



UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE
CENTRO DE ENGENHARIA ELÉTRICA E INFORMÁTICA
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

CYBELLE BELÉM GONÇALVES

RELATÓRIO DE ESTÁGIO INTEGRADO –
LABORATÓRIO DE ENGENHARIA DA
CRIAÇÃO ARTÍSTICA

Campina Grande, Paraíba
Julho de 2015

CYBELLE BELÉM GONÇALVES

RELATÓRIO DE ESTÁGIO INTEGRADO - LABORATÓRIO DE
ENGENHARIA DA CRIAÇÃO ARTÍSTICA

*Relatório de Estágio Integrado submetido à
Unidade Acadêmica de Engenharia Elétrica da
Universidade Federal de Campina Grande
como parte dos requisitos necessários para a
obtenção do grau de Bacharel em Ciências no
Domínio da Engenharia Elétrica.*

Área de Concentração: Eletrônica.

Orientador:
Raimundo Carlos Silvério Freire

Campina Grande, Paraíba
Julho de 2015

CYBELLE BELÉM GONÇALVES

RELATÓRIO DE ESTÁGIO INTEGRADO – LABORATÓRIO DE ENGENHARIA DA CRIAÇÃO ARTÍSTICA

*Relatório de Estágio Integrado submetido à
Unidade Acadêmica de Engenharia Elétrica da
Universidade Federal de Campina Grande
como parte dos requisitos necessários para a
obtenção do grau de Bacharel em Ciências no
Domínio da Engenharia Elétrica.*

Área de Concentração: Eletrônica.

Aprovado em / /

Professor Avaliador
Universidade Federal de Campina Grande
Avaliador

Raimundo Carlos Silvério Freire
Universidade Federal de Campina Grande
Orientador; UFCG

AGRADECIMENTOS

Agradeço à UFCG, em primeiro lugar, pela minha acolhida e pelas condições oferecidas, que me permitiram concluir este trabalho.

Agradeço aos meus pais Raimundo Nonato e Maria do Céu por me apoiar nas minhas decisões e na busca pelo saber. Eles foram fundamentais na realização dos meus sonhos.

Sou grata aos meus irmãos Ricardo, Sílvia, Cira, Michele e Shirley que me ajudaram a fazer minhas escolhas e aos meus cunhados Fabrício e Jorge que também me apoiaram.

Agradeço ao meu noivo Arthur que me apoia ativamente nas atividades da universidade e nas dificuldades da vida desde o ensino fundamental. A sua família Dona Aurení, Seu Luiz e Ana Luiza que me acolheram como filha e irmã.

Agradeço aos meus amigos do laboratório Thais e Túlio que me ajudaram muito nos momentos difíceis e estavam sempre ao meu lado para comemorar as vitórias.

Sou grata à CAPES, que financiou meu intercâmbio acadêmico na França e ao meu tutor Jean Loup Florens que me orientou no meu trabalho na França.

Agradeço o meu orientador Raimundo Carlos Silvério Freire que me ajudou no desenvolvimento desse estágio compartilhando seus conhecimentos.

RESUMO

Os sistemas a retorno de esforço são usados em várias áreas da engenharia com a finalidade de simulação do comportamento de nano partículas, piano de corda e textura de determinados materiais, por exemplo. A concepção desses sistemas requer muita delicadeza, uma vez que o eles devem ser suaves e um pequeno ruído pode acarretar em um sistema diferente do pretendido. O trabalho ao qual este relatório se refere foi desenvolvido no Laboratório ACROE-ICA (*Association pour la Création et la Recherche sur les Outils d'Expression - Ingénierie de la Création Artistique*) com o objetivo de estudar três problemas do sistema a retorno de esforço do tipo Transdutor Retroativo Gestual (TGR), a saber: diafonia, ruído sonoro e quantidade de potência dissipada. Dois componentes do sistema que influenciam os problemas citados são as fontes de alimentação e os amplificadores. Foram testados dois tipos de fontes (linear e chaveada) e amplificador de áudio Classe D. Ao final do estudo, verificou-se que as fontes lineares são mais adequadas para sistemas TGR, por apresentarem maior estabilidade e menor ruído. Além disso, os amplificadores Classe D apresentaram menor perda de potência para o sistema.

Palavras-chave: Amplificadores de Áudio, Fontes de Alimentação, Estágio integrado.

ABSTRACT

Effort Return Systems are used on several engineering areas with the objective of simulation, for example, of nanoparticles' behavior, acoustic pianos and some materials' texture. The conception of these systems requires a lot of delicacy, since the system must be smooth and any noise can result in a very different system from the simulated one. This work was developed at ACROE-ICA Laboratory (*Association pour la Création et la Recherche sur les Outilsd'Expression- Ingénierie de la Création Artistique*) with the propose of studying three different problems of an Effort Return System called TDR (*Transducteur Gestuel Rétroactif* - Retroactive Gestural Transducer) crosstalk, audible noise and the amount of power dissipation. In order to solve these problems, two crucial components were studied: the system's power supplies and amplifiers. Linear and switched power supplies, as well as a D-class audio amplifier were tested. After a lot of tests, it was possible to conclude that the linear power supply presents a better result for some applications, although it is a lot bigger than switched power supplies. D-class amplifiers presented less power loss for the system.

Keywords: Audio Amplifiers, Power Supplies, Integrated stage

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Manipulação usando o TGR.	13
Figura 2: TGR.....	13
Figura 3: Esquema elétrico de um sensor LVDT.	14
Figura 4: Esquema mecânico de sensor LVDT.	14
Figura 5: Esquema da ligação elétrica e mecânica do sistema.	15
Figura 6: Esquema da ligação elétrica e mecânica.	15
Figura 7: Vista superior do estojo.	16
Figura 8: Circuito para tratamento dos sinais e fonte de alimentação.	16
Figura 9: Princípio de funcionamento de uma regulação linear.	17
Figura 10: Princípio de funcionamento de uma regulação chaveada.	17
Figura 11: Estrutura de uma alimentação linear.	18
Figura 12: Estrutura de uma alimentação chaveada.	19
Figura 13: Fonte de alimentação ressonante.....	20
Figura 14: Medida no TGR com a fonte de tensão <i>Agilent E3634</i>	21
Figura 15: Medida no TGR com a fonte <i>ZWS240PAF-24</i>	21
Figura 16: Esquemático do circuito utilizado pra medir o ruído.	22
Figura 17: Circuito usado pra medir ruído.	22
Figura 18: Medida com a fonte <i>Agilent E3634</i>	22
Figura 19: Medida com a fonte <i>ZWS240PAF</i>	22
Figura 20: Medida para fonte de tensão <i>ZWS240PAF-24/SA</i> com 3 A.	23
Figura 21: Análise para a fonte <i>Agilent E3634 - 6 A</i>	23
Figura 22: Análise com fonte <i>ZWS240PAF-6 A</i>	23
Figura 23: Filtro passa baixas LC.....	23
Figura 24: Circuito utilizado com o filtro.....	24
Figura 25: Medida para fonte com o filtro passa baixas.....	25
Figura 26: Circuito com o novo filtro.....	25
Figura 27: Fonte de alimentação com o filtro e uma corrente de 6 A.	26
Figura 28: Medidas com a fonte de tensão e a carga teste e 1 A.....	26
Figura 29: Medidas com a fonte de tensão e a carga teste e 3 A.....	27
Figura 30: Medidas com a fonte de tensão e a carga teste e 6 A.....	27

Figura 31: Medida com a fonte <i>HRPG-450-24 -6 A</i>	27
Figura 32: Esquema de um filtro com seus componentes parasitas.	28
Figura 33: Amplificador classe A.....	30
Figura 34: Amplificador classe B.....	31
Figura 35: Amplificador classe AB.....	32
Figura 36: Amplificador classe D.....	32
Figura 37: TAS5162.....	33
Figura 38: Esquema do circuito feito no Kicad.....	34
Figura 39: Indutor.....	35
Figura 40: Leiaute do circuito.	35
Figura 41: Circuito montado para gerar um sinal PWM.	36
Figura 42: Saída do circuito com uma entrada de 1,27 V.	36
Figura 43: Saída do circuito com uma entrada de 1,6 V.	36
Figura 44: Placa de circuito impressa com os componentes.	37
Figura 45: Placa de circuito impressa com os componentes.	37
Figura 46: Circuito com controle em corrente.....	37

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Comparativo entre Fontes de alimentação.....	19
Tabela 2: Comparativo entre as classes de amplificadorES	29

SUMÁRIO

1	Introdução.....	11
2	Apresentação do laboratório.....	12
3	Contextualização e problemática.....	13
4	A fonte de Alimentação.....	17
4.1	Estudo comparativo entre fontes de Alimentação	17
4.2	Medições com as fontes de alimentação.....	20
4.2.1	Análise com o TGR.....	21
4.2.2	Carga de teste	21
4.2.3	Testes com as fontes.....	22
4.3	Tentativa de reduzir o ruído com um filtro.....	23
4.4	Escolha de uma nova fonte de alimentação chaveada	26
4.5	Conclusão sobre as fontes de alimentação.....	28
5	Os amplificadores de áudio	29
5.1	Estudo comparativo entre as classes de amplificadores	29
5.1.1	Amplificadores classe A.....	30
5.1.2	Amplificadores classe B.....	31
5.1.3	Amplificadores classe AB.....	31
5.1.4	Amplificadores classe D.....	32
5.2	Escolha do amplificador	33
5.3	Conclusão sobre os amplificadores.....	38
6	Conclusão	39
	Referências	40

1 INTRODUÇÃO

O estágio ao qual este relatório se refere foi realizado no laboratório ACROE-ICA (*Association pour la Création et la Recherche sur les Outils d'Expression-Ingénierie de la Création Artistique*), localizado em Grenoble, França. Nesse laboratório, são desenvolvidos dispositivos que proporcionam retorno de esforço físico para simulações de sistemas com interação multissensorial¹. Essas interfaces são usadas no domínio da criação artística e fornecem uma boa qualidade de interação podendo ser utilizadas em simulação de instrumentos musicais, nano partículas ou criação de jogos.

Os dispositivos desenvolvidos no laboratório contêm atuadores eletrodinâmicos especialmente construídos para a interface háptica². Esses dispositivos devem fornecer uma boa linearidade e o sistema de potência deve ser capaz de fornecer impulsos de forças de amplitude elevados (até 200 N) sem distorção.

Um desses dispositivos é o Transdutor Retroativo Gestual (TGR), que pode ser utilizado para simular um piano de corda promovendo a mesma sensação que o martelo fornece ao tocar a corda do piano. No sistema do laboratório, esse dispositivo possuía três problemas específicos, que eram a diafonia entre duas teclas do piano, a alta potência dissipada e o ruído sonoro. Esse trabalho foi desenvolvido com o objetivo de propor soluções, estudá-las e colocá-las em prática a fim de resolver os problemas citados.

¹Interação multissensorial está relacionada àquilo que envolve ou implica dois ou mais estímulos sensoriais simultaneamente

²Háptica é o adjetivo dado às interfaces que fornecem sensação por meio do toque

2 APRESENTAÇÃO DO LABORATÓRIO

O laboratório ACROE-ICA, que pertence ao Instituto Politécnico de Grenoble (INPG), foi criado em 1976 e desde então tem seu foco voltado para o programa de pesquisa e desenvolvimento dos conceitos de modelos em física de partículas, interações de massas e simulação em tempo real com dispositivos que proporcionam o retorno de esforço e multissensoriais. Ao longo do tempo, tem se tornado internacionalmente conhecido no assunto.

Desenvolvendo a tecnologia de modelagem e simulação CORDIS-ANIMA, ele é, também, pioneiro em instrumentos hápticos, tendo feito o seu primeiro sistema de interação háptica em 1978. Desde então, nele foram desenvolvidos vários de modelos físicos e software para ambientes de engenharia e *design*.

O laboratório tem participado de muitos projetos franceses e europeus voltados para pesquisa e criação artística: Projeto R_APM (workshops educacionais móveis) apoiadas pela Região Rhône Alpes (1999-2004), ARCAD (Ateliê de pesquisa e Criação em Artes dinâmicas) com apoio do Ministério da Cultura (2005-2006), o projeto ANR "Criatividade Instrumental" no SHS concurso de 2008 (iniciado em 15 de Dezembro de 2008), o projeto Europeu AMBIANT Creativity (2010-2011).

O laboratório ACROE-ICA tem um conjunto de pesquisas de base que são:

- linguagem e modelagem em física de partículas CORDIS-ANIMA;
- implementação em tempo real de protótipos de processos genéricos, em placa DSP e arquitetura multiprocessador e benchmarking de todos os seus processos e arquiteturas;
- biblioteca de modelos físicos, imagem e som;
- desenvolvimento do dispositivo háptico ERGON_X;
- protótipos de interfaces de usuário de partículas de massa de modelagem com interações físicas, GENESIS e interfaces MIMESIS.

O laboratório contém a plataforma AST (Art-Science-Technology) para a escola PHELMA do Instituto Politécnico de Grenoble. O laboratório ACROE-ICA promove uma especialização Arte-Ciência-Tecnologia pela Universidade de Grenoble.

3 CONTEXTUALIZAÇÃO E PROBLEMÁTICA

No laboratório ACROE-ICA são desenvolvidos sistemas com retorno de esforço para simulação e em particular para a realização de instrumentos virtuais, por exemplo tais como:

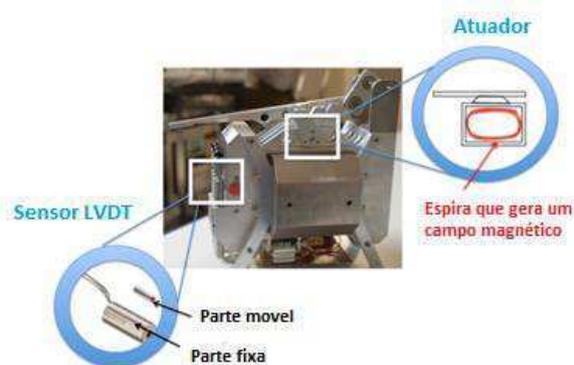
- criação de alguns instrumentos como um piano com cordas virtuais;
- criação de jogos;
- aplicações em diferentes domínios científicos e industriais, os quais tenham necessidade de movimentos precisos ou simulações de determinados movimentos.

Essas manipulações são possíveis usando o TGR (Figura 1), uma vez que ele é a interface entre um objeto simulado no LabVIEW e o mundo real.

Figura 1: Manipulação usando o TGR.



Figura 2: TGR.



O TGR é constituído por uma junção eletromecânica, composta por sensores indutivos LVDT (*Linear Variable Differential Transformer*) e atuadores eletromecânicos especialmente desenvolvidos para o laboratório.

Os sensores do tipo LVDT (Figura 3) são para a medição de deslocamento linear. O princípio de funcionamento é baseado em três bobinas e um núcleo de material ferromagnético de alta permeabilidade (Figura 4). A saída deste sensor é um sinal proporcional ao deslocamento do seu núcleo, que está fixado onde se deseja medir o deslocamento [6].

Figura 3: Esquema elétrico de um sensor LVDT.

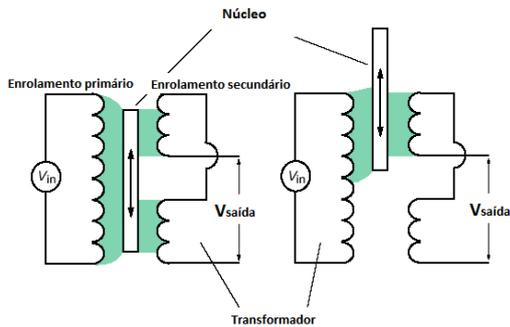
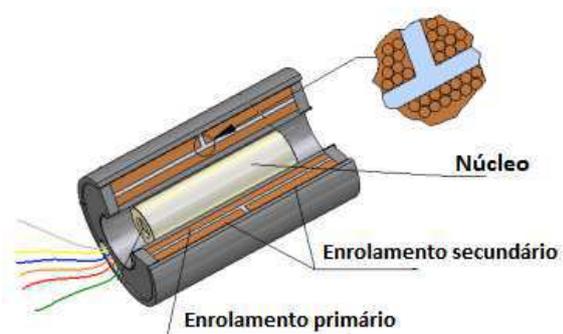


Figura 4: Esquema mecânico de sensor LVDT.



A bobina central é chamada de primária e as outras de secundárias. Para a medição, uma corrente alternada é aplicada ao enrolamento primário, que tem uma tensão induzida em cada enrolamento secundário sendo proporcional à indutância mútua com o primário. A frequência da corrente alternada é normalmente entre 1 kHz e 10 kHz.

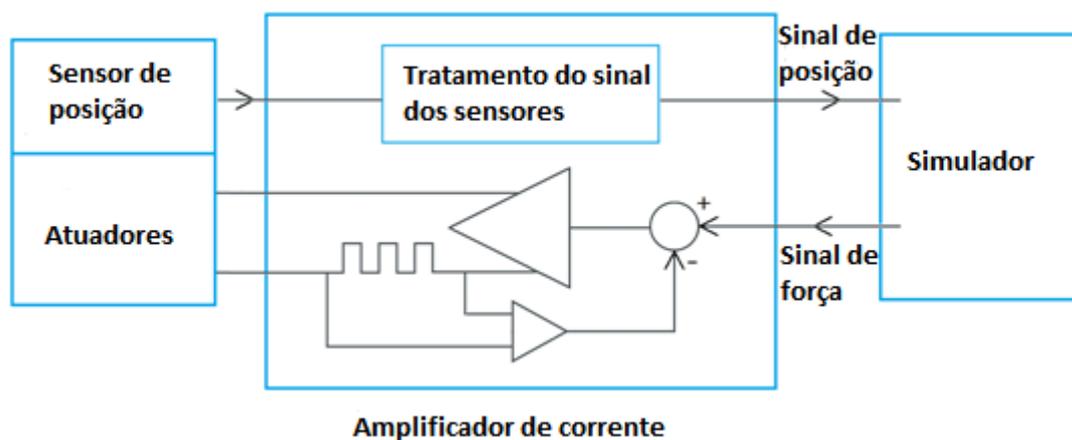
O deslocamento do núcleo varia a indutância mútua e, portanto, a tensão de uma das bobinas secundárias também. As bobinas estão conectadas em série, de modo que a tensão de saída será a diferença entre as duas tensões secundárias. Quando o núcleo está na posição central equidistante das duas bobinas secundárias, as tensões das bobinas secundárias têm mesma amplitude, porém polaridades opostas, então a soma das tensões será zero [8].

Quando o núcleo tem um deslocamento de um lado, a tensão de uma bobina secundária aumenta e a outra diminui, aumentando a tensão de zero ao máximo. Esta tensão está em fase com a tensão primária.

Quando o núcleo tem um deslocamento para o outro lado, a tensão de saída também aumenta de zero a máxima, porém a sua fase está em oposição à tensão primária. A amplitude da tensão de saída é proporcional ao deslocamento do núcleo e é por isso que é chamado linear. A fase da tensão irá indicar a direção de deslocamento [10].

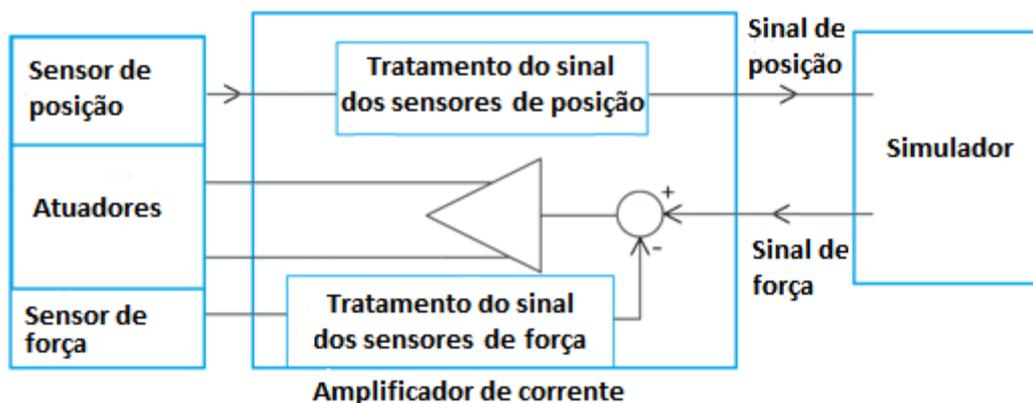
O controle do sistema a retorno de força utilizado é em malha aberta. Nesse sistema, o sinal de força fornecido pelo simulador é convertido em corrente, que é aplicada ao atuador eletrodinâmico, fornecendo uma força proporcional ao sinal (Figura 5).

Figura 5: Esquema da ligação elétrica e mecânica do sistema.



No sistema com realimentação em malha fechada utiliza-se um circuito de contra reação no sistema atuador/amplificador a partir do sensor de força, como pode ser visto no diagrama de blocos na Figura 6.

Figura 6: Esquema da ligação elétrica e mecânica.



Esse sistema atuador sensor é bastante sensível, o que torna as entradas modificantes e espúrias mais difíceis de serem tratadas. O TGR funciona perfeitamente para algumas aplicações, porém para outras ele apresenta alguns problemas. A aplicação mais crítica é a simulação do piano de corda. Isso ocorre, pois esta aplicação é a que consome maior quantidade de energia de forma instantânea e nessa aplicação o sinal não pode conter ruído, pois o ruído influencia de forma significativa no sinal sonoro.

Verificou-se que o ruído sonoro presente nas simulações do piano de corda era bastante significativo e aumentava de maneira proporcional ao número de teclas que são pressionadas. Uma suposição inicial foi de que esse problema estivesse relacionado à fonte de alimentação e ao ruído que ela proporcionava.

A diafonia entre as vias era observada quando uma tecla era pressionada e as duas imediatamente ao seu lado se moviam, esse fenômeno está relacionado ao fato de ser usada a mesma fonte de alimentação para três vias.

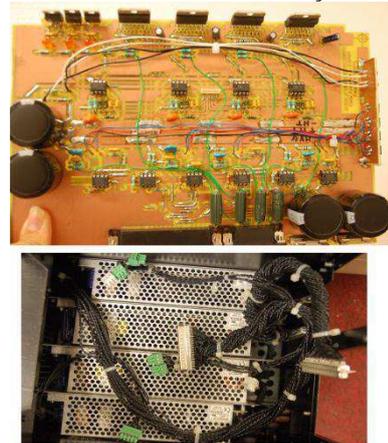
Fez-se um estudo do sistema, a fim de verificar quais dispositivos poderiam ser modificados para que houvesse uma menor dissipação de energia e chegou-se a conclusão que os amplificadores poderiam ter uma influência significativa nessa dissipação.

A fim de resolver esses três problemas, o estágio foi direcionado para as fontes de alimentação e os amplificadores de áudio. O laboratório usava amplificadores lineares Classe AB e fontes chaveadas padrão. Nas figuras 7 e 8 pode-se ver os amplificadores e as fontes de alimentação.

Figura 7: Vista superior do estojo.



Figura 8: Circuito para tratamento dos sinais e fonte de alimentação.



4 A FONTE DE ALIMENTAÇÃO

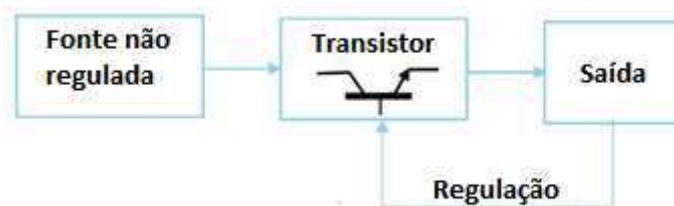
4.1 ESTUDO COMPARATIVO ENTRE FONTES DE ALIMENTAÇÃO

As fontes de alimentação de tensão contínua (CC) são componentes extremamente importantes no âmbito da eletricidade, visto que quase todos os aparelhos que utilizam a rede elétrica necessitam de uma fonte CC para transformar a tensão da rede em tensão contínua. Como a demanda por fontes é grande, existem vários projetos de fontes CC diferentes, de modo a permitir múltiplas opções que podem variar em peso, volume, regulação, potência, nível de ondulação entre outros.

Uma fonte de alimentação CC é um dispositivo que fornece uma tensão CC regulada ou não a partir de uma fonte de tensão. Duas tecnologias de controle da tensão de saída são possíveis: regulação linear e regulação a comutação (chaveada).

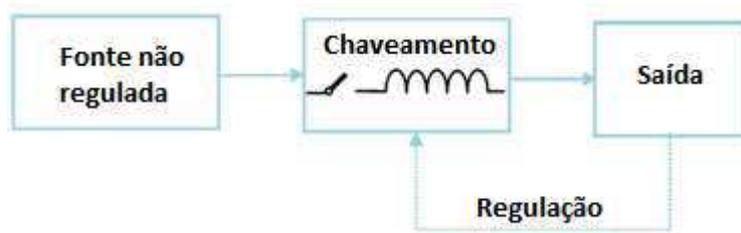
Em fontes de alimentação para baixas correntes com regulação linear (Figura 9) a regulação é feita normalmente utilizando-se um circuito encapsulado, por exemplo, o LM317. O circuito integrado LM317 tenta manter a tensão de saída constante e dissipando energia, esse tipo de circuito é classe A [9].

Figura 9: Princípio de funcionamento de uma regulação linear.



Em uma regulação por meio de comutação, o transistor opera em bloqueio ou saturado e transfere mais ou menos energia para um indutor que armazena momentaneamente sobre forma de energia magnética (Figura 10).

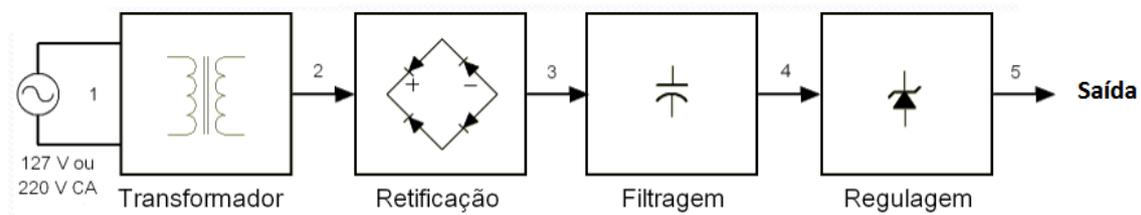
Figura 10: Princípio de funcionamento de uma regulação chaveada.



O ajuste da tensão de saída é feito regulando o ciclo de trabalho (razão entre o tempo de condução do período de comutação). Não há muitas perdas de potência. Assim, o rendimento máximo teórico é de 100%. Esse tipo de circuito é Classe D.

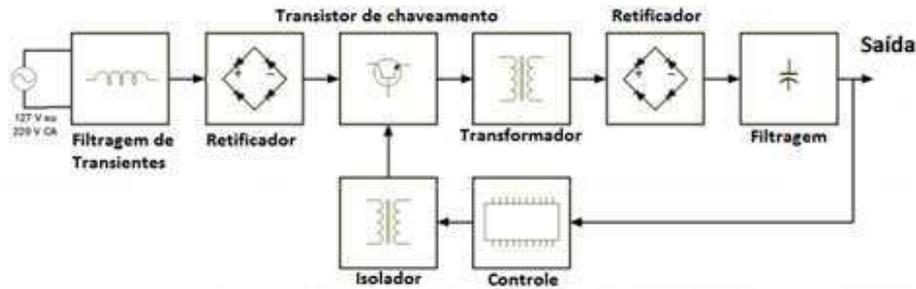
Comparando as estruturas das duas fontes de alimentação, tem-se que, em uma fonte linear, um transformador é usado para diminuir a tensão que vem da rede; em seguida, um retificador feito com diodos para transformar o sinal senoidal em pulsante; posteriormente, coloca-se um capacitor a fim de reduzir a ondulação, a qual será tão menor quanto maior for o capacitor; por fim, pode-se ter um regulador para manter constante o seu nível de saída (Figura 11).

Figura 11: Estrutura de uma alimentação linear.



Para uma alimentação chaveada, pode-se ter a filtragem, e assim como na fonte de alimentação linear, uma ponte retificadora. Para esse tipo de fonte tem-se um circuito de chaveamento, que normalmente é feito com transistor. Ela pode ter um transformador ou apenas um indutor que é colocado posteriormente, um segundo retificador para transformar o sinal de alta frequência em CC e um filtro para amenizar o ruído que fica após a retificação normalmente são utilizados. A regulação é feita controlando o ciclo de trabalho para o transistor de chaveamento (Figura 12).

Figura 12: Estrutura de uma alimentação chaveada.



As vantagens e desvantagens dos dois tipos de fonte são mostradas na Tabela 1.

TABELA 1: COMPARATIVO ENTRE FONTES DE ALIMENTAÇÃO

Características	Fonte Chaveada	Fonte Linear
Potência por quilograma	220 a 300 W/kg	
Potência por unidade de volume	300 W/l	50 W/l
Rendimento	60a 90%	35 a 45%
Tempo de retenção	10 a 100 ms	5a10 ms
Regulação dinâmica	5%-1 ms	1%-50 μ s
Ondulação residual CaC	1%	0,1%
Perturbação EMI RFI*	Importante	Desprezível
*MTBF	60000h	100000h

EMI/RFI (Interferências Eletromagnéticas-Interferências de Rádio)***Mean time between failure*

Analisando a Tabela 1, pode-se perceber que a potência dissipada nos componentes eletrônicos usados a comutação é menor do que quando utilizado em modo linear. Conseqüentemente, o rendimento da fonte de alimentação chaveada é maior e o dissipador de calor é menor. O transformador opera em uma frequência muito mais elevada (mais de 20 kHz, ao invés de 50 ou 60 Hz, como acontece na fonte linear), o que reduz o seu tamanho [15].

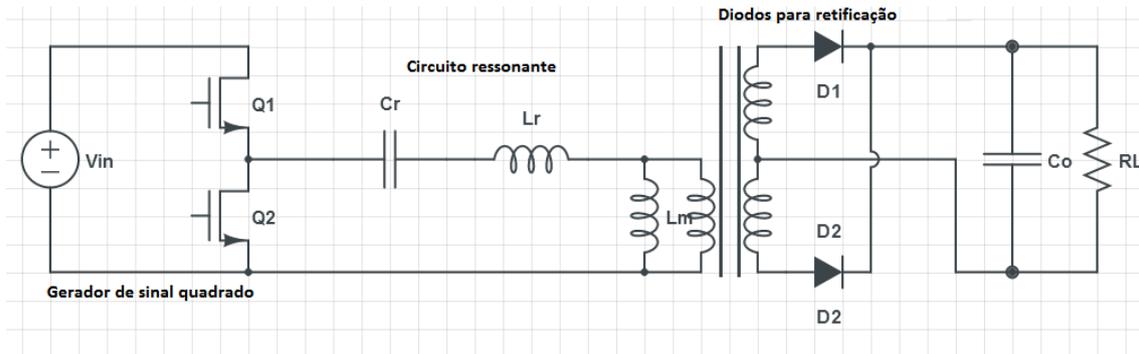
Fontes chaveadas são muito menores e mais leves do que as fontes de alimentação lineares de mesma potência. Além disso, elas têm um melhor desempenho. No entanto, elas têm sinal com um ruído relativamente grande rico em harmônicas, devido à frequência de comutação. Essa limitação a torna inadequada para algumas aplicações.

Um aprimoramento das fontes chaveadas são as fontes de alimentação com um circuito ressonante (Figura 13). Neste último caso, a comutação dos interruptores ocorre

quando as correntes nas bobinas são iguais a zero ou muito perto de zero. Elas contêm um ou mais circuitos LC, operando em ressonância ou quase-ressonância. Este modo de operação tem o nome de comutação suave.

O ruído elétrico gerado é, então, muito menor e a eficiência da alimentação é melhor. E, por conseguinte, torna-se possível trabalhar com frequências de comutação que se aproximam de MHz [12].

Figura 13: Fonte de alimentação ressonante.



O gerador de onda quadrada é constituído por dois MOSFETS (*Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor*) de potência, Q_1 e Q_2 , os quais são individualmente controladas com uma razão de trabalho de 50%. Desta forma, a tensão aplicada aos terminais Q_2 é equivalente a um gerador de onda quadrada.

O circuito ressonante compreende um capacitor C_r , uma indutância em série L_r e indutância do transformador magnetizante L_m . A relação de espiras do transformador é n . Nota-se que a indutância de dispersão L_r está contida no transformador.

Os diodos retificadores no enrolamento secundário do transformador são para retificar a tensão alternada.

4.2 MEDIÇÕES COM AS FONTES DE ALIMENTAÇÃO

Para propor as possíveis soluções, é necessário começar por analisar o sistema atual. No qual foram feitas medidas para compreender a influência da fonte de alimentação no TGR, uma vez que se tem um problema relacionado à qualidade do sinal de saída.

4.2.1 ANÁLISE COM O TGR

Com os testes no TGR, percebeu-se que a causa do ruído era a fonte de tensão. Para confirmar que era esse o problema, foi substituída a fonte de tensão CC portátil ZWS240PAF-24 por uma fonte de tensão CC de bancada *Agilent E3634*. Verificou-se que o ruído diminuiu bastante. Utilizou-se também um osciloscópio para observar o sinal na saída das fontes de alimentação e compará-los. Os resultados obtidos por meio do osciloscópio podem ser vistos nas Figura 14 e 15.

Figura 14: Medida no TGR com a fonte de tensão *Agilent E3634*.

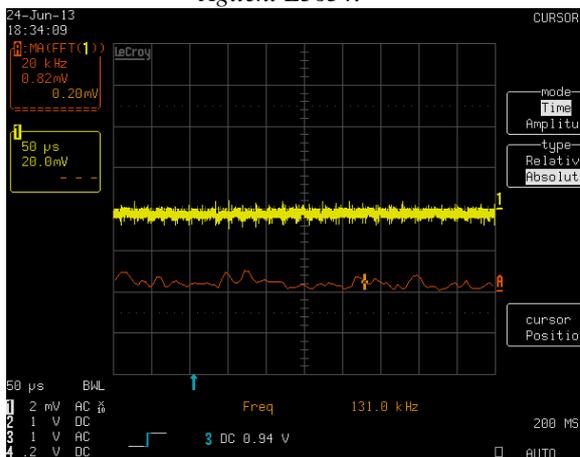
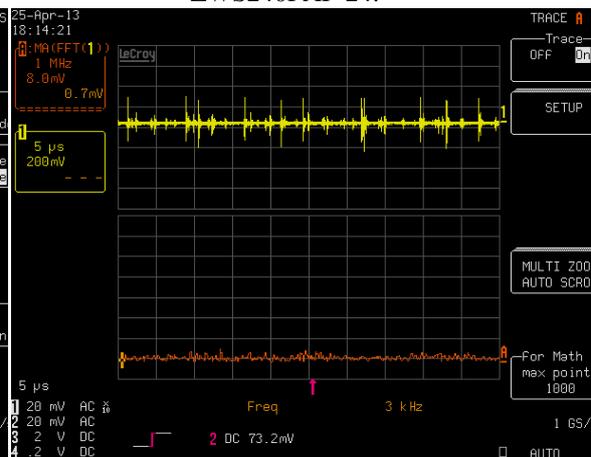


Figura 15: Medida no TGR com a fonte ZWS240PAF-24.



4.2.2 CARGA DE TESTE

Para saber a relação entre a quantidade de corrente fornecida e o ruído, foram testadas cada uma das fontes de alimentação com uma carga de teste. Fixou-se a fonte de alimentação em 25 V e variou-se a carga. Sabendo que o TGR normalmente consome no máximo uma corrente de 6 A, fez-se o comparativo para esse valor de corrente.

A carga era constituída por transistores bipolares para diminuir a potência sobre o potenciômetro. Usou-se a configuração Darlington entre os transistores Q_{13} e Q_{14} permitindo um ganho elevado. Para verificar a corrente, mediu-se a tensão em um resistor de 1 Ω . Também foi usado um dissipador de o calor.

Figura 16: Esquemático do circuito utilizado pra medir o ruído.

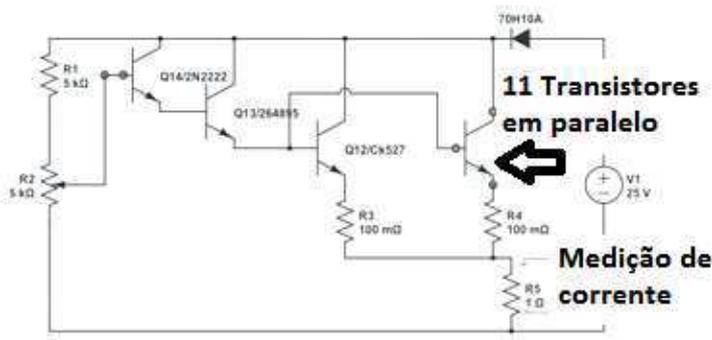
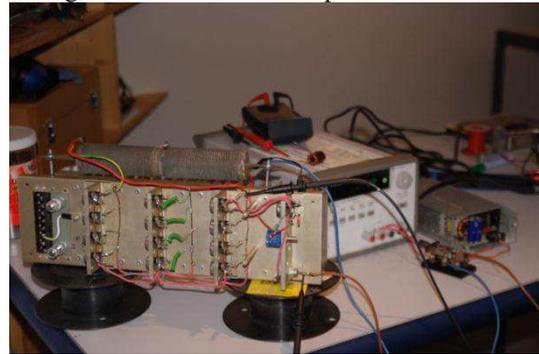


Figura 17: Circuito usado pra medir ruído.



4.2.3 TESTES COM AS FONTES

Nas figuras 18 e 19 podem ser vistos os resultados dos testes utilizando a fonte de tensão Agilent E3634 com 25 V e a fonte ZWS240PAF-24/AS. Esses testes foram realizados com uma corrente de 1 A.

Figura 18: Medida com a fonte Agilent E3634.

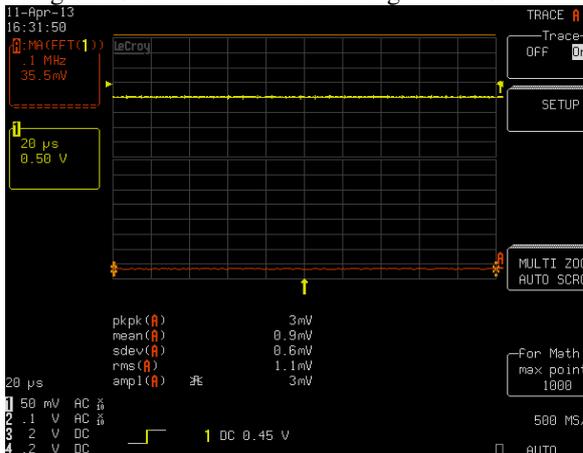
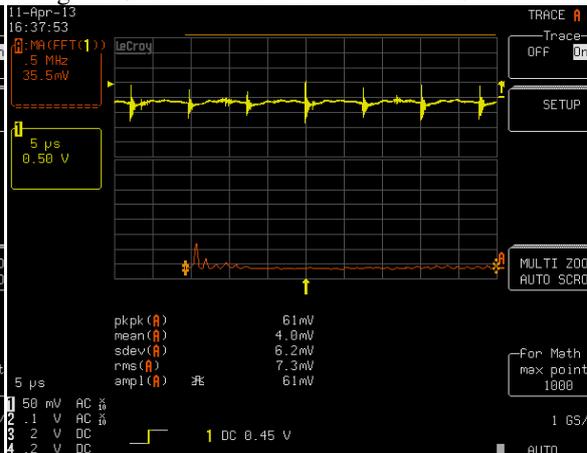


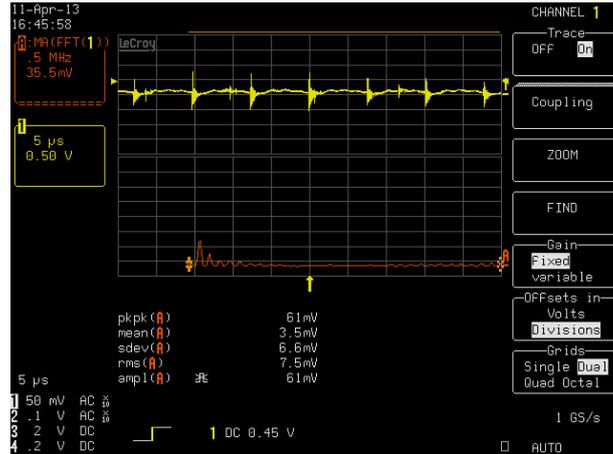
Figura 19: Medida com a fonte ZWS240PAF.



Analisando a Figura 18, pode-se perceber que a fonte Agilent E3634 apresenta uma boa qualidade do sinal de saída. Porém, essas fontes de alimentações são muito grandes e não são fáceis de transportar, sendo assim usadas mais em manipulações de laboratório.

Aumentou-se a corrente de entrada para 3 A, alterando a posição do potenciômetro. Para a alimentação Agilent E3634, verificou-se que não teve aumento no ruído. Por outro lado, para a fonte ZWS240PAF-24/SA o ruído aumentou. Pode-se observar esse aumento analisando a Figura 20.

Figura 20: Medida para fonte de tensão ZWS240PAF-24/SA com 3 A.



Diminuindo gradualmente a impedância e aumentando conseqüentemente quantidade de corrente até o máximo utilizado para o TGR (que era 6 A), verificou-se que a fonte de tensão Agilent E3634 continuou com o ruído mínimo. Por outro lado, a fonte ZWS240PAF-24/SA teve um aumento significativo no ruído (figuras 21 e 22).

Figura 21: Análise para a fonte Agilent E3634 - 6 A.

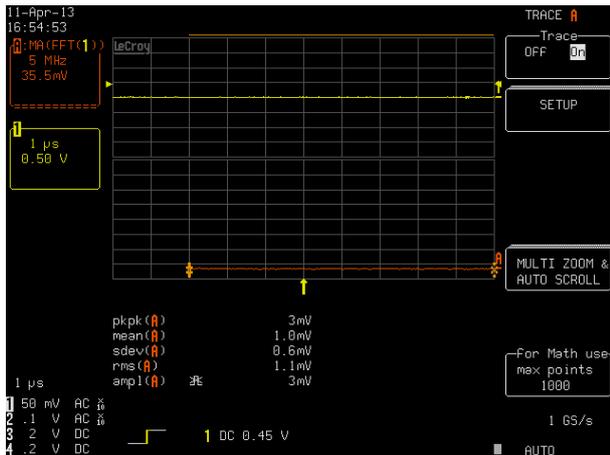
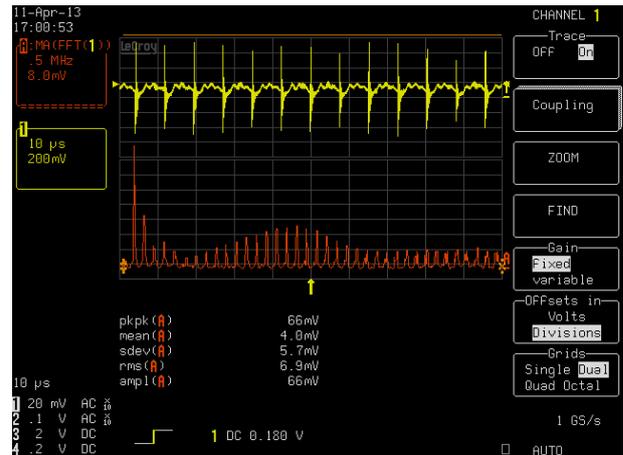


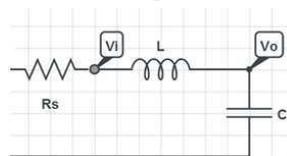
Figura 22: Análise com fonte ZWS240PAF-6 A.



4.3 TENTATIVA DE REDUZIR O RUÍDO COM UM FILTRO

Para reduzir o ruído, utilizou-se um filtro passa baixas LC com a seguinte configuração (Figura 23).

Figura 23: Filtro passa baixas LC.



A frequência de corte é denominada como a frequência em que a potência da saída é metade da potência de entrada. Como a potência de entrada é proporcional ao quadrado da tensão, as expressões de (1) a (3) são referentes ao cálculo da frequência de corte.

$$\left. \frac{P_o}{P_i} \right|_{s=j\omega_c} = \frac{V_o^2}{V_i^2}(j\omega_c) = \frac{1}{2} \Rightarrow \left| \frac{V_o}{V_i}(j\omega_c) \right| = \frac{1}{\sqrt{2}} \cong 0,707 \Rightarrow 20 \log_{10} |T(j\omega_c)| \cong -3 \text{ dB} ;$$

(1)

$$\frac{V_o}{V_i} = \frac{1/sC}{R_s + sL + 1/sC} ; \quad (2)$$

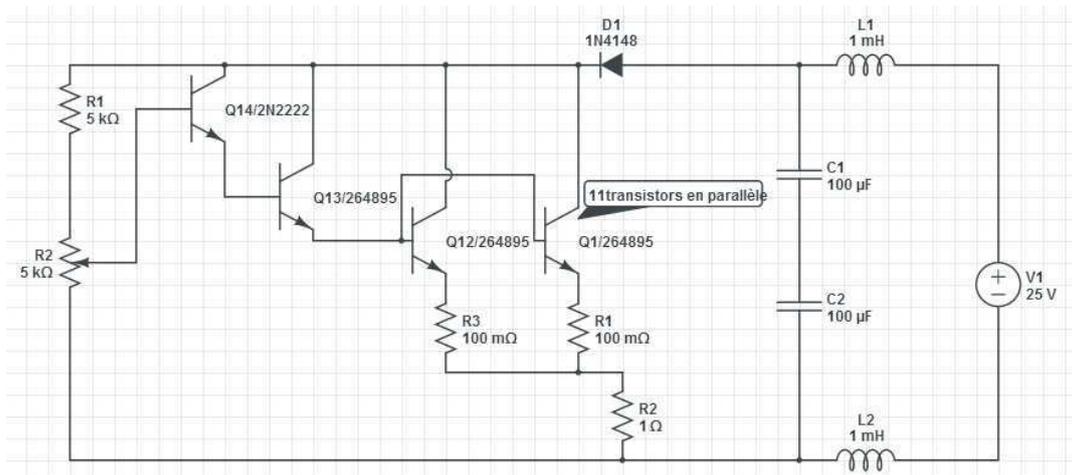
$$\omega_c = \frac{1}{\sqrt{LC}} ; \quad (3)$$

Assim, tem-se que $f = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$. Utilizando um indutor de 1 mH e um capacitor

de 100 μF , obtém-se $f = \frac{1}{2\pi\sqrt{10^{-3} * 10^{-4}}} \cong 503,29 \text{ Hz}$.

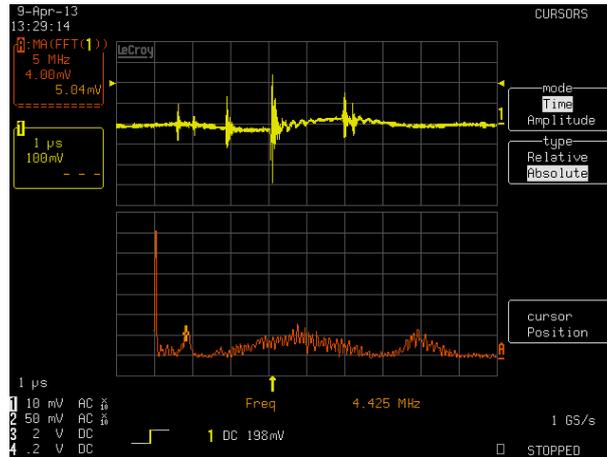
O circuito com o filtro pode ser visto na Figura 24.

Figura 24: Circuito utilizado com o filtro.



Mediu-se a corrente para verificar o ruído e observou-se um ruído na frequência 4 kHz, com 200 mVpp (Figura 25)

Figura 25: Medida para fonte com o filtro passa baixas.

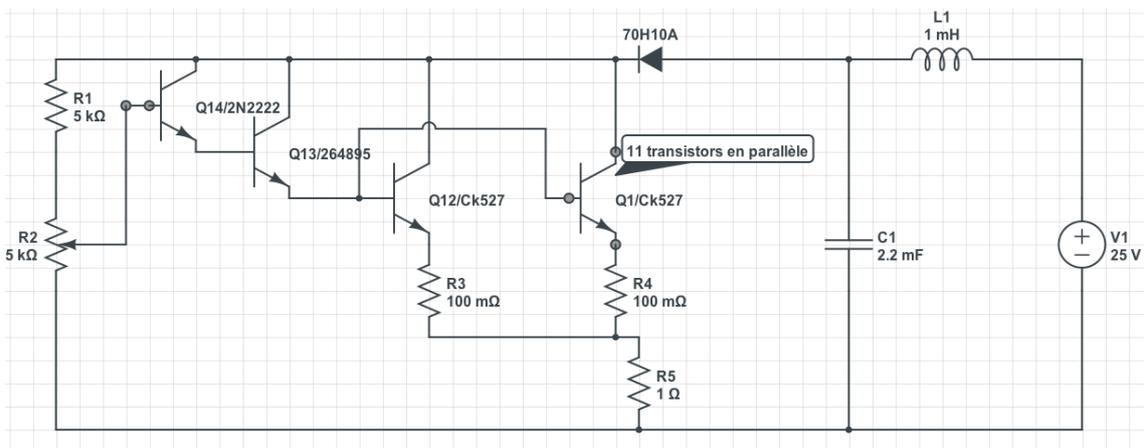


Mudaram-se os valores dos componentes para diminuir a frequência de corte. Utilizou-se um indutor de 1 mH e um capacitor de 2,2 mF. O novo cálculo para frequência está na expressão (4).

$$f = \frac{1}{2\pi \sqrt{10^{-3} * 2,2 * 10^{-3}}} \cong 107,30 \text{ Hz} \quad (4)$$

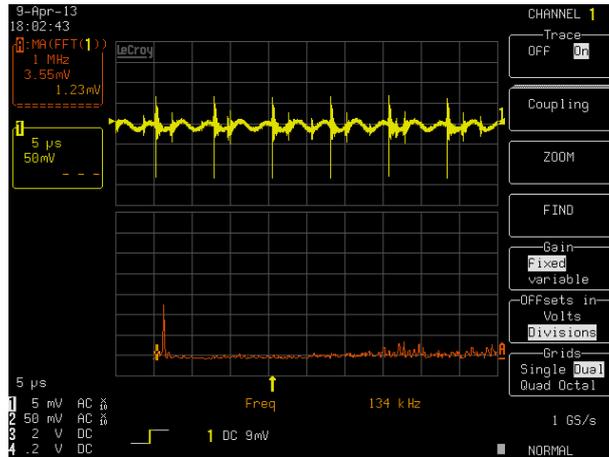
Na Figura 26, pode-se ver o circuito com o novo filtro.

Figura 26: Circuito com o novo filtro.



Mesmo com a utilização desse filtro o ruído continuou com um valor relevante, como pode ser visto na Figura 27. Assim, resolveu-se escolher uma nova fonte de alimentação.

Figura 27: Fonte de alimentação com o filtro e uma corrente de 6 A.

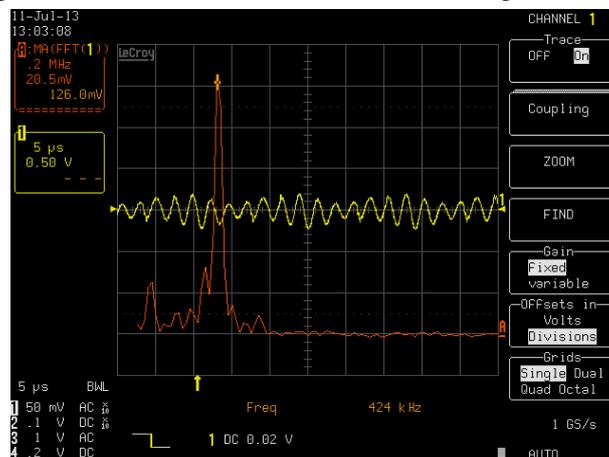


4.4 ESCOLHA DE UMA NOVA FONTE DE ALIMENTAÇÃO CHAVEADA

Uma solução possível foi escolher outra fonte chaveada. Optou-se por uma que tivesse um ruído menor. Foi escolhida a fonte de alimentação *HRPG-450-24*, na qual possui um ruído máximo de 100 mV, segundo seu *datasheet*.

Utilizou-se o circuito da Figura 16 para medir o nível de ruído observando a relação entre o ruído e a quantidade de corrente. Analisando a Figura 28, percebe-se que a fonte proposta tem o mesmo problema de ruído que a fonte usada no TGR (*ZWS240PAF- 6*).

Figura 28: Medidas com a fonte de tensão e a carga teste e 1 A.



Para a mesma tensão de alimentação diminuiu-se a carga e foi obtido um ruído de 500 mV quando a fonte fornecia 3 A e 200 mV quando a fonte fornecia 6 A (Figuras 29 e 30)

Figura 29: Medidas com a fonte de tensão e a carga teste e 3 A.

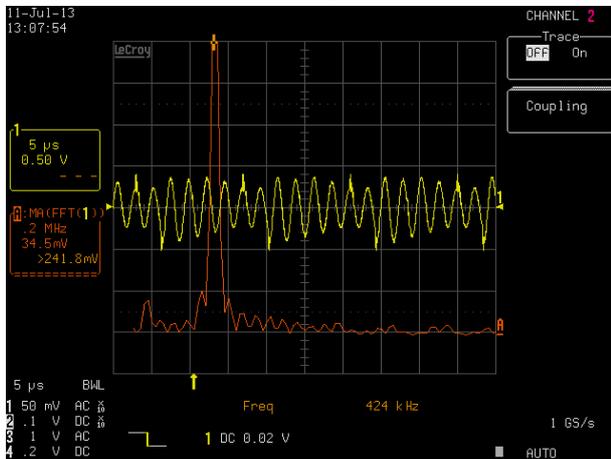
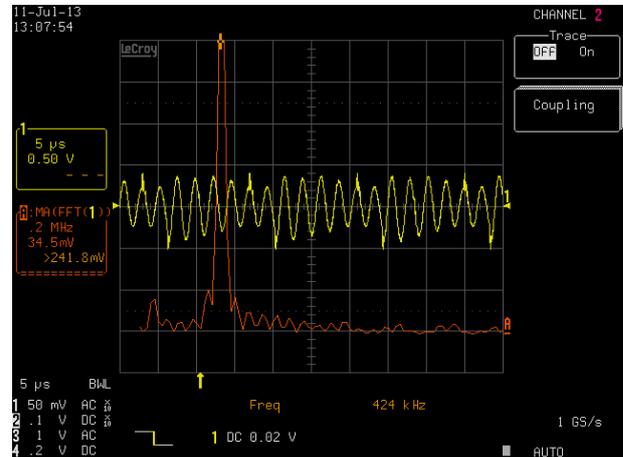
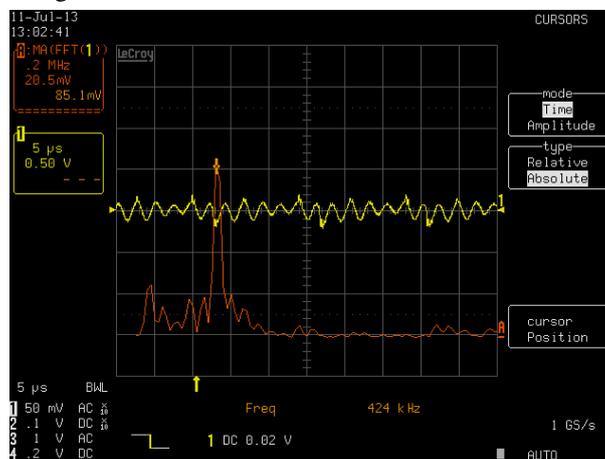


Figura 30: Medidas com a fonte de tensão e a carga teste e 6 A.



Como se pode observar, o ruído é maior que o indicado no *datasheet*. Quando testado com o TGR, o ruído sonoro aumentou. Fez-se mais um teste colocando o filtro como mostrado na Figura 26. Os resultados obtidos podem ser vistos na Figura 31.

Figura 31: Medida com a fonte *HRPG-450-24* -6 A.



Com o filtro, o ruído do sinal e o ruído sonoro foram pouco menores, porém ainda não satisfatório. Como no *datasheet* indicava um ruído menor que o constatado experimentalmente, devolveu-se a fonte para o fabricante.

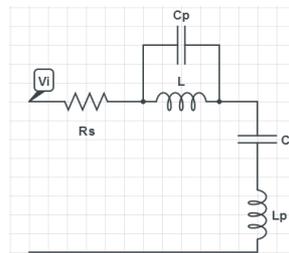
4.5 CONCLUSÃO SOBRE AS FONTES DE ALIMENTAÇÃO

As fontes de alimentação utilizadas com TGR (*ZWS240PAF- 6*) apresentam:

- um nível de ruído elevado;
- o ruído está presente em quase todas as frequências (presente em uma banda larga de frequência);
- a carga de teste tem influência considerável no ruído.

Houve dificuldade para eliminar o ruído com filtragem. Observou-se que os filtros LC ou RCL clássicos não funcionam para essa aplicação. De fato, a tentativa de eliminar o ruído com o filtro LC para qualquer frequência implica em ter um circuito ressonante. Assim, na frequência de ressonância, o capacitor apresenta um indutor parasita L_p , e o indutor apresenta uma capacitância parasita C_p . O circuito equivalente pode ser visto na Figura 32. Uma frequência elevada desse circuito pode coincidir com a frequência de certas componentes do ruído.

Figura 32: Esquema de um filtro com seus componentes parasitas.



A fonte de alimentação testada (*HRPG-450-24 -6 A*) continha um nível de ruído elevado, porém, esse ruído não estava presente nas mesmas frequências que a fonte *ZWS240PAF- 6*. O ruído da fonte *HRPG-450-24-6 A* contém uma componente principal na frequência 400 kHz e uma dependência menor do valor da carga.

Os estudos das fontes de alimentação não foram continuados por falta de tempo. Para resolver esse problema é necessário estudar um sistema de fonte de alimentação mais eficiente. A fim de tornar o sistema utilizável (pelo menos temporariamente até o estudo de uma fonte mais eficiente ser realizado), resolveu-se utilizar uma fonte de alimentação linear não regulada durante o processo de teste do TGR na simulação de um piano de cordas.

5 OS AMPLIFICADORES DE ÁUDIO

Os amplificadores de áudio são circuitos eletrônicos destinados a amplificar sinais da faixa de frequência de áudio. A faixa de audição humana está entre 20 Hz e 20 kHz. Os amplificadores de áudio que conseguem operar nessa faixa de frequência, com baixa distorção do sinal são chamados de Hi-Fi (*High fidelity* - alta fidelidade) [3].

Os amplificadores de áudio vêm sendo usados cada vez mais em vários dispositivos eletrônicos, fixos ou portáteis. Com os novos conceitos de utilização racional de energia elétrica, é indispensável buscar dispositivos que usem os recursos elétricos de maneira eficiente. Assim sendo, um bom emprego dos amplificadores de áudio pode evitar desperdícios de energia [4]. Para isso é necessário entender cada classe dos amplificadores de áudio e saber a que melhor se aplica à aplicação em questão.

5.1 ESTUDO COMPARATIVO ENTRE AS CLASSES DE AMPLIFICADORES

A definição de classes de amplificadores surge da necessidade de diferenciar os diversos tipos de sinal de saída que foram aparecendo conforme foi evoluindo o estado da arte [5]. As classes dos amplificadores descrevem como a corrente se comporta para dispositivos presentes na saída. A partir dela pode-se retirar informações de linearidade e eficiência energética do circuito de amplificação. Além disso, pode-se saber a porção do sinal de entrada que é utilizada por cada componente ativo para termos o sinal de saída, que é conhecida como ângulo de condução α (Tabela 2).

TABELA 2: COMPARATIVO ENTRE AS CLASSES DE AMPLIFICADORES

Classe do amplificador	Proporção do sinal de entrada que é usado	Ângulo de condução
A	Todo o sinal de entrada(100%)	$\alpha= 360$
B	A metade do sinal de entrada (50%)	$\alpha= 180$

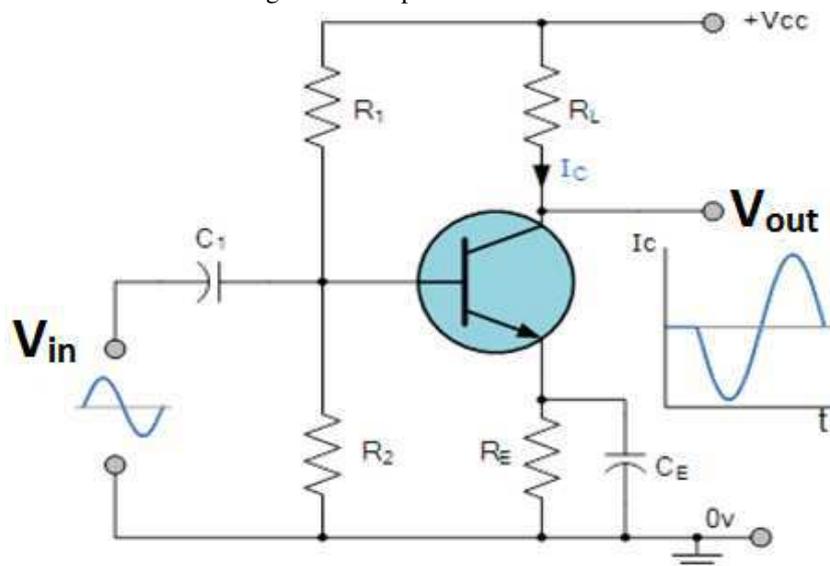
AB	Mais da metade do sinal de entrada (50-100%)	$180 < \alpha < 360$
C	Menos da metade do sinal de entrada (0-50%)	$0 < \alpha < 180$

Os amplificadores da classe D não possuem ângulo de condução, pois eles trabalham com PWM (*Pulse-Width Modulation*). Com esse comportamento, pode-se dizer que praticamente não existe perda por dissipação de calor e a eficiência desse circuito é quase 100% [3].

5.1.1 AMPLIFICADORES CLASSE A

Os amplificadores classe A apresentam a melhor característica de linearidade e são menos complexos, se comparados às outras classes. Entretanto, eles têm o menor rendimento (entre 20% a 30%). Isso ocorre devido os transistores de saída estarem sempre em condução, pois existe uma corrente de polarização, com valor mínimo igual a metade da máxima corrente da carga. Esses amplificadores são usados apenas quando se deseja sinais de baixa potência [3] [2]. Na Figura 33 pode-se ver um esquema de um circuito amplificador classe A.

Figura 33: Amplificador classe A.

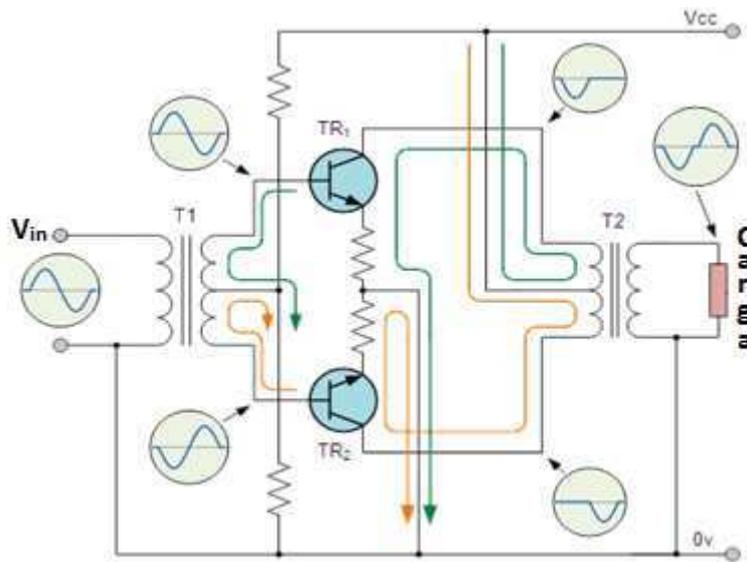


5.1.2 AMPLIFICADORES CLASSE B

O rendimento dos amplificadores classe B é melhor que o da classe A, sendo aproximadamente 78%. Isso se deve ao fato de serem utilizados dois transistores e que cada um conduz durante meio ciclo do sinal de saída [2].

Os amplificadores da classe B (Figura 34) são mais indicados para circuitos de alta potência, pois eles têm uma distorção chamada *crossover*. Essa distorção ocorre devido à interrupção do sinal na transição de um transistor para o outro. Para pequenos sinais a relação do sinal com o nível de harmônicos gerados por essa interrupção é bastante significativa [3] [1].

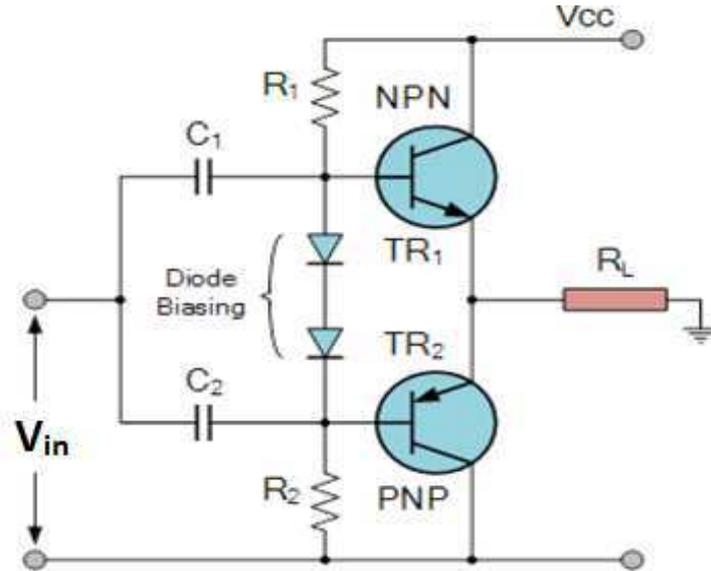
Figura 34: Amplificador classe B.



5.1.3 AMPLIFICADORES CLASSE AB

Os amplificadores da classe AB (Figura 35) são uma junção entre os amplificadores classe A e classe B melhorada. Com essa configuração, o problema da distorção é resolvido com uma polarização nos transistores de saída, porém o rendimento fica menor que na classe B[7]. Essas vantagens fizeram os amplificadores da classe AB serem bastante utilizados. No laboratório ICA-ACROE são utilizados amplificadores classe AB para amplificação de sinal, que, além de todas as vantagens citadas anteriormente, possuem um baixo custo e são de fácil utilização.

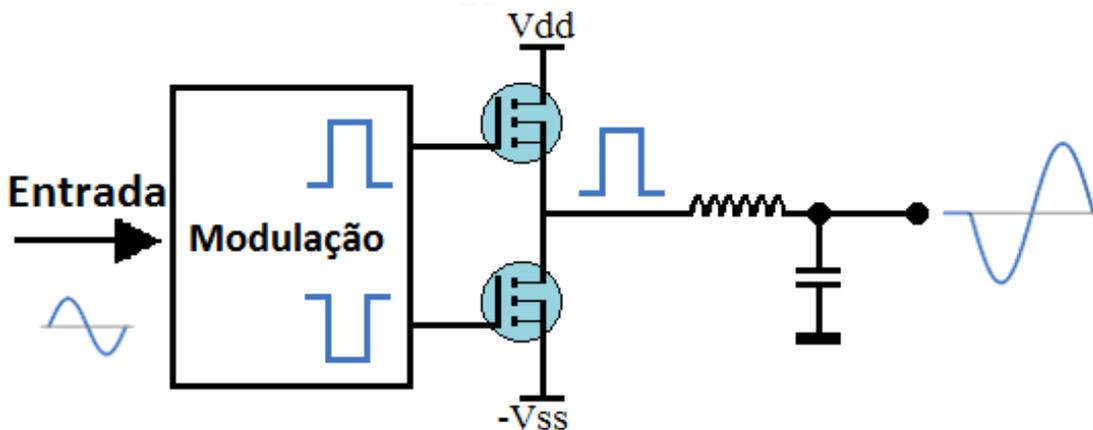
Figura 35: Amplificador classe AB.



5.1.4 AMPLIFICADORES CLASSE D

Para os amplificadores da classe D (Figura 36) o sinal de entrada deve ser modulado em um sinal PWM. Eles utilizam o chaveamento dos transistores de saída para obter um rendimento energético elevado, o seu rendimento teórico é de 100%, na prática é em média 90% [2]. A desvantagem dos amplificadores da classe D é no processo de modulação e demodulação, pois são introduzidas harmônicas e, portanto, distorções.

Figura 36: Amplificador classe D.



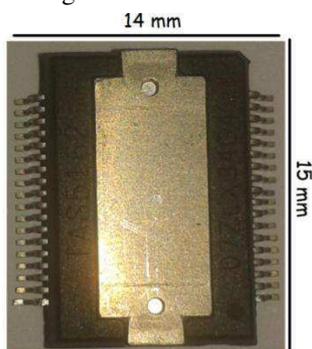
5.2 ESCOLHA DO AMPLIFICADOR

Os amplificadores usados no laboratório eram da classe AB. A fim de diminuir as perdas térmicas e, conseqüentemente, diminuir o espaço ocupado pelos dissipadores de calor do TGR, resolveu-se adquirir um amplificador classe D e testá-lo.

A aplicação em questão necessita de um comando de acionamento por corrente que permita o controle direto da força eletrodinâmica criada pelo atuador. A configuração usada é bem parecida com a usada para amplificadores de áudio, porém, para áudio o comando é feito por tensão.

Após uma pesquisa, o amplificador classe D que mais se adequou às especificações da aplicação foi o TAS5162 (Figura 37), visto que ele utiliza uma potência 2×210 W e seu rendimento é 90%. Ele contém quatro saídas que podem ser combinadas para ter uma ponte H ou meia ponte. Para escolher a configuração da saída basta configurar os pinos de entrada 11,12 e 13. As possíveis configurações se encontram em uma tabela do *datasheet* do TAS5162.

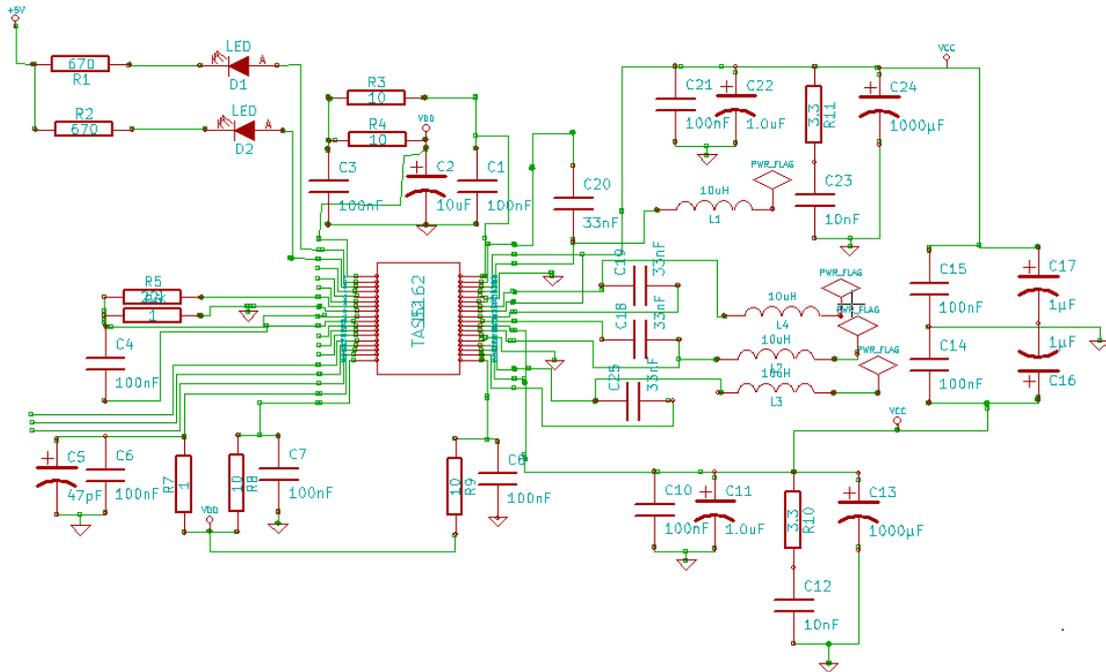
Figura 37: TAS5162.



Como se pode ver, trata-se de um circuito SMD (*Surface Mount Device*) e para testá-lo é necessário uma placa de circuito impresso. Para fazer o esquemático e leiaute da placa do circuito impresso foi utilizado o *software* Kicad. Inicialmente, fez-se um estudo para aprender usar a ferramenta e depois desenhar o circuito. Quanto à utilização da ferramenta, foi construída uma biblioteca com os componentes necessários que não estavam disponíveis no Kicad, como o TAS5162.

O esquemático do circuito pode ser visto na Figura 38. Utilizou-se a configuração sugerida no *datasheet* para os testes iniciais.

Figura 38: Esquema do circuito feito no Kicad.



Para essa configuração foram usados os seguintes componentes:

- Um circuito TAS5162;
- Dois resistores de 1 Ω ;
- Quatro resistores de 10 Ω ;
- Dois resistores de 670 Ω ;
- Dois resistores de 3.3 Ω ;
- Um resistor de 22 k Ω ;
- Um capacitor de 47 pF;
- Dois capacitores de 10 nF;
- Quatro capacitores de 33 nF;
- Dez capacitores de 100 nF;
- Um capacitor de 10 μ F;
- Quatro capacitores de 1 μ F;
- Dois capacitores de 2200 μ F;
- Quatro indutores de 10 μ H;
- Dois Leds amarelos.

Desses componentes, apenas os indutores foram construídos no laboratório. Os demais foram comprados. Para fazê-los, utilizou-se um núcleo de ferrite e foram feitos

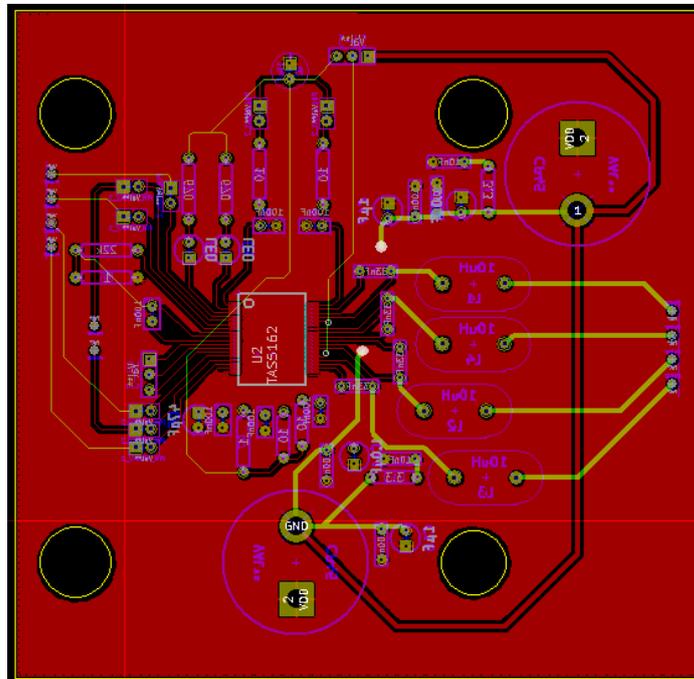
nove enrolamentos com um fio de cobre (Figura 39). O valor da indutância obtido foi $9,87 \mu\text{H}$.

Figura 39: Indutor.



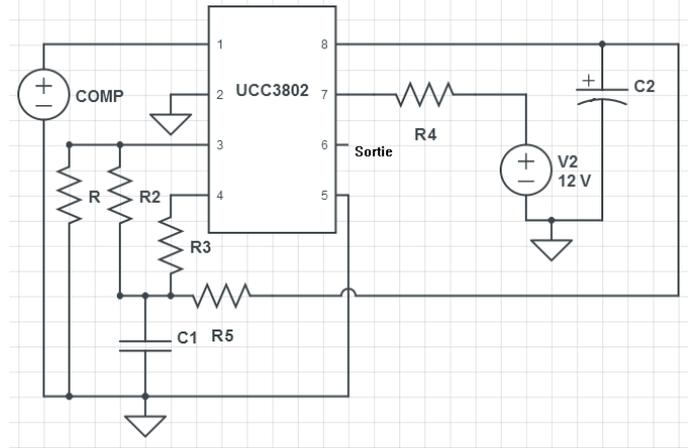
Após o esquemático do circuito foi gerado o leiaute (Figura 40) e foi enviado pra fabricação.

Figura 40: Leiaute do circuito.



Durante o tempo que a placa estava sendo preparada, estudou-se uma forma de obter o PWM para colocar na entrada do circuito. Inicialmente, pensou-se em fazer um PWM simples com um circuito comparador e um amplificador. Entretanto, seria necessário aplicar um *off-set* e, sabe-se que, quanto maior o número de componentes, maior a sensibilidade do circuito. Usou-se um UCC3802 para gerar o PWM, visto que é um circuito integrado dedicado para a geração de PWM. O circuito montado pode ser visto na Figura 41, no qual o pino 1 é a entrada e o pino 4 é a saída.

Figura 41: Circuito montado para gerar um sinal PWM.



Para esse circuito foram usados:

- Três resistores de 100 k Ω ;
- Um resistor de 100 Ω ;
- Um resistor de 330 k Ω ;
- Um resistor de 390 Ω ;
- Um capacitor de 100 pF;
- Um capacitor de 47 μ F.

O circuito foi testado e, como pode ser visto nas figuras 42 e 43, tem-se uma relação da entrada com o sinal PWM gerado.

Figura 42: Saída do circuito com uma entrada de 1,27 V.

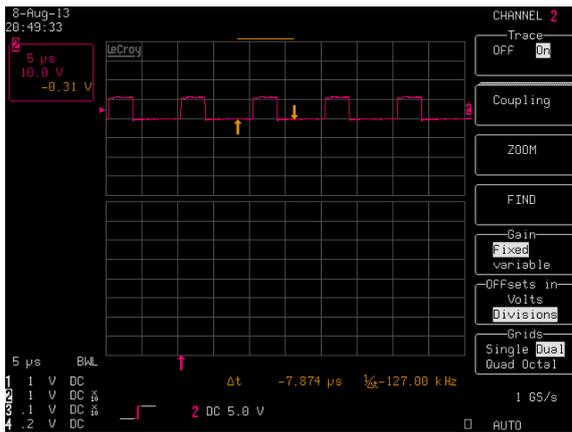
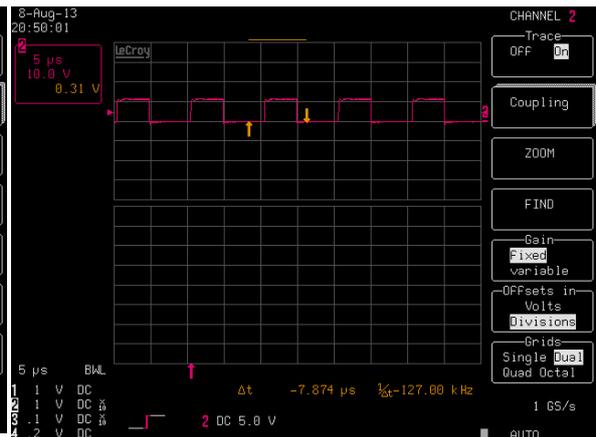


Figura 43: Saída do circuito com uma entrada de 1,6 V.



A placa com os componentes soldados pode ser vista nas figuras 44 e 45.

Figura 44: Placa de circuito impressa com os componentes.

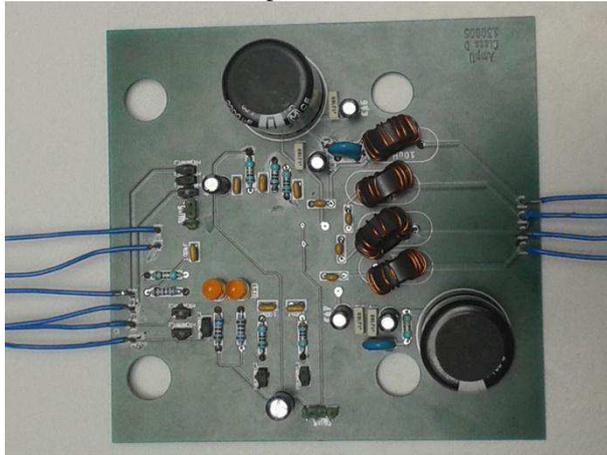
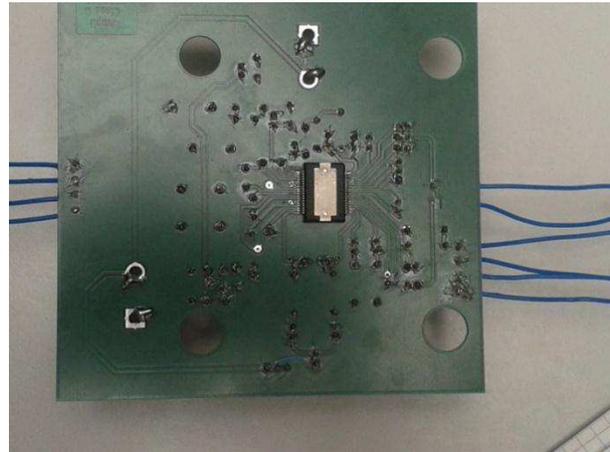


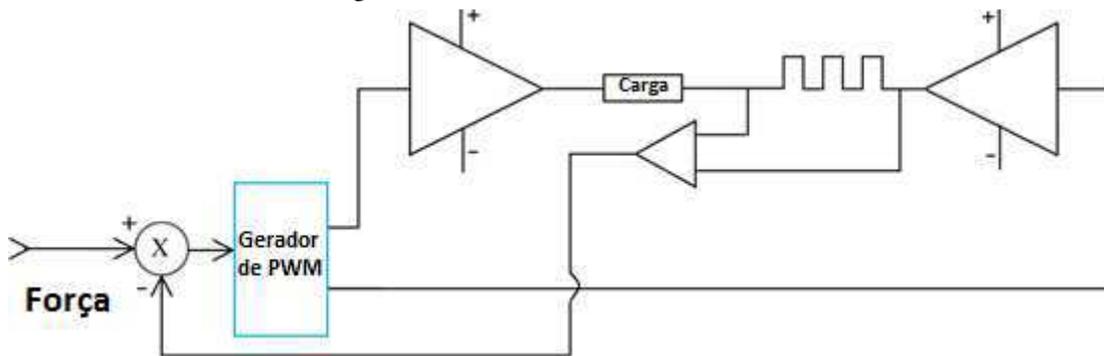
Figura 45: Placa de circuito impressa com os componentes.



Para testar o circuito, colocou-se uma fonte de laboratório (Agilent) e o circuito PWM como entradas. A tensão da fonte foi aumentada gradativamente e o circuito funcionou bem entre 15 e 25 V. Aumentou-se ainda mais a tensão e verificou-se que ele foi danificado com 30 V, o que impossibilitou a captura das curvas. Não houve mais tempo pra fabricar outro circuito.

Como continuação desse trabalho, deve-se colocar em prática o controle por meio de corrente (um esquema proposto pode ser visto na Figura 46). Como se pode ver, o sinal de força juntamente com o controle de corrente vão regular o ciclo de trabalho do PWM

Figura 46: Circuito com controle em corrente.



De fato, o elemento crítico desse circuito é a elaboração do sinal de contra reação. A captura de corrente da carga (atuador), na qual é feita por meio de uma resistência calibrada de baixo valor ($0,5 \Omega$ tipicamente) colocada em série com a carga é delicada, pois esse tipo de circuito introduz um acoplamento entre o circuito de tratamento e a eletrônica de potência.

5.3 CONCLUSÃO SOBRE OS AMPLIFICADORES

Os amplificadores Classe D são uma boa escolha, visto que se pode resolver o problema de diafonia e dissipação. Para resolver o problema de diafonia, pode-se propor como solução:

- utilizar uma alimentação isolada para cada via. Isso seria possível com a utilização de uma alimentação ressonante, pois elas fornecem um sinal de alta frequência o que permite a utilização de transformadores menores e tornaria possível uma alimentação para cada via;
- utilizar amplificadores de medida de corrente isolados. Essa solução é de qualquer forma obrigatória com amplificadores usando a configuração em ponte H, mesmo se forem usados amplificadores Classe AB ou Classe D.

Com os amplificadores classe D, tiveram-se alguns problemas, como por exemplo, para testá-lo uma vez que ele é SMD. Como continuação deve-se melhorar o circuito de potência para que tenhamos um controle em corrente.

6 CONCLUSÃO

O estágio foi fundamental para complementar a formação não só profissional como pessoal da estagiária, uma vez que o trabalho no laboratório ICA-ACROE permitiu que ela utilizasse os conceitos vistos em várias disciplinas da graduação como Circuitos Elétricos I e II, Dispositivos Eletrônicos, Eletrônica, Eletrônica de Potência, Instrumentação Eletrônica entre outras. Como também teve a oportunidade de trabalhar com pessoas de diversas áreas motivadas pelo mesmo produto (TGR). No laboratório trabalham Músicos, Químicos, Físicos, Cientista da computação entre outros profissionais.

Durante o estágio a estagiária pôde também adquirir novos conhecimentos, como por exemplo, a utilização do Kicad para o desenho de placas de circuito impresso, classificação dos amplificadores, fontes de tensão ressonantes entre outros.

Estudando os três problemas, que foram a diafonia entre as vias, o ruído sonoro e a dissipação de energia, a estagiária pôde propor e contribuir para as possíveis soluções, facilitando assim estudos futuros para novas implementações usando o TGR.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Ballou, G. Handbook for Sound Engineers. Indianapolis- USA. Howard W. Sams& Co.,1987
- [2] Benson, K. B. Audio Engineering Handbook. New York- USA. McGraw-Hill,1988
- [3] Capel, V. AudioandHi-FiEngineer'sPocket Book. Heinemann Professional Publishing. London, 1988
- [4] Dapkus, D. Class-D Audio Power Amplifiers: An Overview. IEEE International Conference on Consumer Eletronics (ICCE).13-15 June 2000 Page(s):400-401.
- [5]Duncan, B., “High performance audio power amplifiers, for music performance and reproduction”.1997: newness
- [6] Doebelin, E. O. Measurement Systems – Application and Design McGraw-Hill International Editions, 4 th Edition, 1990.
- [7]Lenk, J. D. Lenk’sAudioHandbook- Operationand Troubleshooting. New York- USA. McGraw-Hill. 1991
- [8]LOSITO, R. ET ALL. Design of a Linear Variable Differential Transformer With High Rejection. IEEE transactions on magnetics, vol. 46, no. 2, february 2010
- [9]MALVINO, A. P. Eletrônica I. São Paulo: McGraw-Hill, 1987
- [10]MEYDAN, T. and HEALEY G.W. Linear Variable Differencial Transformer – linear displacement transducer utilizing ferromagnetic amorphus metallic glas ribbons.IEEE sensors and actuators, vol 32, 1992.
- [11]MOHAN, Ned. Power Eletronics: Converters, applicationsand design. Media Enhanced, 3ed.
- [12]www.astuces-pratiques.fr/electronique/alimentation-a-decoupage-demi-pont-a-resonance-llc acessado em 05/03/2013
- [13]http://fr.farnell.com/images/en/ede/pdf/Tech_FR_p18-19.pdf acessado em 05/03/2013
- [14]http://www.tdk-lambda.com/products/sps/ps_pcb/zws-paf/pdf/zws240paf_ins.pdf acessado em 08/03/2013
- [15]<http://claude.lahache.free.fr/mapage1/alim-decoupage.pdf> acessado em 12/03/2013
- [16]www.fairchildsemi.com/collateral/online-seminars/Design-Considerations-for-an-LLC-Resonant-Converter-PPT.pdf acessado em 12/03/2013
- [17]<http://html.alldatasheet.fr/html-pdf/159064/TI/TAS5162/84/3/TAS5162.html> acessado em 16/03/2013
- [18]http://focus.ti.com/asia/download/Topic_3_Huang_28pages.pdf acessado em 20/03/2013
- [19]www.ti.com/lit/ds/symlink/tas5162.pdf acessado em 21/03/2013

[20]www.ti.com/lit/ds/symlink/ucc3802.pdf acessado em 21/03/2013

[21]www.meanwell.com/search/HRPG-450/HRPG-450-spec.pdf acessado em 06/06/2013

[21]www.singer-instruments.com/products/tutorials/lvdt/introduction acessado em 07/06/2013

APÊNDICE – ESTIMAÇÃO FINANCEIRA

Para a realização do estágio foi necessária a compra de diversos componentes e a contratação de alguns serviços. Na tabela 3, pode-se visualizar o tipo de gasto, a referencia do fornecedor, a quantidade, o custo em euro e o custo em real (considerando o valor do real em relação ao euro atualizado, R\$ 3,48).

TABELA 3: GASTOS NO ESTÁGIO

Tipo de gasto	Ref. Fornecedor	Quantidade	Custo (€)	Custo (R\$)
Fonte chaveada	HRPG-450-24	1	248,92	866,24
Gerador de PWM	UCC3802N	10	25,50	88,74
Capacitor	C322C333K1R5TA	25	3,55	12,35
Capacitor	RPER71H103K2M1A03A	100	10,90	37,93
Capacitor	R82EC3100DQ70J	100	10,60	36,88
Capacitor	SK100M0010BZF-0611	50	3,00	10,44
Amplificador Classe D	TAS5162	10	109,50	381,06
Ponta de prova de osciloscópio		5	207,55	722,27
Fabricação da placa de circuito impresso		1	50,00	174,00
TOTAL			669,52	2329,91