



## ANÁLISE DA QUALIDADE DE UM AMPLIFICADOR DE ÁUDIO ASSOCIADO COM DIVISOR DE FREQUÊNCIA

Renato Santos Freire Ferraz<sup>1</sup>, Rafael Santos Freire Ferraz<sup>2</sup>, Brenda Leal Mota Santos<sup>1</sup>, Vanio Ferreira dos Santos Junior<sup>1</sup>, Rafael Feitosa Silva<sup>1</sup>, Rafael Rodrigues de Queiroz Freitas<sup>1</sup>, Aniel Silva de Moraes<sup>3</sup>, Adjeferson Custódio Gomes<sup>1,3</sup>

<sup>1</sup>DCET – Universidade Estadual de Santa Cruz

<sup>2</sup>DEE – Universidade Federal de Campina Grande

<sup>3</sup>FEELT – Universidade Federal de Uberlândia

**Resumo** - Os alto-falantes possuem uma faixa de frequência específica de operação. Dessa forma, uma maneira de melhorar a qualidade da reprodução do áudio é dividir o sinal em frequências compatíveis com aquelas em que o alto-falante opera. Com isso, desenvolveu-se três filtros ativos do tipo *butterworth*, compondo um divisor de frequência, que divide o sinal em grave, médio e agudo. Além disso, para que o sinal de áudio seja possível de ser reproduzido nos alto falantes, desenvolveu-se amplificadores de potência, que têm o objetivo de elevar o nível de tensão e corrente, conseqüentemente elevar a potência elétrica do sinal de entrada. Finalmente, realizou-se o projeto de uma fonte linear para alimentar todo o circuito.

**Palavras-Chave** - Amplificador, áudio, *butterworth*, filtro.

### ANALYSIS OF AN AUDIO POWER AMPLIFIER ASSOCIATED WITH A FREQUENCY DIVIDER

**Abstract** - All speakers have a specific operating frequency range. So, one way to improve the quality of audio reproduction is dividing the signal into frequencies compatible with frequency range of the speaker. Thus, three active *butterworth* filters (composing a frequency divider) were developed, that divides the signal in bass, mid and treble. In addition, in order to reproduce de audio signal on the loudspeakers, power amplifiers have been developed, which has the objective of raising to raise the voltage and current level, and consequently increase the electrical power of the input signal. Finally, a linear power supply was used in this project.

**Keywords** - Amplifier, áudio, *butterworth*, filter.

### I. INTRODUÇÃO

O amplificador de áudio é um equipamento eletrônico que a partir de um pequeno sinal de entrada, fornece uma saída amplificada para aplicação em um alto falante [1]. A principal preocupação dos desenvolvedores de amplificadores de áudio consiste na redução do tamanho, peso e custo, comprometendo, muitas vezes, a linearidade do sinal de saída. Para alcançar essas reduções, tornou-se cada vez mais frequente a utilização de amplificadores classe D além da utilização de fontes chaveadas para alimentação.

A utilização de fontes chaveadas tem como principal vantagem a elevada eficiência e uma menor quantidade de perdas no processo de regulação. Ademais, pelo fato de operar em alta frequência, os componentes utilizados, como capacitores e transformadores, possuem um tamanho e peso reduzidos [2]. No entanto, na aplicação em amplificadores de áudio, a utilização dessas fontes possui diversas desvantagens, como a inserção de ruído no circuito, que se dá por conta dos chaveamentos que ocorrem em alta frequência. Assim, para o projeto, utilizou-se uma fonte de tensão linear operando em 60 Hz, que é capaz de mitigar os problemas de ruído.

Deve-se ressaltar que o amplificador de áudio classe D, muito utilizado atualmente, possui uma alta eficiência em detrimento de uma baixa linearidade. Para resolver esse problema, utilizou-se um amplificador classe AB, que possui rendimento um pouco mais reduzido, com uma linearidade consideravelmente superior, ou seja, com um baixo nível de distorção harmônica [3].

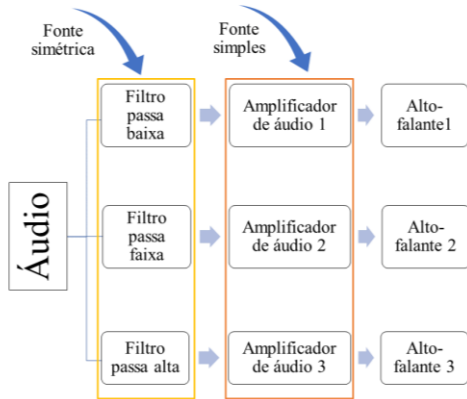
Outrossim, é fundamental dividir o sinal de entrada, através de um filtro ativo, em faixas de frequências compatíveis com as faixas de operação dos alto-falantes utilizados. Neste sentido, desenvolveu-se uma fonte linear, com um divisor de tensão, associado com um amplificador de potência classe AB, para se obter a melhor qualidade de áudio, com um rendimento consideravelmente alto.

### II. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Amplificadores de áudio são circuitos eletrônicos que tem a função de amplificar sinais de áudio. Na Figura 1, é possível

observar o diagrama de blocos do amplificador de áudio, sendo composto pela fonte simples e simétrica, divisor de frequência (filtros) e amplificador de áudio.

Figura 1: Circuito completo de amplificador de áudio.



Inicialmente, deve-se notar que os circuitos amplificadores de áudio e de divisores de frequência (filtros) necessitam de uma alimentação de corrente contínua (CC) para operar de forma correta. Em contrapartida, a energia elétrica disponível na rede é em corrente alternada (CA). Com isso, faz-se necessária a utilização de retificadores e filtros para fazer a conversão de CA para CC [4].

No caso do amplificador de potência, utilizou-se uma fonte simples, ou seja, em um terminal tem-se uma tensão positiva, e no outro a referência zero, também chamado de terra. Enquanto que para o circuito do divisor de frequência (filtro), utiliza-se uma fonte simétrica, ou seja, com um terminal de referência (terra), um com tensão positiva e outro com tensão negativa, com mesmo módulo.

Nas Figuras 2 e 3 estão presentes os dois tipos de fonte citadas anteriormente.

Figura 2: Circuito da fonte linear simples.

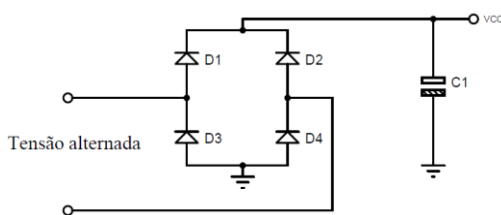
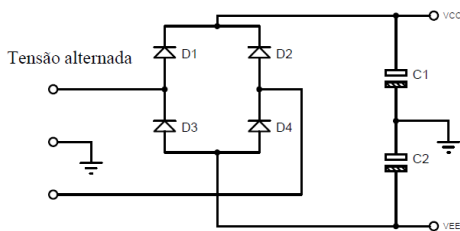


Figura 3: Circuito da fonte linear completa.



Analisando as Figuras 2 e 3, fica claro que na entrada do circuito é aplicada uma tensão CA, diretamente da rede elétrica, que passa por um transformador abaixador (omitido nos circuitos) e em seguida pela ponte de diodos. Durante o

semiciclo positivo da tensão de linha, os diodos D1 e D4 conduzem, enquanto que no semiciclo negativo D2 e D3 conduzem, produzindo assim, um semiciclo positivo na carga, em todos os instantes. Depois disso, é aplicado um filtro capacitivo para a tensão deixar de ser pulsante [5].

Sabe-se que a tensão de saída de uma ponte retificadora é pulsante, necessitando de um filtro de capacitores para tornar linear. A principal função do capacitor é reduzir a tensão de ripple, que é dada pela descarga do capacitor [5]. O valor da capacitância é dado pela Equação (1).

$$C = \frac{1}{2fV_r} \quad (1)$$

Onde:

$C$  – Capacitância.

$f$  – Frequência.

$V_r$  – Tensão de ripple tolerável.

Para o divisor de frequências, é fundamental a utilização de filtros. Com relação ao desenvolvimento do filtro passivo, a utilização de indutores traz desvantagens em função do seu custo e volume, dessa forma, optou-se pela utilização de filtros ativos, compostos por amplificador operacional, capacitor e resistor. A sua classificação pode ser dada como: passa baixa, passa alta e passa faixa, sendo o primeiro composto por um circuito que busca atenuar as frequências superiores à frequência de corte. Já o filtro passa alta, tem as frequências abaixo da frequência de corte são atenuadas e, por fim, o filtro passa faixa, em que existem duas frequências de corte, sendo que apenas a faixa de frequência entre as duas frequências de corte não é atenuada [6].

O filtro utilizado no projeto, foi um filtro *butterworth* de 2 polos, sendo que sua característica consiste em tornar a resposta em frequência o mais plana possível. A topologia do filtro *butterworth* está presente nas Figura 4 e 5.

Figura 4: Filtro passa alta *butterworth*.

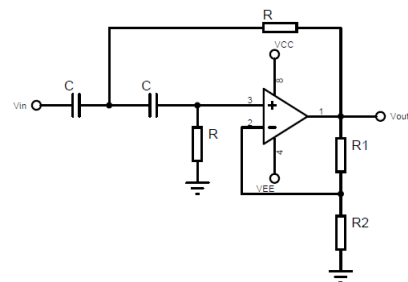
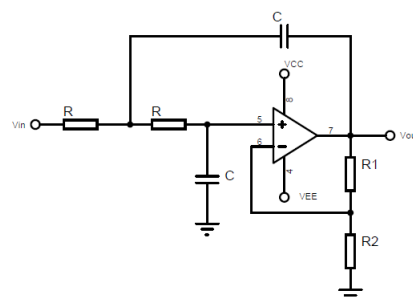


Figura 5: Filtro passa baixa *butterworth*.



Sendo que a frequência de corte do filtro é dada pela Equação (2).

$$f_c = \frac{1}{2\pi RC} \quad (2)$$

Onde:

- $f_c$  – Frequência de corte.
- $R$  – Resistência do circuito.
- $C$  – Capacitância.

Na última etapa do circuito da Figura 1, está presente o amplificador de áudio, que é composto por estágios de ganho de tensão e de corrente. Sabe-se que o amplificador trabalha em um certo ponto de operação, também chamado de ponto quiescente, sendo que no projeto almeja-se posicionar esse ponto no centro da reta de carga [5].

Atualmente, existem diversos circuitos integrados que compõem boa parte do circuito do amplificador, com o objetivo de reduzir o espaço físico ocupado pelo projeto, mantendo a qualidade e fidelidade do áudio. Além disso, utiliza-se uma realimentação no circuito, para reduzir o ruído e estabilizar o ganho. Dessa forma, variações nos parâmetros físicos dos componentes do circuito amplificador não vão comprometer na linearidade do sinal da saída.

Em relação às classes de amplificadores de áudio, destacam-se os amplificadores classe A, B e AB. O primeiro possui a menor taxa de distorção harmônica, porém com o menor rendimento. Isso se dá pelo fato, dos transistores de saída estarem sempre em operação, dessa forma, sempre vai existir uma corrente de polarização, que compromete o consumo elétrico [7].

Os amplificadores classe B, possuem um rendimento consideravelmente superior ao classe A, já que este utiliza dois transistores na saída, não tendo a necessidade de uma corrente de polarização. Em contrapartida, isso faz com que a linearidade seja comprometida no momento da transição dois transistores, gerando a distorção de crossover [3,8].

O amplificador classe AB, resolve a distorção de crossover, mantendo uma pequena corrente de polarização dos transistores de saída, não comprometendo no rendimento do amplificador. Com isso, o amplificador utilizado será classe AB [3].

Para avaliar a qualidade de um amplificador de áudio, existe a taxa de distorção harmônica (THD), que indica o resultado da não linearidade do sinal de saída, em relação ao de entrada. Para encontrar o valor da THD, deve-se somar todos os harmônicos do sinal senoidal original, após passar pelo amplificador, dividido pela tensão total de saída, sendo dada pela Equação 3 [9,10].

$$THD = \frac{\sqrt{v_2^2 + v_3^2 + \dots + v_n^2}}{\sqrt{v_1^2 + v_2^2 + v_3^2 + \dots + v_n^2}} \cdot 100\% \quad (3)$$

### III. MATERIAIS E MÉTODOS

O projeto é dividido em três etapas, a fonte linear, o filtro ativo e o amplificador de potência. Para implementar o projeto da fonte deve-se utilizar transformador, diodos e capacitores. Nesse projeto, utilizou-se uma fonte simples e uma fonte simétrica, dessa forma para a fonte simétrica foi utilizado um

transformador com TAP central (três saídas) enquanto que para a fonte simples utiliza-se um transformador com apenas duas saídas.

No caso do filtro ativo, será utilizado amplificador operacional, resistores e capacitores. Enquanto que para o amplificador de potência é necessária a utilização de circuitos integrados, resistores e capacitores.

É importante notar, que para a composição geral do projeto, serão utilizados dissipadores de calor, para acoplar no circuito integrado, chaves liga/desliga, conectores e fios.

O procedimento de projeto do amplificador de áudio consiste inicialmente no projeto detalhado de todas as etapas, utilizando como base a teoria destacada na fundamentação teórica. Deve-se ressaltar, que nessa etapa os valores alcançados devem ser adaptados para valores comerciais. Depois disso, deve-se simular o circuito obtido por cálculos, para verificar sua eficácia. O *Proteus* é o software utilizado para simulações do projeto.

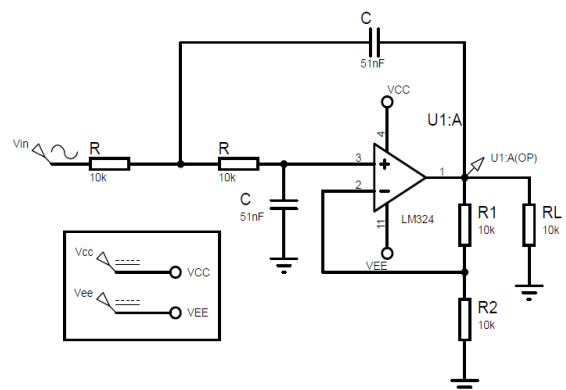
Após a verificação do circuito a partir de simulações, deve-se adquirir os componentes para que seja realizada a montagem na protoboard de todas as etapas do projeto. Por conseguinte, realizou-se a verificação dos resultados obtidos para analisar se está operando como esperado.

Finalmente, foram realizados o desenho e a montagem da placa de circuito impresso com todos os componentes e assim extrair os resultados práticos.

### IV. RESULTADOS

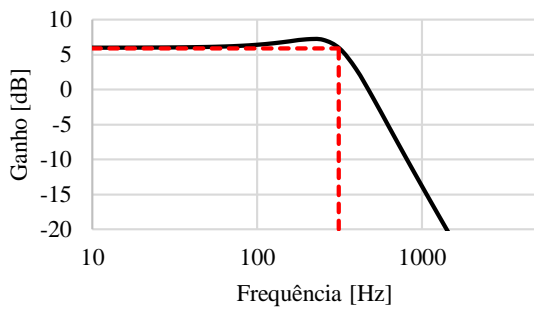
É possível observar, na Figura 6, o filtro *butterworth* utilizado no projeto, nota-se que o valor adotado para a capacitância foi de 51 nF e a resistência do filtro foi de 10 kΩ. Com isso, utilizando a Equação (2), calculou-se a frequência de corte, 312,07 Hz.

Figura 6: Simulação do filtro passa baixa.



Na Figura 7, está presente a resposta em frequência do filtro passa baixa da Figura 6, sendo que a frequência de corte, de 312,07 Hz, está destacada no gráfico.

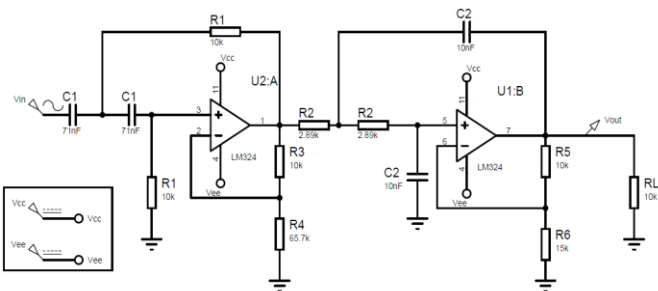
Figura 7: Resposta em frequência do filtro passa baixa.



Como o filtro analisado é um passa baixa, em que se atenua todas as frequências a partir da frequência de corte. Na Figura 7 é possível visualizar a resposta em frequência desse filtro, ficando claro que a frequência que não vai ser atenuada são as baixas, caracterizando o grave do som.

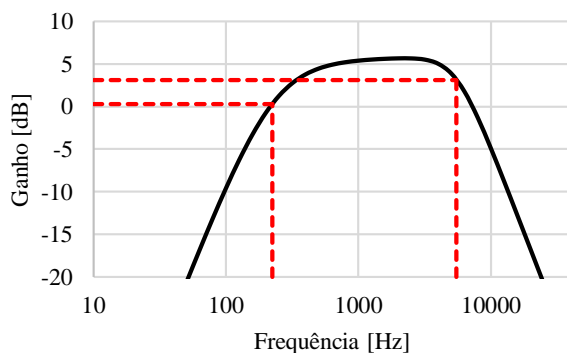
No caso do filtro *butterworth* passa faixa, presente na Figura 8, existem dois filtros em cascata, o passa alta, que possui resistência de  $10\text{ k}\Omega$  e capacitância  $71\text{ nF}$ , caracterizando uma frequência de corte de  $224,17\text{ Hz}$ . Além do filtro passa baixa, que possui resistência de  $2,89\text{ k}\Omega$  e capacitância  $10\text{ nF}$ , conseqüentemente, com frequência de corte de  $5507,25\text{ Hz}$ .

Figura 8: Simulação do filtro passa faixa.



No gráfico da resposta em frequência do filtro analisado, Figura 9, é possível observar a banda passante, que está entre as frequências de corte calculadas anteriormente e indicadas no gráfico.

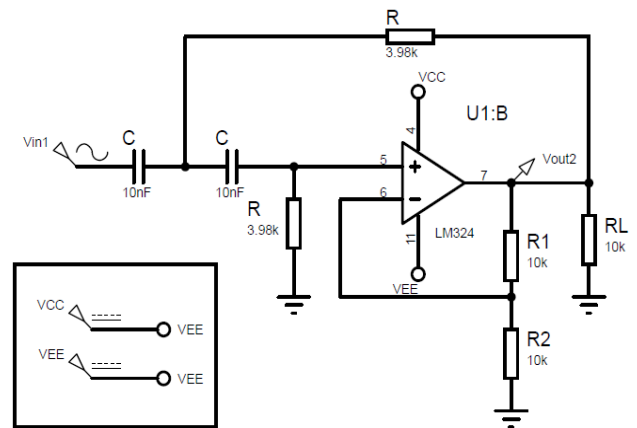
Figura 9: Resposta em frequência do filtro passa faixa.



No projeto, implementou-se um filtro passa alta, que vai compor o som agudo do amplificador, presente na Figura 10. Para esse filtro, o capacitor de  $10\text{ nF}$  e um resistor de  $3,98\text{ k}\Omega$ ,

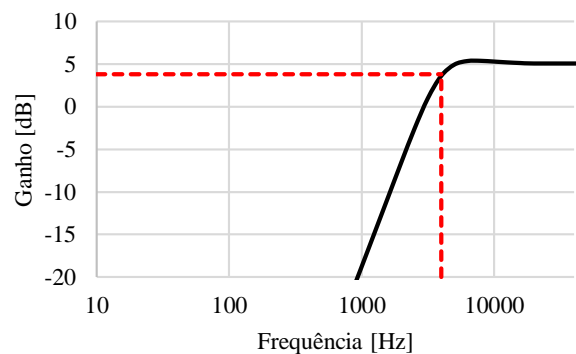
foram estabelecidos para que a especificação da frequência de corte seja de  $4\text{ kHz}$ .

Figura 10: Simulação do filtro passa alta.



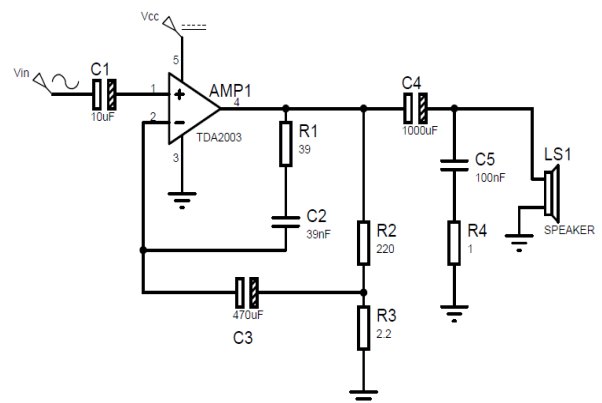
Ao observar a Figura 11, pode-se concluir que as frequências abaixo da frequência de corte (em destaque no gráfico), foram atenuadas.

Figura 11: Resposta em frequência do filtro passa alta.



Além dos filtros, o projeto possui um amplificador de potência, representado pela Figura 12, que é composto pelo circuito integrado TDA 2003, a realimentação e capacitores de acoplamento na entrada e saída, que tem o objetivo de não permitir a passagem de sinais com frequência muito baixa.

Figura 12: Simulação do circuito amplificador.



Analisando a Figura 12, nota-se a presença de uma realimentação negativa em  $R_2$  e  $R_3$ , que é necessária no circuito já que nenhum amplificador é ideal, de forma que o sinal de saída não é uma réplica amplificada do sinal de entrada. Até mesmo um amplificador razoavelmente linear sofre a influência das variações de tensões, da temperatura de forma a variar as características do transistor no seu ponto de operação, o que acarreta em uma limitação da fidelidade do sinal de saída.

Com a realimentação negativa, o amplificador é dessensibilizado de forma que sinais estranhos são reduzidos a certa proporção e a distorção do sinal é reduzida gerando também um aumento da largura de banda do amplificador e alterações nas impedâncias de entrada e de saída. Em compensação, o ganho em malha fechada do amplificador é reduzido na mesma proporção pela qual as alterações no ganho em malha aberta são suprimidas, ou seja, pela dessensibilidade promovida pela realimentação negativa.

#### A. Taxa de distorção harmônica

Para encontrar a THD do amplificador projetado, amplificou-se uma tensão puramente senoidal do amplificador, com frequência de 1 kHz. Na saída obteve-se uma tensão aproximadamente senoidal com tensão RMS de 2,27 V, Figura 13. Dessa forma, utilizou-se a função de transformada rápida de Fourier (FFT) do osciloscópio, Figura 14, e obteve-se a componente fundamental, juntamente com as cinco primeiras componentes harmônicas múltiplas da fundamental. Os dados obtidos estão presentes na Tabela I.

Figura 13: Tensão de saída do amplificador de potência.



Figura 14: FFT do sinal de saída do amplificador de potência.

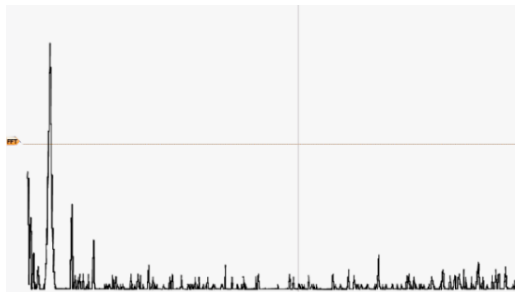


Tabela 1: THD da saída do amplificador

	dB	V
$v_1$	7,05000	2,2516
$v_2$	-40,5000	0,0094
$v_3$	-43,3000	0,0068
$v_4$	-48,1000	0,0039
$v_5$	-46,5000	0,0047
$v_6$	-55,4000	0,0016
<b>THD</b>		0,5902 %

Sabendo que o alto-falante tem uma impedância de 4,7  $\Omega$ , e que no momento da análise havia uma tensão em seus terminais de 2,27  $V_{RMS}$ , obteve-se uma potência de saída de aproximadamente 1 W. Com o auxílio da Equação 3, foi possível obter a THD de 0,59 % do circuito, para as condições citadas anteriormente. Ressalta-se que segundo o *datasheet* do circuito integrado utilizado no amplificador (TDA 2003), a THD para as condições utilizadas no projeto é de 0,15%, sendo que a diferença se justifica pela utilização dos filtros ativos com amplificadores operacionais de baixo custo. Em contrapartida, apesar dos valores de distorção obtidos experimentalmente, é possível concluir que sinal amplificado na saída, possui uma elevada fidelidade em relação ao sinal aplicado na entrada, gerando uma alta qualidade no áudio reproduzido pelos alto-falantes.

#### B. Rendimento

Para realizar o cálculo do rendimento do amplificador de áudio, foi aplicada uma tensão senoidal na entrada do amplificador, com frequência de 1 kHz e medida a tensão RMS de saída e a impedância de cada alto-falante. Com isso, foi possível alcançar a potência elétrica de cada canal do amplificador, sendo que esses dados estão presentes na Tabela II.

Tabela 2: Potência de saída nos alto-falantes

	Potência entregue à carga			
	Tensão [V <sub>rms</sub> ]	Frequência [kHz]	Impedância [ $\Omega$ ]	Potência [W]
<b>Grave</b>	5,11	1,00	3,50	7,46
<b>Médio</b>	3,88	1,00	4,70	3,20
<b>Agudo</b>	5,55	1,00	8,00	3,85
<b>Total</b>				14,51

Além disso, foram medidos os valores de corrente e tensão CA na entrada do amplificador, ou seja, a potência demandada da rede elétrica pelo dispositivo. A partir dessas duas grandezas calculou-se a potência ativa total, Tabela III.

Tabela 3: Potência demandada da rede elétrica

Potência da fonte		
Tensão [V <sub>rms</sub> ]	Corrente [mA <sub>rms</sub> ]	Potência [W]
<b>124,20</b>	150,90	18,74

Comparando o valor da potência na entrada do amplificador (Tabela III), com a potência total nos alto falantes (Tabela II), é possível calcular o rendimento do dispositivo, de 77,44 %, sendo próximo ao valor presente em

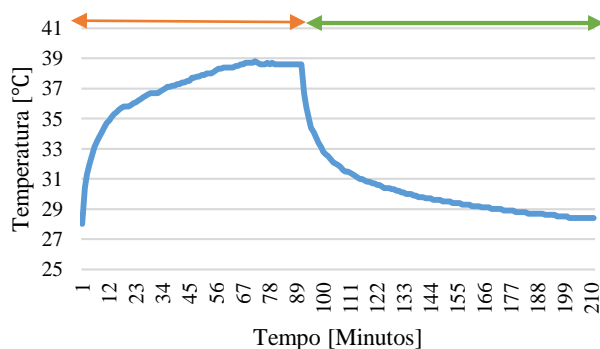


[11], de 78,5 %. Com isso, nota-se uma alta eficiência do amplificador, visto que transforma grande parte da potência de entrada em potência útil. Ademais, evidencia-se que, a partir da teoria do amplificador classe AB e analisando as Tabelas I e III, que é viável desenvolver um circuito amplificador com baixa distorção e alto rendimento.

### C. Temperatura

Na Figura 15, é possível observar o gráfico da variação da temperatura do circuito integrado TDA 2003, acoplado em um dissipador de calor. Deve-se notar que o dispositivo foi ligado no instante zero e desligado depois de 90 minutos. Para realizar a medida, utilizou-se um termopar ligado no multímetro Fluke 17B+.

Figura 15: Gráfico da temperatura do circuito integrado TDA 2003.



Analisando a Figura 15, fica claro que depois de aproximadamente em 70 minutos a temperatura se estabilizou em 38,6 °C, ficando constante por 20 minutos. Com isso, é possível concluir, que se o dispositivo ficasse ligado por mais tempo, não haveria um sobre aquecimento. Isso foi possível em função da presença de um dissipador de calor acoplado diretamente com o transistor (com o auxílio da pasta térmica). Sendo que a medida que o CI aquece o dissipador, este é resfriado por convecção, com o ar.

Ademais, observa-se que a partir do minuto 90, quando o dispositivo foi desligado, a temperatura decai rapidamente nos primeiros minutos e depois tende a se estabilizar na temperatura ambiente. Pode-se concluir que foi adotado um dissipador com dimensões ideais para o projeto.

## V. CONCLUSÕES

A partir da análise dos resultados alcançados é possível notar que a THD do amplificador é de 0,59%, deixando claro que é possível escutar um sinal de áudio de boa qualidade. Ademais, com um rendimento de 77,44%, nota-se que as perdas do circuito são consideravelmente baixas, dessa forma, o circuito aproveita grande parte da energia demandada da rede para produzir som. Finalmente, a partir de testes de temperatura no componente eletrônico que mais esquenta no circuito, o circuito integrado, é possível concluir que o amplificador pode ficar ligado por longos períodos de tempo, sem o risco de sobreaquecimento.

## AGRADECIMENTOS

Reconhecemos o apoio do professor Rafael Queiroz durante a realização do presente trabalho. Ademais agradecemos ao auxílio de Roberto Ferraz que contribuiu para consolidação do projeto.

## REFERÊNCIAS

- [1] STUDIOR. **Amplificadores Passo a Passo**. Disponível em: <<http://www.studior.com.br/beaba.htm>> Acesso em 21 de fevereiro de 2018
- [2] CURSO DE ELETRÔNICA BÁSICA, ANÁLISE DE CIRCUITOS E DIGITAL. **Fonte chaveada comparada com fonte linear**. Disponível em: <<http://www.curso-eletronica.com.br/artigos/fonte-chaveada-comparada-com-fonte-linear>> Acesso em 21 de fevereiro de 2018
- [3] UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO. **Classe operação dos amplificadores de áudio**. Disponível em: <[http://www2.ee.ufpe.br/codec/classes\\_Ampli.pdf](http://www2.ee.ufpe.br/codec/classes_Ampli.pdf)> Acesso em 21 de fevereiro de 2018
- [4] HARDWARE. **Fonte de alimentação**. Disponível em: <<http://www.hardware.com.br/termos/fonte-de-alimentacao>> Acesso em 21 de fevereiro de 2018
- [5] MALVINO, Albert; BATES, David J. **Eletrônica (vol. 1)**. 7 ed. McGraw-Hill, 2008.
- [6] MALVINO, Albert; BATES, David J. **Eletrônica (vol. 2)**. 7 ed. McGraw-Hill, 2008.
- [7] PIRES, F. J. A. **AMPLIFICADOR DE ÁUDIO CLASSE D**. 2010. Dissertação (Mestrado Integrado em Engenharia Eletrotécnica e de Computadores). Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto (FEUP). Porto, 2010.
- [8] SCHWAAB, E. **ESTUDO E IMPLEMENTAÇÃO DE UM AMPLIFICADOR DE ÁUDIO CLASSE D**. 2012. Trabalho de graduação (Graduação em Engenharia Elétrica). Universidade do Estado de Santa Catarina (UDESC). Joinville, 2012.
- [9] ÁUDIO MÚSICA & TECNOLOGIA. **Amplificadores de áudio – Parâmetros principais**. Disponível em: <<http://www.musitec.com.br/blogs/classicos/?c=76>> Acesso em 21 de fevereiro de 2018
- [10] INSTITUTO NCB. **Distorção – O que você precisa saber**. Disponível em: <<http://www.newtoncbraga.com.br/index.php/electronica/52-artigos-diversos/10522-distorcao-o-que-voce-deve-saber-art2411>> Acesso em 21 de fevereiro de 2018
- [11] BORTONI, R. **Amplificadores de Potência**. Disponível em: <[http://www.studior.com.br/amp\\_avan.pdf](http://www.studior.com.br/amp_avan.pdf)> Acesso em 08 de outubro de 2018