

Projeto, montagem e teste de um subwoofer ativo

De Faria Silva, Wellington Corrêa

Curso de Engenharia Elétrica Universidade Federal de São Carlos
São Carlos (SP), Brasil
wellington@estudante.ufscar.br

De Francisco, Carlos Alberto

Departamento de Engenharia Elétrica Universidade Federal de São Carlos
São Carlos (SP), Brasil
cfrancisco@ufscar.br

Abstract – The present work describes in detail the development and construction of an active bass reproduction system "subwoofer". For this, it uses a TPA3255 integrated circuit. This class D amplifier has two outputs that are applied to each of the two $4\ \Omega$ coils of the BRAVOX-P12X-D4 loudspeaker, which has a nominal power of 220 WRMS. In addition, the system has adjustment features (volume control, phase inversion and adjustable low-pass filter) and protection (against overvoltage, overcurrent and filters). All circuits were mounted on printed circuit boards and their operation was evaluated through performance measurements. A comparison of the costs involved in the project in relation to the commercialized models was also carried out.

Keywords: Class D Amplifier TPA3255. Low-pass adjustable. Phase inversion. Active subwoofer.

Resumo – O presente trabalho descreve em detalhes o desenvolvimento e construção de um sistema ativo de reprodução de graves "subwoofer". Para isso utiliza um circuito integrado TPA3255. Esse amplificador classe D possui duas saídas que são aplicadas a cada uma das duas bobinas de $4\ \Omega$ do alto-falante BRAVOX-P12X-D4, o qual possui uma potência nominal de 220 W_{RMS} . Além disso, o sistema possui recursos de ajustes (controle de volume, inversão de fase e filtro passa-baixas ajustável) e proteção (contra sobretensão, sobrecorrente e filtros). Todos os circuitos foram montados em placas de circuito impresso e seu funcionamento avaliado por meio de medições de desempenho. Também foi realizado um comparativo dos custos envolvidos no projeto em relação aos modelos comercializados.

Palavras-chave: Amplificador Classe D TPA3255. Filtro passa-baixas ajustável. Inversor de fase. Subwoofer Ativo.

I. INTRODUÇÃO

O subwoofer ativo é um dispositivo de áudio projetado para reproduzir as frequências mais baixas do espectro sonoro, comumente conhecidas como graves. Sua principal característica está em sua forma compacta, ou seja, como os elementos do sistema estão organizados em um mesmo compartimento [23]. Outro diferencial é a presença de um amplificador interno dedicado de alta eficiência (classe D), o

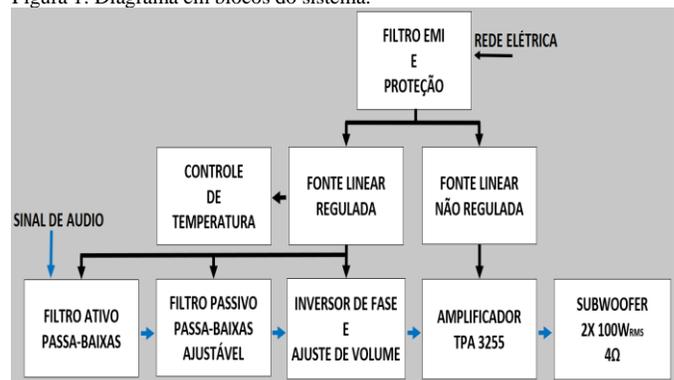
que o torna diferente do passivo, que requer um amplificador externo para seu funcionamento.

O conhecimento das principais partes que compõem o dispositivo (fonte, amplificador, filtros e carga) na etapa de projeto, trazem melhoras significativas de desempenho e qualidade. Por esse motivo são amplamente utilizados em sistemas de áudio residenciais, home theaters e em ambientes profissionais por aqueles que buscam experiências sonoras imersivas e de alta fidelidade.

O conceito de amplificadores Classe D começou a ser desenvolvido e explorado nos anos 1950 e 1960, mas foi a partir de 1990 que começou a ser difundida [25]. Devido à alta eficiência, é amplamente utilizada em aparelhos portáteis, home theaters, subwoofers ativos, som profissional e caixas de som ativas [1]. Segundo [2], a vantagem dessa topologia está em sua eficiência (maior que 90%) se comparada com a classes A (25% sem transformador e 50% com transformador) e a classe B (máxima de 78,5%). Esse aproveitamento energético é proveniente da utilização de chaves semicondutoras controladas por um sinal PWM da ordem de centenas de quilohertz, que por sua vez, operam no corte ou na saturação, apresentando pequena perda de potência apenas quando está conduzindo. O resultado desse processo é um sinal modulado que necessariamente utiliza um filtro passa-baixas com corte entre 30kHz e 60kHz para extrair um valor médio para atuar no alto-falante [1].

O principal motivador do projeto proposto a ser elaborado (subwoofer ativo), é o alto custo dos modelos no mercado. Por esse motivo deverá ser realizado um comparativo e demonstrar de forma clara e objetiva o custo estimado do subwoofer ativo projetado em comparação com os modelos comerciais equivalentes. A Figura 1 traz o diagrama em blocos de cada etapa a ser realizada.

Figura 1: Diagrama em blocos do sistema.



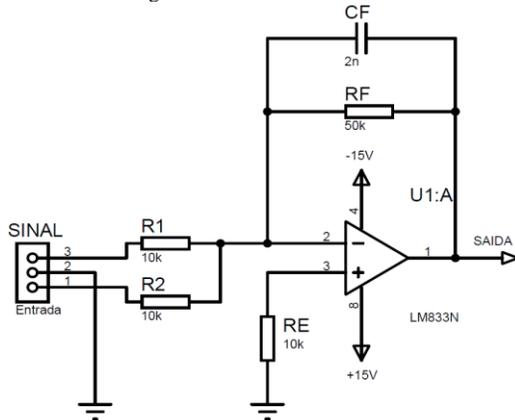
Fonte: Autor.

II. PROJETOS

A. Filtro ativo passa-baixas

O circuito apresentado na Figura 2 é conhecido como somador e filtro passa-baixas ativo[7]. Foi projetado com o objetivo de atenuar sinais acima de 1,6 kHz, manter o ganho estável em 5 para frequências abaixo da frequência de corte e somar os sinais em ambos os canais de áudio.

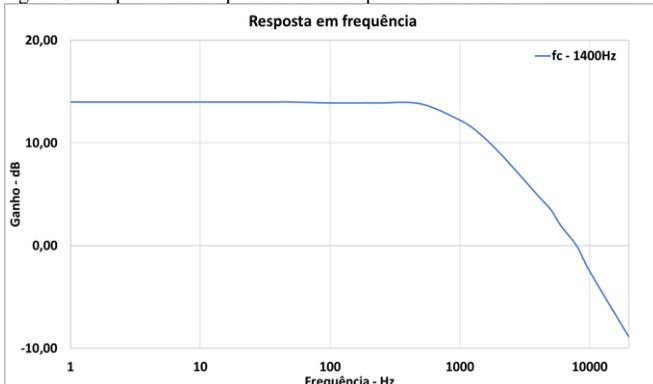
Figura 2: Circuito integrador – Proteus.



Fonte: Autor.

Após a montagem do circuito (Figura 2), foram realizadas medições utilizando uma tensão de pico fixa de 100mV na entrada. Os resultados obtidos foram uma tensão de pico de 500mV em baixas frequências e uma frequência de corte de 1400Hz(Figura 3). É possível que a divergência na frequência de corte seja proveniente tanto da precisão do instrumento de medição quanto dos valores dos componentes utilizados no circuito. Contudo, o filtro passa-baixas ativo funcionou conforme o esperado, atenuando as frequências acima de 1,6 kHz e mantendo o ganho em 5 para as frequências abaixo da frequência de corte, além de realizar a soma dos sinais dos dois canais de áudio.

Figura 3: Resposta em frequência do filtro passa-baixas ativo – MATLAB.



Fonte: Autor.

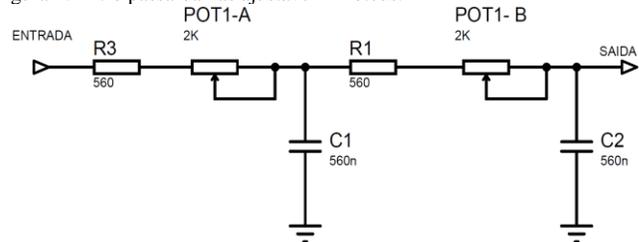
B. FILTRO PASSA-BAIXAS AJUSTÁVEL

O filtro passivo passa-baixas RC de segunda ordem (Figura 4), possibilita ajustar a frequência de corte do sinal proveniente da saída do somador a uma faixa de frequência desejada. Para isso, sua função transferência (1) conta com um

par de pólos responsável em atenuar o sinal a uma taxa de 40dB por década acima da frequência de corte.

O potenciômetro duplo atua como um único componente ajustável, controlando as resistências de ambas as seções em conjunto, proporcionando a capacidade de ajustar a frequência de corte do filtro na faixa desejada (40 Hz a 190 Hz) para reprodução de graves. É importante notar que para ambas as partes do filtro (duas seções RC) tenham o mesmo comportamento, os capacitores e as resistências equivalentes devem possuir os mesmos valores. A utilização de um potenciômetro duplo em série com um resistor permite ajustar simultaneamente as resistências das duas seções, garantindo que ambas tenham os mesmos valores. Isso é importante para manter a resposta do filtro simétrica e alcançar uma frequência de corte precisa e idêntica em ambas as seções. A função de transferência (1) representa a relação entre a tensão de saída e a tensão de entrada do filtro passivo.

Figura 4: Filtro passa-baixas ajustável - Proteus.



Fonte: Autor.

$$\frac{V_o(s)}{V_i(s)} = \frac{1}{s^2 + s \cdot \frac{3}{R \cdot C} + \frac{1}{C^2 \cdot R^2}} \quad (1)$$

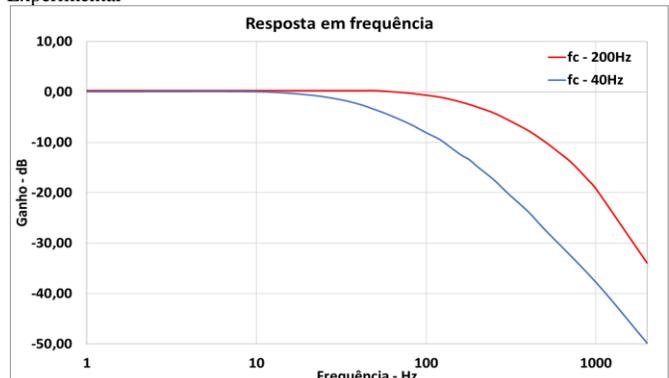
Com C e R sendo composto por:

$$R = R3 + \text{POT1} - A = R1 + \text{POT1} - B \quad (2)$$

$$C1 = C2 \quad (3)$$

A análise experimental do filtro passivo passa-baixas RC de segunda ordem envolveu medições em duas etapas: uma com o ajuste na máxima frequência e outra na mínima. A Figura 5 mostra os resultados obtidos dessas medições.

Figura 5: Resposta em frequência do filtro passa-baixas ajustável – Experimental



Instrumento de medição: Osciloscópio Hantek-6022BE.

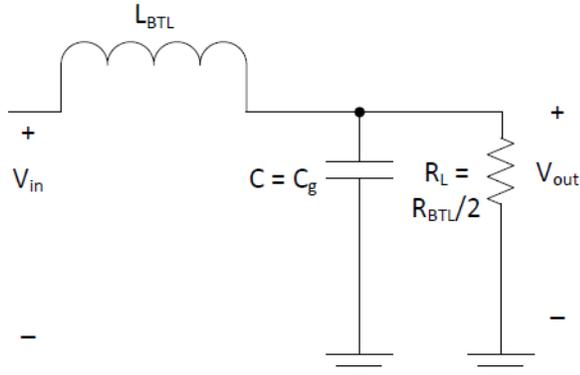
Fonte: Autor.

Mesmo com a pequena divergência na frequência de corte entre a máxima atenuação (40 Hz) e a menor atenuação (200 Hz) do filtro, a Figura 5 comprova que o circuito funcionou conforme o esperado e alcançou o objetivo pretendido. Vale lembrar que essa discrepância pode ser resultado da precisão dos instrumentos e da tolerância dos componentes utilizados.

C. FILTRO LC DE SAÍDA

O sinal de saída de alguns amplificadores classe D, mesmo com filtro passa-baixas LC em suas saídas, exibem sinais de alta frequência provenientes do seu chaveamento. Esses sinais mesmo não sendo audíveis, podem trazer prejuízos ao equipamento e a outros na mesma rede devido às suas componentes harmônicas [9]. Esse efeito indesejado pode afetar as medidas da THD+N (distorção harmônica total mais ruídos) e da potência de saída [3] [22]. Por esse motivo, para realizar as medições do sinal de saída do amplificador, foi utilizado o filtro LC em modo comum (Figura 6), e seus componentes obtidos através das equações (4) e (5) [9].

Figura 6: Filtro passa-baixas LC de segunda ordem.



Fonte: Texas Instruments, 2016 [9].

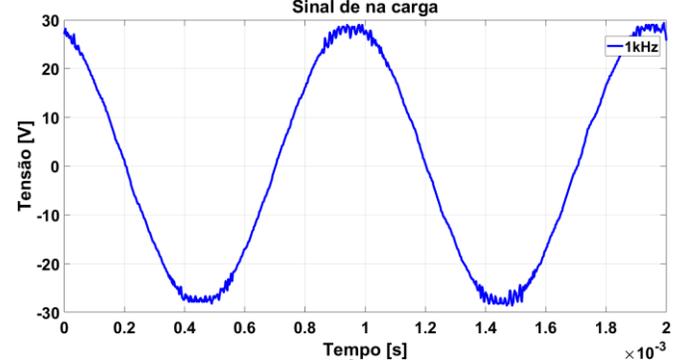
$$L = \frac{R_L \cdot \sqrt{2}}{2 \cdot \pi \cdot f_0} \quad (4)$$

$$C = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot f_0 \cdot R_L \cdot \sqrt{2}} \quad (5)$$

Para comparação, as medições foram feitas de duas formas distintas, primeiro sem a utilização do filtro LC (Figura 7), e depois, com o filtro LC (Figura 8) formado por um capacitor de 1 μ F e um indutor de 22 μ H. Todas as medições foram realizadas com uma carga de 4 Ω e uma potência de saída de 100W.

Os resultados mostraram que o sinal na saída do filtro apresentou poucos ruídos, o que proporcionou melhores medidas. Isso indica que o filtro LC em modo comum foi eficaz na atenuação dos sinais de alta frequência indesejados.

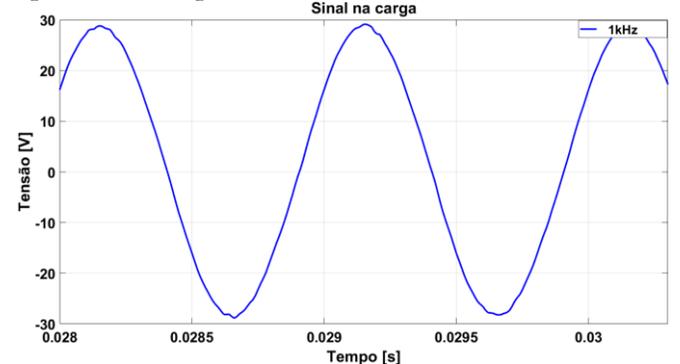
Figura 7: Sinal na carga de 4 Ω a 100W sem o filtro LC adicional.



Instrumento de medição: Osciloscópio Hantek-6022BE.

Fonte: Autor.

Figura 8: Sinal na carga de 4 Ω a 100W com o filtro LC adicional



Instrumento de medição: Osciloscópio Hantek-6022BE.

Fonte: Autor.

A tabela I, elaborada a partir da transformada rápida de Fourier do sinal da Figura 8 e suas amplitudes harmônicas correspondentes, permitiu calcular a distorção harmônica total (THD). O resultado obtido foi uma THD de 0,93%, o que é considerado um resultado satisfatório para a potência aplicada.

Tabela I: Distorção harmônica total do sinal da figura 8.

Amplitude das harmônicas	dB
V2	-49,05
V3	-42,25
V4	-55,84
V5	-54,80
V6	-53,56
V7	-58,92
V8	-57,10
Total	0,93%

Instrumento de medição: Osciloscópio Hantek-6022BE.

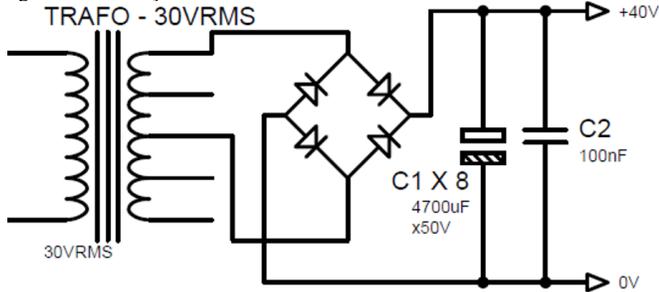
Fonte: Autor.

D. FONTE LINEAR NÃO REGULADA

1) TENSÃO DE SAÍDA

O circuito integrado TDA3255, de acordo com sua folha de dados [14], requer uma fonte de tensão de aproximadamente 35VDC para fornecer uma potência de 120W a uma carga de 4 Ω em cada um de seus dois canais. Para atender a esse requisito, a fonte linear não regulada (Figura 9) foi projetada, utilizando um transformador de 127/30 VRMS, uma ponte retificadora e filtro capacitivo.

Figura 9: Retificação e filtro da fonte.- Proteus.



Fonte: Autor.

Durante o projeto da fonte, a fim de obter o valor efetivo da tensão de saída, foram levados em consideração parâmetros como a tensão sobre a carga [14], tensão de ondulação desejada de 5%, a queda de tensão de 2,4V nos diodos da ponte retificadora (1,2V para cada diodo), e a queda de tensão no secundário do transformador, que ocorre devido à resistência interna do transformador ($0,24\Omega$), resultado obtido por medições com carga puramente resistiva.

Utilizando as equações propostas por [8], foi possível calcular a capacitância mínima necessária de $37600\mu\text{F}$, a tensão de pico de 37,62V, a tensão média de 36,58V e a tensão mínima de 35,54V. Esses parâmetros são fundamentais para garantir que o circuito forneça a tensão necessária ao amplificador TDA3255, possibilitando o suprimento adequado da carga (alto-falante BRAVOX-P12X-D4) em sua potência nominal.

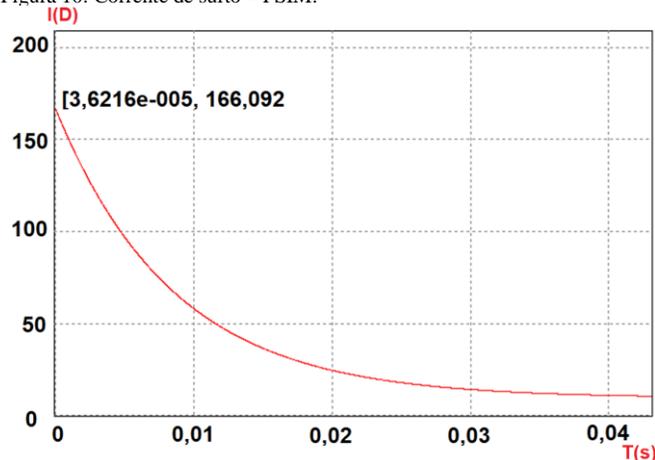
2) CORRENTE DE SURTO E DE PICO REPETITIVO

Em fontes de alimentação, conhecer o comportamento da corrente é de extrema importância para garantir o funcionamento seguro e confiável da ponte retificadora e de todo o circuito. A escolha adequada dos diodos é fundamental para assegurar a eficiência e a durabilidade da fonte.

O comportamento da corrente, especialmente em situações transitórias, como o pico de corrente de surto quando a fonte é ligada, é crucial para determinar a capacidade dos diodos de suportar cargas de corrente elevadas sem danos.

Ao projetar o circuito a fim de obter a corrente de surto (Figura 10), foram considerados os seguintes elementos: uma fonte de tensão contínua de 40VDC com resistência interna de $0,24\Omega$, um capacitor de $4700\mu\text{F}$ e uma carga de 4Ω .

Figura 10: Corrente de surto – PSIM.

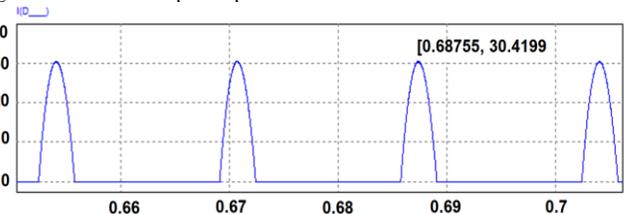


Fonte: Autor.

Através dessa simulação, foi possível observar a corrente de surto de 166A nos diodos da ponte retificadora quando a chave é fechada. Esse pico de corrente ocorre devido o capacitor estar descarregado no instante que a fonte é ligada, nesse momento o capacitor se comporta inicialmente como um curto-circuito, permitindo que uma corrente muito alta flua pelos diodos da ponte retificadora [10]. Essa corrente de surto é transitória e ocorre apenas por um curto período até que o capacitor seja carregado e alcance sua tensão nominal.

Para simular a corrente de pico repetitivo (Figura 11), é utilizado um modelo aproximado que considera a queda de tensão nos diodos e a resistência interna do transformador. A curva de corrente de pico repetitivo em regime permanente é importante para garantir que os diodos escolhidos possam lidar com a corrente sem apresentar superaquecimento ou falhas ao longo do tempo.

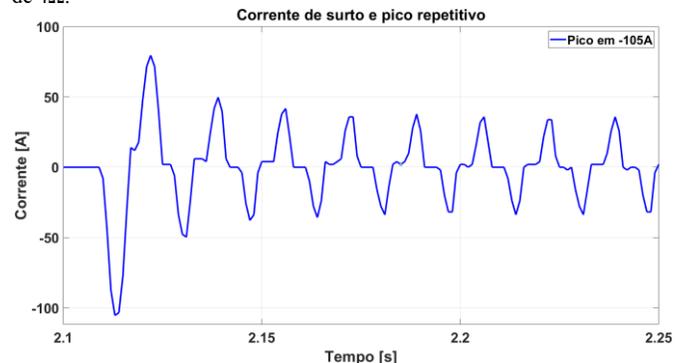
Figura 11: Corrente de pico repetitivo – PSIM.



Fonte: Autor.

Em seguida, uma montagem experimental foi realizada, e a corrente de surto foi medida utilizando um osciloscópio e uma ponta de prova apropriada. Os resultados experimentais (Figura 12) mostraram que a corrente de surto medida foi de 105A, apresentando uma discrepância em relação ao valor simulado. Já a corrente de pico repetitivo apresentou valores próximos dos 30A obtidos em simulação.

Essa diferença provavelmente se deu por causa das perdas no transformador causadas principalmente pelas resistências nos enrolamentos e perdas de Foucault (também conhecidas como perdas por correntes parasitas).

Figura 12: Corrente de surto e pico repetitivo na ponte retificadora com carga de 4Ω .

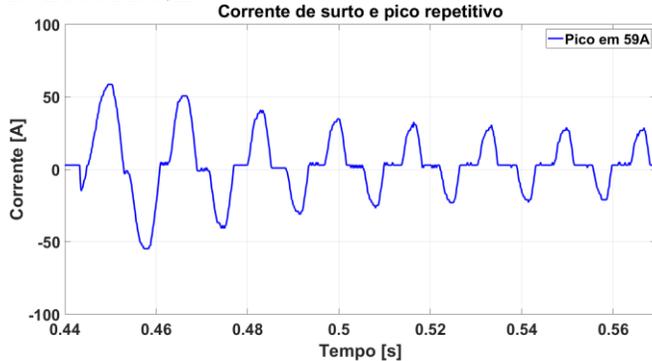
Instrumento de medição: Osciloscópio Hantek-6022BE.

Fonte: Autor

Sabendo que a corrente de pico de 105A sobre os diodos são elevadas, que seu efeito também aparece na instalação elétrica e na carga, a implementação do termistor NTC (Coeficiente de Temperatura Negativo) de 10Ω na entrada da fonte de

alimentação se tornou necessária. Com essa ação foi possível obter uma redução significativa de 46A (Figura 13) na corrente de surto, tornando a operação mais segura e confiável. Isso foi possível devida as características não-lineares do termistor NTC, que diminui sua resistência à medida que a temperatura aumenta com a passagem da corrente e vice-versa.

Figura 13: Corrente de surto e pico repetitivo na ponte retificadora com carga de 4Ω e NTC de 10Ω.



Instrumento de medição: Osciloscópio Hantek-6022BE.

Fonte: Autor

Após a realização dos testes, constatou-se que apenas a tensão de entrada é senoidal, com isso, o fator de potência foi obtido pela equação (6) e (7) proposta por [13].

$$THD = \frac{\sum_{n=2}^{\infty} I_n^2}{I_1} \quad (6)$$

$$FP = \frac{\cos \theta}{\sqrt{1 + THD^2}} \quad (7)$$

A tabela II traz os valores da fonte obtidos experimentalmente.

Tabela II: Parâmetros da fonte principal.

UNIDADES	VALOR
TENSÃO DA REDE - [V]	124,40
CORRENTE DA REDE - [A]	3,57
POTÊNCIA NA ENTRADA - [VA]	444,11
TENSÃO NA CARGA DE 4 Ω - [V]	32,80
CORRENTE NA CARGA DE 4 Ω - [A]	8,54
POTÊNCIA NA CARGA - [W]	280,11
PERDAS (TR., PONT. E CAP.) - [W]	102,61
FATOR DE POTÊNCIA	0,86
RENDIMENTO TOTAL	0,73

Fonte: Autor

E. FILTRO EMI E PROTEÇÃO DA FONTE

O projeto apresentado envolve o desenvolvimento de um filtro modo comum de segunda ordem, um filtro modo diferencial e uma etapa de proteção para a fonte principal.

1) FILTRO MODO COMUM

O projeto do filtro modo comum (Figura 14)[4][5] foi projetado para atenuar interferências e ruídos que possam ser

induzidos no sinal. Ele é de segunda ordem, o que significa que possui uma taxa de atenuação de 12dB por oitava após 150kHz, frequência de corte escolhida que corresponde a 25% dos 600kHz utilizados no chaveamento dos transistores do amplificador[14]. Para a selecionar os componentes dessa etapa, foi escolhido um valor arbitrário de 2,2nF para o capacitor C_Y . O indutor de 512μH foi obtido através das equações (8), (9) e (10), considerando um fator de amortecimento de 0,707.

$$L_{CM} = \frac{1}{C\omega n^2} \quad (8)$$

$$\xi = \frac{L_{CM}}{2 \cdot R_L \sqrt{L_{CM} \cdot C_Y}} \quad (9)$$

$$\frac{V_O(s)}{V_I(s)} = \frac{1}{1 + \frac{L_{CM}}{R_L} \cdot s + L_{CM} \cdot C_Y \cdot s^2} \quad (10)$$

2) FILTRO MODO DIFERENCIAL

O filtro modo diferencial (Figura 14) projetado atenua ruídos e interferências que possam ser captados de forma diferencial pelo sistema [6][9]. Ele foi projetado para ter uma frequência de corte de 150kHz e corrente máxima de 5mA sobre o capacitor C_X .

O valor 100nF para o capacitor C_X foi calculado usando a equação (11), que leva em consideração a indutância (valor arbitrário) e a frequência de corte desejada. A corrente sobre o capacitor é calculada usando as equações (12) e (13), onde é levada em conta a tensão de rede (127V_{RMS}) e a reatância do capacitor a 60Hz.

$$C_X = \frac{1}{8 \cdot \pi \cdot L \cdot f_{DM}} \quad (11)$$

$$I_{CX} = 2 \cdot \pi \cdot f_{Rede} \cdot V_{Rede} \cdot C_X \quad (12)$$

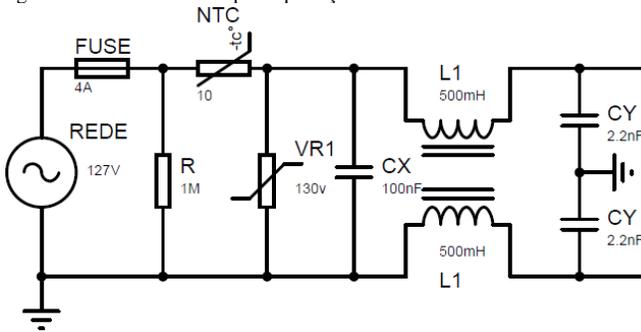
$$X_C = \frac{V_{Rede}}{I_{CX}} \quad (13)$$

3) PROTEÇÃO DE ENTRADA

A etapa de proteção (Figura 14)[4] é essencial para garantir a segurança do sistema e evitar danos aos componentes em caso de sobrecarga ou falhas. Ela é composta por um fusível de vidro de 4A para interromper o circuito em caso de correntes excessivas, um varistor de 130V para proteger contra surtos de tensão, um resistor de descarga de 1MΩ e um termistor NTC de 10Ω para diminuir da corrente de surto.

O conjunto filtro EMI e proteção pode ajudar a minimizar ruídos e interferências indesejadas e um melhor funcionamento da fonte.

Figura 14: Filtro EMI e etapa de proteção CA.

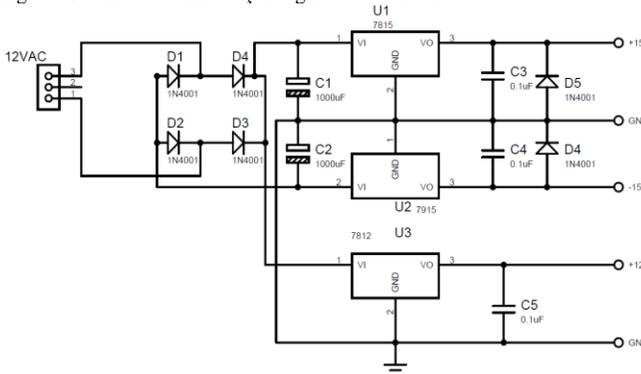


Fonte: Autor.

F. FONTE REGULADA

O circuito da Figura 15 consiste em duas fontes reguladas, uma simétrica de $\pm 15\text{VDC}$ com circuitos integrados LM7815 e LM7915, responsável por alimentar os amplificadores operacionais, e outra não simétrica de 12VDC com circuito integrado LM7812, responsável em alimentar o sistema de controle de temperatura. Ambas contam com transformador com derivação central de $\pm 13\text{VCA}$ a 1A e filtros capacitivos para estabilidade e resposta transitória. Na fonte simétrica o par de diodos evita que uma das fontes possa levar a outra a uma tensão de saída inversa através da carga, assim, evitando falhas tanto na carga quanto no regulador.

Figura 15: Fonte de alimentação regulada. – Proteus.



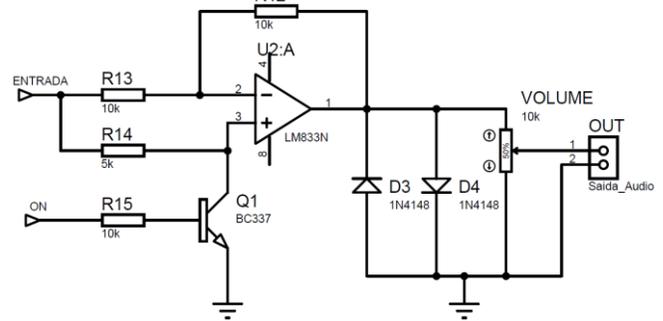
Fonte: Autor.

G. INVERSOR DE FASE E AJUSTE DE VOLUME

O circuito inversor (Figura 16) proposto por [4], permite inverter o sinal comutando uma chave Q1. Essa função é útil para evitar cancelamentos indesejados do sinal quando necessário. O circuito opera como um inversor de fase com ganho próximo de ± 1 , ou seja, a amplitude do sinal de saída é essencialmente igual à do sinal de entrada, mas com uma inversão de fase de 180° .

O ajuste da amplitude do sinal de saída é realizado por meio de um resistor variável que permite controlar a quantidade de sinal efetivamente entregue ao amplificador, possibilitando ajustar o volume. Além disso, a amplitude desse sinal é propositalmente limitada em $0,7\text{V}$ pelo par de diodos de sinais em configuração antiparalela.

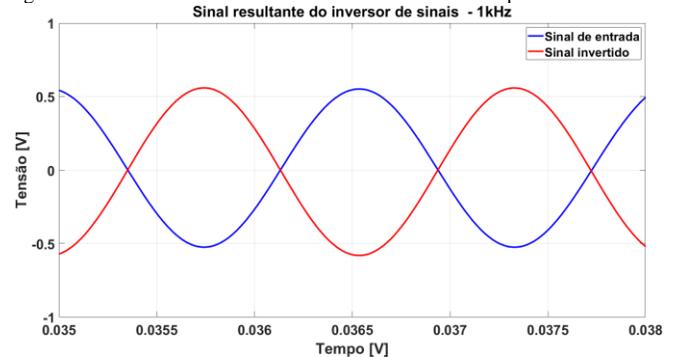
Figura 16: Circuito inversor opcional; $G = \pm 1$. – Proteus.



Fonte: Autor.

A figura 17 apresenta o resultado experimental da etapa do circuito inversor. Conforme esperado, o sinal sofreu um deslocamento de fase de 180° , o que significa que a forma de onda do sinal invertido é exatamente oposta à forma de onda do sinal de entrada. Além disso, o ganho do circuito é praticamente unitário, o que significa que a amplitude do sinal de saída é quase idêntica à amplitude do sinal de entrada, apenas invertida em fase.

Figura 17: Entrada e saída do circuito inversor de fase - Experimental.



Instrumento de medição: Osciloscópio Hantek-6022BE.

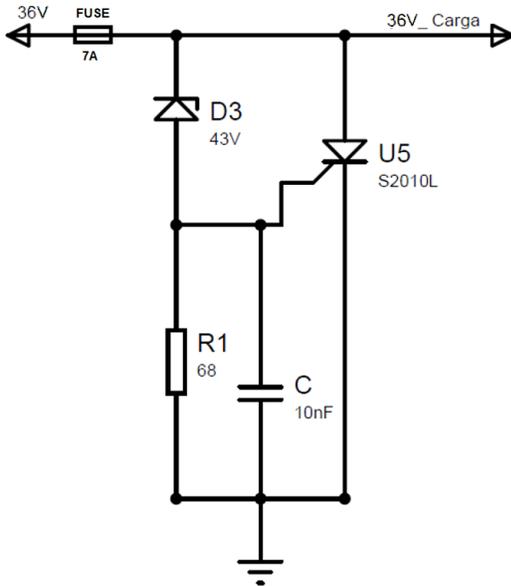
Fonte: Autor

H. PROTEÇÃO SOBRETENSÃO

O circuito de proteção contra sobretensão da fonte não regulada (Figura 18) proposto por [4], foi implementado antes do amplificador e ajustado para disparar o SCR (Retificador Controlado de Silício) quando a tensão for igual ou superior a 43VDC , ou seja, 3VDC acima da tensão em circuito aberto da fonte. Quando o disparo ocorre, a alta corrente sobre o SCR leva a queima do fusível na entrada.

O uso de um circuito de proteção contra sobretensão é importante para salvaguardar os componentes eletrônicos do amplificador e do subwoofer ativo como um todo.

Figura 18: Circuito de proteção contra sobretensão.

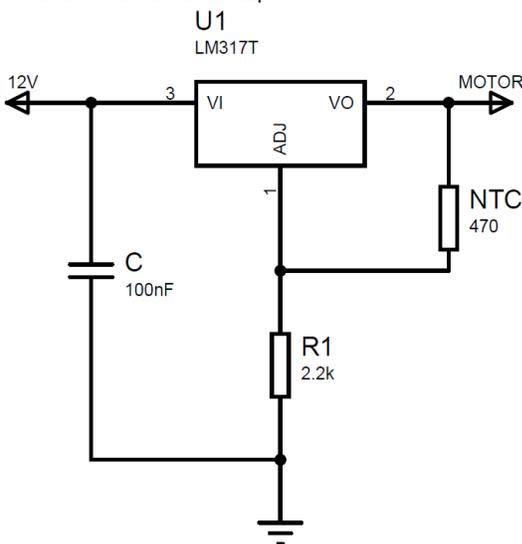


Fonte: Autor.

I. CONTROLE DE TEMPERATURA

Os testes realizados demonstraram que o fator limitante para o amplificador TDA3255 é a sua elevada temperatura. Quando o circuito integrado atinge 52°C , seu sistema de proteção interno atua desligando-o. O circuito da Figura 19, proposto por [11][12], utiliza de um regulador de tensão que varia com a resistência de referência, ou seja, um termistor do tipo NTC. Quando a resistência do NTC diminui com aumento da temperatura, a tensão de saída do LM317 que é aplicado ao ventilador (Foxconn – PVA092G12M) aumenta. Esse aumento da tensão resulta em uma maior velocidade de rotação do ventilador, melhorando a dissipação de calor do amplificador e mantendo sua temperatura em um nível adequado.

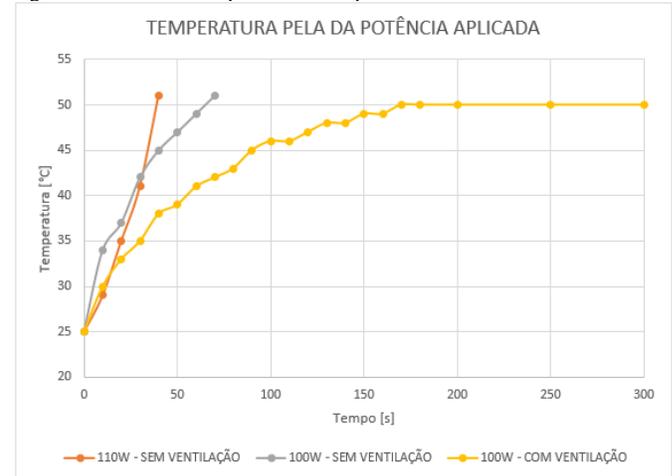
Figura 19: Circuito controlador de temperatura.



Fonte: Autor.

Os testes realizados comprovaram a eficácia do sistema de ventilação controlada pelo NTC. Conforme mostrado nas curvas da Figura 20, a ventilação foi capaz de manter a temperatura do amplificador em torno de 50°C , mesmo operando em sua potência máxima de 100W por canal.

Figura 20: Curvas de temperatura do amplificador.

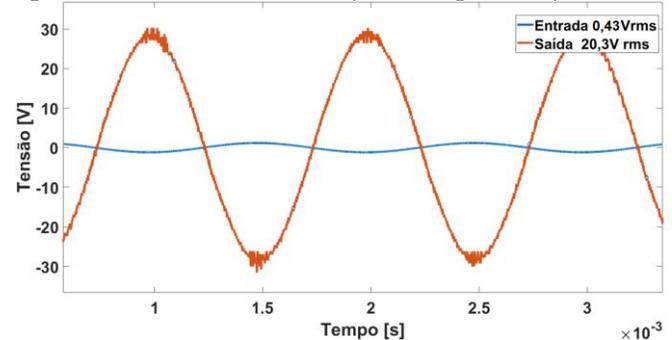


Fonte: Autor.

J. RESPOSTAS DO SISTEMA PROJETADO

Na Figura 21, podemos observar a sensibilidade de entrada do sistema reproduzidor de graves de aproximadamente $0,43\text{VRMS}$. A sensibilidade indica o nível do sinal de entrada necessário para que o amplificador entregue a potência máxima de 100W a uma carga de 4Ω em cada canal.

Figura 21: Entrada e saída do sistema reproduzidor de graves - Experimental.

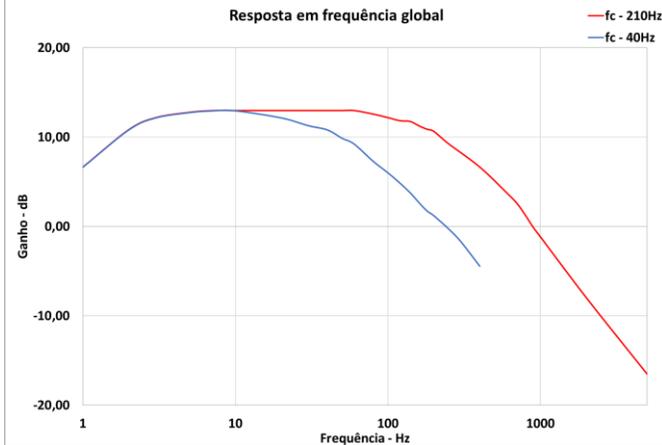


Instrumento de medição: Osciloscópio Hantek-6022BE.

Fonte: Autor

Já na Figura 22, é apresentada a resposta em frequência global do sistema, ou seja, o sinal entregue a carga pela entrada de áudio. As frequências de corte inferior de 5Hz e as frequências de corte superior de 40Hz (menor frequência de ajuste) e 210Hz (maior frequência de ajuste) mantiveram-se dentro do esperado, indicando que o sistema projetado atende às especificações desejadas em relação à faixa de frequências reproduzidas.

Figura 22: Resposta em frequência global do sistema.



Instrumento de medição: Osciloscópio Hantek-6022BE.

Fonte: Autor

III. COMPARATIVO ECONÔMICO

A montagem dos circuitos impressos foi estruturada em blocos funcionais, conforme mostrado na Figura 23, o que proporciona uma abordagem organizada e facilita o processo de montagem e testes em cada etapa do projeto. É importante destacar que a maior parte dos componentes necessários para o projeto foi adquirida no varejo, resultando em um custo total de R\$1.082,00. No entanto, é válido ressaltar que esse valor pode sofrer alterações ao longo do tempo devido à dinâmica do mercado de componentes eletrônicos, como a variação da oferta e demanda, as flutuações cambiais e os descontos oferecidos para compras em grandes quantidades.

A Tabela III apresenta informações sobre quatro modelos de equipamentos com especificações semelhantes ao projeto desenvolvido. Observa-se que o valor médio desses equipamentos comerciais é de R\$3.490,00, aproximadamente 3,2 vezes o valor gasto em materiais para a construção do subwoofer ativo. Esse comparativo simples indica que o custo envolvido na construção de um sistema reproduzidor de graves, para uso particular, é consideravelmente menor do que a média dos modelos comerciais disponíveis no mercado, sem comprometer a qualidade e a potência de reprodução.

Tabela III: Subwoofer ativo – Modelos comerciais

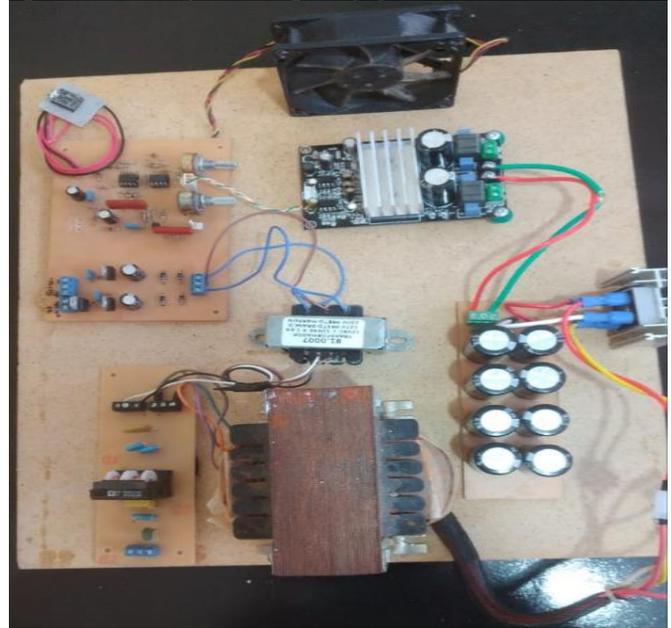
Descrição	Potência [W]	Valor [R\$]
JBL Stage 100P - 10" [16]	300	1889,00
Newaudio SUB200 - 12" [17]	200	2189,99
WLS SM - 10" [18]	200	2000,00
LOUD SW-1200C - 12" [19]	200	3862,00
Polk Audio 550wi -10" [20]	200	7200,00
FRAHM HS SW - 10" [21]	300	3799,00

Fonte: Autor.

Entretanto, é importante ressaltar que o estudo realizado aqui representa uma análise preliminar e que, para uma viabilidade completa de produção com intuito de comercialização, seria necessário um estudo mais detalhado. Aspectos como a viabilidade econômica em escala de produção, a qualidade e disponibilidade dos componentes em larga quantidade, bem

como outros custos associados à fabricação em larga escala, devem ser levados em consideração para uma análise mais completa do projeto. Em suma, o projeto do subwoofer ativo apresenta-se como uma alternativa mais econômica para entusiastas de áudio e amantes de música que desejam obter uma experiência sonora imersiva de alta fidelidade, além de proporcionar a satisfação de ter um sistema personalizado construído com qualidade e cuidado.

Figura 23: Sistema reproduzidor de graves projetado.



Fonte: Autor

IV. CONCLUSÃO

O desenvolvimento do projeto do subwoofer ativo revelou que o fator limitante foi a elevada temperatura do circuito integrado TPA3255 quando submetido a uma potência acima dos 1/3 da potência máxima estabelecida pelo fabricante. No entanto, foi possível superar essa limitação ao implementar um sistema de ventilação forçada no amplificador, o que permitiu entregar 100W às duas cargas de 4Ω com uma distorção harmônica total inferior a 1%.

Os resultados experimentais confirmaram que o sistema reproduzidor de graves atendeu às especificações desejadas, proporcionando uma resposta em frequência global dentro do esperado, com frequências de corte adequadas e mantendo a qualidade sonora em níveis satisfatórios.

Embora o projeto tenha alcançado resultados positivos em relação ao desempenho, é importante ressaltar que para o custo envolvido foi realizado uma abordagem inicial e simplificada.

REFERÊNCIAS

- [1] Cordell, Bob. Designing Audio Power Amplifiers. 1. Ed. United States: McGraw-Hill, 2010.
- [2] Boylestad, Robert L. Dispositivos eletrônicos e teoria de circuitos. 11. ed. São Paulo: Pearson Education do Brasil, 2013. 592p.
- [3] Honda, J., Adams, J., "Class D Audio Amplifier Basics", IRF Application Note AN-1071, Aug.2005.

- [4] Horowitz, P; Hill, W; 2017. A arte da eletrônica: Circuito eletrônico e microeletrônica. 3.ed. Porto Alegre. Bookman, 2017.
- [5] Coilcraft. Common Mode Filter Design Guide. Disponível em: <https://www.mouser.com/pdfDocs/doc191_CMFilterDesign.pdf>. Acesso em 05/04/2023.
- [6] Lee Ozenbaugh, Richard. EMI Filter Design. 2. Ed, New York: Marcel
- [7] Pertence Júnior, Antonio. Amplificadores Operacionais e Filtros Ativos. 6. Ed. Porto Alegre: Bookman, 2003.
- [8] Barbi, Ivo. Eletrônica de Potência: Projeto de Fontes Chaveadas. 3. ed. Florianópolis: Ed. do autor, 2014.
- [9] Texas Instruments. LC Filter Design. Disponível em: <https://www.ti.com/lit/an/slaa701a/slaa701a.pdf?ts=1680677158150&ref_url=https%253A%252F%252Fwww.google.com%252F>. Acesso em 05/04/2023.
- [10] SEDRA, Adel S.; SMITH, Kenneth C. Microeletrônica. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2010.
- [11] EEWeb.com. PC Fan Speed Controller – For a Low-Noise PC Disponível em: <<https://www.eeweb.com/pc-fan-speed-controller-for-a-low-noise-pc/>>. Acesso em: 05/04/2023.
- [12] Texas Instruments. Datasheet LM317: 3 -TERMINAL ADJUSTABLE REGULATOR. Disponível em: <<https://pdf1.alldatasheet.com/datasheetpdf/view/95601/TI/LM317.htm>>. Acesso em: 05/04/2023.
- [13] UNICAMP, Departamento de Sistemas e Controle de Energia. FATOR DE POTÊNCIA E DISTORÇÃO HARMÔNICA. Disponível em: <<https://www.dsce.fee.unicamp.br/~antenor/htmlfile/harmo/fcpa1.html>>. Acesso em: 05/04/2023.
- [14] Texas Instruments. Datasheet TPA3255-Q1 . Disponível em: <https://www.ti.com/lit/ds/symlink/tpa3255-q1.pdf?ts=1681120984837&ref_url=https%253A%252F%252Fwww.google.com%252F>. Acesso em: 05/04/2023.
- [15] WTE - POWER SEMICONDUCTORS. Datasheet KBPC5010. Disponível em: <<https://pdf1.alldatasheet.com/datasheetpdf/view/34010/WTE/KBPC5010.html>>. Acesso em: 10/04/2023.
- [16] JBL Stage 100P – 10. Disponível em: <https://www.kabum.com.br/produto/174166/subwoofer-jbl-stage-a100p-ativo-de-10-com-300-watts-preto-bivolt?gclid=CjwKCAjwitShBhA6EiwAq3RqA2AKW2WaXWxumqzJVIS7AQiVZJ6a3MOh6aYragZMe5TWbbTRZD1QCxoC9V0QAvD_BwE>. Acesso em: 05/04/2023.
- [17] Newaudio SUB200 - 12". Disponível em: <https://produto.mercadolivre.com.br/MLB-2157389913-subwoofer-ativo-newaudio-12-polegadas-sub200-200w-clean-desi-_JM?matt_tool=14940811&matt_word=&matt_source=google&matt_campaign_id=14303413829&matt_ad_group_id=125984299837&matt_match_type=&matt_network=g&matt_device=c&matt_creative=539354957172&matt_keyword=&matt_ad_position=&matt_ad_type=pla&matt_merchant_id=556897974&matt_product_id=MLB2157389913&matt_product_partition_id=1801285665490&matt_target_id=pla-1801285665490&gclid=CjwKCAjwitShBhA6EiwAq3RqA1jCVSA2fiO1_LP6_p8KJe7pJKXdmvihkuhod-oUciXb7R6LstOuxoCA_EQAvD_BwE>. Acesso em: 05/04/2023.
- [18] WLS SM - 10". Disponível em: <<https://www.mundodosdjs.com.br/produtos/sm10-wls/>>. Acesso em: 05/04/2023.
- [19] LOUD SW-1200C - 12". Disponível em: <<https://www.cweleto.com.br/produtos/subwoofer-ativo-loud-sw-1200c/?pf=gs&variant=351786506>>. Acesso em: 05/04/2023.
- [20] Polk Audio 550wi -10" Disponível em: <https://www.audioprime.com.br/subwoofer-ativo-polk-audio-dsw-pro-550wi-10-200w-rms-preto?utm_source=google&utm_medium=Shopping&utm_campaign=subwoofer-ativo-polk-audio-dsw-pro-550wi-10-200w-rms-preto&inStock=&srsrtid=AfAwrE67tyco79D-03DWtIRWpuYEUvdXCR9DVRkQkN8mVn7plVOC1V4BN_0#derivacao=8>. Acesso em: 05/04/2023.
- [21] Audioprime. SUBWOOFER PREMIUM ATIVO FRAHM HS 10 SW 300W RMS PRETO. Disponível em: <https://www.audioprime.com.br/subwoofer-premium-ativo-frahm-hs-10-sw-300w-rms?utm_source=google&utm_medium=Shopping&utm_campaign=subwoofer-premium-ativo-frahm-hs-10-sw-300w-rms&inStock=&gclid=CjwKCAjwitShBhA6EiwAq3RqAzNsk4DmVTSfwjQ8IbrSb7qtP0wp3i3BNQo370FgYq_t_zcKUSkKwKHoCLAAQAvD_BwE#derivacao=66>. Acesso em: 05/04/2023.
- [22] Texas Instruments. RC Filter Box for Class-D Output Power and THD+N Measurement. Disponível em: <https://e2echina.ti.com/cfs-file/__key/telligent-evolution-components-attachments/00-42-01-00-00-16-04-62/RC-Filter-Box-For-Class_2D00_D-Output-Power-and-THD_2B00_N-Measurement.pdf>. Acesso em: 19/04/23.
- [23] Sony. What is the difference between an active subwoofer and a passive subwoofer? Disponível em: <<https://www.sony-asia.com/electronics/support/articles/00020675>>. Acesso em: 19/04/23.
- [24] Foxconn. Cooling FanPVA092G12M-DC12V 0.24A 3-Pin Disponível em: <[https://www.elecok.com/pt/data_sheet/130905/FOXCONN_PVA092G12M_12V_0%2C24A_3fios_Resfriamento_Ventilator_\(PT\).pdf](https://www.elecok.com/pt/data_sheet/130905/FOXCONN_PVA092G12M_12V_0%2C24A_3fios_Resfriamento_Ventilator_(PT).pdf)>. Acesso em: 19/04/23.
- [25] Duncan, Ben, High Performance Audio Power Amplifiers – for music performance and reproduction, 1st edition, Newnes, 1997. 147 p