a forma de onda senoidal e retirar a alta frequência, para isso foi usado um filtro LC passa baixa de segunda ordem com um indutor e capacitor representado no circuito por L1 e C5. No cálculo do filtro, foi usado uma planilha disponibilizada pela fabricante de componentes Texas instruments, para um alto falante com impedância de 4 ohms e uma frequência de corte de 40kHz, um indutor de 22uH e um capacitor de 0,703uF foram calculados com um fator de qualidade Q de 0,703.



Fonte: Autoria própria (2023).

Fonte: Autoria própria (2023).

As figuras 6 A e B mostram que o filtro LC está funcionando muito bem, reconstruindo o sinal de saída e retirando a alta frequência do sinal com baixa distorção. Para calcular o ganho global e a potência de saída foi-se usado a equação 1 e 2.

$$Gg = Psaida/Pentrada \tag{1}$$

$$P = V * i \tag{2}$$

Tabela 1: Tensões e corrente em RMS na entrada e saída do amplificador e de potências e ganho

| Frequência | Tensão da entrada | Corrente da entrada | Potência da entrada | Tensão no alto-falante | Corrente no alto-falante | Potência saída | Ganho em relação a entrada |
|------------|-------------------|---------------------|---------------------|------------------------|--------------------------|----------------|----------------------------|
| 100Hz | 646mV | 22,5uA | 0,14535uW | 1,5V | 0,220A | 0,33W | 22703,81 |
| 1000Hz | 646mV | 22,5uA | 0,14535uW | 1V | 0,212A | 0,212W | 14585,48 |

Fonte: Autoria própria (2023).

A impedância do alto falante muda de acordo com a frequência, por isso obtivemos ganhos diferentes.

CONCLUSÃO

Com os resultados apresentados, é possível ver que o amplificador funcionou perfeitamente, amplificando o sinal de entrada em tensão e corrente como mostrado na tabela 1, e com uma baixa distorção harmônica, o que é essencial. As principais dificuldades para a implementação de um classe D é a alta frequência, pois é necessário

que os componentes empregados suportem a frequência exigida para ter um alto ganho de potência, e baixa perda, o que diminui a oferta de componentes, e para termos um ganho maior é necessário componentes melhores.

AGRADECIMENTO

Agradeço a todos que me auxiliaram na pesquisa e execução deste trabalho.

CONFLITO DE INTERESSE

Não há conflito de interesses.

REFERÊNCIAS

GAALAAS, Eric. **Class D Audio Amplifiers: What, Why, and How**, 2006. 7 p. Disponível em: <https://www.analog.com/media/en/analog-dialogue/volume-40/number-2/articles/class-d-audio-amplifiers.pdf> :Acesso em 10 nov. 2022.

HONDA, Jun; ADAMS Jonathan. **Application Note AN-1071**. Class D Audio Amplifier Basics. International Rectifier, 2005. 14 p.
Disponível em: <https://www.infineon.com/dgdl/an-1071.pdf?fileId=5546d462533600a40153559538eb0ff1> > Acesso em 25 jan. 2023.

LEMOS; Felipe Barros. **Projeto e Implementação de Filtros para um Amplificador de Áudio Classe D**. Sorocaba, 2022. 100 p. Artigo (Engenharia de Controle e Automação) - Universidade Estadual Paulista (UNESP). Disponível em < https://repositorio.unesp.br/bitstream/handle/11449/235981/lemos_fb_tcc.soro.pdf?sequence=7 > Acesso em 10 nov. 2022.

NIELSEN, Karsten. **Audio Power Amplifier Techniques With Energy Efficient Power Conversion**. Dinamarca, 1998. 335 p. Artigo (Department of Applied Electronics) - Technical University of Denmark. Disponível em < <https://www.osti.gov/etdweb/servlets/purl/10147859> > Acesso em 15 mar. 2023

PIRES, F. J. A. **Amplificador de áudio classe D**. Porto, Portugal, 2010. 130 p. Tese (Engenharia Electrotécnica e de Computadores) - Faculdade de Engenharia. Universidade do Porto. Disponível em < <https://repositorio-aberto.up.pt/bitstream/10216/59390/1/000142641.pdf> > Acesso em 06 jun. 2023.

SELF, Douglas. **Audio Power Amplifier Design**. 6. ed. Focal Press, 2013.

Texas Instruments. **LOWPASSFILTER-CALC**. Low- Pass Filter Calculator Tool. Disponível em < <https://www.ti.com/tool/LOWPASSFILTER-CALC> > Acesso em 15 mar. 2023.