

Universidade Católica de Petrópolis
Centro de Engenharia e Computação
Engenharia Mecatrônica

Hiago Riba Guedes

Projeto e Confecção de um Plasma Speaker

Petrópolis
2018

Universidade Católica de Petrópolis
Centro de Engenharia e Computação
Engenharia Mecatrônica

Projeto e Confecção de um Plasma Speaker

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado
ao Centro de Engenharia e Computação da
Universidade Católica de Petrópolis como
requisito parcial para conclusão do Curso de
Engenharia Mecatrônica..

Autor: Hiago Riba Guedes

Orientador: Guilherme de Andrade Garcia

Petrópolis
21 de dezembro de 2018

Autorizo a reprodução e divulgação total ou parcial deste trabalho, por qualquer meio convencional ou eletrônico, para fins de estudo e pesquisa, desde que citada a fonte.

CIP – Catalogação na Publicação

G924p Guedes, Hiago Riba.

Projeto e confecção de um plasma Speaker / Hiago Riba

Guedes. – 2018.

63 f.

Monografia (Graduação em Engenharia em Mecatrônica) –
Universidade Católica de Petrópolis, 2018.

Orientação: Prof. Guilherme de Andrade Garcia.

1.Bobina de tesla. 2. Arduino. 3. Eletrônica. I. Garcia,
Guilherme de Andrade (Orient.). II. Título.

CDD: 629.895

Universidade Católica de Petrópolis (UCP)
Bibliotecária responsável: Marlena H. Pereira – CRB7: 5075

Aluno: Hiago Riba Guedes

Matrícula: 11620104

Projeto e Confecção de um Plasma Speaker

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Centro de Engenharia e Computação da Universidade Católica de Petrópolis como requisito parcial para conclusão do Curso de Engenharia Mecatrônica.

AVALIAÇÃO

Grau Final: _____

AVALIADO POR:

Prof. Guilherme de Andrade Garcia, Dr.Sc. _____

Prof. Felipe de Oliveria Baldner, M.Sc. _____

Prof. Fausto Lima Custódio, M.Sc. _____

Petrópolis, 21 de dezembro de 2018
Prof. Paulo Cesar Lopes Leite, M.Sc
Coordenador do Curso de Engenharia Mecatrônica

Resumo

Inventado por Nikola Tesla por volta de 1890, a Bobina de Tesla é um transformador ressonante capaz de gerar uma alta tensão alternada de alta frequência com grande simplicidade de construção. Seus efeitos visuais, aliados com sistemas convencionais de áudio, oferecem uma ótima fonte de aprendizado para o estudo de temas importantes na engenharia como eletrônica de potência, microcontroladores e a aplicação prática de técnicas de construção de projetos. Este trabalho foi realizado com o objetivo de analisar e projetar seus blocos constitutivos, blocos estes sendo a modulação, o ganho de tensão e as fontes de alimentação que suprirão os dois anteriores. A primeira ação tomada foi o estudo na literatura dos sistema de modulação mais utilizados para o sistema proposto. Das técnicas de modulação existentes se destacaram a modulação PWM e a PCM, para essas técnicas foram escolhidas a topologia de modulação PWM com o circuito integrado 555 e a topologia de modulação PCM com a plataforma Arduino. De maneira independente começou-se o projeto do bloco de ganho de tensão e potência, bloco responsável pela amplificação de corrente provinda do bloco de modulação. Por causa da diferença de potência e tensão entre os blocos foi necessário o projeto de um isolador que separa os dois estágios de maneira simples e eficiente, por essas características optou-se pelo Gate Driver Transformer. A topologia utilizada para o bloco de aumento de potência e tensão foi o conversor half-bridge que com o uso de transistores do tipo MOSFET têm uma alta capacidade de chavear o sinal da modulação a um nível o suficiente para exceder o limite da barreira dielétrica do ar. Um componente de suma importância para o sistema é o tipo de transformador que é utilizado, com transformadores de núcleo de ferrite se tem o transformador ideal para operar com alta frequência, alta corrente e alta tensão.

Palavras Chave: Bobina de Tesla, Arduino, Eletrônica.

Abstract

Invented by Nikola Tesla around 1890, the Tesla Coil is a resonant transformer capable of generating high-frequency alternating high voltage with great simplicity of construction. Its visual effects, coupled with conventional audio systems, provide a great learning source for studying important engineering topics such as power electronics, microcontrollers, and the practical application of project-building techniques. This work was carried out with the objective of analyzing and designing its constituent blocks, these blocks being the modulation, the voltage gain and the power supplies that will supply the two previous ones. The first action taken was the study in the literature of the most used modulation system for the proposed system. From the existing modulation techniques, the PWM and PCM modulation were highlighted. For these techniques, the PWM modulation topology with the 555 integrated circuit and the PCM modulation topology with the Arduino platform were chosen. Independently, the design of the block of voltage and power gain, the block responsible for the current amplification from the modulation block, was started. Because of the difference in power and voltage between the blocks, it was necessary to design an isolator that separates the two stages in a simple and efficient way, by these characteristics we chose Gate Driver Transformer. The topology used for the power and voltage increase block was the half-bridge converter which, with the use of MOSFET-type transistors, has a high capacity to switch the modulation signal to a level sufficient to exceed the dielectric barrier limit of air. A very important component for the system is the type of transformer that is used, with ferrite core transformers if you have the ideal transformer to operate with high frequency, high current and high voltage.

Palavras Chave: Tesla Coil, Arduino, Eletronics.

Lista de Acrônimos

AC	<i>Alternate Current</i>
AM	<i>Amplitude Modulation</i>
BJT	<i>Bipolar Junction Transistor</i>
CI	Circuito Integrado
DC	<i>Direct Current</i>
DIY	<i>Do It Yourself</i>
FM	<i>Frequency Modulation</i>
GDT	<i>Gate Driver Transformer</i>
GTO	<i>Gate Turn-Off Thyristor</i>
IGBT	<i>Insulated Gate Bipolar Transistor</i>
MIT	<i>Massachusetts Institute of Technology</i>
MOSFET	<i>Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor</i>
PCM	<i>Pulse-code modulation</i>
PIC	<i>Programmable Interface Controller</i>
PWM	<i>Pulse Width Modulation</i>
SCR	<i>Silicon Controlled Rectifier</i>
SD	<i>Secure Disk</i>
SMD	<i>Surface Mounting Device</i>
UCP	Universidade Católica de Petrópolis

Lista de Símbolos

Ω	Unidade Resistiva- Ohms
μ	Permeabilidade Ferro Magnética do Material
A	Unidade de Corrente- Ampere
C	Capacitância
in	Unidade de Distância- polegadas
L	Indutância
m	Unidade de Distância- metro
V	Unidade de Tensão Elétrica - Volts
W	Unidade de Potência - Watts

Sumário

1	INTRODUÇÃO	13
1.1	Revisão Bibliográfica	13
1.2	Motivação	13
1.3	Objetivo Geral	13
1.4	Objetivos Específicos	13
1.5	Principais Dificuldades do Projeto	14
1.6	Aplicações	15
1.7	Organização do Trabalho	15
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	17
2.1	História da Bobina de Tesla	17
2.2	Estudo dos estágios do Plasma Speaker	18
2.2.1	Modulação	18
2.2.1.1	Modulação PWM e PCM	19
2.2.1.1.1	Modulação PWM	19
2.2.1.1.2	Modulação PCM	20
2.2.2	Eletrônica de Potência	20
2.2.2.1	Transistores	21
2.2.2.2	Inversores e Conversores Monofásicos	22
2.2.2.2.1	Inversor Half-Bridge e Full Bridge	22
2.2.2.3	Amplificador Push-Pull	24
2.2.2.4	Rigidez Dielétrica	25
2.2.2.5	Isolador	26
2.2.2.6	Transformador Elevador de Tensão	27
2.2.2.7	<i>Speaker</i>	29
2.2.3	Fontes de Alimentação	30
3	METODOLOGIA	31
3.1	Circuitos de Potência	31
3.1.1	Propostas de Circuitos para o Aumento de Potência	31
3.1.1.1	Círculo Básico	31
3.1.1.2	Círculo com Conversor de Tensão	32
3.2	Componentes da Modulação	32

3.2.1	Círcuito Integrado 555	33
3.2.1.1	Modulação PWM com 555	34
3.2.2	Arduino	37
3.2.2.1	Modulação PWM de áudio via Arduino	38
3.2.2.2	Modulação PCM via Arduino e a biblioteca TMRpcm.h	38
3.2.2.2.1	Cartão SD	39
3.2.3	Propostas de Circuitos para a Modulação	39
3.2.3.1	Círculo de Modulação Digital com 555	39
3.2.3.2	Círculo de Modulação Digital com Microcontrolador	40
4	O PLASMA SPEAKER	42
4.1	Fontes de Alimentação	42
4.2	GDT	42
4.3	Transformador Elevador de Tensão	42
4.4	Transistor do Conversor Half-Bridge	43
4.5	Conversor Push-Pull	44
4.6	Diodos	45
4.6.1	Díodo de Alta Tensão e Rápida Comutação	45
4.6.2	Díodo 1N4148	46
4.6.3	Díodo Zener	46
4.7	Materiais Diversos	47
5	RESULTADOS	50
5.1	Resultados da Simulação do Círcuito	50
5.2	Resultados Práticos	51
5.2.1	Primeiro Centelhamento	51
5.2.2	Funcionamento da Bobina e Reprodução do Áudio	51
5.2.3	Esquemático do Sistema	52
6	CONCLUSÃO E CONSIDERAÇÕES FINAIS	54
	REFERÊNCIAS	56
A	A BIBLIOTECA TMRPCM	57
A.1	Modulação PCM via Arduino	57
A.1.1	Como reproduzir músicas no Arduino?	57
A.1.2	Funções da biblioteca	59
B	DATASHEETS	66

B.1	IRFP 460	66
B.2	BD139 e BD140	66

Lista de ilustrações

Figura 1 – Imagem ilustrativa de um plasma speaker DIY	14
Figura 2 – Nikola Tesla em seu laboratório com a Bobina em pleno funcionamento.	17
Figura 3 – Fluxograma simples explicando o funcionamento básico do Plasma Speaker.	18
Figura 4 – Conceito básico de modulação PWM utilizando um comparador.	19
Figura 5 – Conceito Básico de Modulação PCM.	20
Figura 6 – Fluxograma para a parte de potência do sistema.	21
Figura 7 – Diferenças entre conversores, inversores e retificação.	22
Figura 8 – Fluxo elétrico em um inversor de meia ponte.	23
Figura 9 – Fluxo elétrico em um inversor de ponte completa.	23
Figura 10 – Distorção de Crossover.	24
Figura 11 – Distorção de Crossover inexistente em DC.	24
Figura 12 – Modelo elétrico de um núcleo de Ferrite.	27
Figura 13 – Coeficiente de Nagaoka em relação do diâmetro da bobina com o comprimento total.	28
Figura 14 – Sistema eletromecânico de um alto falante convencional.	30
Figura 15 – Topologia das Fontes de Alimentação.	30
Figura 16 – Circuito básico Push-Pull.	32
Figura 17 – Topologia do conversor Half-Bridge.	33
Figura 18 – Especificações básicas do circuito integrado 555.	34
Figura 19 – Terminais do invólucro do CI 555.	35
Figura 20 – Representação da modulação com circuito lógicos.	36
Figura 21 – Formas de Onda na modulação PWM existentes no CI 555 na modulação PWM.	36
Figura 22 – Placa Arduino com suas características.	37
Figura 23 – Mudança de tamanho do cartão SD.	39
Figura 24 – Arquitetura padrão de um cartão SD.	40
Figura 25 – Modulação com 555.	40
Figura 26 – Exemplo de possível circuito de modulação com processador, no caso com o processador da ATMega e utilizando módulo de cartão SD.	41
Figura 27 – GDT montado e sua respectiva resposta a uma onda quadrada.	43
Figura 28 – Transformador Elevador de Tensão selecionado.	43
Figura 29 – Especificações da família de diodos 54xxg.	46
Figura 30 – Especificações do diodo 1N4148.	47

Figura 31 – Jacob's Ladder.	48
Figura 32 – Corrente nos Capacitores em um conversor de Meia Ponte.	48
Figura 33 – Dissipador de calor selecionado.	49
Figura 34 – Resposta estimada do sistema no primário, a estimativa é que o sistema consegue descarregar aproximadamente 1 kW. Entretanto na prática conseguiu-se obter 200 W.	50
Figura 35 – Primeiro Centelhamento reproduzido no laboratório. Estimou-se que a tensão no secundário era de 1000 Volts.	51
Figura 36 – Resposta do GDT quando ligado ao sistema.	52
Figura 37 – Análise do áudio original (duas faixas de baixo) com a do áudio modulado pelo Arduino (duas faixas de cima e gravado com o celular).	52
Figura 38 – Diagrama esquemático do circuito.	53
Figura 39 – Foto do protótipo com conversor half-bridge montado em funcionamento.	55
Figura 40 – Circuito necessário para o teste da modulação no Arduino.	59
Figura 41 – Módulo SD para Arduino utilizado.	59
Figura 42 – Passo a passo sobre como colocar a música no formato certo utilizando o software Audacity. Após esse passo basta inserir o arquivo de áudio no cartão SD. Passo 1.	60
Figura 43 – Passo a passo sobre como colocar a música no formato certo utilizando o software Audacity. Após esse passo basta inserir o arquivo de áudio no cartão SD. Passo 2.	60
Figura 44 – Passo a passo sobre como colocar a música no formato certo utilizando o software Audacity. Após esse passo basta inserir o arquivo de áudio no cartão SD. Passo 3.	61
Figura 45 – Passo a passo sobre como colocar a música no formato certo utilizando o software Audacity. Após esse passo basta inserir o arquivo de áudio no cartão SD. Passo 4.	61
Figura 46 – Passo a passo sobre como colocar a música no formato certo utilizando o software Audacity. Após esse passo basta inserir o arquivo de áudio no cartão SD. Passo 5.	62
Figura 47 – Retirados do Datasheet do IRFP 460.	66
Figura 48 – Retirados do Datasheet do IRFP 460.	67
Figura 49 – Especificações dos transistores BD139 e BD140. Imagem retirada do datasheet fornecido pela ST.	68
Figura 50 – Especificações dos transistores BD139 e BD140.	69

Lista de tabelas

Tabela 1 – Efeitos do choque elétrico no corpo humano.	15
Tabela 2 – Rígidez Dielétricas de Alguns Materiais	25
Tabela 3 – Tabela de materiais que compõe os toróides.	27
Tabela 4 – Terminais do CI 555.	35

1 Introdução

1.1 Revisão Bibliográfica

Todos os conceitos utilizados nesse trabalho foram retirados dos livros citados na bibliografia, de documentos disponibilizados pelos fabricantes dos componentes utilizados, pelos conhecimentos adquiridos durante o curso das aulas da graduação em Engenharia Mecatrônica da UCP e das matérias eletivas feitas durante a graduação.

1.2 Motivação

O principal motivo da escolha para esse tema de projeto é a de poder unir conceitos vistos em sala de aula, previstas pelo curso de graduação específico, com conceitos vistos por outras áreas da engenharia com a intenção de juntar uma parte significativa desse conhecimento acumulado em um projeto visualmente agradável e significativo para as pessoas interessadas. Uma opção viável é a união entre programação utilizando microcontroladores com eletrônica de potência, como é o caso de uma Bobina de Tesla Cantante (ou Plasma Speaker), como pode ser visto na figura 1. O projeto faz parte de uma série de projetos que estão sendo organizados por professores da Universidade Católica de Petrópolis com a intenção de entender e estudar esse dispositivo para fins demonstrativos e educacionais.

1.3 Objetivo Geral

Analizar e estudar os componentes que permitem a obtenção de um arco voltaico assim como a sua extensão para a reprodução de áudio.

1.4 Objetivos Específicos

Os objetivos específicos do trabalho estão contidas nos seguintes itens

- O estudo na literatura dos estágios e dos componentes eletrônicos que compõem o projeto.
- Realizar testes teóricos e práticos dos blocos constitutivos do sistema.
- Realizar a montagem do sistema .
- Reprodução do áudio.

Figura 1 – Imagem ilustrativa de um plasma speaker DIY.



Fonte: Ebay

1.5 Principais Dificuldades do Projeto

Um problema que é de suma importância ao projeto é a descarga que é gerada pela bobina. A potência dissipada pelo sistema poderá chegar a 1 kW e suas consequências ao entrar em contato com a pele humana são bastante sérias. Esta característica faz com que esse trabalho seja de alta periculosidade, podendo gerar consequências indesejáveis a qualquer pessoa, conforme mostra a tabela 1. Para isso precisa-se garantir um bom isolamento elétrico para o circuito e para seus entornos, agindo com cautela durante sua execução e assegurando um bom conforto de quem estiver assistindo.

Outro problema encontra-se no dimensionamento dos componentes que serão utilizados. Como a frequência e a potência dissipada serão bastante altas, certos elementos comuns de projetos deverão ser repensados, seja por apresentar uma baixa eficiência (como uma resistência interna alta o suficiente) ou pela queima do componente por não aguentar as características de trabalho. Encontrar e dimensionar os componentes corretos será de suma importância para o projeto, implicando em uma leitura cuidadosa e criteriosa dos datasheets dos componentes.

Para fazer com que o projeto funcionasse precisou-se confeccionar outras etapas necessárias para o funcionamento dela tais como a alimentação do sistema, que é de suma importância

Tabela 1 – Efeitos do choque elétrico no corpo humano.

Efeito Fisiológico	Nível de Corrente DC [mA]	Nível de Corrente AC [mA]
Percepção	0-4	0-1
Surpresa	4-15	1-4
Reflexo de afastamento	15-80	4-21
Inibição Muscular	80-160	21-40
Bloqueio Respiratório	160-300	41-100
Morte	>300	>100

Fonte: The Ultimate Tesla Coil Design and Construction [3]

para que se tenha a devida atuação de todos os elementos ativos da bobina tais como transistores, amplificadores operacionais e microprocessadores. Uma escada de Jacob foi montada para poder visualizar melhor o comportamento do arco voltáico. Para fins demonstrativos seria interessante mostrar uma lista variada de músicas, por essa forma foi incorporada ao projeto um módulo receptor de Bluetooth para que pudesse haver uma seleção de músicas de forma prática e rápida, sendo este módulo não necessário ao projeto.

1.6 Aplicações

Pela interdisciplinaridade que o projeto alcança o estudo não fica restrito somente ao Plasma Speaker. Muitas partes do sistema podem ser levados para outras áreas, como medidas elétricas, microcontroladores, eletrônica industrial, eletromagnetismo e termodinâmica.

1.7 Organização do Trabalho

Na seção 2 encontra-se a fundamentação teórica onde discorre-se sobre os elementos de potência necessários para obter o arco voltáico, estudar sobre os transistores de potência e as topologias eletrônicas existentes na literatura. No final serão mostradas as soluções utilizadas no projeto.

Na seção 3 encontra-se a metodologia onde serão mostradas as propostas de solução para os blocos que compõem o projeto.

Na seção 4 são definidos os componentes que compõe o Plasma Speaker, junto com o motivo de sua escolha com datasheets e fórmulas.

Na seção 5 são mostrados os resultados, com simulações e resultados práticos adquiridos em laboratório.

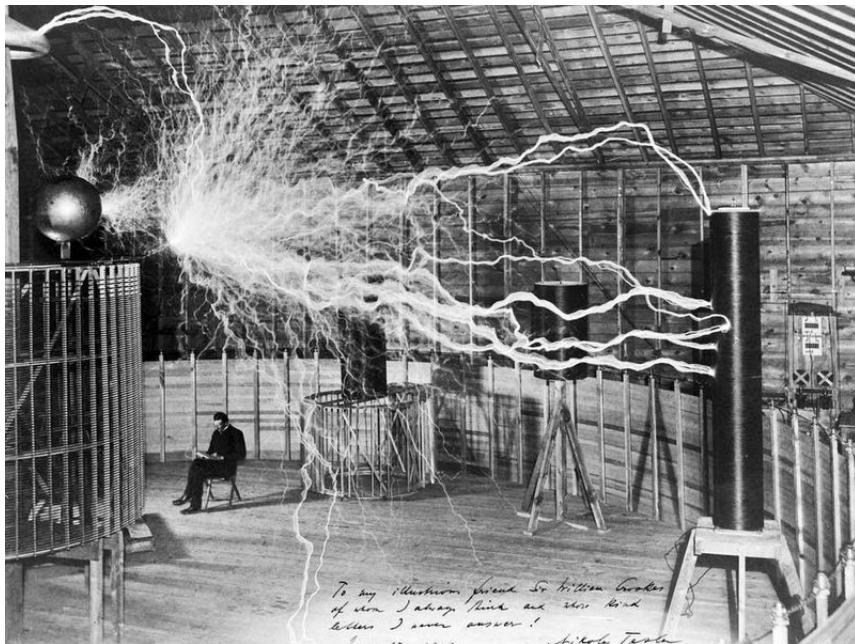
Na seção 6 têm-se a conclusão do trabalho junto com algumas propostas de trabalhos futuros.

No trabalho encontram-se dois apêndices, o primeiro é referente a biblioteca que fora utilizado para reprodução dos áudios utilizando-se a plataforma Arduino. Por se tratar de uma biblioteca grande e de um terceiro, o apêndice apenas contém o método de como inserir o áudio corretamente para que ele seja reproduzível pela plataforma. Após essa parte encontra-se uma breve explicação das funções existentes na biblioteca. O segundo apêndice apresenta alguns datasheets de componentes cujas características são importantes para a compreensão do projeto e que precisam de um maior espaço de visualização de modo a não comprometer o corpo do trabalho.

2 Fundamentação Teórica

2.1 História da Bobina de Tesla

Figura 2 – Nikola Tesla em seu laboratório com a Bobina em pleno funcionamento.



Fonte: WIKIMEDIA COMMONS

Nascido em 1856 na vila de Smiljan, onde hoje é a Croácia, Nikola Tesla (visto em seu laboratório na figura 2) foi um notório engenheiro, inventor e visionário. Sendo uma das seletas personalidades responsáveis pela existência do mundo moderno do jeito como é hoje. Um exemplo está na "guerra" travada com Thomas Edison em defesa do uso da corrente alternada para a distribuição de energia, enquanto Thomas defendia o uso da corrente contínua, que era menos eficiente pois dissipava mais calor realizando a mesma operação.

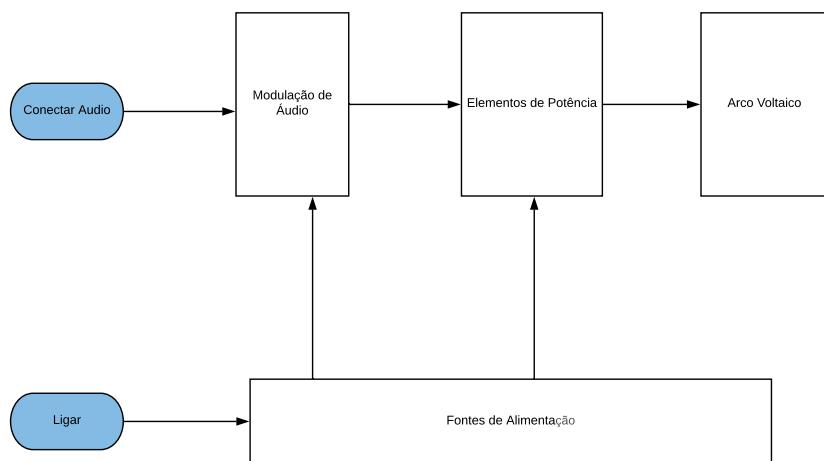
A bobina de Tesla foi um dos experimentos que demonstravam na época a versatilidade da corrente alternada. Criada em 1891, inicialmente ela fora criada para estudar e expandir os experimentos de Hertz na área de radiação eletromagnética. Após a sua construção Tesla, de maneira frustrada, utilizou o modelo de muitas outras formas com a finalidade de transmitir energia elétrica sem fios. Tanto que certa vez, seu laboratório no Colorado possuía uma bobina com 16 metros de diâmetro conectada a uma antena. Devido à enormidade desse sistema ocorreu uma falta de energia na região ao se queimar os dínamos de uma central de energia localizada a 10 km de distância de onde se situava essa bobina. Hoje em dia

não se têm aplicações práticas para a mesma, existindo até produtos a venda no mercado porém apenas por ser um produto esteticamente atraente e de aparência intrigante. Porém sua engenhosidade é considerada como uma das precursoras do rádio e seu invento é de suma importância na teoria do controle do rádio.

Fonte modificada do paper Bobina de Tesla: História e Construção Didática [5].

2.2 Estudo dos estágios do Plasma Speaker

Figura 3 – Fluxograma simples explicando o funcionamento básico do Plasma Speaker.



Fonte: Autor

Como a figura 3 mostra, o Plasma Speaker consta com blocos bem determinados. O sistema precisa de uma alimentação para o funcionamento dos elementos ativos do sistema, tais como transistores e processadores. O sistema também necessita de uma entrada de áudio, essa entrada precisa ser modulada e amplificada em tensão e corrente para se ter o arco voltáico.

2.2.1 Modulação

Modulação é o processo de variação das características de uma onda, tais como a amplitude, a frequência e a fase. Em telecomunicações esse processo é de vital importância para a transmissão de um sinal. Para o *Plasma Speaker* a transmissão não é necessária porém a modulação é a etapa principal para a etapa de chaveamento de potência.

Nas próximas subsubseções se entrará em mais detalhes de como os circuitos de modulação realizam a tarefa a qual são destinadas.

2.2.1.1 Modulação PWM e PCM

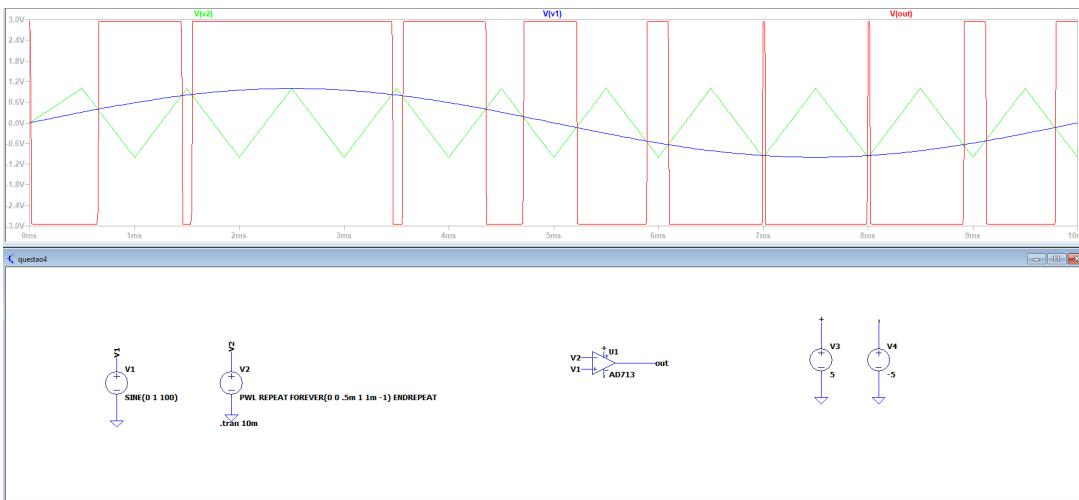
Diversas técnicas de modulação são usadas no dia a dia, uns muitos conhecidos como o AM e FM ou mais antigos e não mais usuais como PM, VSB, DSB. As modulações pulsadas como PWM, PCM, PAM, PPM ou ainda as modulações digitais como ASK, PSK e FSK, todos com seus objetivos e aplicações muito bem consagradas na literatura.

Porém quando se trata do Plasma Speaker vê-se a necessidade da utilização de um sinal pulsado. Por se ter uma menor interferência quanto a força do campo magnético e ruído gerado pelo sistema pela necessidade da alta frequência e alta potência em sua saída, tornando a modulação por pulsos a melhor e mais simples escolha para tal. Dessa encontra-se com maior destaque na literatura as modulações PWM e a PCM.

2.2.1.1.1 Modulação PWM

PWM refere-se ao conceito de enviar pulsos digitais de forma rápida em um circuito eletrônico a ponto de simular uma saída analógica com variáveis digitais. Esta técnica é utilizada no controle de motores elétricos, aquecedores e acendimento de LEDs.

Figura 4 – Conceito básico de modulação PWM utilizando um comparador.



Fonte: Autor. Software Utilizado: LT Spice.

Em um tom mais voltado para modulação tem-se que o sinal modulante (a ser modulado) é o sinal de áudio e o sinal de portadora é o sinal de varredura (clock). Se for aplicado uma varredura com frequência alta o suficiente para se ler o sinal de áudio, a tensão média de PWM referente a essa leitura resultará no áudio que será tocado no Plasma Speaker, em

teoria com pouco ruído. Analisando a figura 4 consegue-se ver que a portadora é o sinal triangular enquanto o sinal a ser modulado é a senoide.

2.2.1.1.2 Modulação PCM

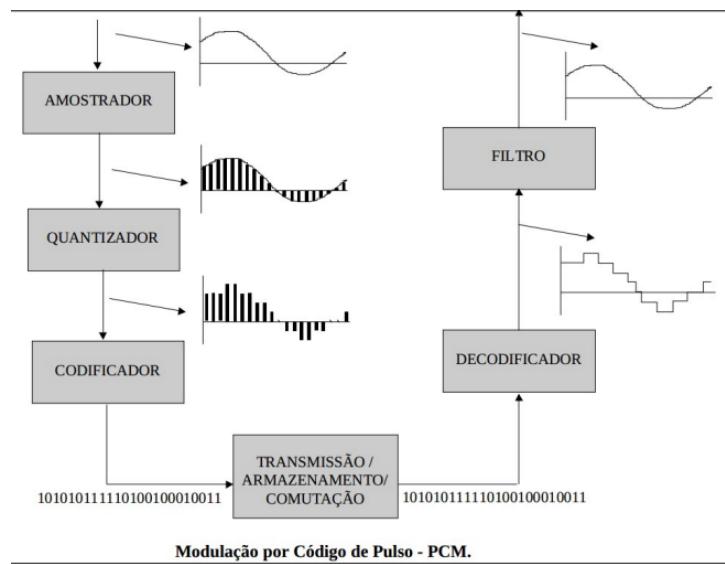
PCM refere-se a amostragem em níveis bit-a-bit (quantificada) de um sinal analógico com a utilização do mesmo tempo de amostra de um bit para outro. No PCM, a amplitude de cada amostra de sinal é representado por um bit, sendo cada bit transmitido através de um pulso. Como cada amostra precisa ser transmitida através de vários pulsos, os pulsos precisam ter sua largura reduzida, aumentando consequentemente a banda passante de canal necessária. Uma das vantagens da modulação PCM é que seu sinal é puramente digital, sendo de fácil regeneração e entendimento para os sistemas embarcados. Essa técnica é amplamente utilizada em sistemas de armazenamento de dispositivos móveis em geral para se armazenar arquivos diversos.

Todo modulador PCM tem a seguinte característica Básica :

Amostrador → Quantizador → Codificador

Característica podendo ser vista pela figura 5.

Figura 5 – Conceito Básico de Modulação PCM.

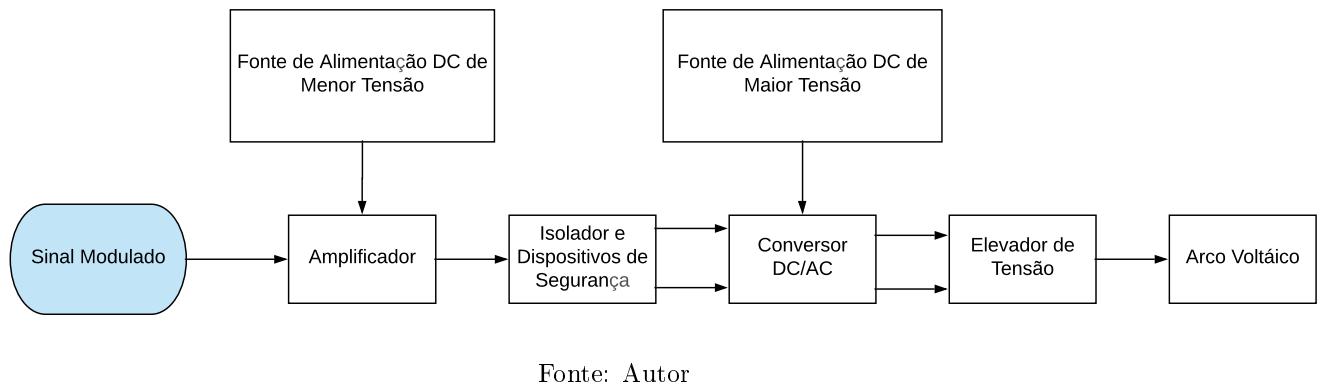


Fonte: Instituto Federal de Santa Catarina

2.2.2 Eletrônica de Potência

Como mostra a figura 6, o bloco de potência contém as partes importantes para se elevar a tensão de forma a poder romper a rigidez dielétrica do ar.

Figura 6 – Fluxograma para a parte de potência do sistema.



2.2.2.1 Transistores

Uma das maiores descobertas no mundo da eletrônica sem dúvida foi o transistor, pois sem ele seria inimaginável prever como existiria os computadores e sistemas microprocessados da forma como existe hoje. O transistor conta com inúmeras aplicações como o chaveamento de um circuito, para a realização de operações lógicas ou para amplificar a corrente passante. Este último sendo o motivo pelo qual foi conferido o prêmio Nobel de Física a John Bardeen, Walter Houser Brattain e William Bradford Shockley em 1956. Graças a esse invento que existe grande parte do que se conhece hoje como a eletrônica de potência. Componentes como diodos, transistores bipolares de junção, MOSFETs, SCRs, IGBTs, GTOs, com aplicações como inversores de frequência, retificação, conversores, fonte chaveadas, etc...

No mercado existem basicamente três tipos de transistor, os bipolares de junção, os MOSFETs e os IGBT, sendo os últimos considerados transistores de potência. A seguir vão algumas de suas principais características

BJT:

- Dispositivo controlado por corrente;
- Quando saturado exibe tensão entre coletor e emissor residual;
- Apresenta baixas perdas de condução;
- Tensão entre base e emissor decresce com a corrente no coletor (necessita equalização em associação paralela de dispositivos).

MOSFETs:

- Dispositivo controlado por tensão;
- Quando na região resistiva, exibe resistência residual;
- Apresenta baixas perdas de chaveamento;
- Díodo reverso intrínseco;

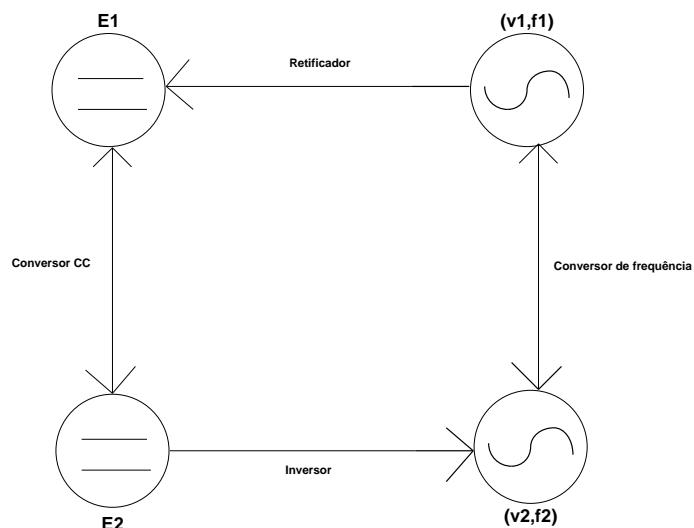
-Corrente entre o dreno e o source cresce com a corrente e a temperatura (não necessita equalização em associação paralela).

IGBT:

- Dispositivo controlado por tensão;
- Quando saturado exibe tensão Vce residual;
- Apresenta baixas perdas de condução;
- Díodo reverso externo;
- Vbe decresce com Ic (necessita equalização em associação paralela)

2.2.2.2 Inversores e Conversores Monofásicos

Figura 7 – Diferenças entre conversores, inversores e retificação.



Fonte: Autor

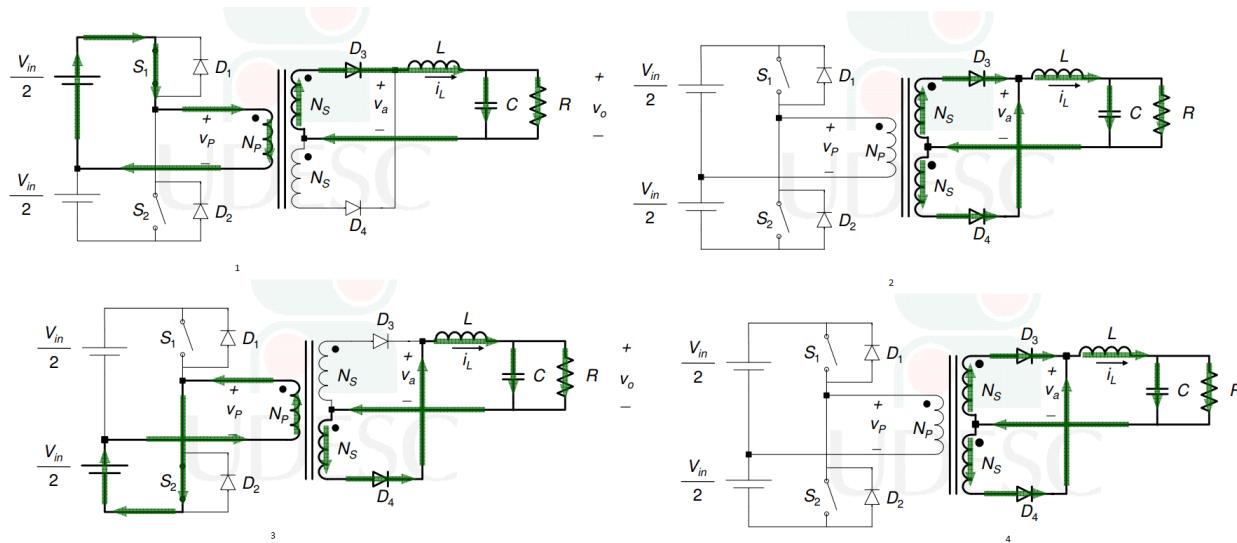
Inversores são conversores estáticos que convertem uma fonte de energia CC (tensão ou corrente) em uma fonte de energia CA simétrica, de valor médio nulo e com amplitude e frequência controláveis. Conversores são os circuitos que alteram tensão no caso de CC e frequência no caso de CA. Um diagrama pode ser visto na figura 7 onde pode-se notar suas principais diferenças.

2.2.2.2.1 Inversor Half-Bridge e Full Bridge

Necessários para a inversão de energia provinda de uma fonte DC em sinal analógico os inversores se fazem altamente necessárias no sistema. Requeridos em aplicações de maior potência se comparadas com as topologias forward e flyback e a sua não necessidade da

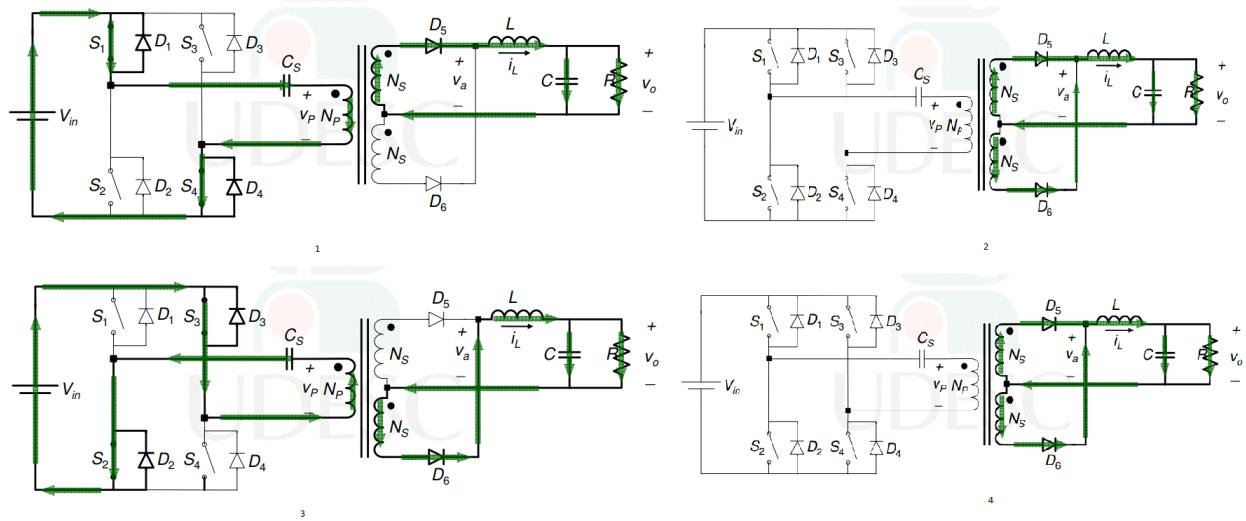
Inclusão de um circuito de desmagnetização faz com que a topologia de meia ponte e ponte completa sejam uma melhor opção para o sistema a ser montado. Porém a necessidade de uma alta potência faz com que essa parte seja a mais custosa do projeto. Seu funcionamento podem ser entendido pelas figuras 8 e 9.

Figura 8 – Fluxo elétrico em um inversor de meia ponte.



Créditos: Prof. Cassiano Rech da UDESC.

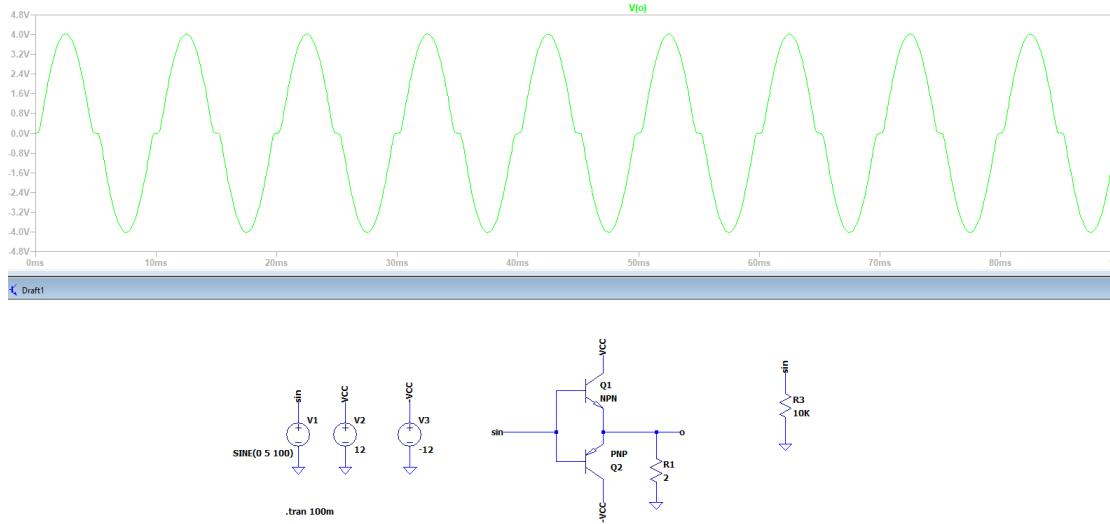
Figura 9 – Fluxo elétrico em um inversor de ponte completa.



Créditos: Prof. Cassiano Rech da UDESC.

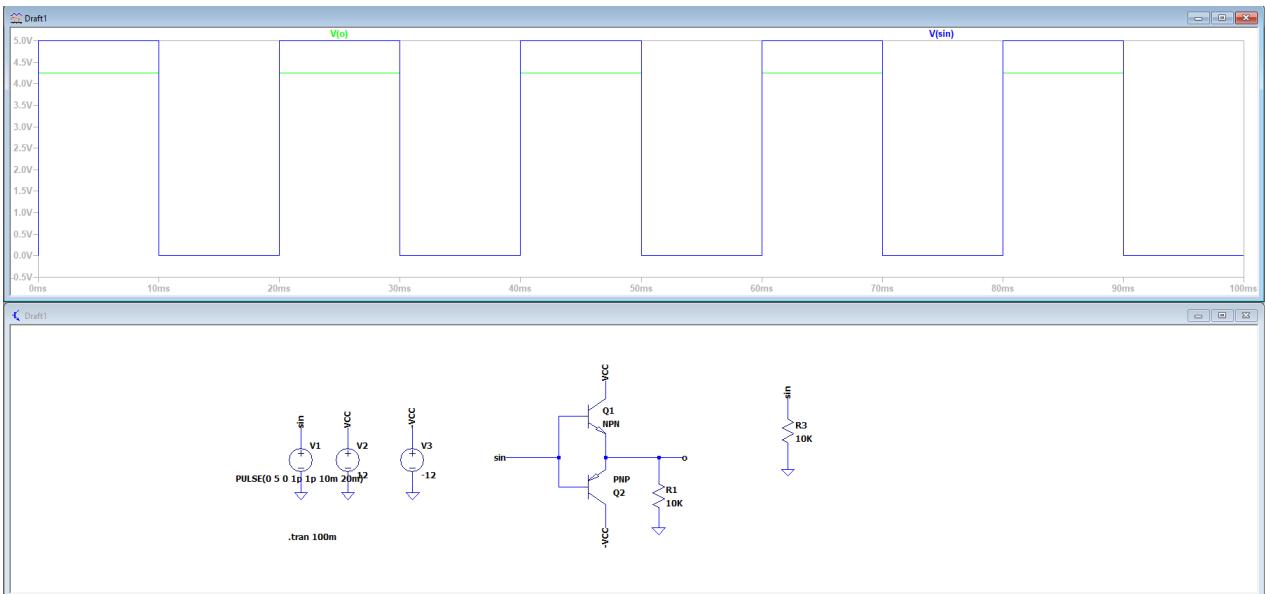
2.2.2.3 Amplificador Push-Pull

Figura 10 – Distorção de Crossover.



Fonte: Autor. Software Utilizado: LT Spice.

Figura 11 – Distorção de Crossover inexistente em DC.



Fonte: Autor. Software Utilizado: LT Spice.

Sendo um amplificador de potência, o amplificador Classe B (ou Push-Pull) é uma das topologias capazes de conseguir amplificar os dois ciclos de uma entrada senoidal. Sua

configuração simples é desejável, pelo sua rápida montagem porém a configuração permite ao projeto apenas uma eficiência máxima de 78.5%

Os efeitos altamente desejáveis para esse tipo de conversor são vistos quando não se há nenhuma carga após o circuito. Se for aplicada uma carga acontece o fenômeno de distorção de crossover. Esse efeito significa a presença de um delay para a ativação devido ao diodo interno existente no transistor que só sai do limite resistivo após o sinal passar de 0.7 V . Tanto no ciclo positivo quanto no negativo. Seu efeito pode ser notado na figura 10 para AC . Esse efeito já não acontece quando se tem um sinal quadrado, então é preferível que se faça essa amplificação de potência em DC como visto na figura 11.

Tabela 2 – Rigidez Dielétricas de Alguns Materiais

Material	Rigidez Dielétrica[kV/cm]
Ar	30
Baquelite	240
Borracha de Neopreno	120
Nylon	140
Papel	160
Polistireno	240
Vidro Pyrex	140
Quartzo	80
Óleo de Silicone	150
Titanato de Estrôncio	80
Teflon	600

Fonte: Newton C. Braga

2.2.2.4 Rigidez Dielétrica

Em relação a capacidade de condução elétrica pode-se classificar os materiais de três formas, condutoras, isolantes ou semicondutoras. Internamente os materiais condutores apresentam uma grande quantidade de elétrons com fraca ligação aos seus núcleos atômicos o que ajudam na condução, uma vez que elas dependem de uma força externa. Os materiais isolantes (ou

dielétricos) são o contrário, seus elétrons são fortemente ligadas a seus núcleos atômicos, tornando difícil a formação de correntes elétricas.

A rigidez dielétrica é o valor de campo elétrico máximo que um material isolante suporta antes de passar a conduzir. Seu valor que pode ser tabelado como mostra a tabela 2 pode ser considerado um fator para a fabricação de componentes que precisam apresentar isolamento, como exemplo uma fita isolante.

2.2.2.5 Isolador

Quando se trabalha com tensões elevadas não se pode conectar o circuito de baixa tensão com o de alta tensão sem nenhum tipo de isolação entre elas. Deve-se isolar-los de alguma forma para que o funcionamento de um não interfira com a do outro. Existem duas soluções principais para esse problema. Utilizar de optoacopladores ou utilizar do GDT. O primeiro é mais complexo e seu dimensionamento pode depender de outros equipamentos, o segundo é de mais simples confeccionamento e podendo ser utilizado de maneira a elevar os pulsos provindos da modulação, porém é menos eficiente por conta do material que é utilizado para tal. Nem sempre é fácil encontrar em sucata um núcleo que tenha uma comportamento satisfatório em altas frequências.

Núcleos que se comportam bem em altas frequência são de algum tipo de Ferrite. Eles podem ser encontrados em fontes de Computador ou até mesmo no início de cabos de controle de videogame ou de Cabos USB. Suas propriedades materiais são excelentes para esses circuitos uma vez que eles agem como filtros passa-baixas, não afetando o controle de altas frequências nem a rede.

No mercado existem dois tipos de toróide com bom comportamento em alta frequência: os de núcleo de pó de ferro e os de ferrite. Teoricamente, precisa-se encontrar um núcleo que tenha maior permeabilidade e para essa verificação o jeito mais prático é com um osciloscópio e com um gerador de sinais e assim testar-lo com a frequência desejada para o trabalho. Depois desse trabalho precisa-se verificar de que material específico é feito o material encontrado segundo a tabela 3.

Do modelo apresentado na figura 12 e do trabalho presente na Analog Devices [8] pode-se ter uma base teórica interessante para esses núcleos. Conclui-se então que cada tipo de material corresponde a uma determinada faixa de frequência ótima. Uma vez que suas resistências e capacitâncias precisam ser modeladas de forma um tanto quanto empírica utilizando-se do resultado oferecido pelo osciloscópio.

Tabela 3 – Tabela de materiais que compõe os toróides.

Cor	Material	f[MHz]
Amarelo/Branco	Hidrogênio Reduzido	DC-1
Cinza	Carbonyl HP	0.05-0.50
Vermelho/Branco	Carbonyl GS6	0.1-2
Azul	Carbonyl C	0.5-5
Vermelho	Carbonyl E	2-30
Branco	Carbonyl SF	3-35
Amarelo	Carbonyl SF	10-50
Preto	Pó de Ferro W	30-100
Verde/Branco	Óxido Sintético	50-200
Azul/Amarelo	Carbonyl	40-180
Castanho	Fenólico	100-300

Fonte: Artigo sobre os materiais dos toroides [6]

Figura 12 – Modelo elétrico de um núcleo de Ferrite.

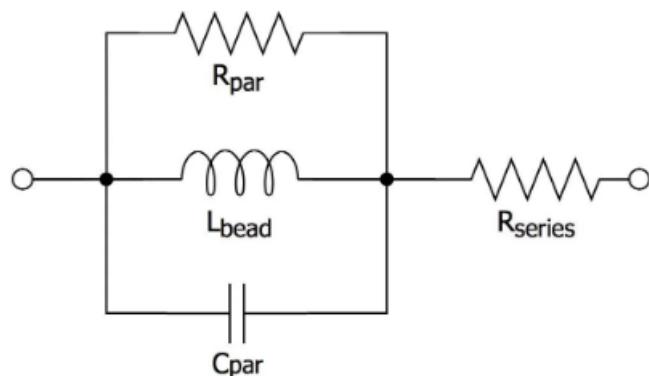


Imagen retirada do site All About Circuits.

2.2.2.6 Transformador Elevador de Tensão

Naturalmente deveria ser confeccionado um transformador elevador de tensão apropriado para a bobina de Tesla, porém precisa-se de um material que suporte aos altos parâmetros impostos pela Bobina de Tesla. Assim como o isolador, o transformador precisa ser de alta perfemeabilidade. Com o confeccionamento certos parâmetros importantes podem ser calculados como:

$$L = \frac{1}{l} K \mu_0 N^2 A \quad (2.2.2.1)$$

Onde:

L =indutância em Henrys [H]

μ_0 =Permeabilidade no vácuo = $4\pi \times 10^{-7} H/m$

K = Coeficiente de Nagaoka

Cujo valor fica entre ($0 < K \leq 1$) E seu cálculo é complicado devendo-se observar uma tabela disponível no próprio trabalho do Nagaoka [9] e que pode ser visto na figura 13

N = Número de Voltas

A = Área da seção da bobina [m^2]

l = Comprimento da Bobina [m]

Figura 13 – Coeficiente de Nagaoka em relação do diametro da bobina com o comprimento total.

TABLE OF $\frac{g}{A}$ AS FUNCTION OF $\frac{Diameter}{Length}$.					
Diameter Length	$\frac{g}{A}$	A_1	Diameter Length	$\frac{g}{A}$	A_1
0'00	1'000 000	-0'004 231	0'30	0'883 803	-0'003 498
0'01	0'995 769	-0'004 207	0'31	0'880 305	-0'003 476
0'02	0'991 562	-0'004 184	0'32	0'876 829	-0'003 452
0'03	0'987 381	-0'004 157	0'33	0'873 377	-0'003 429
0'04	0'983 224	-0'004 132	0'34	0'869 948	-0'003 406
0'05	0'979 092	-0'004 107	0'35	0'866 542	-0'003 384
0'06	0'974 985	-0'004 082	0'36	0'863 158	-0'003 350
0'07	0'970 903	-0'004 056	0'37	0'859 799	-0'003 338
0'08	0'966 847	-0'004 032	0'38	0'856 461	-0'003 315
0'09	0'962 015	-0'004 008	0'39	0'853 146	-0'003 293
0'10	0'958 807	-0'003 982	0'40	0'849 853	-0'003 270
0'11	0'954 625	-0'003 957	0'41	0'846 583	-0'003 248
0'12	0'950 668	-0'003 933	0'42	0'843 335	-0'003 225
0'13	0'946 935	-0'003 910	0'43	0'840 110	-0'003 204
0'14	0'943 025	-0'003 884	0'44	0'838 906	-0'003 183
0'15	0'939 141	-0'003 859	0'45	0'835 723	-0'003 160
0'16	0'935 294	-0'003 834	0'46	0'830 563	-0'003 139
0'17	0'931 450	-0'003 811	0'47	0'827 424	-0'003 117
0'18	0'927 639	-0'003 785	0'48	0'824 307	-0'003 096
0'19	0'923 854	-0'003 761	0'49	0'821 211	-0'003 075
0'20	0'920 093	-0'003 737	0'50	0'818 136	-0'003 054
0'21	0'916 356	-0'003 713	0'51	0'815 082	-0'003 033
0'22	0'912 643	-0'003 689	0'52	0'812 049	-0'003 012
0'23	0'908 954	-0'003 664	0'53	0'809 037	-0'003 091
0'24	0'905 290	-0'003 641	0'54	0'806 048	-0'002 971
0'25	0'901 649	-0'003 618	0'55	0'803 075	-0'002 950
0'26	0'898 033	-0'003 593	0'56	0'800 125	-0'002 930
0'27	0'894 440	-0'003 569	0'57	0'797 195	-0'002 910
0'28	0'890 871	-0'003 546	0'58	0'794 285	-0'002 890
0'29	0'887 325	-0'003 522	0'59	0'791 395	-0'002 870

Imagen retirada do traballo do Nagaoka [9].

Sua influência em força magnética e campo magnético são dados pelas seguintes fórmulas:

$$H = 0.4 \frac{\pi N I}{l_e} \quad (2.2.2.2)$$

$$B = \frac{LI \times 10^8}{NA_e} \quad (2.2.2.3)$$

Onde:

H =Força do campo magnético

N=Número de voltas utilizadas

I=Corrente DC Média [A]

l_e = Comprimento do enrolamento[in]

B=Fluxo Magnético [T]

L=Indutância[H]

A_e =Área da seção transversal do indutor[in^2]

O ganho de tensão provinda do transformador vem da seguinte relação entre as espiras :

$$\frac{V_1}{V_2} = \frac{N_1}{N_2} \quad (2.2.2.4)$$

2.2.2.7 Speaker

Para ocorrer a reprodução de um sinal sonoro necessariamente precisa-se existir algum dispositivo mecânico vibrante. Um exemplo são as cordas vocais que todos os seres humanos possuem. De forma análoga um alto falante convencional não será diferente assim como mostra a figura 14. Onde a variação de frequência imposta pelo conjunto imã-bobina faz movimentar o sistema de suspensão que segura a bobina ocorrendo assim a movimentação para frente e para trás, ou comprimindo e descomprimindo o ar que se encontra nos arredores do speaker, formando o som.

Um *Plasma Speaker* também ocasiona a vibração do ar em seus arredores, porém de maneira diferente. Devido a alta temperatura imposta para a formação do plasma uma pequena variação de energia proveniente do plasma é suficiente para pressurizar e despressurizar o ar. Uma vez que o ar é esquentado muito rapidamente e não há tempo dele se expandir então se é válido o uso da equação ideal dos gases associando a variação de pressão com a variação de temperatura existente em seus terminais o que é dada pela equação 2.2.2.5.

$$\Delta P = \frac{nR}{V} \Delta T \quad (2.2.2.5)$$

Onde:

P é a pressão [Pa]

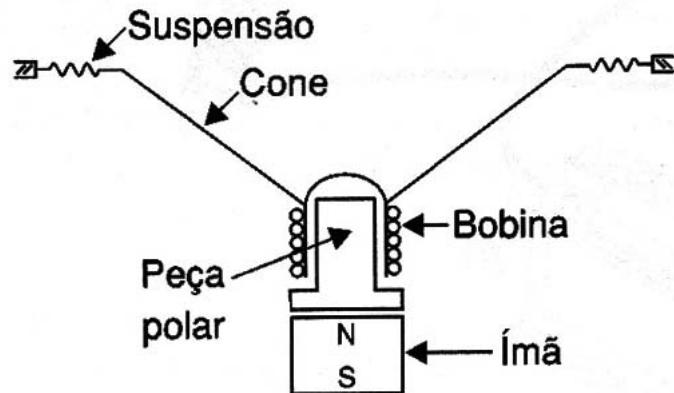
T é a temperatura [K]

R é a constante universal dos gases perfeitos [0.082 atm.L/mol.K]

n é o número de mols do gás

Se o sistema consegue ser capaz de variar a pressão do ar em seus arredores então ele consegue reproduzir som, se de certa forma consegue se controlar a temperatura em seus terminais logo se consegue escutar música.

Figura 14 – Sistema eletromecânico de um alto falante convencional.

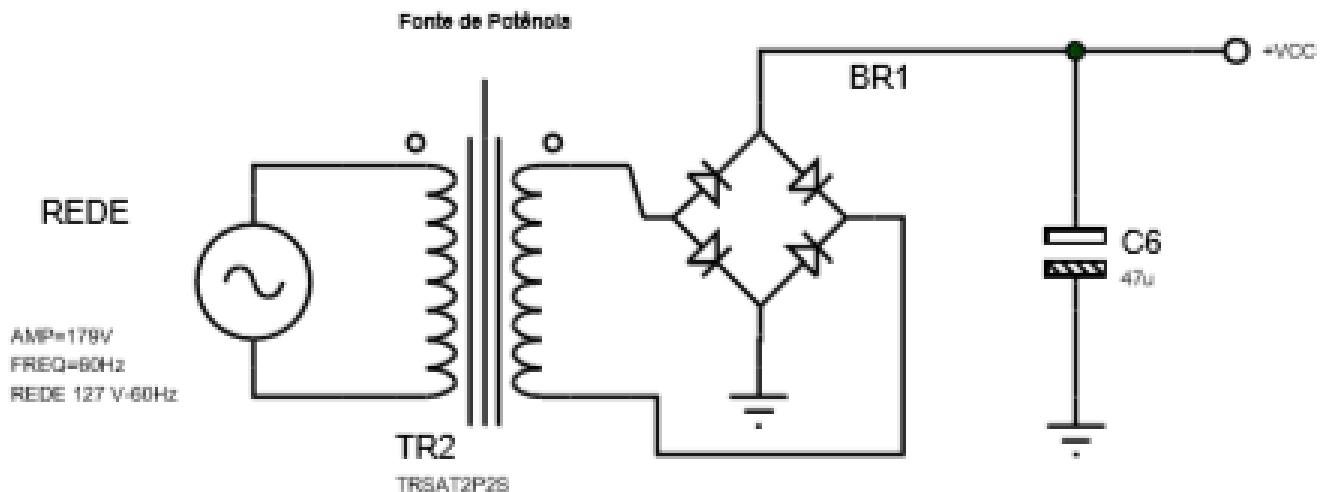


Fonte: Newton C Braga.

2.2.3 Fontes de Alimentação

A princípio, pelo fluxograma presente na figura 3, o sistema precisa apresentar ao menos duas fontes de alimentação, uma de baixa tensão e baixa potência para alimentar o circuito de modulação (que é mais sensível) e outra de alta tensão e alta potência que é para alimentar a parte que irá amplificar a parte de potência. A topologia utilizada se encontra na figura 15.

Figura 15 – Topologia das Fontes de Alimentação.



Fonte: Autor.

3 Metodologia

O que se espera da bobina é que ela exceda a rigidez dielétrica do ar ocasionando com que a mesma ionize o ar em torno da saída do sistema casando-se a impedância do sistema com a do ambiente, formando assim o plasma. Para que esse fenômeno ocorra precisa-se fazer com que o sistema gere uma alta tensão com alta frequência com o seu circuito, e quebre esse isolamento que é de aproximadamente 30 kV para cada centímetro percorrido.

Para a realização desse fenômeno o projeto se divide em duas partes principais. A parte de modulação digital do áudio. A segunda parte é a amplificação desse sinal modulado em corrente e tensão para se ter visualmente o efeito voltáico esperado.

Para o problema da modulação os métodos mais simples para a obtenção do PWM e PCM, citados anteriormente, são respectivamente utilizando o CI 555 e a plataforma Arduino. Para a amplificação do sinal utiliza-se um amplificador de qualquer classe, além de um conversor DC para AC. Se discutirá nessa seção as topologias que serão utilizadas para o sistema.

3.1 Circuitos de Potência

A primeira questão se encontra em como conseguir passar da barreira de isolação do ar com componentes elétricos. A dificuldade se encontra em conseguir gerar essa alta potência em um espaço reduzido. E dessa dificuldade entra em jogo a eletrônica de potência.

A primeira ação a ser tomada é a construção de um transformador que eleve a tensão, pois necessita-se de um sistema que seja capaz de fornecer um sinal de alta frequência, alta tensão e de alta corrente.

A segunda questão é a de pesquisar as topologias que podem ser utilizadas para esse objetivo, e consequentemente o dimensionamento da ordem de grandeza dos principais componentes utilizados. O principal desses componentes são os transistores de potência.

Após esses passos vêm as fontes de alimentação, responsáveis por deixar os componentes ativos operantes e funcionais para o funcionamento completo do circuito. De forma análoga, serão utilizados topologias simples sem a preocupação com o controle da mesma.

3.1.1 Propostas de Circuitos para o Aumento de Potência

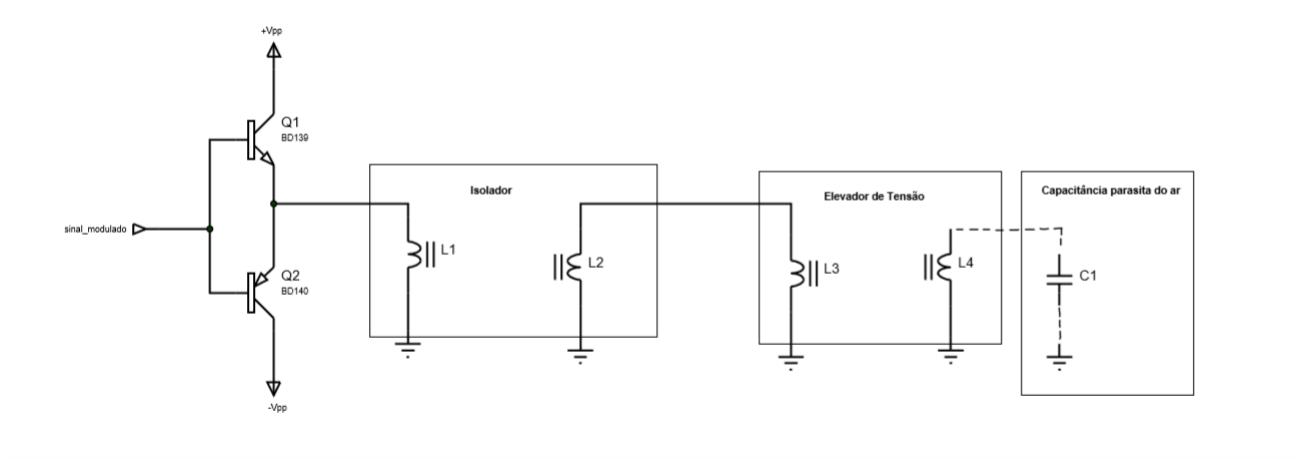
Serão mostradas algumas sugestões para topologia da parte de potência.

3.1.1.1 Circuito Básico

A topologia mais simples para se obter alta tensão é acoplando junto ao circuito um amplificador de corrente uma vez que se têm uma baixa corrente fornecida pela modulação.

O arranjo mais simples para um sinal de áudio é o encontrado na figura 16 que é o circuito do tipo Push-Pull. O circuito tem uma eficiência interessante se levado em conta sua simplicidade e facilidade de montagem.

Figura 16 – Circuito básico Push-Pull.



Fonte: Autor.

Este circuito traz um boa orientação para o aprimoramento da bobina de Tesla, sendo trabalhosa apenas a construção do circuito. Porém demonstra-se que os transistores do tipo BJT não irão nos fornecer uma descarga alta o suficiente.

3.1.1.2 Circuito com Conversor de Tensão

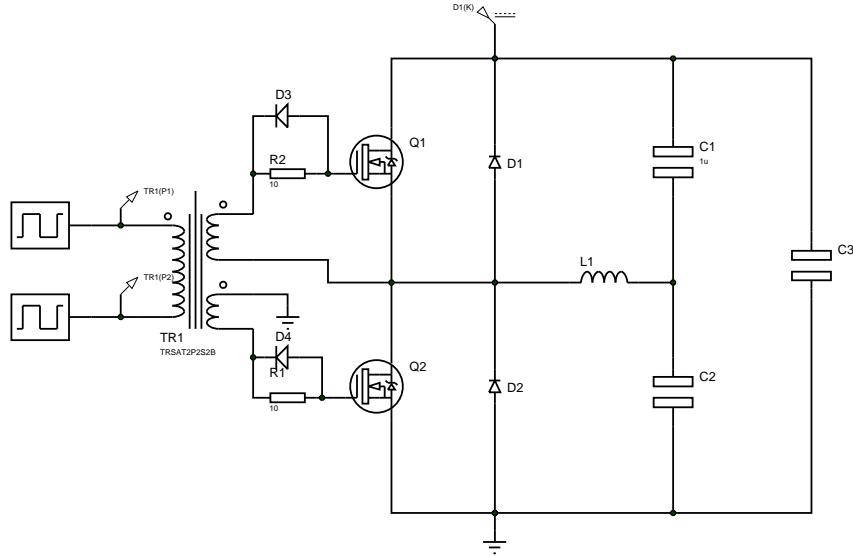
Devido ao fato de não se obter um grande centelhamento com o circuito Push-Pull (que representa um aumentador de corrente) a próxima abordagem é a de elevar mais a tensão gerada pelo sistema. Como se trata de um circuito de potência e sua entrerrada receber sinais pulsados provenientes da modulação fica-se restrito aos conversores Half-Bridge e Full-Bridge. O segundo conta com pelo menos dois transistores diferentes, um do tipo P e outro do tipo N o que encarece o projeto, fazendo com que seja mais viável a utilização do conversor do tipo Half-Bridge o qual pode ser vista na figura 17.

Por conta da inclusão de um circuito que eleva de maneira exagerada a potência na saída se faz nescessária por motivos de segurança a inclusão de um isolador entre esses dois estágios, não comprometendo o funcionamento do modulador nem do amplificador.

3.2 Componentes da Modulação

Serão mostradas algumas dos principais componentes para o bloco de modulação.

Figura 17 – Topologia do conversor Half-Bridge.



Fonte: Autor.

3.2.1 Circuito Integrado 555

Projetado há mais de 40 anos pelo engenheiro eletrônico John R. Camenzind o CI 555 é um famoso CI temporizador. Sua versatilidade faz com que o componente seja encontrado na maior parte dos projetos. O seu circuito é composto por 23 transistores, 2 diodos e 16 resistores em um encapsulamento duplo em linha (DIP) de 8 pinos. Suas especificações se encontram na figura 18, sua pinagem na tabela 4 e na figura 19. Na figura 20 encontra-se sua representação interna com componentes lógicos, na figura 21 as formas de onda nos componentes. O circuito integrado consta com dois modos de operação:

Operação Monoestável: Funciona como um disparador

Operação Astável: Funciona como um oscilador

O CI para seu funcionamento requere apenas um resistor, um capacitor e um sinal de clock. Em operação monoestável o mesmo tem o comportamento de controle de tempo bem conhecido que é dado pela fórmula 3.2.1.1 .

$$t = 1.1 \times R \times C \quad (3.2.1.1)$$

Figura 18 – Especificações básicas do circuito integrado 555.

PARAMETER	SYMBOL	VALUE	UNIT
Supply Voltage	Vcc	16	V
Power Dissipation	Pd	600	mW
Lead Temperature	Tlead	300	C
Operating Temperature	Topr	0 to 70	C
Storage Temperature	Tstg	-65 to 150	C

ELECTRICAL CHARACTERISTICS(Ta=25 C ,Vcc=5 ~ 15V)

PARAMETER	SYMBOL	TEST CONDITIONS	MIN	TYP	MAX	UNIT	
Supply voltage	Vcc		4.5	16	16	V	
Supply Current (Note 1)	Icc	Vcc=5V,RL=		3	6	mA	
		Vcc=15V,RL=		7.5	15	mA	
Timing Error(monostable)							
Initial Accuracy(Note 2)	ACCR	RA=1k to 100k μ Ω		1.0	3.0	%	
Drift with Temperature	$\Delta t/\Delta T$	C=0.1 μ F		50		ppm/ C	
Drift with Supply Voltage	$\Delta t/\Delta Vcc$			0.1	0.5	%/V	
Timing Error(astable)							
Initial Accuracy(Note 2)	ACCR	RA=1k to 100k μ Ω		2.25		%	
Drift with Temperature	$\Delta t/\Delta T$	C=0.1 μ F		150		ppm/ C	
Drift with Supply Voltage	$\Delta t/\Delta Vcc$			0.3		%/V	
Control Voltage	Vc	Vcc=15V	9.0	10.0	11.0	V	
		Vcc=5V	2.6	3.33	4.0	V	
Threshold Voltage	VTH	Vcc=15V		10.0		V	
		Vcc=5V		3.33		V	
Threshold Current(Note 3)	I _{TH}			0.1	0.25	μ A	
Trigger Voltage	Vtr	Vcc=5V	1.1	1.67	2.2	V	
		Vcc=15V	4.5	5	5.6	V	
Trigger Current	I _{tr}	Vtr=0		0.01	2.0	μ A	
Reset Voltage	Vrst			0.4	0.7	1.0	V
Reset Current	I _{rst}			0.1	0.4	mA	
Low Output Voltage	V _{OL}	Vcc=15V					
		I _{sink} =10mA		0.06	0.25	V	
		I _{sink} =50mA		0.3	0.75	V	
		Vcc=5V					
		I _{sink} =5mA		0.05	0.35	V	
High Output Voltage	V _{OH}	Vcc=15V					
		I _{source} =200mA		12.5		V	
		I _{source} =100mA	12.75	13.3		V	
		Vcc=5V					
		I _{source} =100mA	2.75	3.3		V	
Rise Time of Output	t _R			100		nSec	
Fall Time of Output	t _F			100		nSec	
Discharge Leakage Current	I _{LKG}			20	100	nA	

Imagen retirada do datasheet fornecido pela Fairchild.

3.2.1.1 Modulação PWM com 555

Como a maioria dos datasheets mostra, uma das aplicações do CI é a de modular em PWM qualquer sinal que é aplicado no terminal de Control Voltage (pino 5). O sinal de portadora (ou de clock) deverá ser aplicado no Trigger. Como visto nos datasheets a tensão de saída é a mesma fornecida pela alimentação do circuito e sua corrente de saída é de somente 200 mA.

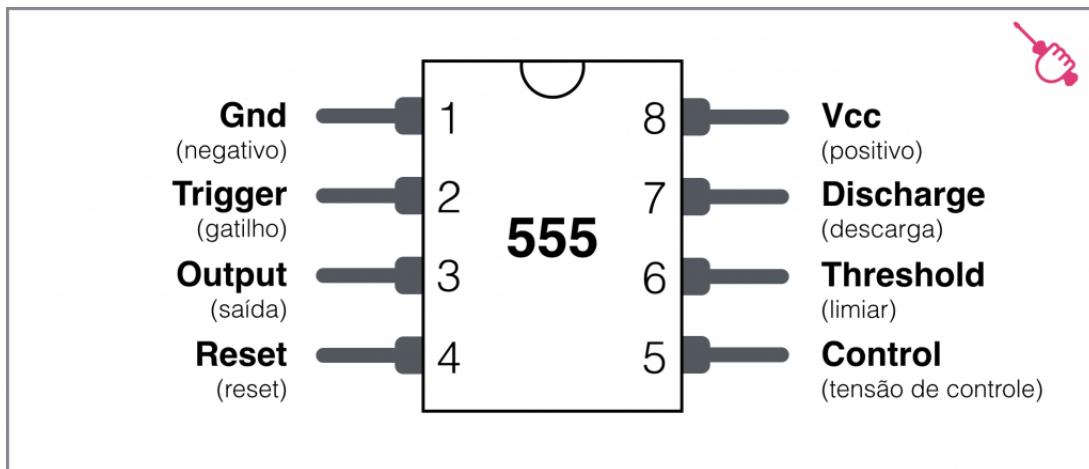
A modulação no CI acontece em dois estágios, um de maior tensão e outro de menor tensão. O de maior tensão compara o sinal do áudio com o da descarga do capacitor e

Tabela 4 – Terminais do CI 555.

Pino	Nome	Função
1	GND	Aterramento(0 V)
2	TRIG	Um pulso de tensão baixo ativa o modo biestável(< 1/3 Vcc)
3	OUT	Saída do sistema que assume o valor máximo de +Vcc
4	RESET	Pode se interromper um ciclo mandando um pulso de Reset
5	CV	Permite acesso ao divisor interno de tensão (2/3 VCC).
6	THRES	Um pulso alto de tensão desativa o modo biestável(> 2/3)
7	DISCH	Descarrega o capacitor que deverá ser acoplado a esse terminal
8	VCC	Alimentação do circuito, que vai de 5 V a 15 V

Fonte: Wikipedia

Figura 19 – Terminais do invólucro do CI 555.



Fonte: Blog Fazedores

o de menor tensão compara o mesmo sinal de descarga do capacitor com o sinal de clock do sistema. No final esses sinais comparados ligam e desligam um flip-flop que fornece a modulação PWM em sua saída. Suas formas de onda são vistas na figura 21.

Figura 20 – Representação da modulação com circuito lógicos.

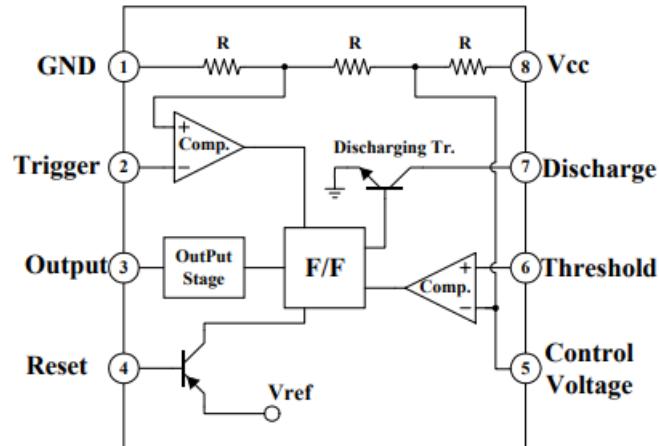
Internal Block Diagram

Imagen retirada do datasheet fornecido pela Fairchild.

Figura 21 – Formas de Onda na modulação PWM existentes no CI 555 na modulação PWM.

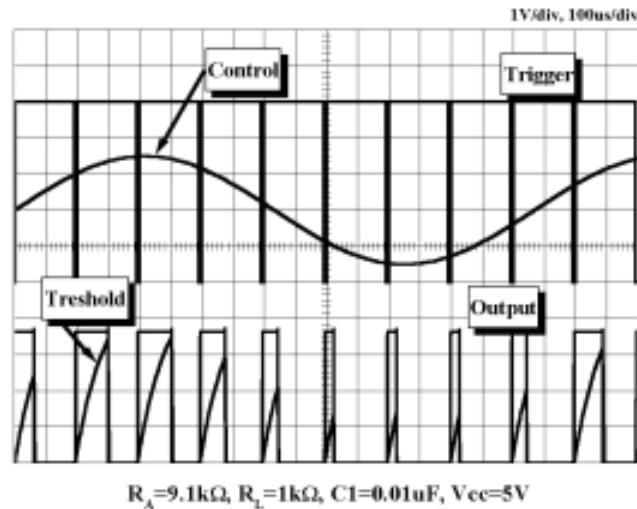


Imagen retirada do datasheet fornecido pela Fairchild.

3.2.2 Arduino

Figura 22 – Placa Arduino com suas características.

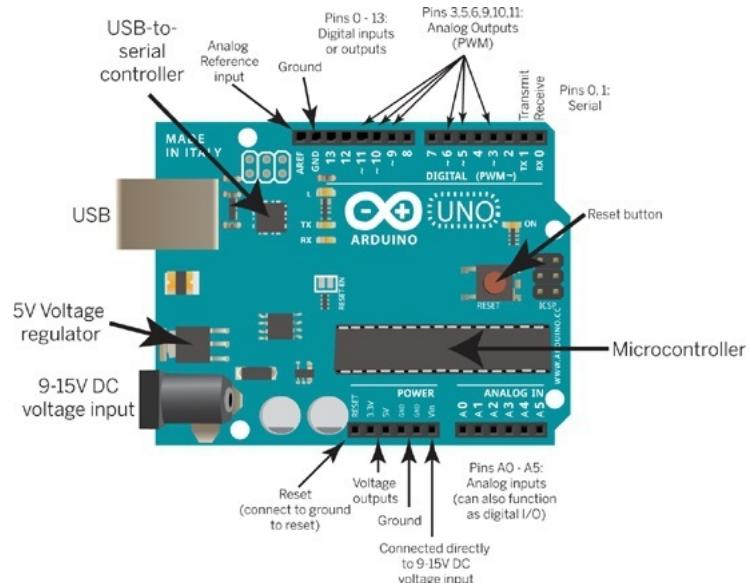


Imagen retirada do blog Structure Of Arduino

Abaixo encontra-se um pequeno resumo geral encontrado na Wikipedia com as especificações do Arduino.

O Arduino é uma plataforma de prototipagem eletrônica de hardware livre e de placa única, projetada com um microcontrolador Atmel AVR com suporte de entrada/saída embutido, uma linguagem de programação padrão, a qual tem origem em Wiring, e é essencialmente C/C++. O objetivo do projeto é criar ferramentas que são acessíveis, com baixo custo, flexíveis e fáceis de se usar por principiantes e profissionais. Principalmente para aqueles que não teriam alcance aos controladores mais sofisticados e ferramentas mais complicadas. Seu objetivo é a de facilitar a vida de desenvolvedores para montar pequenos protótipos eletrônicos.

Os primeiros protótipos da plataforma Arduino surgiram em 2005 na cidade de Ivrea, cidade ao norte da Itália com cerca de 23000 habitantes. O intuito inicial era de integrar e interagir em projetos escolares de forma a ter um custo menor que os sistemas de prototipagem existentes na época.

O Arduino é uma ferramenta importante no mundo da engenharia eletrônica/computação, e veio para padronizar muito dos aspectos de eletrônica aplicada a embarcados e de métodos de compilação que já existiam em outros sistemas como o PIC, que é fabricada pela Microchip. Sua simplicidade faz com que o Arduino saia do campo da engenharia e entre em muitos projetos de Arte, Design e Educação. Muitos leigos e hobbystas começam simples projetos de forma fácil e intuitiva com a plataforma. Uma representação da plataforma com seus

principais componentes pode ser vista na figura 22.

3.2.2.1 Modulação PWM de áudio via Arduino

Com 50000 placas vendidas até o outubro de 2008, o Arduino tem a vantagem de ser uma plataforma popular ao redor do mundo por conta do seu hardware ser de livre acesso. Possibilitando diversas pessoas a desenvolverem circuitos eletrônicos a um custo ainda menor que a praticada pelo mercado. E na medida que o tempo avança pessoas ao redor do mundo podem aprender e desenvolver projetos utilizando-se de códigos livres de licença na internet, criando e organizando assim grandes bibliotecas com código igualmente livre. Dessa idéia surgiu o desenvolvimento da biblioteca Mozzi [10], biblioteca capaz de gerar sons e efeitos sonoros com a plataforma Arduino e que também modula em PWM (nas placas de arquitetura AVR). O sinal de áudio entraria no pino analógico 0 da placa e seria reproduzido em tempo real na saída do pino digital 9, pino onde internamente estaria a função do timer 0 do processador. O projeto ainda está em processo de desenvolvimento e a parte da modulação em PWM ainda não foi devidamente testada pelo seu desenvolvedor. Esse processo inacabado pode ser visto pelo tipo de som saído da placa, na qual pode se constatar o excesso de ruído. Descarta-se então a ideia, porém vale o acompanhamento do desenvolvimento por ser uma biblioteca com muitas funções interessantes.

3.2.2.2 Modulação PCM via Arduino e a biblioteca TMRpcm.h

Com um processador de baixo custo em mãos muitos profissionais de sistemas móveis disponibilizaram uma parte de seus trabalhos para outros desenvolvedores poderem incorporar seus projetos. Essa iniciativa proporciona uma melhora significativa nos projetos independentes da comunidade. Surgiu então a simples biblioteca PCM.h[12] onde graças a ela muitos hobbystas e makers pudessem acoplar junto com seu processador seus cartões de memória (que se utilizam desse tipo de modulação) e com isso aprimorar seus projetos. Tais como robôs falantes e cancelas eletrônicas. A IDE do Arduino já conta com uma bliblioteca nativa para leitura e escrita de cartões SD. Sendo assim, da junção dessas bibliotecas surge uma biblioteca otimizada que é a TMRpcm [13], que utiliza melhor a modulação PCM com os arquivos inseridos dentro do cartão SD.

A biblioteca é responsável pela leitura dos dados em PCM provinda do cartão de memória e a transforma em saída PWM para as portas preparadas para tal. Por mais interessante que a plataforma Arduino seja ela não é forte o suficiente para processar sinais com alta frequência como as que são utilizadas nos formatos de áudio mais comuns.

No anexo será disponibilizada uma explicacão geral sobre suas funções específicas.

3.2.2.2.1 Cartão SD

Com seu surgimento em câmeras fotográficas, os cartões SD se tornaram parte vital para aparelhos portáteis como os smartphones, por conta de seu tamanho reduzido, relativa alta capacidade de armazenamento, baixo consumo e alta velocidade de acesso.

Figura 23 – Mudança de tamanho do cartão SD.

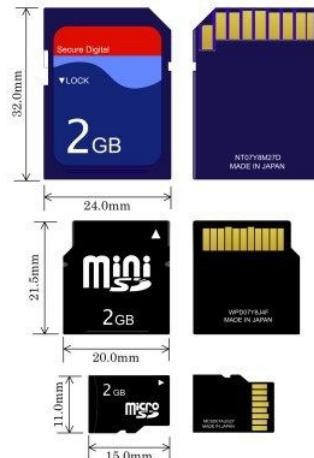


Imagen retirada da Wikipedia.

Todo cartão SD tem o mesmo padrão tanto na parte mecânica quanto na parte elétrica quanto no seu desgin. A responsável pelo design é a SD Association. Com ela se sabe que independente da marca da fabricante se tem conhecimento de seu tamanho físico, local dos terminais, tensão de operação (2.7 - 3.5 V) e sua arquitetura básica. Essa padronização é de suma importância para projetos como esse uma vez que é de fácil aquisição qualquer componente adicional para utilização. Sua forma pode ser vista na figura 23 e sua arquitetura na figura 24.

3.2.3 Propostas de Circuitos para a Modulação

A seguir serão mostradas as propostas de circuito para se obter a modulação do áudio.

3.2.3.1 Circuito de Modulação Digital com 555

Após a conclusão das topologias do estágio de potência entram os testes dos circuitos de modulação, uma vez esses circuitos serão a entrada do sistema propriamente dito. De forma análoga, muitas abordagens podem ser adotadas para essa tarefa. A mais simples forma encontrada na literatura foi a com o circuito integrado 555, por ser um componente de fácil aquisição e fácil entendimento este CI foi o escolhido para essa tarefa. Seu circuito pode ser visualizada na figura 25.

Figura 24 – Arquitetura padrão de um cartão SD.

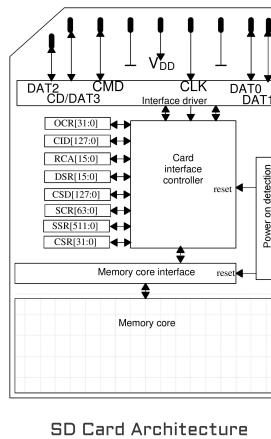
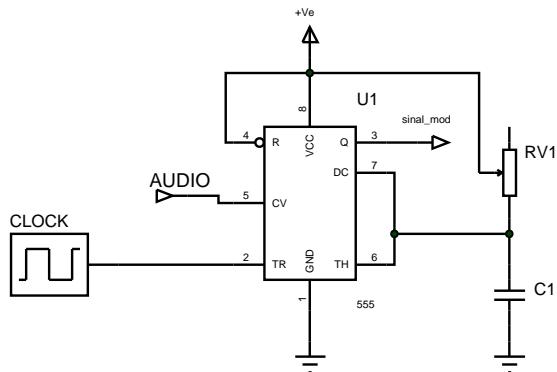


Imagen retirada do site Vishnu M Aiea

Figura 25 – Modulação com 555.

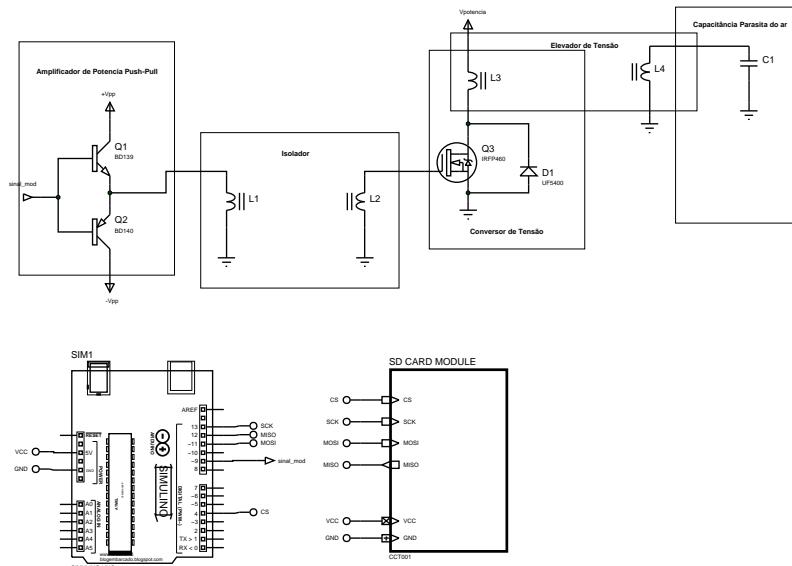


Fonte: Autor

3.2.3.2 Circuito de Modulação Digital com Microcontrolador

Uma outra possível forma de modular o sinal de entrada é utilizando um processador como mostrado na figura 26. O mesmo estará recebendo o sinal como no exemplo da figura de um cartão de memória, o microcontrolador só precisará estar programado para a reprodução desse sinal.

Figura 26 – Exemplo de possível circuito de modulação com processador, no caso com o processador da ATMega e utilizando módulo de cartão SD.



Fonte: Autor

4 O Plasma Speaker

Os componentes que serão listados nessa seção foram escolhidos para compor os circuitos que foram propostos na seção anterior e todas foram escolhidas de forma bastante prática, parte dos componentes foram encontrados nas dependências da UCP e alguns foram encontrados em sucata e adaptados para o sistema. Foram feitas a conferências dos datasheets dos componentes e seu respectiva teste na bancada utilizando ferramentas de bancada como osciloscópio, geradores de sinais e instrumentos de medição diversos. Os testes foram conduzidos para comprovar a eficiência dos mesmos para serem utilizados no sistema.

4.1 Fontes de Alimentação

Duas fontes independentes foram montadas para alimentar cada estágio, um próprio para o circuito que irá modular o sinal de áudio (de aproximadamente 14 V_{DC}) e um próprio para o circuito de potência (90 V_{DC}). Dessa forma consegue-se isolar de maneira mais eficiente os dois estágios, uma vez que precisa-se de uma distância considerável entre o estágio de maior potência do estágio de modulação. O campo magnético gerado pelo circuito de potência interferirá com o funcionamento do circuito eletrônico. Ambas poderão ser vistas no esquemático geral presente no Apêndice B.

4.2 GDT

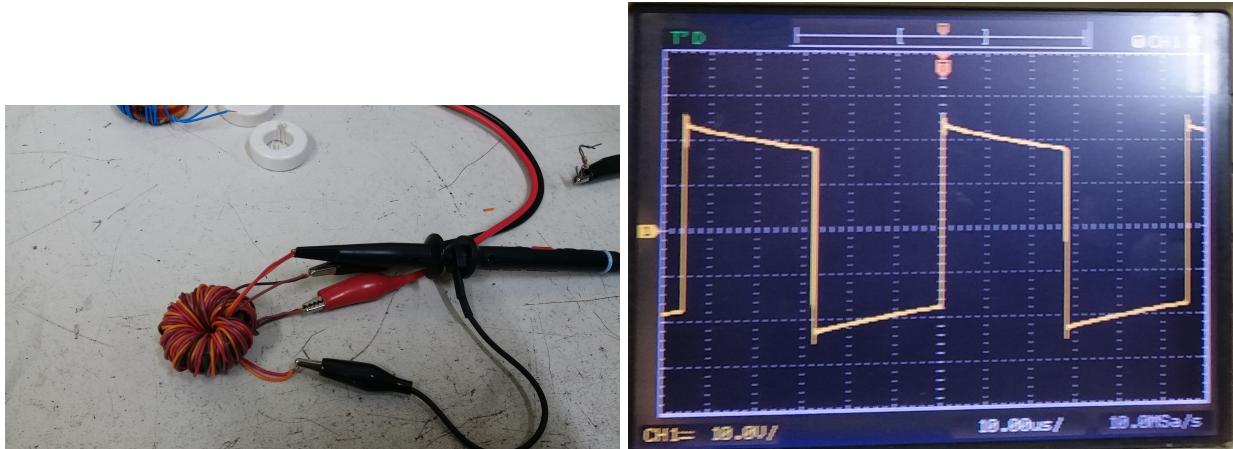
Foi confeccionada um isolador que ajuda a aumentar a tensão provinda da modulação, além de cumprir a principal função de isolar os estágios em que há diferença de tensão. O GDT montado e sua resposta podem ser vistas na figura 27.

4.3 Transformador Elevador de Tensão

Como dito na fundamentação teórica, naturalmente deveria-se confeccionar um isolador que atendesse ao projeto. Porém esse tipo de componente felizmente pôde ser encontrado em sucata o que ajudou com o prosseguimento ágil do projeto. O componente foi devidamente testado com parâmetros estimados de trabalho e apresentou resultados satisfatórios. O transformador pode ser visto na figura 28.

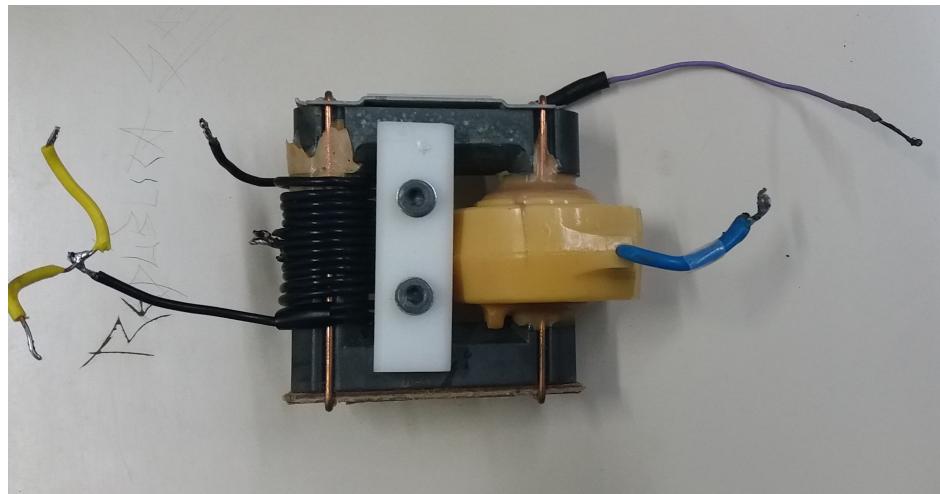
Porém, pelo componente apresentar a resina de proteção ficou-se impossibilitado de realizar a medição de parâmetros importantes tais como número de espiras, tamanho de seção e por razão desse impedimento não conseguindo calcular valores como a força magnética.

Figura 27 – GDT montado e sua respectiva resposta a uma onda quadrada.



Fonte: Autor

Figura 28 – Transformador Elevador de Tensão selecionado.



Fonte: Autor

4.4 Transistor do Conversor Half-Bridge

Os projetos de Bobinas de Teslas mais avançados utilizam transistores industriais do tipo IGBT como o FF300R12KS4, que suporta uma tensão elétrica de 1200 V e fornecem uma corrente elétrica de 600 A. Projetos menores também utilizam outros transistores do tipo IGBT por conta de suas excelentes características elétricas porém seu preço notoriamente elevado, se comparado com os MOSFETs, torna o projeto inviável.

O transistor a ser utilizado deverá ter as seguintes características:

- Suporte altas tensões

- Tenha uma baixa resistência interna (menor dissipação de calor)
- Sejam de rápida comutação

Entende-se por rápida comutação um componente que têm a somatória dos tempos de subida (t_r), tempo de descida (t_f) e tempo de delay (t_d) menor que 10% do tempo de chaveamento imposto pelo sistema. A base para o projeto foi a frequência de operação máxima do Arduino que é de 16kHz de frequência ou $62.5 \mu\text{s}$.

- Consiga chavear correntes altas
- Seja relativamente barato

Com essas características o transistor que melhor atendia os requisitos foi o IRFP 460 e suas características podem encontradas no Apêndice B

4.5 Conversor Push-Pull

Situado antes do isolador o circuito de push-pull precisa nos garantir que o circuito terá uma corrente suficiente para poder ativar os MOSFETs de potência. A forma para dimensionar esses correntes se encontra na equação 4.5.0.1:

$$I_g = C_{gs} \frac{dV_{gs}}{dt} \quad (4.5.0.1)$$

Onde:

I_g é a corrente que passa no terminal de gate do nosso Mosfet, que por consequência é a corrente nos transistores de push-pull [A]

C_{gs} é a capacidade intrínseca equivalente no Mosfet [F]

dV_{gs} é a tensão aplicada entre o gate e o source [V]

dt é o tempo de subida característica de subida do Mosfet especificado [s]

Logo a corrente aproximada a qual os transistores de push-pull devem suportar é de :

$$I_g = 4200 \times 10^{-12} \times \frac{10}{59 \times 10^{-9}} = 0.712A$$

Pelos datasheets dos transistores BD139 e BD140 se vê que os transistores conseguem fornecer uma corrente de coletor de 1.5 A. Logo temos esses dois transistores como os escolhidos para o Push-Pull.

A análise estática do push-pull é igual a de ponte completa e a de meia ponte. A diferença é que a eficiência desse é menor ($\approx 78\%$)

4.6 Diodos

Sendo o componente eletrônico semicondutor mais simples os diodos ganham espaço em muitos projetos de eletrônica, por sua utilidade como sistema de proteção e pelo seu preço extremamente acessível. Por conta da sua alta aplicabilidade existem diodos dos mais variados tipos e classes, abrangendo a mais variada gama de potências. Como os Schottky, Dumper, de Sinal, Retificador e entre outros. Cada classe possuindo uma finalidade específica, sendo de extrema importância seu correto dimensionamento e comportamento específico na frequência de trabalho a qual foi projetada.

4.6.1 Díodo de Alta Tensão e Rápida Comutação

Esses diodos são necessários para a proteção dos transistores de potência e eles não podem interferir com o chaveamento das mesmas. Logo seu tempo de subida e descida devem ser os mais baixos possíveis além de ter uma alta tensão de operação.

Um problema encontrado quando se há uma carga indutiva são os pulsos que são gerados pelo armazenamento de energia, pulsos que podem danificar o dispositivo de chaveamento. A forma de se proteger desses pulsos é colocando-se um diodo em paralelo com o dispositivo, dessa forma o diodo cria uma caminho alternativo pro sinal pulsado e consegue aliviar a tensão de carga para o transistor. Uma forma de se dimensionar esses diodos é utilizando a equação do chute do indutor presente na equação 4.6.1.1.

$$V = L_{primario} \times \frac{dI}{dt} \quad (4.6.1.1)$$

Onde:

V é a tensão elétrica na qual o diodo deverá suportar [V]

L é a indutância que o primário do transformador que gerará os pulsos possui[H]

dI é a variação de corrente que o dispositivo irá chavear [A]

dt é o tempo de subida do diodo [s]

Como não houve uma medição dos parâmetros do transformador utilizado então teve-se que estimar esses valores.

$$V = 200 \times 10^{-6} \times \frac{1}{200 \times 10^{-9}} = 1kV$$

Logo o diodo deverá suportar no mínimo um pulso de 1 kV vindo do indutor.

Dos diodos que se possuía o que melhor atendia esses requisitos foi o UF5404G. Suas especificações podem ser vistas na figura 29.

Uma característica importante de se citar é que na montagem do protótipo, esse componente deve estar o mais próximo possível do transistor. Por uma maior eficiência da segurança.

Figura 29 – Especificações da família de diodos 54xxg.

Characteristic	Symbol	UF 5400G	UF 5401G	UF 5402G	UF 5403G	UF 5404G	UF 5406G	UF 5407G	UF 5408G	Unit
Peak Repetitive Reverse Voltage Working Peak Reverse Voltage DC Blocking Voltage	V _{RRM} V _{RWM} V _R	50	100	200	300	400	600	800	1000	V
RMS Reverse Voltage	V _{R(RMS)}	35	70	140	210	280	420	560	700	V
Average Rectified Output Current (Note 1) @T _A = 55°C	I _O					3.0				A
Non-Repetitive Peak Forward Surge Current 8.3ms Single Half Sine-Wave Superimposed on Rated Load (JEDEC Method)	I _{FSM}					150				A
Forward Voltage @I _F = 3.0A	V _{FM}			1.0		1.3		1.7		V
Peak Reverse Current @T _A = 25°C At Rated DC Blocking Voltage @T _A = 100°C	I _{RM}				10	100				µA
Reverse Recovery Time (Note 2)	t _{rr}			50			75			nS
Typical Junction Capacitance (Note 3)	C _J			45			36			pF
Typical Thermal Resistance Junction to Ambient (Note 1) Typical Thermal Resistance Junction to Lead (Note 1)	R _{θJA} R _{θJL}				20	8.5				°C/W
Operating and Storage Temperature Range	T _J , T _{TSG}				-65 to +150					°C

Imagen retirada do datasheet fornecido pela Won-Top Eletronics.

4.6.2 Diodo 1N4148

Devido ao inevitável fato de se ter um tempo de descida superior ao tempo de subida o sinal que sairá da base do transistor do conversor half-bridge sairá de forma distorcida atrapalhando mesmo que pouco o funcionamento do transistor. De forma a amenizar esse funcionamento recomenda-se usar um diodo rápido de sinal no ciclo negativo e um resistor de atraso no ciclo positivo.

O diodo escolhido foi o 1N4148, por ser fácil de se encontrar e de ter um bom comportamento. Suas especificações podem ser vistas na figura 31.

4.6.3 Diodo Zener

Diodos Zeners de 15 V foram escolhidos para proteger os gates dos MOSFETs pois pode-se ocorrer um surto na fonte e o dispositivo precisa estar minimamente protegido para tal, mesmo que os transistores de potência sejam projetados para tensões consideravelmente altas. Quando ligados em anti-paralelo os diodos protegem a carga nos dois ciclos existentes do sinal.

Figura 30 – Especificações do diodo 1N4148.

PARTS TABLE				
PART	ORDERING CODE	TYPE MARKING	CIRCUIT CONFIGURATION	REMARKS
1N4148	1N4148-TAP or 1N4148TR	V4148	Single	Tape and reel / ammopack

ABSOLUTE MAXIMUM RATINGS ($T_{amb} = 25^{\circ}\text{C}$, unless otherwise specified)				
PARAMETER	TEST CONDITION	SYMBOL	VALUE	UNIT
Repetitive peak reverse voltage		V_{RRM}	100	V
Reverse voltage		V_R	75	V
Peak forward surge current	$t_p = 1 \mu\text{s}$	I_{FSM}	2	A
Repetitive peak forward current		I_{FRM}	500	mA
Forward continuous current		I_F	300	mA
Average forward current	$V_R = 0$	$I_{F(AV)}$	150	mA
Power dissipation	$I = 4 \text{ mm}, T_L = 45^{\circ}\text{C}$	P_{tot}	440	mW
	$I = 4 \text{ mm}, T_L \leq 25^{\circ}\text{C}$	P_{tot}	500	mW

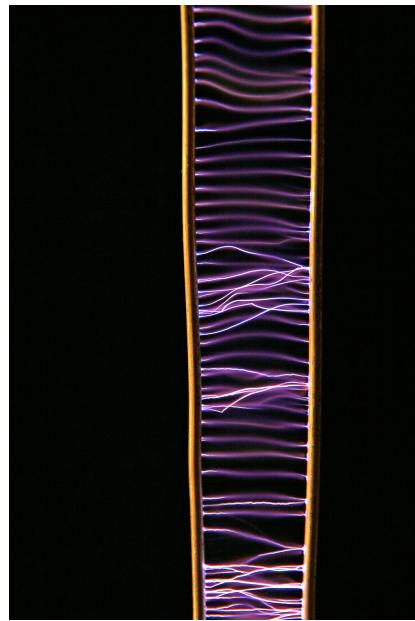
THERMAL CHARACTERISTICS ($T_{amb} = 25^{\circ}\text{C}$, unless otherwise specified)				
PARAMETER	TEST CONDITION	SYMBOL	VALUE	UNIT
Thermal resistance junction to ambient air	$I = 4 \text{ mm}, T_L = \text{constant}$	R_{thJA}	350	K/W
Junction temperature		T_J	175	°C
Storage temperature range		T_{stg}	-65 to +150	°C

Imagen retirada do datasheet fornecido pela Vishay Semiconductors.

4.7 Materiais Diversos

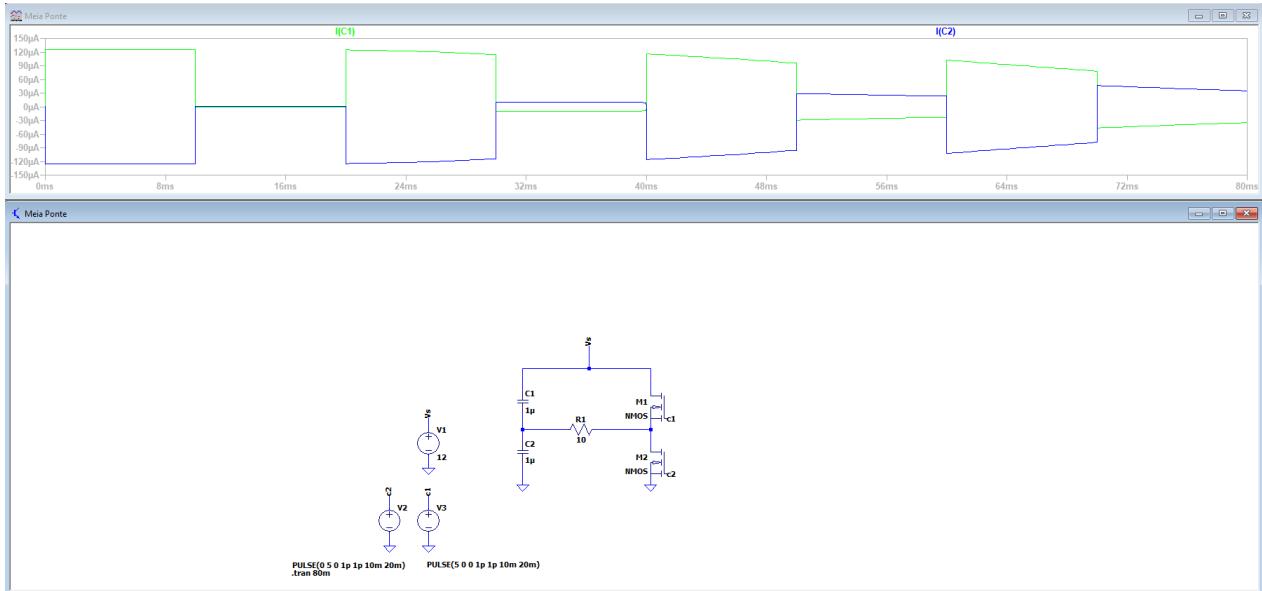
- 2 Resistores 10Ω para retardo do sinal no ciclo negativo. Atuando em paralelo com os diodos 1N4148.
- Dois Arames de baixa resistência (de até uns 10Ω) e que não seja muito fino (como um arame) para o não rompimento por conta dilatação térmica, para se saber o quanto espesso tinha que ser o material foi preciso realizar testes de bancada até se achar um que atendesse. O material tem o objetivo o efeito Jacobs Ladder visto na figura 30.
- 4 Portas lógicas NOT para a inversão e desinversão do sinal modulado e fornecer corrente suficiente para se ativarem os BJTs.
- 2 Capacitores de Poliéster de $1 \mu\text{F}$ com tensão de trabalho de 250 V para uso no conversor *half-bridge*, seu comportamento pode ser visto na figura 32.
- Capacitores Eletrolíticos entre a fonte de potência e o terra. De preferência com alto valor de capacitância pois ele dará uma maior corrente no secundário gerando descargas com intensidades maiores. Sua escolha é a ideal para esse tipo de aplicação por ser necessário um alto valor de capacitância em um volume relativamente pequeno.
- Um dissipador de calor de um tamanho considerável, como o que pode ser visto na figura 33, acompanhado de pasta térmica branca ou cinza e uma camada de mica isolando o transistor da carcaça do dissipador. Como eles estarão sujeitos a um chaveamento em

Figura 31 – Jacob's Ladder.



Fonte: Google

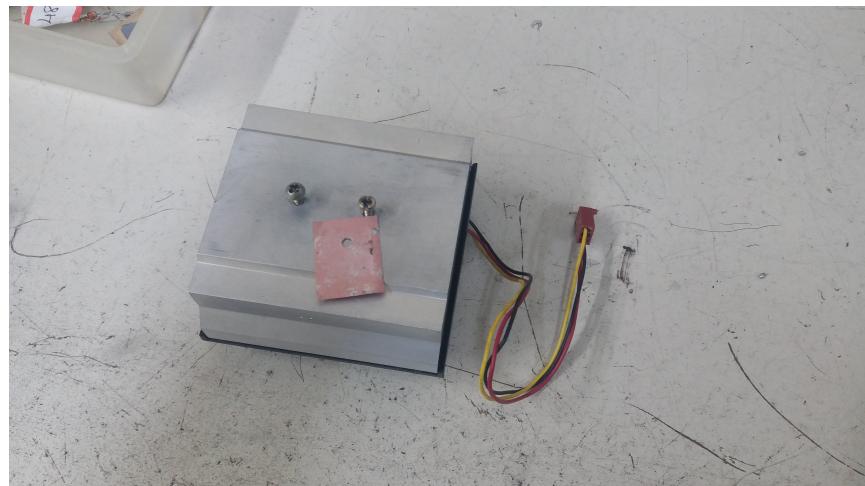
Figura 32 – Corrente nos Capacitores em um conversor de Meia Ponte.



Fonte: Autor. Software Utilizado: LT Spice.

alta potência e alta frequência eles esquentarão de maneira demaisada. Caso não se tenha esse sistema de dissipação pode-se ocasionar a queima dos transistores.

Figura 33 – Dissipador de calor selecionado.



Fonte: Autor

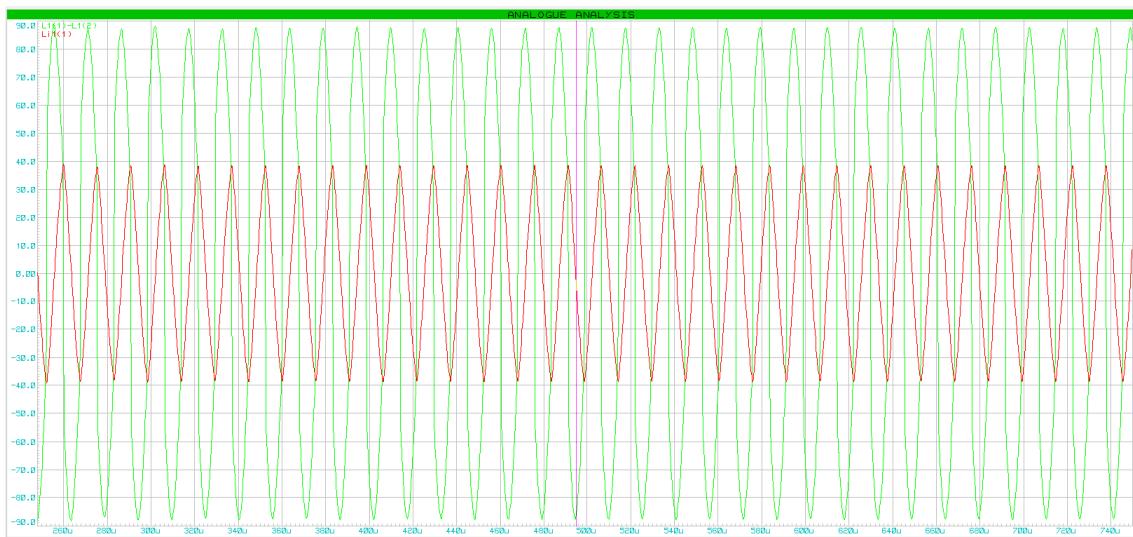
5 Resultados

Nessa seção serão mostrados alguns dos resultados obtidos no projeto. Resultados tanto na parte computacional (simulando partes do projeto) e resultados práticos referentes a construção elétrica e estrutura física do sistema.

5.1 Resultados da Simulação do Circuito

Foi simulado o conversor de Meia Ponte com os componentes citados. Por se tratar de um circuito complexo o tempo de simulação é um tanto quanto elevado, porém é de suma importância esse tipo de trabalho computacional uma vez que se precisa ao menos estimar a potência dissipada pelo sistema. A resposta estimada de tensão e corrente pode ser vista na figura 34.

Figura 34 – Resposta estimada do sistema no primário, a estimativa é que o sistema consiga descarregar aproximadamente 1 kW. Entretanto na prática conseguiu-se obter 200 W.



Fonte: Autor. Software Utilizado: Proteus.

5.2 Resultados Práticos

Foram testados em bancada os circuitos de modulação com a plataforma Arduino, e os circuitos de potência com amplificador push-pull e o circuito com conversor half-bridge. Nessa subseção irão ser mostradas os resultados práticos quanto as topologias citadas.

5.2.1 Primeiro Centelhamento

Utilizando apenas o circuito push-pull com transistores BJT foi possível obter o primeiro centelhamento.

Figura 35 – Primeiro Centelhamento reproduzido no laboratório. Estimou-se que a tensão no secundário era de 1000 Volts.



Fonte: Autor.

Utilizando o circuito básico citado na seção 2, um push-pull formado pelos transistores complementares BD139 e o BD140, o GDT e o flyback fizeram com que aparecesse o primeiro centelhamento que aparece na figura 35.

A resposta que o isolador oferece ao alimentar o resto do sistema se encontra na figura 36.

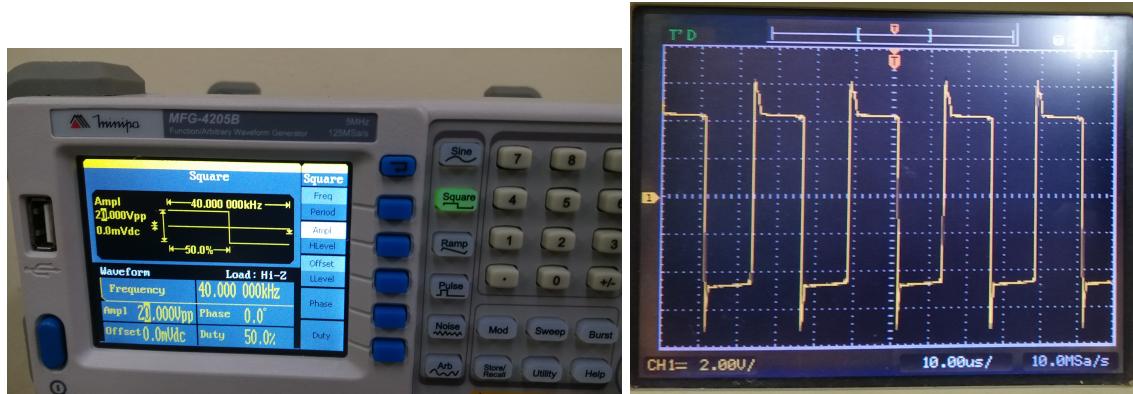
5.2.2 Funcionamento da Bobina e Reprodução do Áudio

Como se trata de um resultado prático, o som e a luz precisam de outros meios além do trabalho escrito para serem devidamente expostos. Para essa finalidade, serão disponibilizados links onde poderá ser visto na prática o funcionamento do *Plasma Speaker* com o conversor half-bridge.

<https://www.youtube.com/channel/UC3sG21YkeEm0LiAqX7QuXmg>

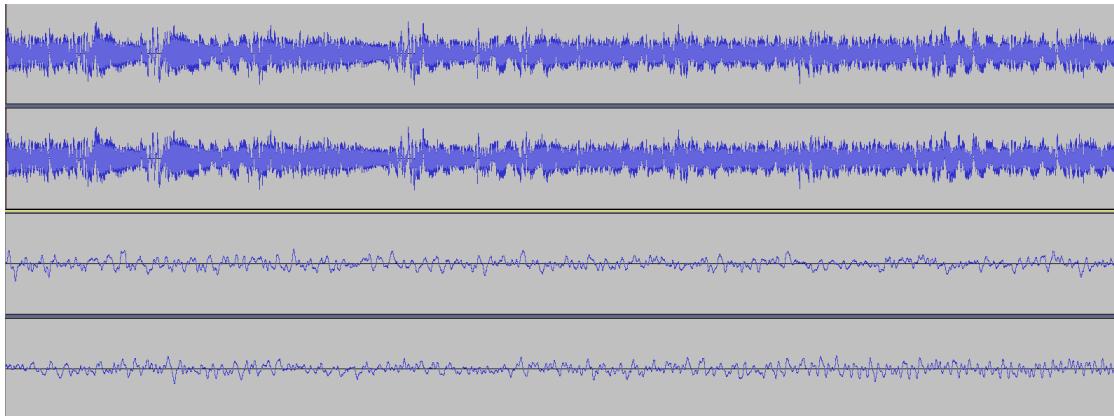
Foi feito também uma análise do sinal de áudio antes e depois da modulação e seu resultado pode ser visto pela figura 37 .

Figura 36 – Resposta do GDT quando ligado ao sistema.



Fonte: Autor.

Figura 37 – Análise do áudio original (duas faixas de baixo) com a do áudio modulado pelo Arduino (duas faixas de cima e gravado com o celular).

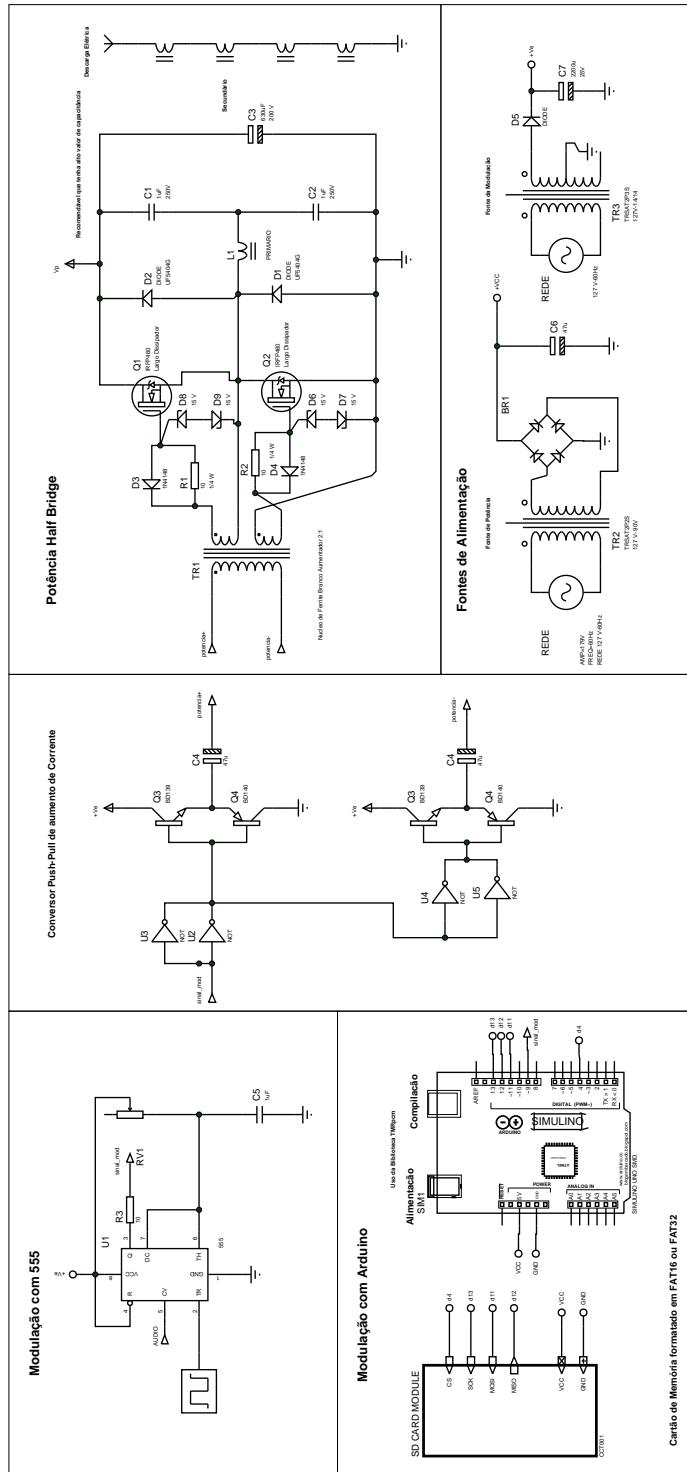


Fonte: Autor. Software Utilizado: Audacity.

5.2.3 Esquemático do Sistema

O esquemático geral do *Plasma Speaker* pode ser visto na figura 38.

Figura 38 – Diagrama esquemático do circuito.



Fonte: Autor

6 Conclusão e Considerações Finais

Com o trabalho pôde-se estudar e aplicar conceitos relacionados a áudio, eletrônica de potência, termodinâmica e sistemas embarcados. Essa interdisciplinaridade é de suma importância para um aluno que está se formando em engenharia cumprindo-se com a idéia de que uma Bobina de Tesla é um excelente material de estudo e de aplicação para quem se interessa por projetos eletrônicos. Uma vez que se mexe com práticas importantes da área como isolamento de circuitos, áudio digital, dimensionamento de componentes eletrônicos de potência. O projeto em funcionamento na bancada pode ser visto na figura 39.

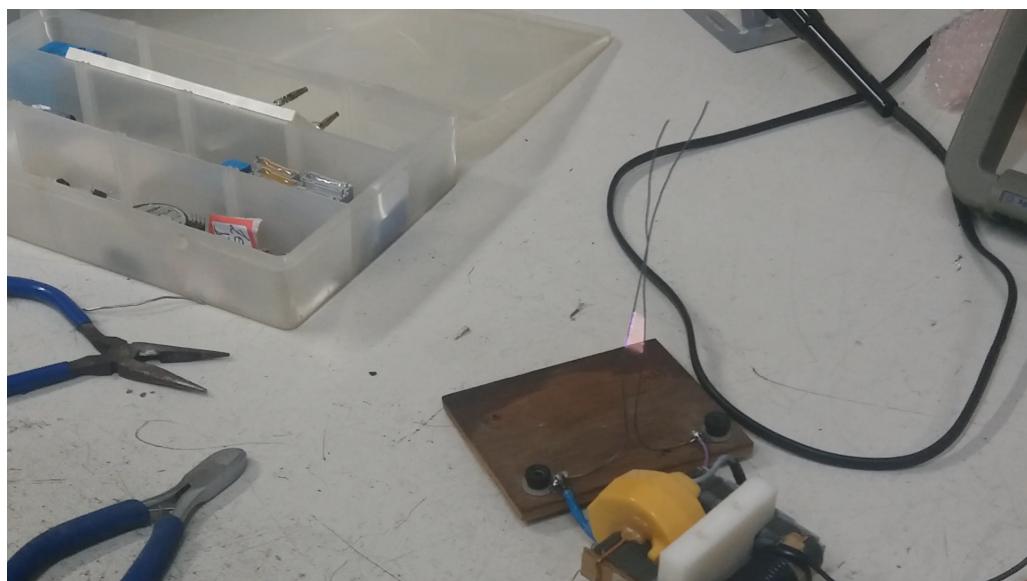
O desenvolvimento do projeto teve sempre como objetivo o apropriado funcionamento prático do sistema, fazendo-se respeitar os conceitos teóricos presentes na literatura. Provando-se eficaz o uso do conversor half-bridge junto com as modulações propostas, oferecendo um sistema capaz de exceder a barreira dielétrica do ar. Aliado com a diferença de pressão do ar causada pela variação do duty cycle no bloco de modulação obter uma reprodução de áudio com boa performance.

O uso dos MOSFETs especificados na conversão DC/AC foi bem eficiente, uma vez que na bancada pôde-se constar que os mesmos trabalhavam em uma faixa segura de temperatura, não comprometendo com o funcionamento do sistema e realizando o chaveamento com a desejável eficiência.

Os núcleos de ferrite encontrados tanto para o isolamento do circuito quanto para elevação de tensão para o surgimento do arco voltáico foram bem eficientes, respondendo bem as altas frequências que eram fornecidas pelo Arduino quanto nos testes feitos com gerador de sinais.

Por se tratar de uma primeira versão inúmeras avanços podem ser feitos para o seu aperfeiçoamento. O autor e a Universidade não pouparão esforços para que o sistema seja melhorado e ganhe uma maior complexidade com o passar do tempo. Possíveis melhorias podem ser a de um projeto de um amplificador classe E ao invés do Push-Pull utilizado, um conversor Buck- Boost também pode ser idealizado junto com os professores da Universidade com aplicação em correção ativa do fator potência aumentando a potência útil do sistema, além de um estudo acerca de outros projetos de modulação tais como modulação AM e FM com a intenção de obter uma maior qualidade sonora, uma outra bobina pode ser construída a fim de se obter uma reprodução com dois canais (*stereo*) ao invés de somente um (*mono*).

Figura 39 – Foto do protótipo com conversor half-bridge montado em funcionamento.



Fonte: Autor.

Referências

- [1] BOYLESTAD; Robert ,NACHELSKY,Louis. **Dispositivos Eletrônicos e Teoria De Circuitos**, 11^a edição, Pearson Education do Brasil, 2013.
- [2] HART, Daniel W. . ***Power Eletronics***, Mc Graw Hill, 2011.
- [3] TIBURY, Mitch. ***The Ultimate Tesla Coil Design and Construction Guide***, Mc Graw Hill, 2008.
- [4] Lone Oceans, <http://www.loneoceans.com/labs/>, Acesso em: Agosto 2018
- [5] História sobre Nikola Tesla,https://www.researchgate.net/publication/310480125_Bobina_de_Tesla_Historia_e_Construcao_Didatica, Acesso em: Outubro 2018
- [6] Características dos Toroides, <http://doradioamad.dominiotemporario.com/doc/ENTENDENDO%20TOROIDES%20PY2ADN.pdf>, Acesso em: Outubro 2018
- [7] Artigo do Newton C Braga sobre o 555, <http://newtoncbraga.com.br/index.php/38-newton-c-braga/conversando/11979-utilizando-o-555-art1386>, Acesso em: Novembro 2018
- [8] Sobre as ferrites, <https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/application-notes/AN-1368.pdf>, Acesso em: Setembro 2018
- [9] Artigo Digitalizado do Nagaoka, <http://www.g3ynh.info/zdocs/refs/Nagaoka1909.pdf>, Acesso em: Outubro 2018
- [10] Domínio do Mozzi no GitHub, <https://sensorium.github.io/Mozzi/>, Acesso em: Outubro 2018
- [11] Artigo de Tim Barass criador do Mozzi, https://www.researchgate.net/publication/2018/298980875 MOZZI_INTERACTIVE_SOUND_SYNTHESIS_ON_THE_OPEN_SOURCE_ARDUINO_MICROPROCESSOR, Acesso em: Setembro 2018
- [12] Biblioteca PCM para arduino, <https://github.com/damellis/PCM>, Acesso em: Setembro 2018
- [13] Biblioteca TMRpcm, <https://github.com/TMRh20/TMRpcm>, Acesso em: Setembro 2018

A A Biblioteca TMRpcm

A.1 Modulação PCM via Arduino

Esse anexo tem a intenção de mostrar o básico da biblioteca utilizada no processador Arduino, expondo suas funções e o hardware necessário para o seu funcionamento.

A.1.1 Como reproduzir músicas no Arduino?

Nessa seção será mostrado um tutorial de como reproduzir músicas de forma básica utilizando o Arduino e a biblioteca TRMpcm.

```

1
2 #include <SD.h>                                // precisa incluir a
   biblioteca SD
3 //#define SD_ChipSelectPin 53 // No arduino MEGA usa-se o pino
   53 para SS
4 #define SD_ChipSelectPin 4 // No arduino, Uno, nano,
   Duemillanove usa-se o 4
5 #include <TMRpcm.h>                            // precisa incluir a biblioteca
   TMRpcm
6 #include <SPI.h>                                //Precisa incluir a biblioteca
   de comunicacao SPI
7
8 TMRpcm tmrpcm;      // cria-se um objeto para o uso nesse sketch
9
10 void setup() {
11
12   tmrpcm.speakerPin = 9; //5,6,11 or 46 para saida de speaker no
   Arduino Mega, 9 no Uno, Nano, etc
13
14   Serial.begin(9600);
15   if (!SD.begin(SD_ChipSelectPin)) { // verifica se o cartao
   esta presente e pode ser utilizado
16   Serial.println("SD_fail");    //printe no Serial Monitor SD
   fail

```

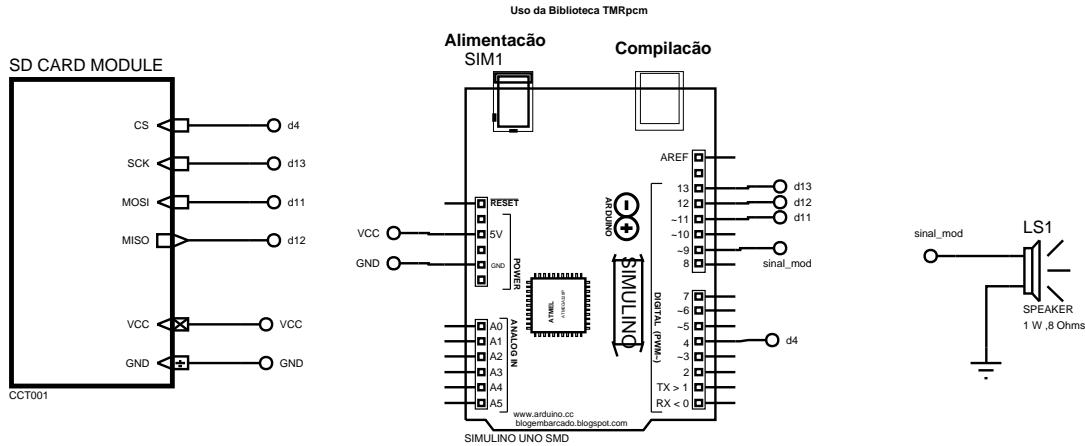
```
17     return; // Faça nada se o SD não estiver disponível
18 }
19 tmrpcm.play("music"); //O arquivo de música "music" irá tocar
20     toda vez que o arduino for ligado ou resetado.
21 }
22 void loop() {
23
24     if(Serial.available()) {
25         if(Serial.read() == 'p'){ // mande o caractere p no Serial
26             Monitor para reproduzir a música
27             tmrpcm.play("music");
28         }
29     }
30 }
```

Com esse código consegue-se ver a configuração básica do hardware assim como suas bibliotecas e funções utilizadas além da inserção de um arquivo chamado music para ser reproduzido pelo código. Ao todo temos 3 bibliotecas inclusas, sendo 2 nativas além de 1 função da biblioteca externa e 1 arquivo de áudio.

Para se inserir uma música reproduzível pelo sistema deveremos cumprir certos passos, o primeiro é que o cartão deverá estar no formato adequado. Cartões de até 2 GB deverão ter o formato FAT16, cartões maiores o formato FAT32. O áudio deverá estar em formato WAV e seu tutorial será mostrado nas figuras de número 42 a 46 utilizando o software gratuito Audacity. O circuito mínimo necessário para se testar o código dito é o que está presente na figura 40.

Primeiramente precisamos ter o arquivo de música em qualquer formato digital (mp3, ogg, wav, FLAC,etc...), inserimos esse áudio no Audacity, transformamos o arquivo de reprodução Stereo para Mono, mudamos a amostragem de áudio para 16000 Hz e exportamos o áudio em formato PCM 8-bit sem sinal. Esse formato é formato o reproduzível pela biblioteca e por mais simples que pareça ser o formato tem baixa perda de qualidade e sua facilidade de edição e de leitura a torna ideal para esse tipo de projeto. A figura 41 mostra o módulo de cartão utilizado para a leitura do cartão pelo Arduino.

Figura 40 – Circuito necessário para o teste da modulação no Arduino.



Fonte: Autor.

Figura 41 – Módulo SD para Arduino utilizado.

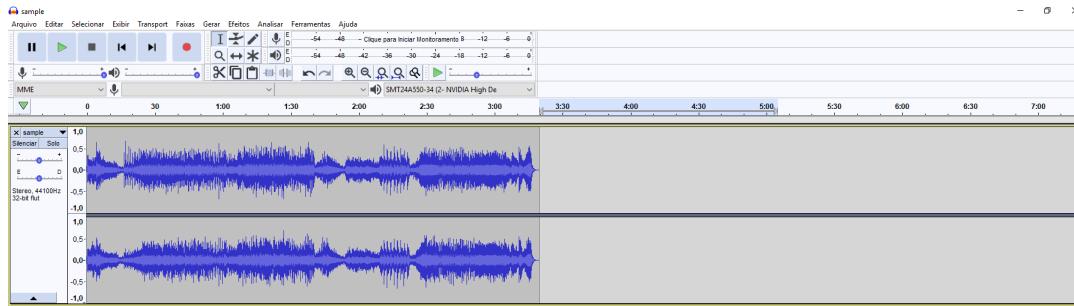


Fonte: Google

A.1.2 Funções da biblioteca

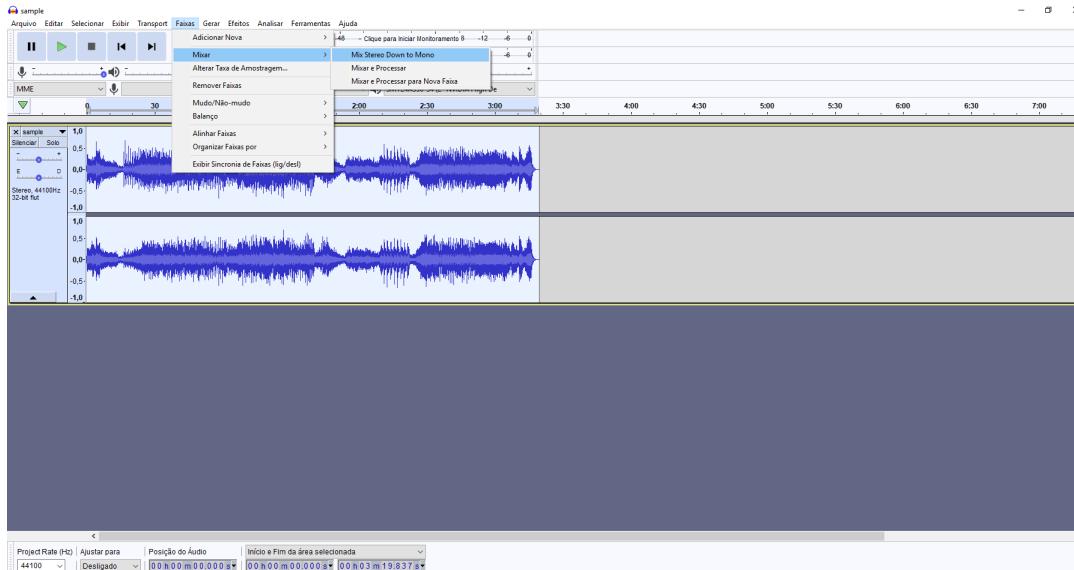
A biblioteca tem as seguintes capacidades: Reproduz áudio em PCM ou em WAV diretamente do cartão SD, aceita formatos em WAV de 8 a 32 kHz em mono, playback assíncrono isso é aceita outros códigos durante a sua reprodução, se utiliza do Timer 1 do Arduino Uno ou timer 4 e 5 do Mega, Pode ter a utilização de dois speakers, tem capacidade de

Figura 42 – Passo a passo sobre como colocar a música no formato certo utilizando o software Audacity. Após esse passo basta inserir o arquivo de áudio no cartão SD. Passo 1.



Fonte: Autor

Figura 43 – Passo a passo sobre como colocar a música no formato certo utilizando o software Audacity. Após esse passo basta inserir o arquivo de áudio no cartão SD. Passo 2.



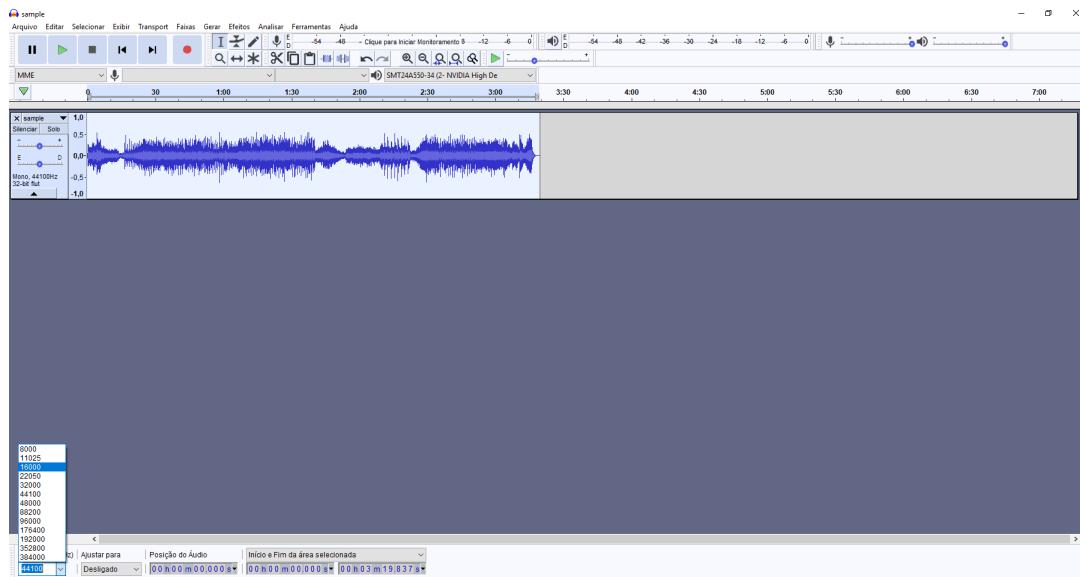
Fonte: Autor

2x de oversampling (reproduzir em frequência maior que a suportada), qualquer Arduino é reproduzível.

Pelo header da biblioteca conseguimos ver as seguintes inclusões com as seguintes explanações e significados.

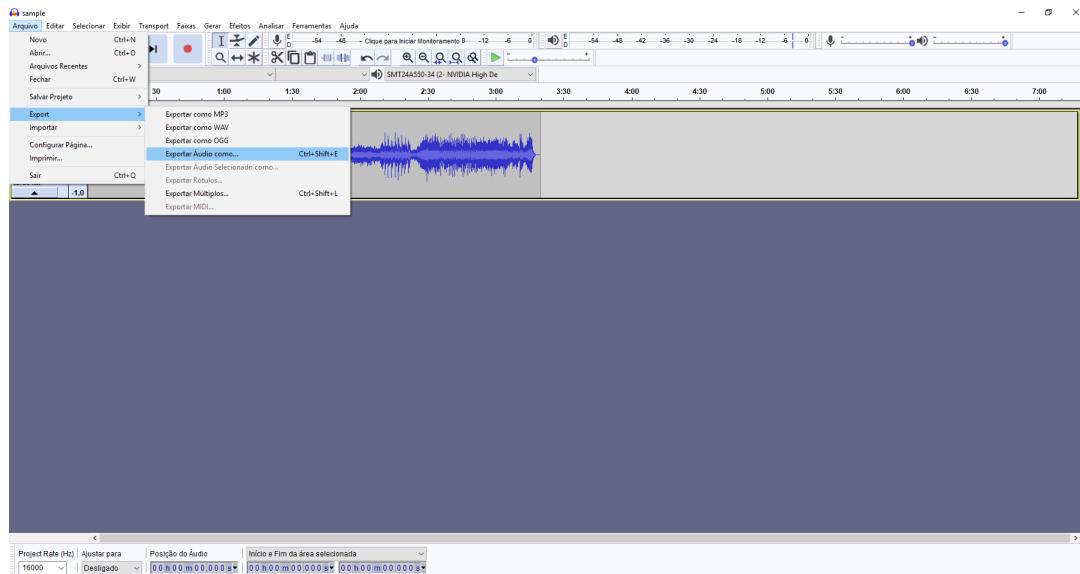
- `#include "Arduino.h";`
Cabeçalho do Arduino, traz as funções nativas do Arduino como delay,attachInterrupt, Timer, entre outros...
- `#include <pcmConfig.h>;`

Figura 44 – Passo a passo sobre como colocar a música no formato certo utilizando o software Audacity. Após esse passo basta inserir o arquivo de áudio no cartão SD. Passo 3.



Fonte: Autor

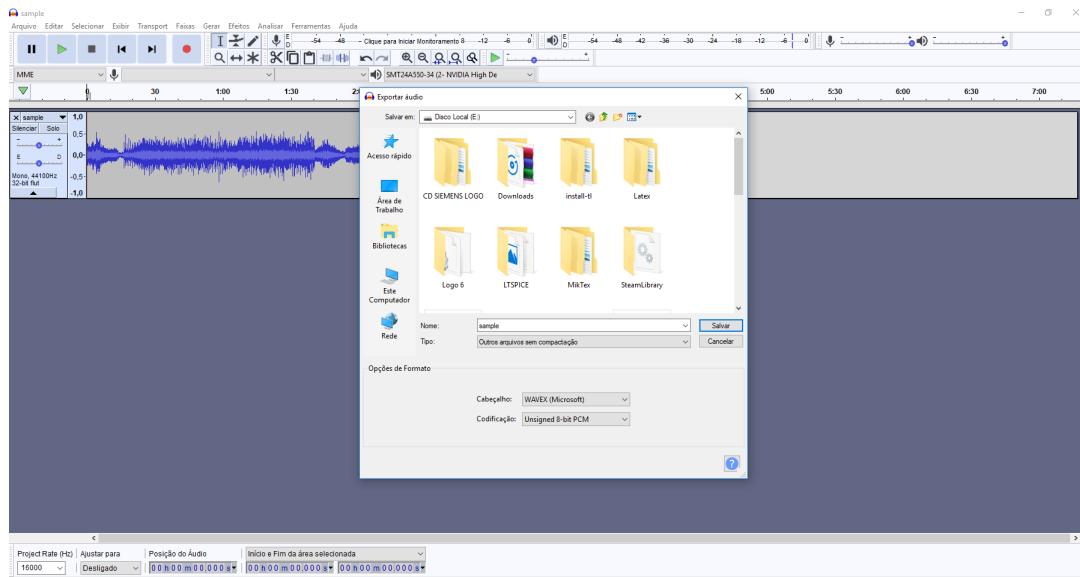
Figura 45 – Passo a passo sobre como colocar a música no formato certo utilizando o software Audacity. Após esse passo basta inserir o arquivo de áudio no cartão SD. Passo 4.



Fonte: Autor

É um arquivo header de teste do sistema, existem muitos defines comentados que se ativados elas podem melhorar a qualidade do som, trabalhar com som estéreo ao invés de mono, gravação de áudio e alocação de espaço para a gravação. Ou utilidades que ficam

Figura 46 – Passo a passo sobre como colocar a música no formato certo utilizando o software Audacity. Após esse passo basta inserir o arquivo de áudio no cartão SD. Passo 5.



Fonte: Autor

desabilitadas do código nativo (como uso de outros Timers, já que o código desabilita essa função para o funcionamento máximo do processador). Se habilita a função a ser utilizada por aqui.

- `#include<pcmRF.h>;`

As funções que a biblioteca contribui, como tocar áudio, transmitir áudio, parar áudio, começar áudio em tempo específico e uma variável boolena se está tocando áudio ou não. Habilitando os registradores necessários para executar tais funções.

- `#include<SD.h>;`

Usa a função SD nativa do Arduino.

- `#include<SdFat.h>;` Utiliza a biblioteca SDFAT vinda do <http://code.google.com/p/sdfatlib/>, ela pode ser utilizada ao invés da SD própria do Arduino (que é baseada na SDFAT, a escolha vai no que o projetista achar melhor para sua aplicação)

- `#include<SPI.h>;`

Biblioteca Nativa do Arduino que comunica o módulo SD com o processador.

- `#include<RF24.h>;`

Utilizado para streaming do sinal.

E com as seguintes funções:

- `play(char* filename);`

Utiliza a função play do pcmRF para reproduzir o áudio que se encontra no SD (device 0), ativa a interrupção de comunicação e habilita os registradores de operação para a leitura do sistema.

Existe também o método multiplo, isso é com mais speakers `play(char* filename, unsigned long seekPoint);` Pode também ser chamado da seguinte forma `play(char* filename, int time);` Para reproduzir no segundo determinado

- `stopPlayback();`

Coloca a variável playing a 0 e desliga o registrador de reprodução de gravação.

- `volume(char vol);`

Aumenta ou diminui o volume do áudio, colocando-se essa função dentro do loop se cria a possibilidade de atribuir um painel de botões para o controle do volume do áudio.

- `setVolume(char vol);`

Lê-se o estado do volume atual e diminui para o volume setado.

- `disable();`

Desabilita o timer no pino de saída e para a música.

- `speakerPin;`

Pino de saída para o speaker, que é o pino 9 para o Uno .

- `pause();`

Lê o bit mais significativo do byte de estado do áudio e verifica se está com a flag de tocando ativa, se sim limpa esse bit e desativa os registradores de modulação

- `quality(boolean q);`

Seta a qualidade do áudio escrevendo na variável do tipo byte optionByte o tamanho

da resolução que ela terá em relação a amostra de áudio passante. Escreva 1 em seu parâmetro para ter o 2x Oversampling.

Existe também o método multiplo `quality(boolean q, boolean q2);`

- `loop(boolean set);`

Pega o terceiro bit menos significativo do byte de estado e seta ele pra variável set, ativando o loop infinito da música no proprio setup do código fonte. Sem precisar colocar um tempo arbitrário de término da mesma caso não saiba.

- `boolean isPlaying();`

Variável booleana para saber se o processador reconhece que tem um áudio sendo executado ou não. Retorna 1 se a música está tocando e 0 se não.

Existe também o método multiplo `boolean isPlaying(which);`

- `uint8_t CSPin;`

A biblioteca SD utiliza o protocolo de comunicação SPI e para haver comunicação entre um dispositivo e outro precisa-se enviar nível lógico 0 e para isso precisa-se definir no processador que pino fará esse papel, por isso encontra-se no header.

Funções avançadas

- `listInfo(char* filename, char *tagData, byte infoNum);`

Pega as informações de uma lista de músicas .

- `id3Info(char* filename, char *tagData, byte infoNum);`

Pega informações de uma música com a etiqueta ID3, bastante usado por outros reprodutores de música como o Windows Media Player, iTunes, etc...

- `getInfo(char* filename, char* tagData, byte infoNum);`

Função usada para salvar os metadados provenientes do áudio a ser executado, alguns desses dados podem ser alterados enquanto se acaba de modificar uma música no Audacity e esses metadados podem ser utilizadas em funções específicas.

Existem também as funções de gravação, no qual não será explicada a sua funcionalização por não ser utilizada no sistema.

- `createWavTemplate(char* filename, unsigned int sampleRate);`
- `finalizeWavTemplate(char* filename);`
- `void startRecording(char* fileName, unsigned int SAMPLE_RATE, byte pin);`
- `void stopRecording(char *fileName);`

B Datasheets

Nesse apêndice encontram-se os datasheets que precisam de um maior espaço para visualização, de forma a não comprometer o corpo do trabalho.

B.1 IRFP 460

As especificações podem ser vistas nas figuras 47 e 48.

Figura 47 – Retirados do Datasheet do IRFP 460.

ORDERING INFORMATION			
PARAMETER	SYMBOL	LIMIT	UNIT
Package	TO-247		
Lead (Pb)-free	IRFP460PbF		
	SiHFP460-E3		
SnPb	IRFP460		
	SiHFP460		

ABSOLUTE MAXIMUM RATINGS $T_C = 25^\circ\text{C}$, unless otherwise noted			
PARAMETER	SYMBOL	LIMIT	UNIT
Drain-Source Voltage	V_{DS}	500	V
Gate-Source Voltage	V_{GS}	± 20	
Continuous Drain Current	I_D	20	A
		13	
Pulsed Drain Current ^a	I_{DM}	80	
Linear Derating Factor		2.2	W/ $^\circ\text{C}$
Single Pulse Avalanche Energy ^b	E_{AS}	960	mJ
Repetitive Avalanche Current ^a	I_{AR}	20	A
Repetitive Avalanche Energy ^a	E_{AR}	28	mJ
Maximum Power Dissipation	P_D	280	W
Peak Diode Recovery dV/dt^c	dV/dt	3.5	V/ns
Operating Junction and Storage Temperature Range	T_J, T_{stg}	- 55 to + 150	$^\circ\text{C}$
Soldering Recommendations (Peak Temperature)	for 10 s	300 ^d	
Mounting Torque		10	lbf · in
		1.1	N · m

Notes

- a. Repetitive rating; pulse width limited by maximum junction temperature (see fig. 11).
- b. $V_{DD} = 50$ V, starting $T_J = 25^\circ\text{C}$, $L = 4.3$ mH, $R_G = 25 \Omega$, $I_{AS} = 20$ A (see fig. 12).
- c. $I_{SD} \leq 20$ A, $di/dt \leq 160$ A/ μs , $V_{DD} \leq V_{DS}$, $T_J \leq 150^\circ\text{C}$.
- d. 1.6 mm from case.

* Pb containing terminations are not RoHS compliant, exemptions may apply

Fonte: Vishay Siliconix.

B.2 BD139 e BD140

As especificações podem ser vistas nas figuras 49 e 50.

Figura 48 – Retirados do Datasheet do IRFP 460.

THERMAL RESISTANCE RATINGS						
PARAMETER	SYMBOL	TYP.	MAX.	UNIT		
Maximum Junction-to-Ambient	R_{thJA}	-	40	$^{\circ}\text{C}/\text{W}$		
Case-to-Sink, Flat, Greased Surface	R_{thCS}	0.24	-			
Maximum Junction-to-Case (Drain)	R_{thJC}	-	0.45			

SPECIFICATIONS $T_J = 25 \text{ }^{\circ}\text{C}$, unless otherwise noted						
PARAMETER	SYMBOL	TEST CONDITIONS	MIN.	TYP.	MAX.	UNIT
Static						
Drain-Source Breakdown Voltage	V_{DS}	$V_{GS} = 0 \text{ V}, I_D = 250 \mu\text{A}$	500	-	-	V
V_{DS} Temperature Coefficient	$\Delta V_{DS}/T_J$	Reference to $25 \text{ }^{\circ}\text{C}$, $I_D = 1 \text{ mA}$	-	0.63	-	$\text{V}/^{\circ}\text{C}$
Gate-Source Threshold Voltage	$V_{GS(\text{th})}$	$V_{DS} = V_{GS}, I_D = 250 \mu\text{A}$	2.0	-	4.0	V
Gate-Source Leakage	I_{GS}	$V_{GS} = \pm 20 \text{ V}$	-	-	± 100	nA
Zero Gate Voltage Drain Current	I_{DS}	$V_{DS} = 500 \text{ V}, V_{GS} = 0 \text{ V}$	-	-	25	μA
		$V_{DS} = 400 \text{ V}, V_{GS} = 0 \text{ V}, T_J = 125 \text{ }^{\circ}\text{C}$	-	-	250	
Drain-Source On-State Resistance	$R_{DS(on)}$	$V_{GS} = 10 \text{ V}$	$I_D = 12 \text{ A}^b$	-	0.27	Ω
Forward Transconductance	G_f	$V_{DS} = 50 \text{ V}, I_D = 12 \text{ A}^b$	13	-	-	S
Dynamic						
Input Capacitance	C_{iss}	$V_{GS} = 0 \text{ V},$ $V_{DS} = 25 \text{ V},$ $f = 1.0 \text{ MHz, see fig. 5}$	-	4200	-	pF
Output Capacitance	C_{oss}		-	870	-	
Reverse Transfer Capacitance	C_{rss}		-	350	-	
Total Gate Charge	Q_g	$V_{GS} = 10 \text{ V}$	$I_D = 20 \text{ A}, V_{DS} = 400 \text{ V}$ see fig. 6 and 13 ^b	-	210	nC
Gate-Source Charge	Q_{gs}			-	29	
Gate-Drain Charge	Q_{gd}			-	110	
Turn-On Delay Time	$t_{d(on)}$	$V_{DD} = 250 \text{ V}, I_D = 20 \text{ A},$ $R_G = 4.3 \Omega, R_D = 13 \Omega, \text{ see fig. 10}^b$	-	18	-	ns
Rise Time	t_r		-	59	-	
Turn-Off Delay Time	$t_{d(off)}$		-	110	-	
Fall Time	t_f		-	58	-	
Internal Drain Inductance	L_D	Between lead, 6 mm (0.25") from package and center of die contact	-	5.0	-	nH
Internal Source Inductance	L_S		-	13	-	
Drain-Source Body Diode Characteristics						
Continuous Source-Drain Diode Current	I_S	MOSFET symbol showing the integral reverse p - n junction diode	-	-	20	A
Pulsed Diode Forward Current ^a	I_{SM}		-	-	80	
Body Diode Voltage	V_{SD}	$T_J = 25 \text{ }^{\circ}\text{C}, I_S = 20 \text{ A}, V_{GS} = 0 \text{ V}^b$	-	-	1.8	V
Body Diode Reverse Recovery Time	t_{rr}	$T_J = 25 \text{ }^{\circ}\text{C}, I_F = 20 \text{ A}, dI/dt = 100 \text{ A}/\mu\text{s}^b$	-	570	860	ns
Body Diode Reverse Recovery Charge	Q_{rr}		-	5.7	8.6	μC
Forward Turn-On Time	t_{on}	Intrinsic turn-on time is negligible (turn-on is dominated by L_S and L_D)				

Notes

- a. Repetitive rating; pulse width limited by maximum junction temperature (see fig. 11).
b. Pulse width $\leq 300 \mu\text{s}$; duty cycle $\leq 2 \%$.

Fonte: Vishay Siliconix.

Figura 49 – Especificações dos transistores BD139 e BD140. Imagem retirada do datasheet fornecido pela ST.

Symbol	Parameter	Value				Unit		
		NPN		PNP				
		BD135	BD139	BD136	BD140			
V_{CBO}	Collector-base voltage ($I_E = 0$)	45	80	-45	-80	V		
V_{CEO}	Collector-emitter voltage ($I_B = 0$)	45	80	-45	-80	V		
V_{EBO}	Emitter-base voltage ($I_C = 0$)	5		-5		V		
I_C	Collector current	1.5		-1.5		A		
I_{CM}	Collector peak current	3		-3		A		
I_B	Base current	0.5		-0.5		A		
P_{TOT}	Total dissipation at $T_c \leq 25^\circ\text{C}$	12.5				W		
P_{TOT}	Total dissipation at $T_{amb} \leq 25^\circ\text{C}$	1.25				W		
T_{stg}	Storage temperature	-65 to 150				$^\circ\text{C}$		
T_j	Max. operating junction temperature	150				$^\circ\text{C}$		

Table 3. Thermal data

Symbol	Parameter	Max value	Unit
$R_{thj-case}$	Thermal resistance junction-case	10	$^\circ\text{C/W}$
$R_{thj-amb}$	Thermal resistance junction-ambient	100	$^\circ\text{C/W}$

Imagen retirada do datasheet fornecido pela ST.

Figura 50 – Especificações dos transistores BD139 e BD140.

(T_{case} = 25 °C unless otherwise specified)**Table 4. On/off states**

Symbol	Parameter	Polarity	Test conditions	Value			Unit
				Min.	Typ.	Max.	
I _{CBO}	Collector cut-off current (I _E =0)	NPN	V _{CB} = 30 V V _{CB} = 30 V, T _C = 125 °C			0.1 10	μA μA
		PNP	V _{CB} = -30 V V _{CB} = -30 V, T _C = 125 °C			-0.1 -10	μA μA
I _{EBO}	Emitter cut-off current (I _C =0)	NPN	V _{EB} = 5 V			10	μA
		PNP	V _{EB} = -5 V			-10	μA
V _{CEO(sus)} ⁽¹⁾	Collector-emitter sustaining voltage (I _B =0)	NPN	I _C = 30 mA BD135 BD139	45 80			V V
		PNP	I _C = -30 mA BD136 BD140	-45 -80			V V
V _{CE(sat)} ⁽¹⁾	Collector-emitter saturation voltage	NPN	I _C = 0.5 A, I _B = 0.05 A			0.5	V
		PNP	I _C = -0.5 A, I _B = -0.05 A			-0.5	V
V _{BE} ⁽¹⁾	Base-emitter voltage	NPN	I _C = 0.5 A, V _{CE} = 2 V			1	V
		PNP	I _C = -0.5 A, V _{CE} = -2 V			-1	V
h _{FE} ⁽¹⁾	DC current gain	NPN	I _C = 5 mA, V _{CE} = 2 V I _C = 150 mA, V _{CE} = 2 V I _C = 0.5 A, V _{CE} = 2 V	25 40 25		250	
		PNP	I _C = -5 mA, V _{CE} = -2 V I _C = -150 mA, V _{CE} = -2 V I _C = -0.5 A, V _{CE} = -2 V	25 40 25		250	
h _{FE} ⁽¹⁾	h _{FE} groups	NPN	I _C = 150 mA, V _{CE} = 2 V BD139-10 BD135-16/BD139-16	63 100		160 250	
		PNP	I _C = -150 mA, V _{CE} = -2 V BD140-10 BD136-16/BD140-16	63 100		160 250	

1. Pulsed: pulse duration = 300 μs, duty cycle 1.5%

Imagen retirada do datasheet fornecido pela ST.