

ESCOLA POLITÉCNICA DA UNIVERSIDADE DE
SÃO PAULO

Departamento de Engenharia de
Energia e Automação Elétricas



**PROJETO DE UM AMPLIFICADOR CLASSE D
PARA ÁUDIO**

Stephen Daniel Goldsmith Killing
PROJETO DE FORMATURA 2007

ESCOLA POLITÉCNICA DA UNIVERSIDADE DE
SÃO PAULO

Departamento de Engenharia de
Energia e Automação Elétricas



PROJETO DE FORMATURA 2007

**PROJETO DE UM AMPLIFICADOR CLASSE D
PARA ÁUDIO**

Aluno: Stephen Daniel Goldsmith Killing
Orientador: Walter Kaiser
Coordenadores: Lourenço Matakas Júnior
Eduardo César Senger

AGRADECIMENTOS

A Deus, por sua graça e misericórdia;

Aos meus pais, irmão e irmã que me deram apoio nos momentos mais caóticos da minha vida e meus estudos;

Ao professor Walter Kaiser, por aceitar o desafio ser orientador de um projeto não necessariamente ligado à sua área de atuação;

Ao professor Wilson Komatsu, por complementar o trabalho de orientação quando o prof. Kaiser não estava disponível;

Ao professor Guido Stolfi, pelas idéias e orientação iniciais que levaram a decisões importantes sobre o encaminhamento do projeto;

Aos professores Eduardo César Senger e Lourenço Matakas Júnior, pela cobrança necessária para o andamento do projeto;

A Antonio Ricardo Giaretta, por sua ajuda na concepção de partes do projeto e dicas relativas à execução prática do projeto;

A Maurício Galassi e Marco Antonio de Oliveira, pela disposição em ajudar na execução prática do projeto e manuseio dos equipamentos do laboratório;

Aos colegas de turma que muitas vezes se mostraram mais interessados no projeto do que eu, servindo de apoio e incentivo.

RESUMO

O presente trabalho procura projetar e implementar um amplificador de áudio Classe D. Inicialmente procura-se introduzir os conceitos relevantes ao entendimento do funcionamento do circuito, baseando-se em extensa pesquisa bibliográfica. Em seguida discute-se as considerações de projeto oriundas de tal pesquisa. Enfim, parte-se para o projeto e execução física do circuito. O amplificador projetado trabalha de forma chaveada, em contraste com a amplificação linear tradicional. Para isso é utilizada a modulação do tipo PWM natural de dois níveis. A implementação do circuito de controle foi feita de modo analógico visando um melhor aprendizado, por parte do aluno, dos conceitos que envolvem um projeto de um sistema de áudio deste tipo. O estágio de potência é implementado por um inversor com transistores em ponte completa (*full-bridge*) e a demodulação é feita com filtro passivo LC. Os resultados obtidos foram satisfatórios, levando-se em conta que os sistemas disponíveis comercialmente possuem um controle mais sofisticado, muitas vezes implementado com processadores digitais.

SUMÁRIO

| | |
|--|-----------|
| 1) Introdução | 6 |
| 1.1 Objetivo..... | 6 |
| 1.2 Motivação..... | 6 |
| 1.3 Metodologia | 7 |
| 1.4 Estrutura do Relatório | 8 |
| 2) Embasamento Teórico..... | 9 |
| 2.1 Amplificação..... | 9 |
| 2.2 Modulação PWM | 11 |
| 2.3 Estágio de Entrada | 13 |
| 2.4 Estágio de Saída | 13 |
| 2.4.1 Transistores de potência..... | 13 |
| 2.4.2 Circuito de acionamento | 15 |
| 2.4.3 Filtro demodulador..... | 15 |
| 3) Implementação..... | 16 |
| 3.1 Pesquisa inicial sobre as soluções existentes | 16 |
| 3.2 Especificação da tecnologia a ser adotada | 16 |
| 3.3 Projeto inicial do circuito | 17 |
| 3.3.1 Estágio de Entrada | 17 |
| 3.3.2 Circuito de Controle PWM | 18 |
| 3.3.3 Estágio de Potência | 20 |
| 3.3.4 Passos seguintes | 20 |
| 3.4 Continuação do Projeto | 21 |
| 3.4.1 Estágio de Entrada | 21 |
| 3.4.2 Circuito de Controle PWM | 22 |
| 3.4.3 Estágio de Potência | 25 |
| 3.4.4 Testes | 32 |
| 4) Considerações Finais | 34 |
| 4.1 Dificuldades encontradas | 34 |
| 4.2 Estudos Futuros..... | 34 |
| 4.3 Conclusões | 35 |
| 5) Bibliografia..... | 36 |
| 6) ANEXOS..... | 37 |
| Anexo 1: Fotos dos Circuitos..... | 38 |

ÍNDICE DE FIGURAS

| | |
|--|----|
| Figura 1: Amplificador Classe A | 10 |
| Figura 2: Amplificador Classe B | 10 |
| Figura 3: Exemplo de PWM | 12 |
| Figura 4: Topologia Half-Bridge | 14 |
| Figura 5: Topologia Full-Bridge | 14 |
| Figura 6: Estágio de Entrada inicial | 17 |
| Figura 7: Gerador de Onda Triangular..... | 18 |
| Figura 8: Modulação de um sinal senoidal | 19 |
| Figura 9: Portadora Triangular..... | 19 |
| Figura 10: Novo estágio de entrada | 22 |
| Figura 11: Novo Gerador de Onda Triangular..... | 23 |
| Figura 12: Geração do PWM e Level Shifting | 24 |
| Figura 13: Circuito de Buffer..... | 25 |
| Figura 14: Sinais de Disparo do Inversor..... | 27 |
| Figura 15: Tempo de Atraso (dead-time)..... | 28 |
| Figura 16: Entrada e Saída do Inversor..... | 29 |
| Figura 17: Filtro de Saída para Ponte Completa..... | 30 |
| Figura 18: Exemplo de Indutor | 31 |
| Figura 19: Entrada e Saída do sistema completo | 32 |
| Figura 20: Espectro da saída com 1 kHz na entrada | 33 |
| Figura 21: Resposta em Freqüência do Sistema Completo..... | 33 |

1) Introdução

A amplificação de sinais é um processo fundamental em circuitos elétricos. Ela encontra aplicações nas mais diversas áreas da engenharia elétrica e está presente na maioria dos circuitos elétricos existentes. Neste projeto será considerada apenas sua aplicação em circuitos de áudio, mais especificamente no estágio de amplificação de potência.

Por muitos anos a tecnologia de amplificadores de áudio tem se mantido praticamente a mesma com pequenas modificações decorrentes do desenvolvimento de materiais e otimização das topologias. Desde sua concepção, no início do século XX, até os dias de hoje a tecnologia predominante tem sido a de amplificação linear, em que os transistores do estágio de saída do amplificador são acionados de maneira a trabalharem na sua região linear. Apesar da simplicidade, tal modo de operação gera perdas em aquecimento e distorção no sinal.

Este projeto procurará implementar uma tecnologia mais recente de amplificação, a amplificação chaveada. Ela é feita através da modulação do sinal de entrada com PWM, seguida da amplificação do sinal modulado e por fim a filtragem ou demodulação do sinal amplificado, de modo a se obter na saída o sinal de entrada amplificado. Este modo de operação tem uma eficiência teórica de 100% e distorção harmônica teórica de 0%. Na prática obviamente esses resultados não podem ser obtidos devido às limitações físicas dos componentes. Por isso, irá se analisar até que ponto essa tecnologia é melhor que a linear em projetos práticos.

1.1 Objetivo

Projetar e construir um amplificador Classe D para uso em sistemas de áudio. Com o objetivo de concluir o projeto de maneira satisfatória e dentro do prazo restringiu-se o escopo do projeto ao desenvolvimento dos componentes de controle e amplificação bem como a placa de circuito impresso que servirá de suporte a estes. Portanto, considera-se fora do escopo o desenvolvimento de uma fonte de alimentação interna e demais componentes necessários para um produto completo e comercializável.

1.2 Motivação

Antes mesmo de ingressar na Escola Politécnica já havia interesse, por parte do aluno, em sistemas de áudio eletrônicos. Alguns assuntos relacionados, que foram abordados nas

matérias ao longo do curso despertaram especial interesse por parte do aluno. Os que se destacaram foram:

- Técnicas de modulação PWM
- Amplificadores transistorizados
- Filtros analógicos e digitais
- Blindagem e interferência eletromagnética em circuitos

Portanto, neste projeto deseja-se:

- Aplicar os conceitos aprendidos relativos a PWM a sistemas de áudio
- Aprender mais sobre sistemas eletrônicos de áudio, seu projeto e construção física
- Aprender mais sobre as técnicas de projeto para diminuição de ruído e interferência em placas de circuito impresso
- Aprender mais sobre as diferentes topologias e aplicações de amplificadores transistorizados

1.3 Metodologia

O projeto constará das seguintes etapas:

- Pesquisa inicial sobre soluções existentes: Pesquisa bibliográfica das soluções funcionais existentes e avaliação da viabilidade de implementação de cada solução considerando o escopo e os prazos do projeto
- Especificação da tecnologia: Uma vez escolhida a solução adequada ao projeto, especificar os componentes e topologia do circuito a ser implementado
- Projeto inicial: Desenvolvimento do circuito completo, dados os componentes escolhidos anteriormente
- Testes e avaliação dos resultados: medição do desempenho e características do circuito na bancada de testes, para avaliar se a implementação condiz com o esperado
- Adequação do projeto: Caso os resultados dos testes não sejam satisfatórios, será necessário um novo projeto do circuito, baseado no anterior, que atenda às especificações requeridas
- Construção do protótipo: Uma vez testadas todas as características e verificado seu funcionamento correto, parte-se para a construção do circuito em placa de circuito impresso para se avaliar o funcionamento do sistema em condições reais de operação, próximas àquelas de sistemas comerciais

1.4 Estrutura do Relatório

O presente relatório está dividido em duas partes, primeiramente um capítulo de embasamento teórico que serve como fundamentação para o projeto. Em seguida apresenta-se a descrição da implementação, explicitando as decisões tomadas e o andamento do projeto. Essa descrição está dividida em duas partes, correspondentes ao primeiro e segundo semestres da disciplina de Projeto de Formatura. Portanto, a segunda parte apresenta soluções para os problemas encontrados no projeto inicial bem como a implementação do restante do projeto que não havia sido feita no primeiro semestre e os resultados finais obtidos com o sistema completo.

2) Embasamento Teórico

2.1 Amplificação

A amplificação de sinais desempenha um papel importante em circuitos elétricos; ela é responsável por aumentar a amplitude, e consequentemente a energia, de um sinal para que ele possa ser processado adequadamente ou utilizado no acionamento de um sistema que não é sensível a sinais de baixa energia. No caso de sistemas de áudio a elevação de energia é necessária principalmente para o acionamento do auto-falante, de modo que consiga vibrar o suficiente para gerar a pressão sonora desejada.

Tradicionalmente a tecnologia de amplificação mais utilizada tem sido a linear. Neste tipo de amplificação os transistores são polarizados de maneira a trabalharem na sua região linear, ao invés de completamente em condução ou em corte. Os amplificadores são separados por classes, sendo que para os amplificadores lineares as principais são as classes A, B e AB.

A diferença entre as três classes está no ângulo de condução dos transistores, sendo que os da Classe A conduzem durante todo o ciclo do sinal, os da Classe B apenas durante metade do ciclo do sinal e os da Classe AB cobrem todos os ângulos intermediários. A eficiência de amplificadores que funcionam desta forma é limitada pois os transistores, ao trabalharem em sua região linear, dissipam uma grande parte da potência em forma de calor. Os amplificadores Classe A são os que mais fielmente reproduzem o sinal, mas são os menos eficientes energeticamente em geral atingindo no máximo 25% de eficiência [5]. Já os amplificadores Classe B são mais eficientes, conseguindo atingir até 78% de eficiência [5], mas possuem não linearidades que levam a uma alta distorção do sinal. Tais não-linearidades são devidas ao período de transição entre a condução de um transistor e o outro. Os amplificadores Classe AB são projetados levando em conta a relação custo/benefício entre eficiência e distorção, tentando encontrar um valor ótimo.

Na figura 1 tem-se um exemplo da topologia básica de um amplificador classe A, em que apenas um transistor fornece potência para a carga, enquanto que o resto do circuito serve apenas para manter o transistor polarizado.

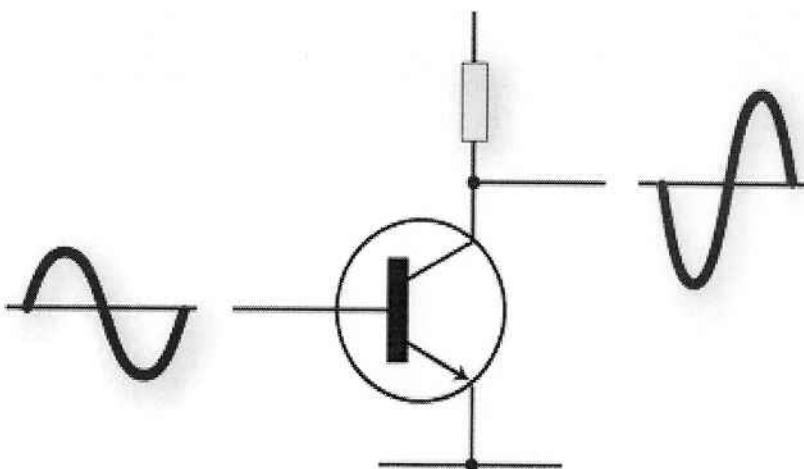


Figura 1: Amplificador Classe A

A figura 2 mostra um exemplo de um amplificador classe B, em que os dois transistores alternam entre si, sendo que cada um conduz durante 50% do ciclo.

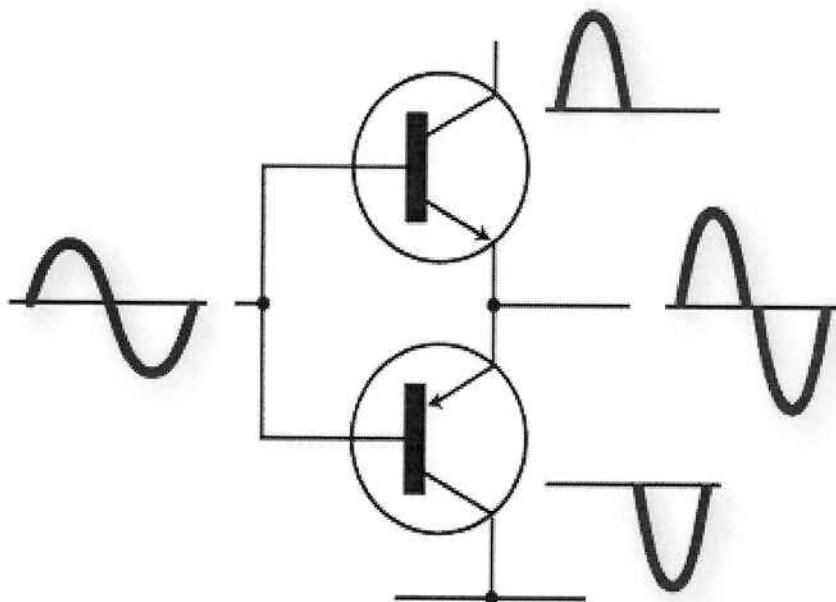


Figura 2: Amplificador Classe B

Os amplificadores da classe AB possuem praticamente a mesma topologia dos da classe B, com ligeiras diferenças no controle dos transistores, para se obter os ângulos de condução desejados.

O amplificador estudado neste trabalho pertence a uma classe mais recente chamada Classe D. Diferentemente dos lineares, esse tipo de amplificador trabalha com os transistores totalmente ligados ou totalmente desligados, ou de maneira chaveada como muitas vezes é denominado. Apesar de em meados da década de 1950 já haver trabalhos

relacionados a amplificação chaveada com válvulas [6], seu desenvolvimento real aconteceu somente nas últimas duas décadas. Isso se deve ao fato de os componentes utilizados não terem capacidade de chavear a altas freqüências sem apresentarem problemas significativos. Com o desenvolvimento da engenharia de materiais foi possível produzir novos dispositivos eletrônicos que fossem capazes de chavear com freqüências e potência maiores, como os transistores MOSFET e IGBT.

Ao invés de amplificar o sinal senoidal diretamente, os amplificadores da classe D amplificam pulsos resultantes da modulação do sinal original. Por trabalhar com os transistores desligados ou em condução plena, a eficiência teórica dessa classe de amplificadores é 100% [5]. Além disso, como a variação da largura da onda retangular é contínua, a distorção teórica por não linearidades é zero. Outra característica importante relacionada à eficiência de amplificadores é sua variação com o carregamento; enquanto a eficiência máxima dos amplificadores lineares só é atingida próximo de 100% de carregamento, a dos amplificadores Classe D é praticamente constante a partir de 40% de carregamento [5].

2.2 Modulação PWM

Como descrito anteriormente o amplificador Classe D trabalha com o sinal modulado. A técnica de modulação mais comumente utilizada é a Modulação por Largura de Pulso (Pulse Width Modulation). Existem várias maneiras de se fazer a modulação PWM, no entanto só irá se discutir a maneira utilizada neste trabalho, que é a baseada em portadora.

A geração do sinal PWM, pela técnica baseada em portadora, é feita através da comparação do sinal original com uma onda triangular ou dente de serra, chamada de portadora. A portadora pode possuir freqüência fixa ou variável e deve ser N vezes maior do que a maior freqüência presente no espectro do sinal de entrada, em geral da ordem de 10 a 20 vezes maior. Isso é necessário para garantir que todas as freqüências serão corretamente representadas pelo sinal modulado e que todas estarão presentes após a demodulação. Cada ciclo do sinal original é representado por N pulsos do sinal modulado, portanto, quanto maior o número de pulsos maior o espectro que pode ser representado.

A comparação entre o sinal de entrada e a portadora é feita por um circuito comparador de alta velocidade que gera apenas dois níveis de tensão na saída. Um nível representa que o sinal de entrada possui amplitude maior que da portadora e o outro nível representa a situação inversa. Como a amplitude instantânea dos sinais oscila, em cada

instante pode haver um sinal maior que o outro e o comparador gera instantaneamente o resultado da comparação. A amplitude do sinal de entrada deve ser limitado a no máximo 90% da amplitude da portadora para que não ocorra sobre-modulação que leva a saída do comparador a ficar fixa em um determinado estado durante o período em que o sinal ultrapassar a portadora. Garantida esta condição, o resultado é uma onda retangular de freqüência constante mas ciclo de trabalho variável, sendo que o ciclo de trabalho é maior que 50% quando o sinal de entrada é positivo e menor que 50% quando o sinal é negativo. Quando o sinal é zero a onda se torna quadrada, ou seja, ciclo de trabalho de 50%. A figura 3 ilustra o funcionamento para um sinal senoidal fundamental.

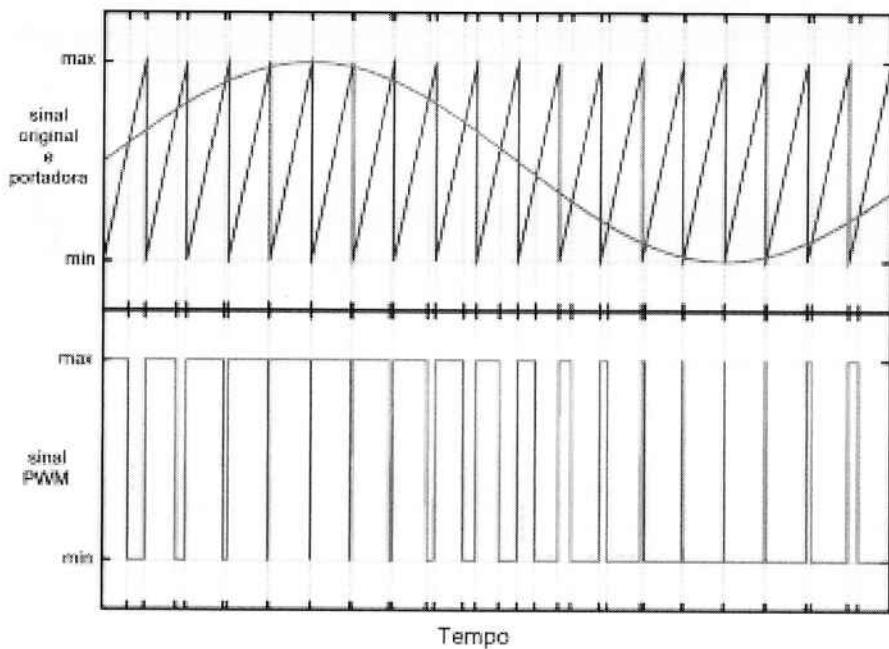


Figura 3: Exemplo de PWM

2.3 Estágio de Entrada

O estágio de entrada é útil para adequar o sinal de entrada aos outros sinais utilizados na parte de controle do amplificador. Em geral, faz-se casamento de impedância, filtragem e, se necessária, amplificação do sinal no estágio de entrada.

O casamento de impedâncias é útil para garantir a maior transferência de potência do sinal do sistema externo para o circuito do amplificador.

A filtragem é usada para limitar a banda do sinal de entrada, bloqueando qualquer componente contínua e limitando as freqüências altas. Como a portadora do modulador PWM normalmente opera a uma freqüência fixa deve-se limitar as freqüências presentes no sinal de entrada para que a modulação ocorra corretamente, representando de maneira satisfatória até a máxima freqüência, como explicado no item anterior.

A amplificação é necessária, pois a saída de sinal de outros aparelhos de áudio é de amplitude baixa, normalmente chega no máximo a 2 Vrms, sendo mais comum encontrar níveis entre 0,75 e 1,5 Vrms. No entanto, não se deve amplificar muito o sinal na entrada, pois se ele ficar acima do nível dos demais pode causar problemas no processamento, como a sobre-modulação mencionada no tópico anterior.

2.4 Estágio de Saída

O estágio de saída é onde efetivamente ocorre a amplificação do sinal. Ele é formado pelos transistores de potência, seu circuito de acionamento e o filtro de demodulação.

2.4.1 Transistores de potência

Os transistores podem ser conectados à carga de duas maneiras: meia ponte (*half-bridge*) ou ponte completa (*full-bridge*). Na primeira, dois transistores são conectados em série entre os terminais da fonte e a carga é conectada no ponto intermediário dos dois transistores e o terminal negativo da fonte, de maneira similar à da topologia das classes B e AB. A figura 4 ilustra a topologia.

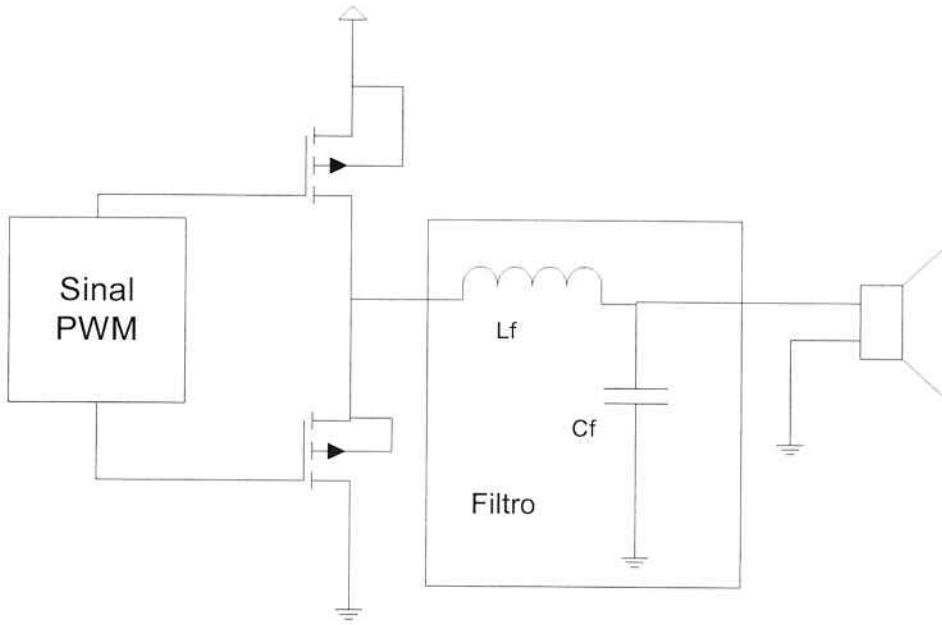


Figura 4: Topologia Half-Bridge

Na topologia *full-bridge* há dois blocos *half-bridge* e a carga é conectada entre os dois pontos intermediários deles, de modo a ser acionada pela diferença de tensão entre os dois blocos. Esta segunda topologia é mais eficiente no acionamento da carga, de acordo com [5] e [11], pois permite uma variação em toda a gama de tensões entre os terminais da fonte, enquanto que a primeira aproveita apenas metade da tensão no barramento DC. Além disso, essa topologia facilita o controle, pois não necessita de realimentação para garantir a estabilidade. Outra vantagem é que cada bloco do *full-bridge* enxerga apenas metade da impedância da carga, o que permite a obtenção da mesma potência com menos tensão. A figura 5 ilustra a topologia:

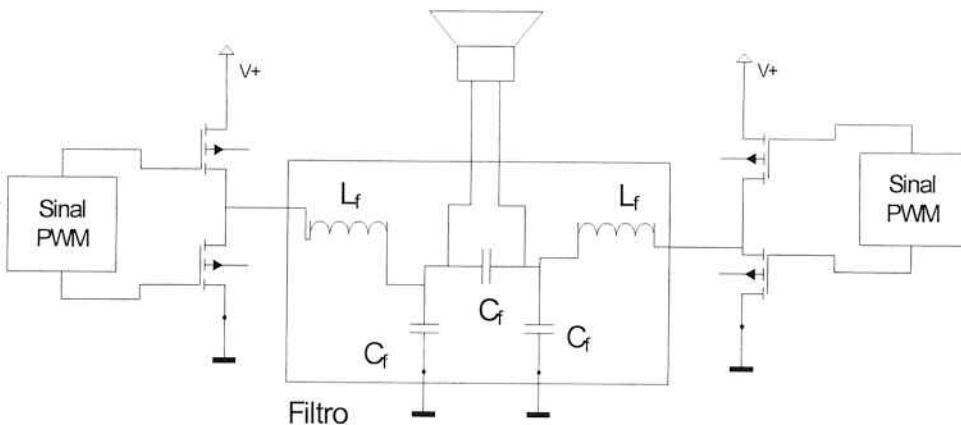


Figura 5: Topologia Full-Bridge

2.4.2 Circuito de acionamento

O circuito de acionamento é útil principalmente para definir o instante de disparo para a condução de cada um dos transistores de potência. Como os transistores operam de maneira chaveada entre os dois terminais da fonte de alimentação, é necessário que o circuito controle o acionamento destes de modo que a fonte não seja curto-circuitada pela condução simultânea de dois transistores em série. O tempo de atraso protege os componentes do circuito mas introduz distorção no sinal, portanto é necessário estabelecer um tempo que atenda de maneira satisfatória ambos os critérios. Os fabricantes de transistores em geral fornecem também circuitos integrados de controle que permitem ajustar o tempo de atraso entre o acionamento de um transistor e outro.

2.4.3 Filtro demodulador

Para a regeneração do sinal original é necessário demodular o sinal amplificado de modo que resulte apenas o sinal de entrada amplificado. Como a modulação é PWM, utiliza-se filtros que fornecem na saída o valor médio do sinal em cada instante. Estes são filtros passivos LC passa-baixas que permitem a passagem apenas das freqüências presentes no sinal original, no caso deste projeto apenas até 20 kHz, freqüência máxima do espectro de um sinal audível. Além da função de demodulação, os filtros de saída desempenham um papel importante na redução da interferência eletromagnética, pois eliminam as altas freqüências do sinal amplificado antes que estas circulem pelo resto do circuito de potência, o que iria resultar em radiação de alta freqüência e potência para o resto do circuito ou para regiões vizinhas.

3) Implementação

Nesta seção serão discutidos os detalhes de execução do projeto. Inicia-se com a descrição da pesquisa bibliográfica e escolha da tecnologia a ser adotada. Em seguida discute-se a implementação prática do projeto, separada em duas partes, cada uma referente a um semestre do projeto.

3.1 Pesquisa inicial sobre as soluções existentes

Inicialmente consultou-se alguns professores, conhecedores dos assuntos abordados pelo projeto, para que a pesquisa bibliográfica fosse mais direcionada. Em virtude do desenvolvimento relativamente recente dos amplificadores Classe D não há livros texto específicos sobre o assunto, como no caso dos amplificadores lineares. No entanto, boa parte dos temas abordados neste projeto pode ser encontrada em livros que abordam amplificadores em geral, filtros analógicos e acionamento de motores com PWM. Em seguida foram visitadas páginas na internet de fabricantes de componentes, para se obter literatura de cunho mais prático e objetivo relacionado a aspectos de projeto de placas de circuito impresso. Também na internet foi possível encontrar alguns projetos pessoais em que não há muito rigor, mas que são úteis para a obtenção de informações sobre os problemas e soluções de ordem prática. Os principais trabalhos, que foram efetivamente usados como referência, encontram-se listados na seção de bibliografia.

3.2 Especificação da tecnologia a ser adotada

A partir da pesquisa bibliográfica pode-se avaliar as diferentes soluções existentes e chegou-se em quatro possibilidades para o presente projeto:

- Controle analógico com componentes discretos
- Controle analógico com circuitos integrados
- Controle digital com componentes discretos
- Controle digital com circuitos integrados

As opções abordam apenas o circuito de controle, pois o de potência necessariamente será analógico e discreto. Com o objetivo de obter um aprendizado mais aprofundado da tecnologia decidiu-se adotar a primeira opção, ou seja, uma abordagem de projeto analógica e discreta.

3.3 Projeto inicial do circuito

A seguinte seção descreve a evolução do projeto obtida até o fim do primeiro semestre de 2007. As mudanças feitas no circuito e os resultados finais obtidos podem ser encontrados na seção 3.4.

3.3.1 Estágio de Entrada

O estágio de entrada busca filtrar o sinal de entrada implementando um filtro passa-banda com freqüência de corte inferior de 10 Hz e superior de 20 kHz. O circuito obtido com valores comerciais foi simulado e obteve-se $f_{C\text{ inferior}} = 1,6 \text{ Hz}$ e $f_{C\text{ superior}} = 19 \text{ kHz}$. Além da filtragem, o estágio de entrada amplifica ligeiramente o sinal para torná-lo compatível com o sinal da portadora triangular que será usada na modulação PWM. Como em geral a tensão de saída em aparelhos sonoros domésticos é de 1 a 1,5 Vrms, e a onda triangular utilizada excursiona de -12 a +12V, optou-se por buscar uma amplificação de 5 vezes, ou aproximadamente 14 dB, o que com valores comerciais resultou em 4,7 vezes, ou 13.4 dB. O esquema do circuito encontra-se na figura 6.

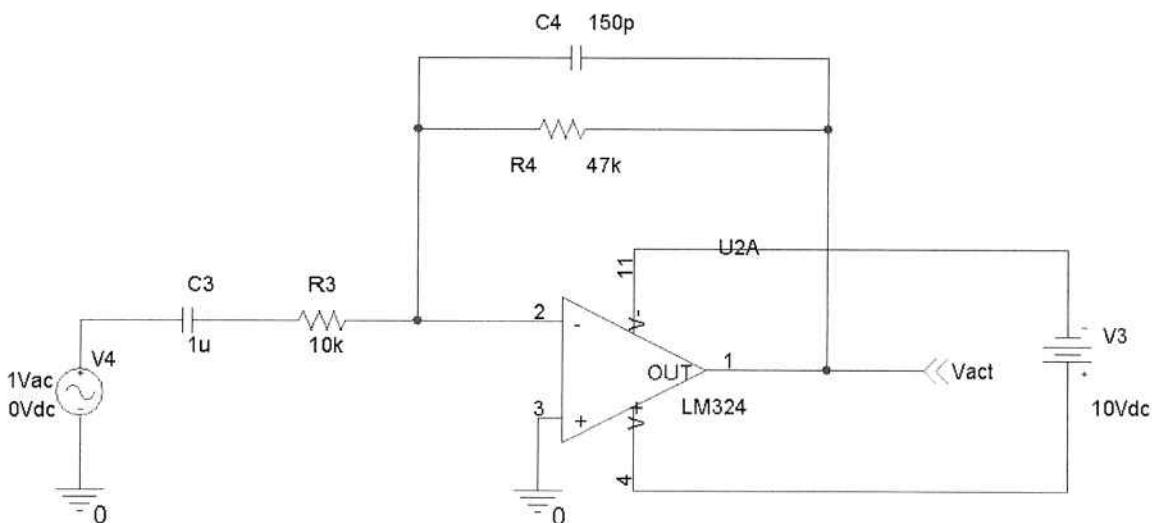


Figura 6: Estágio de Entrada inicial

Neste circuito o ganho é controlado pela relação R_4 / R_3 , e as freqüências de corte inferior e superior são dadas por:

$$f_{C\text{ inferior}} = \frac{1}{R_3 \cdot C_3} \quad f_{C\text{ superior}} = \frac{1}{R_4 \cdot C_4}$$

A resposta em freqüência foi medida e constatou-se que ficou de acordo com o esperado, ou seja, $f_{C\text{inf}} \approx 1,6 \text{ Hz}$ e $f_{C\text{sup}} \approx 19 \text{ kHz}$.

3.3.2 Circuito de Controle PWM

O circuito deve ser composto por um gerador de ondas triangulares, um comparador e um circuito de acoplamento com o estágio de saída. O acoplamento não foi feito ainda mas pretende-se utilizar um circuito integrado de acoplamento ótico para diminuir a propagação de interferências dentro do circuito, através do barramento de terra.

O gerador de ondas triangulares é um circuito amplamente encontrado na literatura [9] e consta de dois amplificadores operacionais, um funcionando como comparador e outro como integrador. O sinal do comparador é uma onda quadrada que uma vez integrada passa a ser triangular. O diagrama do circuito encontra-se na figura 7:

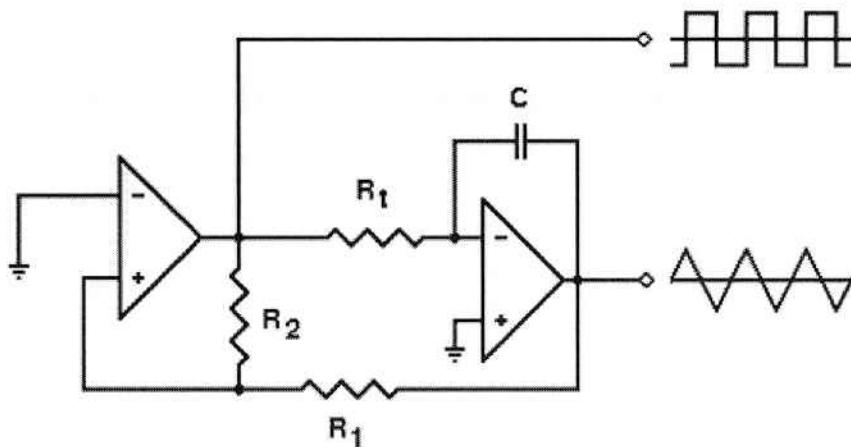


Figura 7: Gerador de Onda Triangular

Neste circuito a relação R_2 / R_1 controla a amplitude da onda de saída e a freqüência de oscilação é dada por:

$$f = \left(\frac{R_2}{R_1} \right) \cdot \frac{1}{4 \cdot R_t \cdot C}$$

No circuito implementado tentou-se obter 200 kHz, mas após diversas montagens com componentes diferentes não se conseguiu atingir freqüências acima de 130 kHz sem distorções significativas na forma de onda triangular. Foram usados amplificadores operacionais LF347, $C = 1,22 \text{ nF}$, $R_t = 3,3 \text{ k}\Omega$, $R_1 = 33 \text{ k}\Omega$ e $R_2 = 220 \text{ k}\Omega$. Por isso, deixou-se a freqüência neste valor e passou-se a testar se a modulação PWM seria feita como esperado.

Como comparador foi utilizado o circuito integrado LM393N. Como sinal de entrada colocou-se um sinal senoidal de 5 kHz. Mediú-se com o osciloscópio as formas de onda no circuito para verificar seu funcionamento. As formas de onda obtidas encontram-se na figura 8.

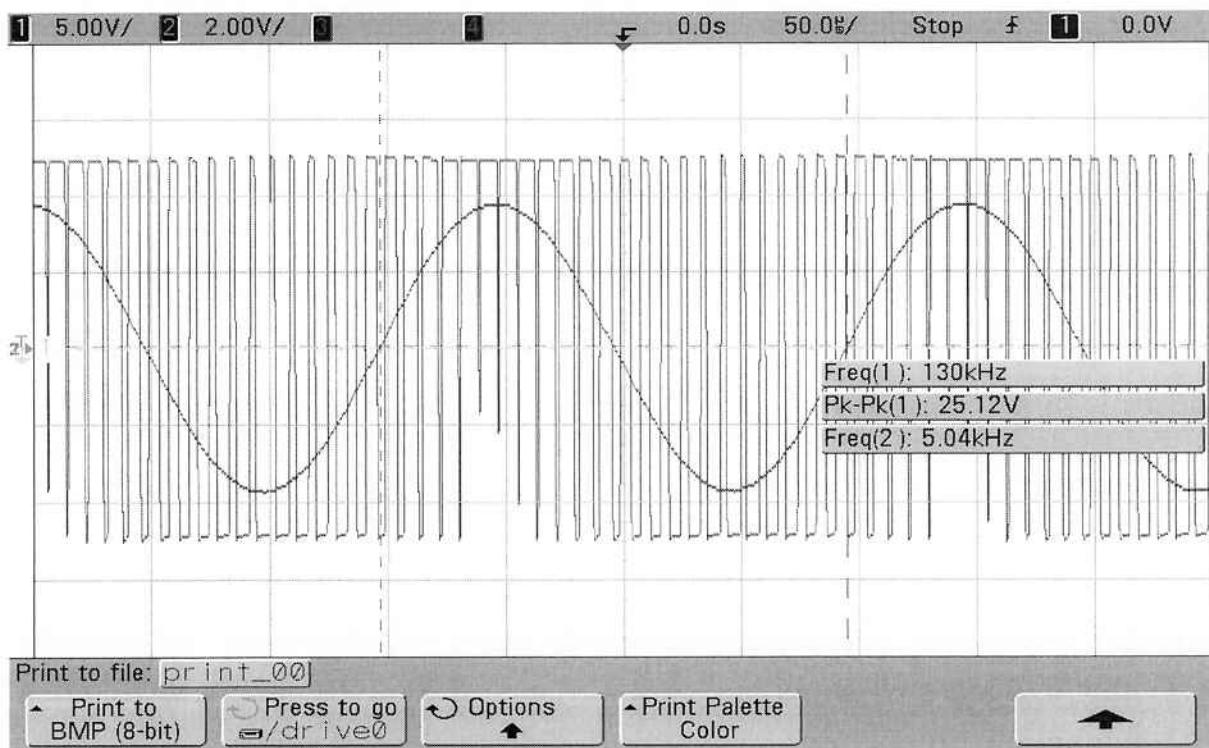


Figura 8: Modulação de um sinal senoidal

Pode-se observar que a modulação da largura dos pulsos foi feita corretamente, com valor médio positivo no ciclo positivo do sinal de entrada e valor médio negativo no ciclo negativo. Na forma de onda da saída PWM pode-se notar algumas componentes de freqüência alta e amplitude razoável que introduzem picos nos cantos da onda quadrada.

A figura 9 mostra a onda triangular obtida no circuito:

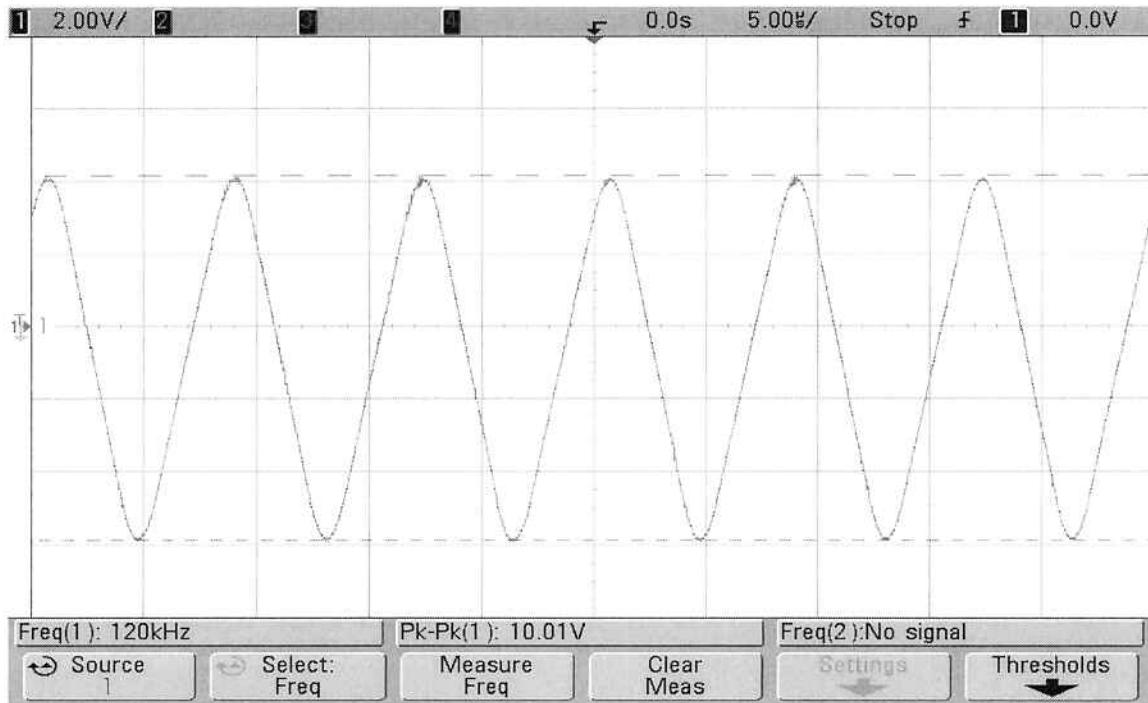


Figura 9: Portadora Triangular

Pode-se observar que a onda triangular está ligeiramente suavizada nos picos, em vez de ter cantos vivos, o que pode gerar problemas na modulação caso amplitude do sinal de entrada seja muito próxima a estes patamares. Mesmo assim, como a amplitude na entrada estava menor que a amplitude da portadora, a modulação foi feita como esperado. Portanto, através do circuito de pré-amplificação, procurará se manter o sinal de entrada o mais alto possível sem que chegue a uma amplitude igual a dos picos.

3.3.3 Estágio de Potência

Por não ter sido concluído o circuito de controle, não se projetou o estágio de potência que dependerá da forma do sinal de saída do circuito de controle. Este bloco será composto de:

- Circuito de acionamento (*drivers*) de transistores com controle de tempo de atraso, para uma configuração de ponte completa (*full-bridge*)
- Transistores de potência
- Filtro demodulador passivo

3.3.4 Passos seguintes

Na continuação do projeto procurará se reduzir ou eliminar o ruído devido às componentes de alta freqüência, bem como aumentar a freqüência da portadora e melhorar sua forma para ficar o mais próxima possível de uma onda triangular.

Além disso, procurará se projetar e implementar o estágio de potência e começar a ensaiar o conjunto completo para verificar a interação dos componentes e analisar as possíveis soluções para problemas de ruído e interferência.

3.4 Continuação do Projeto

Nesta seção procurará-se descrever a evolução do projeto durante o segundo semestre de 2007, explicitando as modificações feitas ao circuito inicial, a implementação dos itens não concluídos no primeiro semestre e os resultados obtidos ao final do projeto.

3.4.1 Estágio de Entrada

Após nova pesquisa bibliográfica chegou-se à conclusão de que seria necessário modificar o estágio de entrada para que pudesse oferecer um maior controle da amplitude do sinal, de modo que fosse possível abranger uma variedade maior de amplitudes do sinal de entrada. Se o sinal for muito alto, deve-se atenuá-lo e se for muito baixo, ele deve ser amplificado, de maneira que o sinal de saída do estágio de entrada possua uma amplitude ótima para a modulação. Além disso, buscou-se obter uma impedância de entrada próxima à utilizada comercialmente, para que com o casamento de impedâncias fosse possível se obter a melhor transferência de potência do sinal de entrada.

Para implementar as novas especificações, modificou-se a relação dos resistores e capacitores, de modo a manter a mesma resposta em freqüência mas com menor amplificação do sinal. A amplificação foi diminuída pois a nova onda triangular gerada excursiona entre +5 e -5V, como será descrito no item referente ao circuito de controle.

Além disso, através de uma pesquisa bibliográfica das especificações adotadas pela maior parte dos fabricantes de aparelhos de áudio comerciais, conclui-se que a de impedância de entrada do circuito deveria ser de aproximadamente $50\text{ k}\Omega$. Para isso, colocou-se um *trimpot* de mesmo valor entre o terminal de entrada e o terra, com o sinal de saída sendo obtido do terminal central. Através da excursão do terminal central do *trimpot* pode-se obter um sinal maior ou menor do que o sinal aplicado na entrada.

O restante do circuito apresenta o mesmo funcionamento do circuito projetado anteriormente, filtrando e amplificando o sinal. A amplificação é de 1,5 vezes (ou 3,5 dB) e as freqüências de corte inferior e superior continuam sendo respectivamente 1,6 Hz e 19 kHz. O esquema do novo circuito do estágio de entrada encontra-se na figura 10.

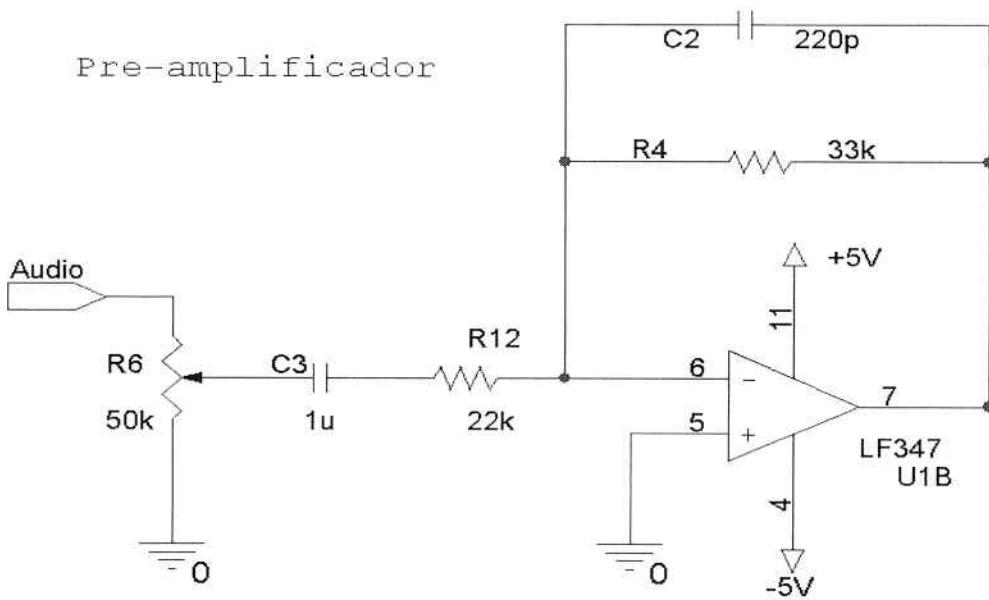


Figura 10: Novo estágio de entrada

3.4.2 Circuito de Controle PWM

O diagrama completo do circuito de controle projetado encontra-se em anexo.

3.4.2.1 Gerador de Onda Triangular

Como mencionado anteriormente, não foi possível obter a freqüência desejada para a onda triangular, sendo que o melhor resultado obtido foi de 130 kHz. Através de diversos ensaios notou-se que a dificuldade encontrada era devida à amplitude da onda que estava sendo gerada. Apesar do valor nominal de *slew rate* para o amplificador operacional LF347 ser de 13V/us, o circuito não conseguiu excursionar entre o nível alto (+12V) e o baixo (-12V) com a rapidez necessária. Como a fonte de alimentação a ser utilizada seria uma fonte simétrica com níveis de tensão +5 , 0 e -5V , a amplitude foi diminuída de modo que a onda triangular excursionasse entre +5 e -5V. Com isso, foi possível obter uma freqüência de 250 kHz, como esperado.

Apesar de obtida a freqüência desejada, a onda triangular possuía nível DC, o que leva ao aparecimento de um nível DC na onda PWM gerada pelo comparador. Para eliminar o nível DC foi necessário modificar o circuito de geração da onda triangular, inserindo um *trimpot* entre os barramentos de alimentação e o terminal do amplificador operacional que funciona como comparador. Através da excursão do terminal central do *trimpot*, aplica-se tensões contínuas de valores diferentes no terminal de comparação do amplificador operacional.

Com isso, muda-se o nível de tensão a partir do qual a comparação resulta em positiva ou negativa. O circuito final de geração da onda triangular encontra-se na figura 11.

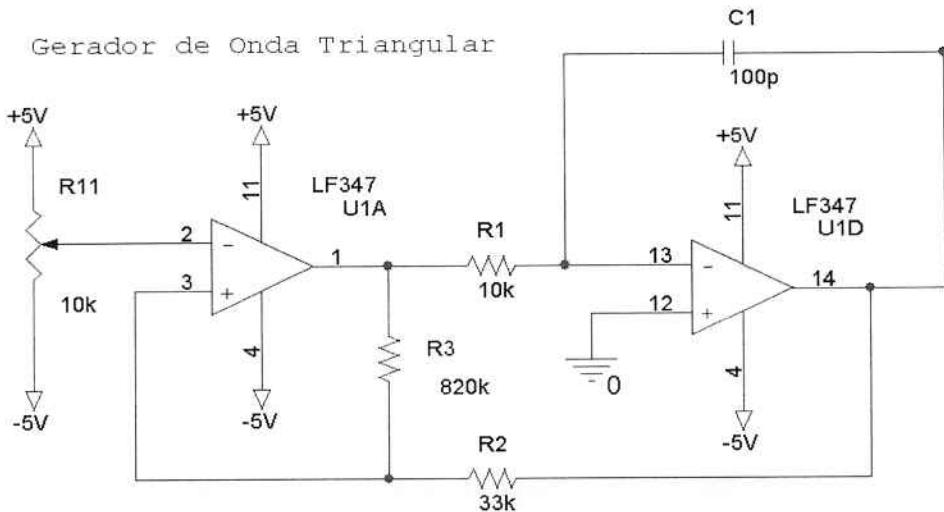


Figura 11: Novo Gerador de Onda Triangular

3.4.2.2 Comparação e PWM

Como foi gasto muito tempo com o projeto do circuito de controle, decidiu-se que não haveria tempo hábil para projetar o estágio de potência. Portanto, foi decidido que iria se aproveitar um projeto de inversor já consolidado, conforme será descrito na seção dedicada ao estágio de potência. Para poder integrar o inversor ao restante do sistema foi necessário fazer adaptações ao circuito de controle, de modo que o sinal de saída fosse compatível com a entrada do inversor. Para isso foi necessário incluir mais dois blocos ao circuito de controle: circuito de *level shifting* e circuito de *buffer*.

3.4.2.2.1 Level Shifting

Como o comparador é alimentado por uma fonte simétrica de $\pm 5V$, a onda quadrada resultante da comparação alterna entre 5 e -5 V. No entanto, a entrada do inversor deve ser controlada por sinais pulsados em nível TTL, ou seja, 0 ou $+5V$. Portanto, é necessário modificar a excursão do sinal de saída do comparador para que fique na faixa desejada. Isso é feito pelo circuito de level shifting, que consiste de um amplificador operacional funcionando como somador, somando um nível de $5V$ ao ciclo negativo do sinal do comparador, obtendo-se assim um sinal que alterna entre 0 e $5V$.

3.4.2.2.2 Buffer

Apesar da saída no comparador ser uma onda quadrada, ao passar pelo circuito somador ela é levemente distorcida e apresenta um aspecto arredondado. Por isso, faz-se uso de um circuito integrado de *buffer*, normalmente uma simples porta lógica, que apresenta na saída apenas dois níveis de tensão, o que confere novamente ao sinal de saída um aspecto quadrado. Um sinal PWM arredondado poderia causar mal funcionamento do inversor.

Além da adequação da forma do sinal, o circuito de *buffer* foi conectado de forma a fornecer dois sinais de saída, um invertido em relação ao outro. Isso é necessário pois o circuito do inversor responsável pelo acionamento da ponte de transistores necessita de dois sinais, um para cada metade da ponte, mas o circuito de modulação fornece apenas um sinal de saída. As figuras 12 e 13 mostram os esquemas dos circuitos de *level shifting* e *buffer*.

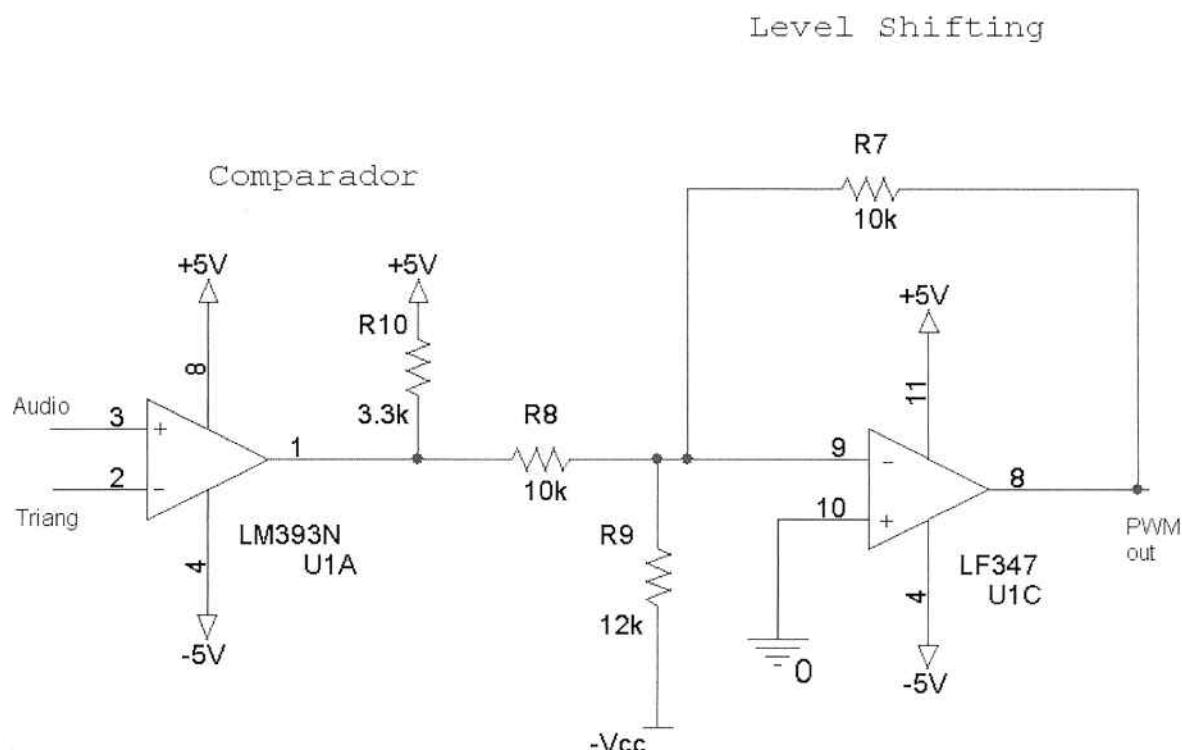


Figura 12: Geração do PWM e Level Shifting

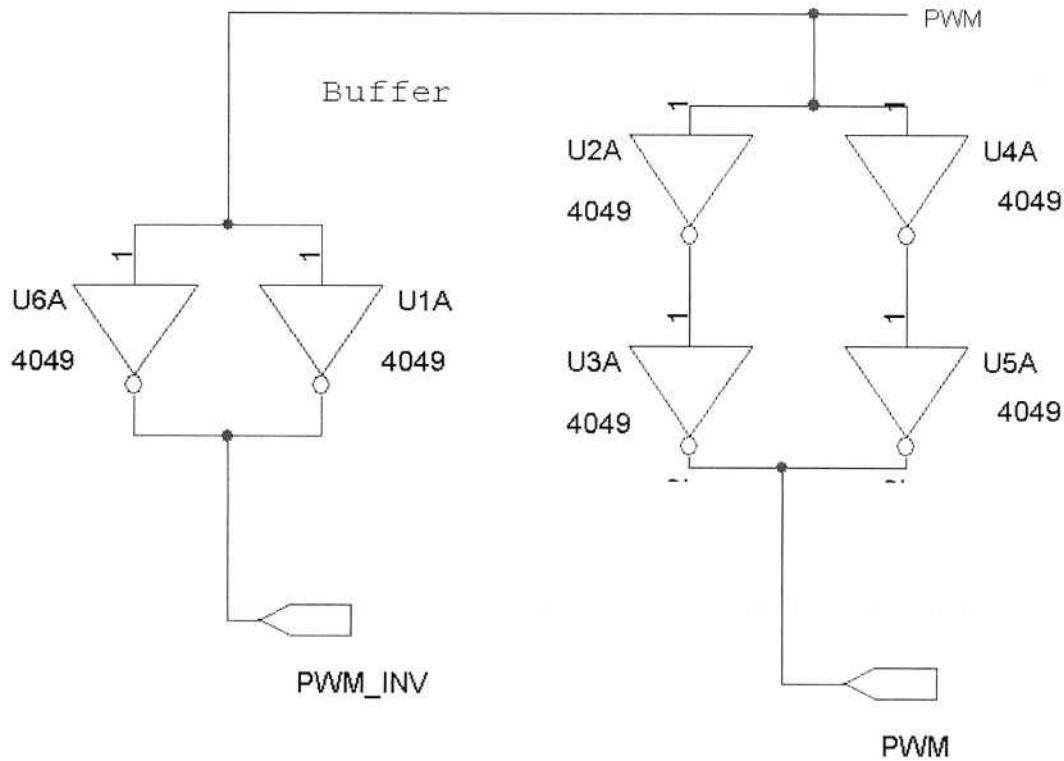


Figura 13: Circuito de Buffer

3.4.3 Estágio de Potência

Como mencionado anteriormente, o projeto do circuito de controle e modulação PWM levou mais tempo que o esperado, limitando muito o tempo disponível para projetar o circuito de acionamento dos transistores. Portanto, aproveitou-se um projeto consolidado de um inversor que apresenta características bem próximas às que se desejava implementar inicialmente no circuito de potência, como será descrito a seguir.

3.4.3.1 Inversor

O inversor utilizado foi projetado por um membro do Laboratório de Eletrônica de Potência com o intuito de ser um circuito inversor padrão genérico, podendo ser utilizado em diversas aplicações como acionamento de lâmpadas e motores e alimentação de sistemas elétricos de baixa potência. Portanto, o trabalho realizado no presente projeto foi de montar fisicamente o inversor, aprender como funciona e como pode ser controlado, verificar seu correto funcionamento e adequar o circuito de controle para comandar o inversor.

O inversor possui configuração tipo ponte completa (*full-bridge*), ou seja, uma associação de duas meias-pontes com a carga entre os dois pontos intermediários delas, como descrito

na introdução teórica. O circuito do inversor é dividido em duas placas de circuito impresso, o disparador e o estágio de potência. O esquema do inversor encontra-se em anexo.

3.4.3.1.1 Disparador

O disparador é responsável pelo acionamento e proteção dos transistores de potência. Para o acionamento dos transistores também é necessário adequar os sinais de disparo aos níveis de tensão utilizados na porta dos transistores.

Os sinais de disparo são recebidos de um circuito externo que é conectado às duas entradas disponíveis, uma para cada meia ponte. O circuito de entrada e o circuito que efetivamente aciona os transistores são isolados entre si através de acopladores ópticos Agilent HCPL-316J, de modo que um defeito em um deles não venha a danificar o outro. Além disso, o desacoplamento entre os barramentos de terra dos circuitos impede a transmissão de ruído através do terra, de um circuito para o outro.

Cada sinal de entrada é transformado em dois sinais, um invertido em relação ao outro, sendo que um controla o transistor superior e o outro o inferior da meia ponte. Como mencionado na introdução teórica, em um circuito em ponte os transistores são conectados entre os dois barramentos da fonte DC e consequentemente não podem ser acionados simultaneamente para não impor um curto-círcuito à fonte. Por isso o disparador possui um circuito que controla o tempo de atraso (*dead-time*) entre o desligamento de um transistor e o acionamento de outro. Esse controle é feito através de componentes externos R e C que podem ser modificados conforme a necessidade.

3.4.3.1.2 Estágio de Potência

O estágio de potência é composto dos transistores de potência que efetivamente compõe a ponte completa e acionam diretamente a carga, além de componentes passivos necessários para o correto funcionamento do conjunto.

Os transistores são IRF840, que suportam até 500V de tensão de barramento e corrente no dreno de até 8A, podendo assim ser usados para acionamentos de potência considerável. Além disso, possuem $R_{DS(on)} = 0.85\Omega$ o que garante baixas perdas de condução. Como o objetivo do projeto é construir um amplificador de 50W, tais transistores estão superdimensionados.

Além dos transistores, o estágio de potência possui capacitores de desacoplamento e circuitos *snubber*. Os capacitores de desacoplamento são colocados na entrada do barramento para filtrar ruídos provenientes da alimentação e para suprir perdas temporárias de energia. Os circuitos *snubber* são apenas conjuntos RC que são conectados entre o coletor

e a porta de cada transistor para minimizar os efeitos de elevação instantânea de tensão (dv/dt elevado), causados por cargas indutivas, no momento em que o transistor é desligado; portanto, desviam picos de energia que poderiam levar ao mal funcionamento e até à queima dos transistores. Os circuitos *snubber* devem ser feitos de acordo com a freqüência da portadora que for usada.

3.4.3.2 Teste do Inversor

Após a montagem física do inversor, ele foi testado para verificar se funcionaria como esperado e se seriam necessários ajustes antes que fosse integrado ao amplificador. As etapas serão descritas a seguir.

3.4.3.2.1 Disparador

Para verificar isoladamente o funcionamento do circuito disparador alimenta-se apenas a placa de circuito impresso correspondente a ele, deixando o estágio de potência desligado. Como o inversor é composto de duas meias pontes, cada metade do disparador foi testada individualmente. Para isso, foi aplicada uma onda quadrada de 0 a +5V na entrada de cada uma das metades e verificou-se se na saída havia dois sinais quadrados de mesma amplitude e invertidos entre si, correspondentes aos sinais de disparo do transistor superior e inferior de cada meia ponte. A figura 14 mostra os sinais obtidos.

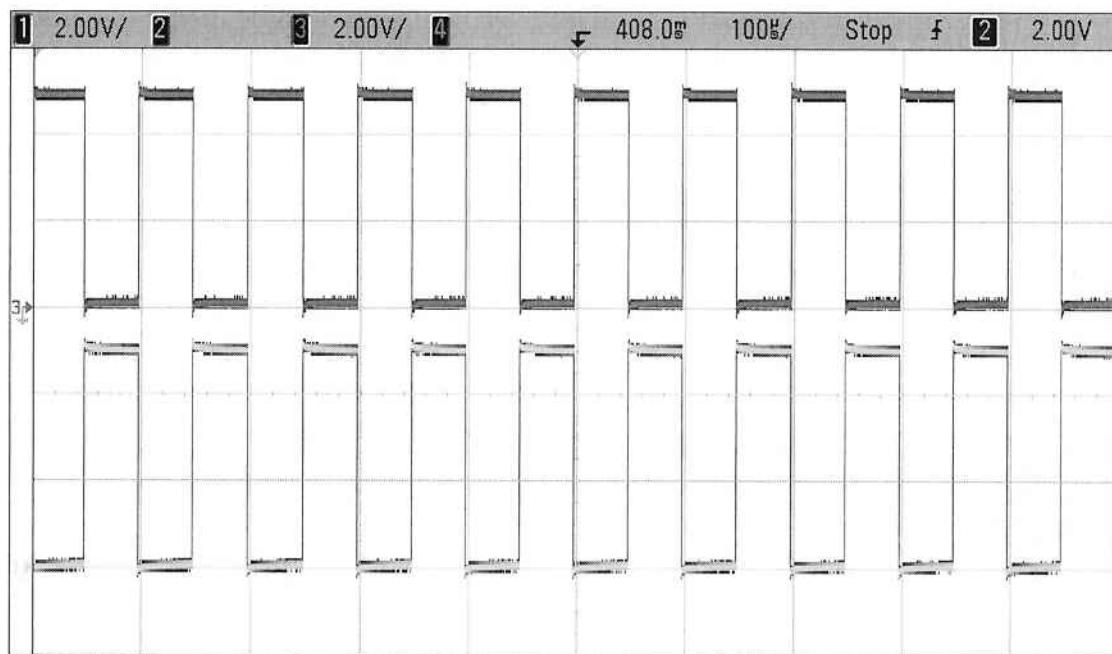


Figura 14: Sinais de Disparo do Inversor

Para verificar se o controle do tempo de atraso é feito de maneira correta basta ampliar a forma de onda, como ilustra a figura 15.

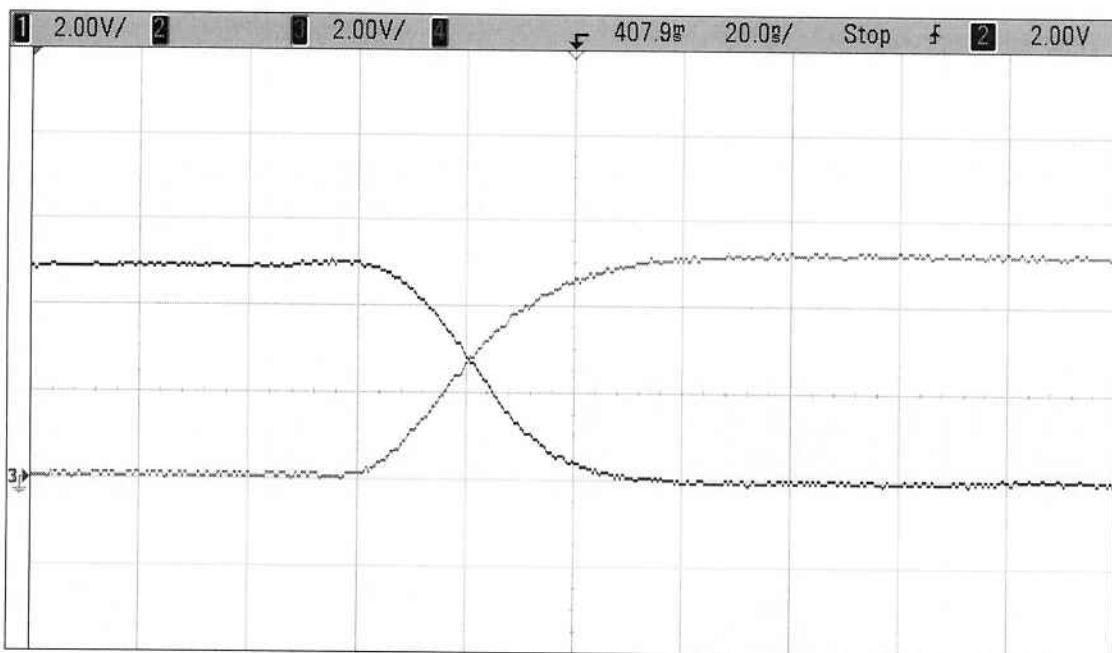


Figura 15: Tempo de Atraso (dead-time)

Como se pode observar, não há nenhum período em que os dois transistores estejam plenamente em condução simultaneamente e o período de transição é de aproximadamente 50 ns, cerca de 1.5% do período da freqüência de chaveamento do PWM que é de 4 us, o que garante uma distorção razoavelmente baixa, como será explicitado posteriormente.

3.4.3.2.2 Estágio de Potência

Para verificar o funcionamento do estágio de potência basta seguir o mesmo procedimento usado para o circuito disparador, mas alimentando a placa de circuito impresso de potência com a tensão de barramento desejada para a carga. No teste executado alimentou-se o barramento com tensão simétrica $\pm 10V$ e mediu-se a saída para verificar se o sinal correspondia à mesma forma de onda de entrada, mas com amplitude maior. O resultado obtido é mostrado na figura 16.

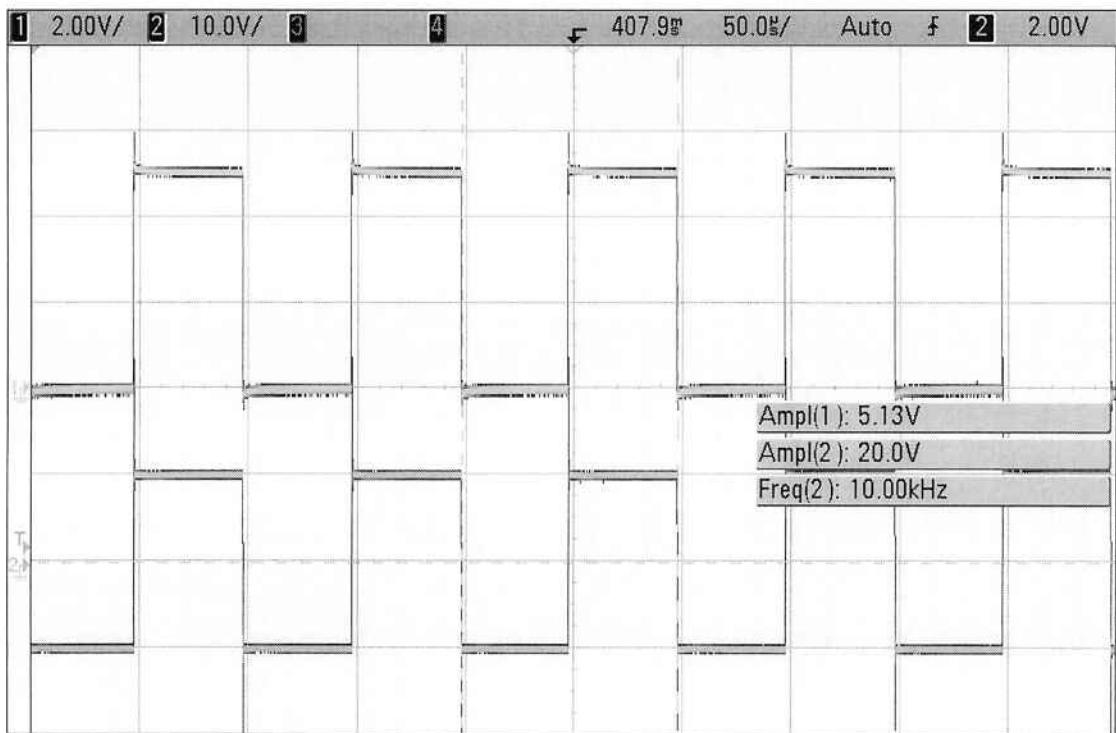


Figura 16: Entrada e Saída do Inversor

Como se pode observar os sinais de saída (2) estão seguindo os de entrada (1), sendo que a entrada apresenta apenas os níveis lógicos de sinais digitais (0 e +5V) enquanto que o sinal de saída pode apresentar quaisquer níveis de tensão escolhidos, positivos ou negativos.

3.4.3.3 Filtro de Saída

O filtro de saída é o componente responsável pela regeneração do sinal original a partir do sinal modulado. A regeneração é feita eliminando-se as componentes de alta freqüência do sinal PWM, restando apenas o valor médio instantâneo de cada ciclo da onda quadrada, que representa o valor instantâneo do sinal original. O filtro utilizado para esse fim é o filtro passa-baixas, também chamado de filtro de valor médio.

Existem diversas topologias de filtros passa-baixas, nesse projeto optou-se por utilizar um filtro Butterworth de segunda ordem, por possuir uma banda passante praticamente plana e boa resposta de fase. Para o estágio de potência em configuração de ponte completa, o filtro é colocado entre os pontos intermediários das meias pontes e a carga é colocada em paralelo com o capacitor. A figura 17 ilustra o conceito:

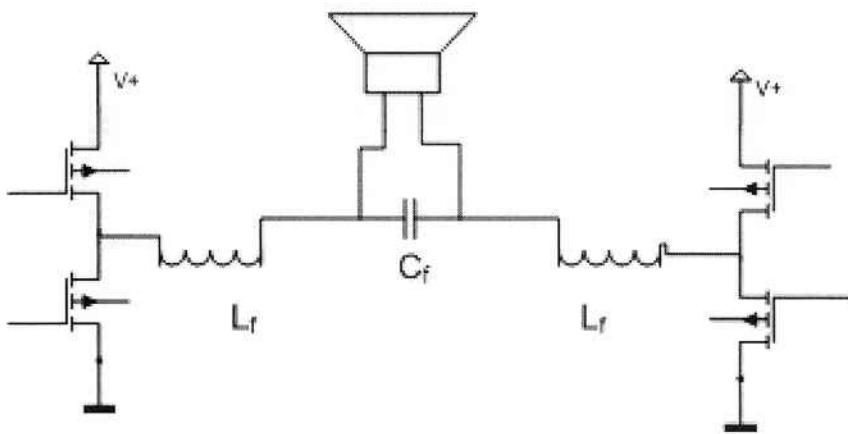


Figura 17: Filtro de Saída para Ponte Completa

Para o tipo de filtro escolhido, o valor do capacitor é dado por:

$$C_f = \frac{1}{\omega_0 \times R_{carga} \times \sqrt{2}}$$

E o valor dos indutores é dado por:

$$L_f = \frac{R_{carga} \times \sqrt{2}}{\omega_0}$$

Portanto, para uma freqüência de corte de $\omega_0 = 30$ kHz obtém-se:

$$C_f = 0,94 \text{ } \mu\text{F} \quad L_f = 30 \text{ } \mu\text{H}$$

O valor comercial mais próximo disponível para o capacitor é de 1 μF .

Os indutores foram fabricados manualmente enrolando-se fio de cobre esmaltado em carretéis de nylon torneados de acordo com a geometria necessária. Os indutores foram feitos com núcleo de ar, pois deveriam apresentar indutância baixa e não saturar. Para o cálculo das dimensões do carretel, procurou-se manter a relação entre as dimensões de acordo com a relação de Brooks, que é tida como uma relação ideal [8] entre diâmetro do carretel e o empacotamento das espiras. Para um indutor de Brooks, a indutância é dada aproximadamente por:

$$L = 1.6994 \times 10^{-6} \cdot a \cdot N^2$$

sendo ‘a’ o raio das espiras da camada central do indutor e N o número de espiras total. A figura 18 ilustra a geometria do indutor esperada.

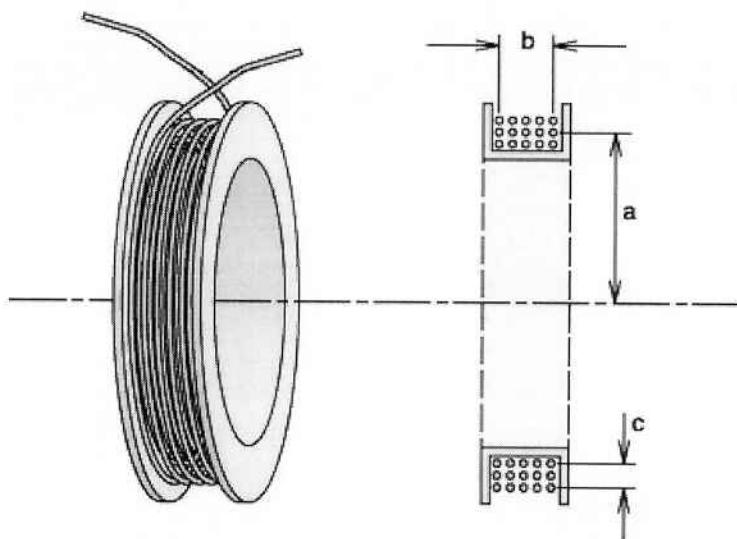


Figura 18: Exemplo de Indutor

Com o material disponível no laboratório para confecção dos carretéis, estimou-se $a = 1\text{cm}$ e chegou-se em $N = 43$ espiras. Para se ter um empacotamento aproximadamente simétrico, considerou-se fazer 6 camadas com 7 espiras cada uma, resultando num total de 42 espiras. Como foi utilizado fio esmaltado com diâmetro de 1,34mm , as dimensões a, b e c, de acordo com a figura foram calculados e são:

$$a = 1,4\text{cm} \quad b = 1,07\text{cm} \quad c = 8,06\text{mm}$$

Portanto, os diâmetros interno e externo são dados por:

$$D_{\text{int}} = 2 \times (a - 0,5 \times c) = 2\text{cm} \quad D_{\text{ext}} = (D_{\text{int}} + c) \times 1,3 = 3,7\text{cm}$$

Feitos os carretéis, enrolou-se o fio tomando-se o cuidado de manter as espiras próximas com o maior empacotamento possível. Uma vez enroladas as espiras, os indutores foram medidos com um medidor RCL que forneceu $L = 26\text{ uH}$ para cada uma, o que está relativamente próximo ao esperado, considerando-se o processo praticamente artesanal de construção.

A resposta em freqüência simulada revelou que a freqüência de corte superior ficou abaixo da esperada incialmente, ficando em aproximadamente 18 kHz.

3.4.4 Testes

Uma vez montado o conjunto completo, partiu-se para a avaliação do funcionamento do circuito.

Para simular um alto-falante utilizou-se um resistor dissipativo de impedância similar. Para um melhor aproveitamento do sistema, adotou-se um alto-falante de 4Ω e o cálculo do filtro se baseou nisso. Como os resistores estão disponíveis apenas em valores discretos, usou-se um resistor de $3,9\Omega$.

Ensaiou-se o circuito completo com um sinal de entrada senoidal de 1 kHz. O sinal de saída possui ruído de alta freqüência, mas tal ruído não é audível. A figura 19 o sinal de entrada e o de saída. Pode-se observar que o sinal está sendo demodulado como esperado, fornecendo um sinal senoidal amplificado na saída.

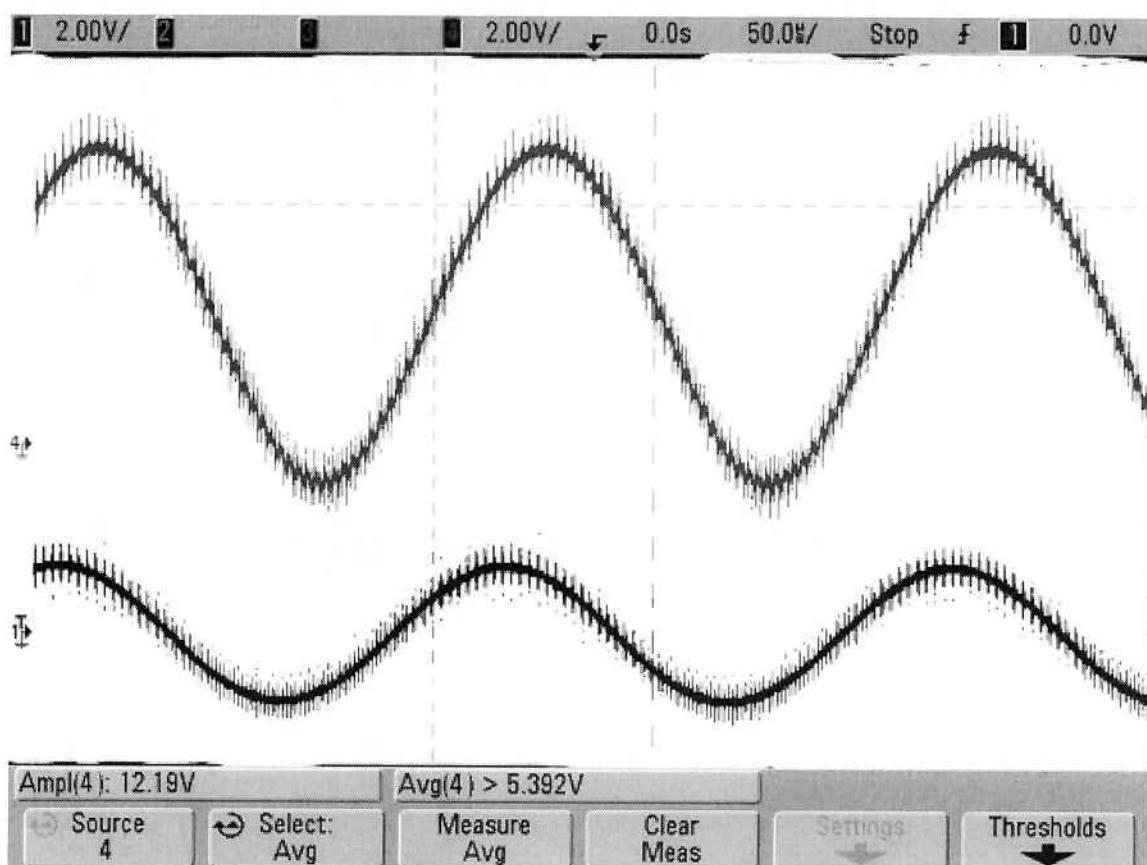


Figura 19: Entrada e Saída do sistema completo

O espectro consiste da fundamental, sua segunda harmônica muito atenuadas e algumas componentes ao redor de 250 kHz. A figura 20 mostra o espectro limitado de forma a poder se visualizar o espectro mais próximo ao da fundamental do sinal de entrada.

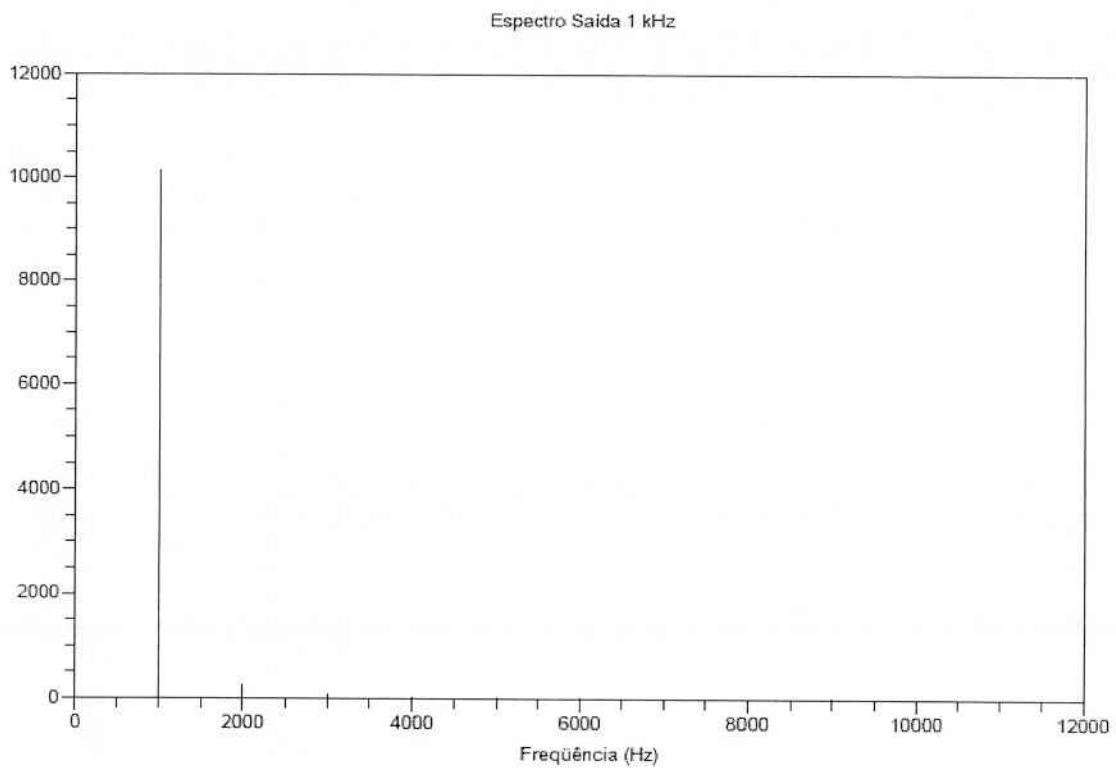


Figura 20: Espectro da saída com 1 kHz na entrada

Procurou-se também medir a resposta em freqüência do sistema utilizando um gerador de sinais senoidais e um osciloscópio. Mediú-se a defasagem entre entrada e a saída para obter a resposta em fase. A freqüência de corte superior (-3 dB) do sistema foi aproximadamente 15 kHz. O resultado é dado na figura 21:

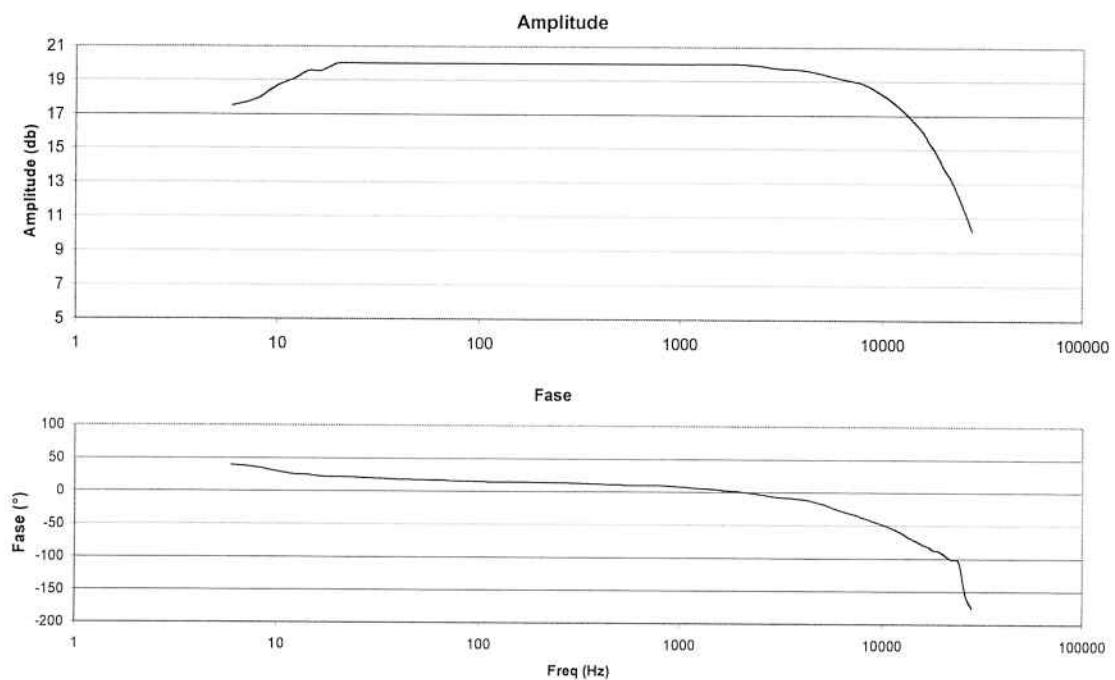


Figura 21: Resposta em Freqüência do Sistema Completo

4) Considerações Finais

4.1 Dificuldades encontradas

Projeto

Por falta de experiência do aluno alguns dos circuitos projetados inicialmente não possuíam componentes que permitissem uma boa depuração do circuito, como pinos de testes - para obtenção de formas de onda ao longo do circuito - e LEDs - para indicar que a alimentação do circuito estava ativa e com a polarização correta. Seguindo as sugestões dos professores, tais componentes foram adicionados e facilitaram em muito a identificação de problemas no circuito.

Além disso, o aluno não tinha conhecimento e traquejo no uso de programas computacionais para desenho do *layout* do circuito. Mesmo assim, uma vez assimilados os conceitos, foi possível fazer se otimizar a disposição dos componentes e produzir um layout razoavelmente compacto.

Construção

Como o aluno nunca havia construído protótipos em circuito impresso, foi necessário aprender todo o processo de produção do mesmo, para que o aluno pudesse trabalhar por conta própria e não ficar dependendo da disponibilidade dos técnicos.

Além da produção do circuito, foi necessário aprender a se pensar na montagem mecânica e disposição dos circuitos que compunham o amplificador completo.

Ensaios

A falta esporádica de alguns equipamentos acabou atrasando o desenvolvimento do projeto. Além disso, o laboratório não possui alguns equipamentos usados para medir parâmetros de qualidade de áudio, pois não são necessários para os outros projetos desenvolvidos no laboratório. Procurou-se utilizar outros laboratórios que possuíssem tais equipamentos, mas não foi possível conseguir isso em tempo hábil.

4.2 Estudos Futuros

Um possível desenvolvimento para o projeto apresentado seria implementar no circuito de controle um modulador PWM de 3 níveis, a fim de se criar um valor intermediário para os instantes em que o sinal de entrada é zero, de modo que os transistores de potência fiquem desligados durante esses períodos, consumindo menos energia. Outra vantagem é que tal

esquema de modulação permite o uso de um filtro mais reduzido, já que o espectro possui componentes de frequencia muito maior e distantes das componentes do sinal de entrada.

Além disso, poderia ser projetado um circuito de potência próprio para o amplificador, pois o inversor utilizado foi projetado para potências maiores e possui circuitos de proteção superdimensionados para a aplicação do amplificador.

4.3 Conclusões

Apesar das limitações dos componentes e de usar controle analógico sem realimentação, pode-se observar que os resultados foram razoavelmente satisfatórios. Apesar do filtro ter sido projetado e ensaiado para uma impedância de 4Ω , a caixa acústica disponível no laboratório possuía impedância de 8Ω . O efeito disso é que altera a resposta em freqüência principalmente nos agudos (altas freqüências), fornecendo uma impressão sonora diferente. Mesmo assim, ao ouvir o resultado não é possível se perceber ruído ou distorção significativa.

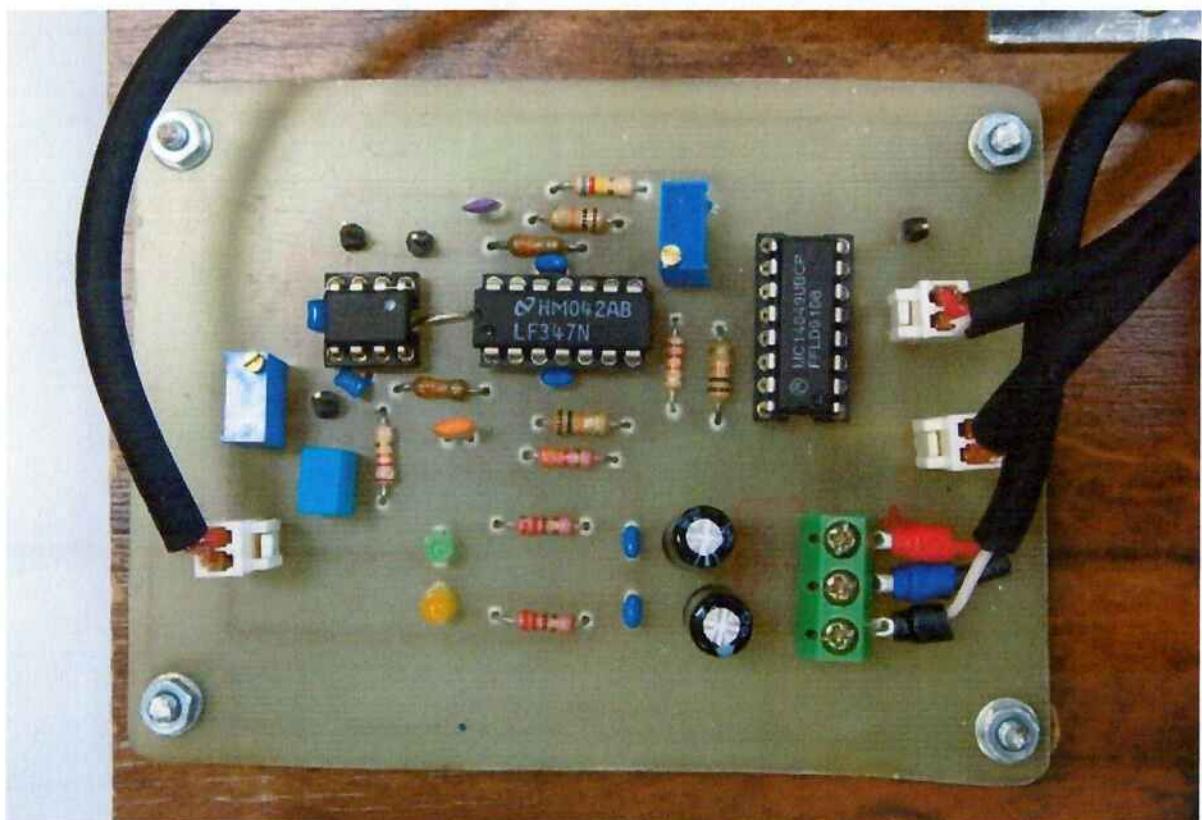
A inexperiência levou a uma avaliação errônea do tempo necessário para a realização das etapas, atrasando o projeto no primeiro semestre e levando a uma mudança significativa do projeto. Mesmo assim, um dos principais objetivos iniciais foi cumprido, que era o de aprender sobre os conceitos envolvidos na elaboração, construção e testes de um sistema de áudio.

5) Bibliografia

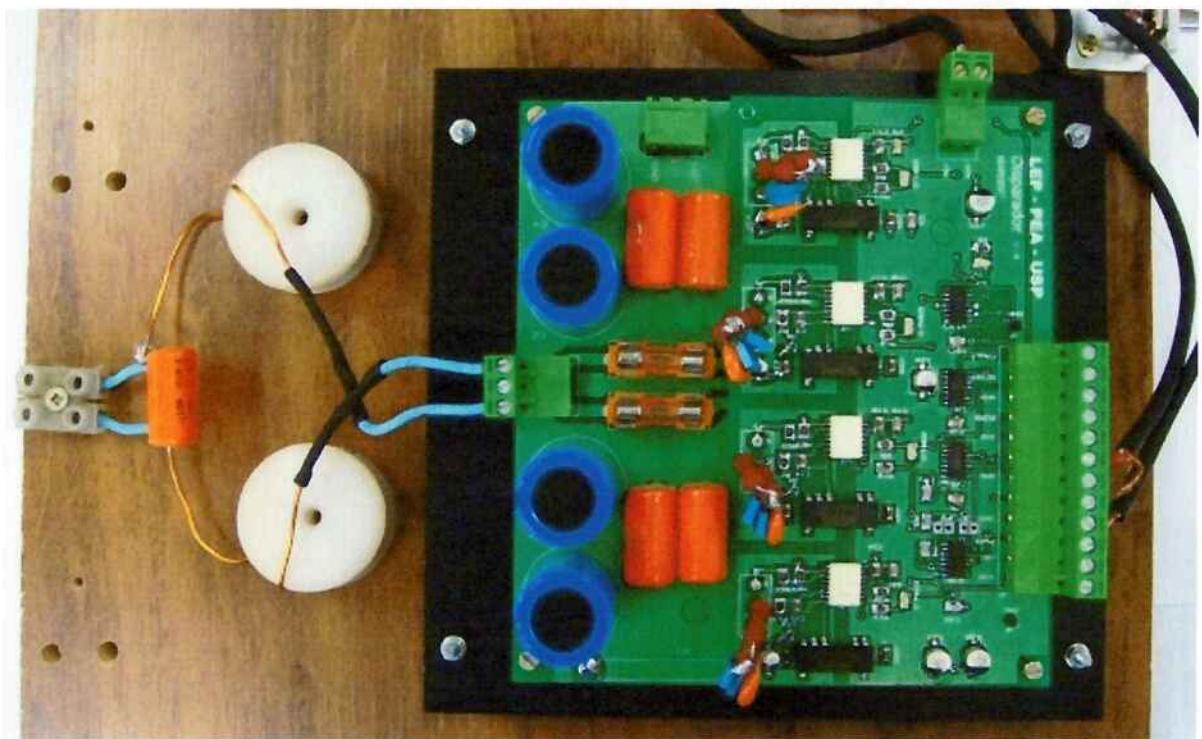
- [1] Wan, Tng Chee, *Multi-level Switchmode Class D Amplifier*, University of Queensland, Austrália 1998
- [2] Boon, Chiew Tiam, *Switch Mode Multilevel (Class D) Power Amplifier*, University of Queensland, Austrália 2001
- [3] Frioni, Victor, *High Power Digital Audio Amplifier (Output Stage)*, University of Queensland, Austrália 1999
- [4] Hemmings, Christopher N., *Improving Class D Audio Power Amplifiers*, University of Queensland, Austrália 1999
- [5] Dallas Semiconductor, *Application Note 1760 - Class D Audio Amplifiers Save Battery Life*, Setembro 2002
- [6] W. Marshall Leach Jr., *Introduction to Electroacoustics and Audio Amplifier Design 2nd Edition*, Kendall/Hunt Publishing, 2001
- [7] Texas Instruments, *Application Report SLOA119 Class-D LC Filter Design*, Abril 2006
- [8] Clarke, Richard. (Novembro, 2007). *An introduction to the air cored coil*. University of Surrey, Reino Unido. [Internet]. Disponível em:
http://info.ee.surrey.ac.uk/Workshop/advice/coils/air_coils.html
- [9] National Semiconductor, *Application Note 20 - An Applications Guide for Op Amps*, Fevereiro 1969
- [10] N. Mohan, T .M. Undeland, W. Robbins, "Single-Phase Inverters," in Power Electronics: Converters, Applications and Design, 3rd ed., Hoboken, NJ, John Wiley & Sons, 2003, pp. 211-225.
- [11] Dallas Semiconductor, *Application Note 3977 - Class D Amplifiers: Fundamentals of Operation and Recent Developments*, Dezembro 2006
- [12] W. Marshall Leach Jr., *Introduction to Electroacoustics and Audio Amplifier Design (2nd Edition)*, Kendall/Hunt Publishing, 2001

ANEXOS

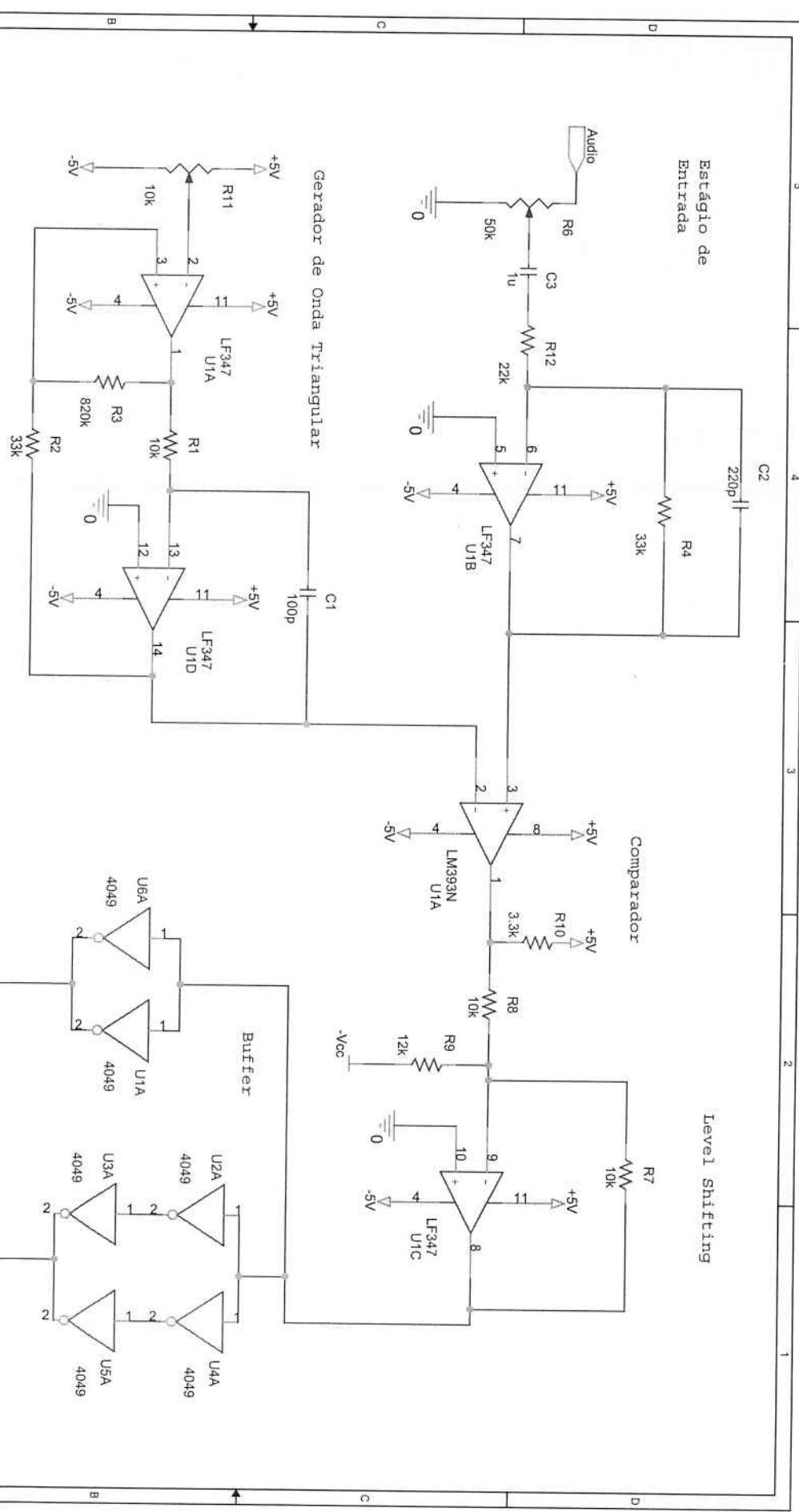
1-) FOTOS DOS CIRCUITOS



Circuito de controle



Estágio de potência



| | |
|--|---|
| Projeto de um Amplificador Classe D para Áudio | |
| Title | ANEXO 1 - Circuito de Controle completo |
| Size | Document Number |
| A | Rev 1 |