



**Universidade de Brasília - UnB
Faculdade UnB Gama - FGA
Curso de Engenharia Eletrônica**

GERADOR DE ENERGIA PIEZOLÉTRICO

**Autor: Tatiane Lucio Rodrigues
Orientador: Marcus Vinícius Batistuta**

**Gama, DF
2017**



TATIANE LUCIO RODRIGUES

GERADOR DE ENERGIA PIEZOELÉTRICO

Monografia submetida ao curso de graduação em engenharia eletrônica da Universidade de Brasília, como requisito parcial para obtenção do Título de Bacharel em engenharia eletrônica.

Orientador: Dr. Marcus Vinícius Batistuta

**Gama, DF
2017**

CIP – Catalogação Internacional da Publicação*

Rodrigues, Tatiane.

Gerador de energia piezoelétrico. Tatiane Lucio Rodrigues.

Gama: UnB, 2017. 64 p. : il. ; 29,5 cm.

Monografia (Graduação) – Universidade de Brasília

Faculdade do Gama, Gama, 2017. Orientação: Marcus Vinícius
Batistuta.

1. Piezoelétrico. 2. Materiais piezoelétricos. 3. Colheita de energia.
Batistuta, Marcus. II. Geradores de energia.

CDU Classificação



GERADORES DE ENERGIA PIEZOELÉTRICOS

Tatiane Lucio Rodrigues

Monografia submetida como requisito parcial para obtenção do Título de Bacharel em Engenharia Eletrônica da Faculdade UnB Gama - FGA, da Universidade de Brasília, em 18/07/2017 apresentada e aprovada pela banca examinadora abaixo assinada:

Prof. Dr. : Marcus Vinícius Batistuta, UnB/ FGA
Orientador

Prof. Dr.: Cristiano Jacques Miosso R. Mendes, UnB/ FGA
Membro Convidado

Gama, DF
2017

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus por me dar forças e fé para acreditar que um dia seria possível alcançar este objetivo, por estar do meu lado, por sempre me fazer acreditar que eu era capaz e me mostrar, quando minha vontade de desistir excedia a vontade de vencer este desafio, que este dia chegaria.

Agradeço aos meus pais, Gilberto e Lucimeire por toda a paciência, recurso e apoio nesses longos anos de curso, acreditando que um dia eu conseguiria chegar ao final desta etapa da minha vida, mesmo com todas as dificuldades para me manter em um estado diferente do que residem, me dando força para continuar mesmo com a vontade de me ver de volta para perto deles, anulando a saudade e necessidade de ter a família toda reunida como nos velhos tempos, para que o meu sonho pudesse ser alcançado.

Ao meu grande amor, companheiro, amigo, namorado, noivo e futuro esposo Sérgio, que esteve ao meu lado nos piores dias, onde a palavra desistir não saía dos meus lábios, dando apoio em meio ao desespero e comemorando junto comigo as vitórias, suportando minhas mudanças de humor e me ajudando a continuar firme e focada na linha de chegada da tão sonhada graduação em engenharia eletrônica.

Aos professores que me ajudaram nesta caminhada, passando seu conhecimento, e me fazendo acreditar que eu era capaz. Em especial aos professores Adson Rocha e Marcus Vinícius Batistuta. Ao professor Adson por estar comigo desde o início, me ensinando sempre que necessário, e servindo até como psicólogo em alguns momentos. Ao professor Marcus que teve tanta paciência durante este tempo de orientação e por todo o conhecimento e ajuda que pude absorver neste período, é visível a sua paixão pela profissão e obrigada por permitir que eu pudesse ver e ser contagiada por este sentimento tão lindo.

Aos meus grandes companheiros de caminhada Vinícius Siqueira, Priscilla Villela, Brenda Castro, Davi Gusmão, Heitor Prado, Dandara Aranha, Henrique Berilli, Raquel Melo, Maurício Barros Wolney que festejaram, lutaram, sofreram comigo, me ajudando a alcançar este momento. Sem pessoas ao meu lado nunca seria possível chegar aqui.

Ainda que tivesse o dom da profecia, conhecesse todos os mistérios e toda a ciência, e ainda que tivesse toda a fé, de maneira tal que transportasse os montes, e não tivesse amor, nada seria. (I Corintios 13:2)

RESUMO

A busca por novas fontes de energia para completar ou substituir as usuais, têm despertado interesse nas áreas de pesquisas. O material piezoelétrico é uma fonte alternativa de energia elétrica que pode ser utilizada para aplicações com baixa potência de consumo. Este material possui a capacidade de transformar energia mecânica vibratória em energia elétrica, sendo um dos meios de suprir esta necessidade.

Existem muitas formas de se obter energia mecânica vibratória que pode servir de motivação para o estudo sobre os materiais que as utilizam, como por exemplo, a vibração gerada pelos automóveis nas ruas, o caminhar das pessoas, o movimento nas pistas de dança, o deslocamento das montanhas, as ondas vibratórias geradas pelos sons entre outras.

Este trabalho tem por objetivo conceber e construir um protótipo de gerador piezoelétrico e validar a extração e conversão de energia mecânica vibratória em energia elétrica, por meio de um regime de vibrações em diferentes frequências e amplitudes, para aplicações em dispositivos que possam se alimentar desta energia gerada. Ao observar a necessidade em se ter uma fonte de energia independente para alimentar sistemas de alarme de antifurto automotivos, surgiu a motivação para a realização do trabalho, estudando novas fontes de energia diferentes das utilizadas atualmente.

O trabalho será dividido em duas etapas, a primeira etapa do trabalho consiste em realizar um levantamento teórico sobre o piezoelétrico. A segunda parte descreve os circuitos que realizaram a extração de energia elétrica, assim como uma análise quantitativa e qualitativa dos dados extraídos em bancada e de softwares simuladores a respeito do protótipo construído. Um destes circuitos é responsável por realizar o acionamento do eletroímã, produzindo assim, as variações na vibração mecânica para analisar o comportamento do transdutor piezoelétrico nestas condições.

O gerador piezoelétrico foi testado em bancada, com vibrações mecânicas senoidais e pulsadas em frequências variadas, produzidas por um eletroímã com um circuito de controle chaveado de corrente e modulação PWM.

Os resultados foram obtidos em uma faixa de frequência que não ultrapassou 370Hz, obtendo uma frequência de ressonância em 210 Hz para o regime senoidal. Com os resultados e observando o funcionamento do material piezoelétrico, foi possível verificar que o mesmo tem uma sensibilidade grande, e que conforme estivesse posicionado ou estimulado, alterações consideráveis surgiam na energia elétrica final gerada. Por isso é importante ressaltar que o seu funcionamento é dependente de vários fatores, físicos e ambientais, onde o seu posicionamento influencia no resultado final. Desta forma, procurou-se manter a posição inicial do protótipo para que esta variação não fosse tão considerável.

Palavras-chave: Gerador Piezoelétrico, Piezoelétricidade, Colheita de energia.

ABSTRACT

The search for new sources of energy in order to complete or substitute the usual ones has risen the interest in the research areas. The piezoelectric material is an alternative source of electric energy which can be used for applications with low power consumption. This material has the capacity of transforming vibratory mechanic energy into electric energy, being it one of the means to fulfill this need.

There are many ways to obtain this vibratory mechanic energy that can work as a motivation for the study about the materials that use them, for example, the vibration generated by the automobiles on the street, people walking, the movement on the dance floors, the displacement of the mountains, the vibratory waves generated by the sounds, etc.

This work has as its objective to conceive and construct a prototype of a piezoelectric generator and validate the extraction and conversion of vibratory mechanic energy into electric energy, through a regime of vibrations in different frequencies and amplitudes, for applications in devices that can use this generated energy when observing the need of having an independent source of energy to feed anti robbery alarm systems in cars, a motivation to create this work appeared, studying new sources of energy different from the ones used nowadays.

This work will be separated in two stages, the first stage consists in having a theoretical research about the piezoelectric. The second one describes the circuits which accomplished the extraction of electric energy, just like a quantitative and qualitative analysis of the data extracted in presentations and software simulators about the built prototype. One of these circuits is responsible for accomplishing the electromagnet activation, producing the variations in the mechanic vibration in order to analyze the behavior of the piezoelectric transductor in these conditions.

The piezoelectric generator was tested in studies, with mechanic sinusoidal and pulsed vibrations in many frequencies produced by an electromagnet with a circuit of key control of current and PWM modulation.

The results were obtained in a frequency rate which didn't surpass 370Hz , obtaining a frequency of resonance in 210Hz for the sinusoidal regime. With the results and observing the functioning of the piezoelectric material, it was possible to verify that the same has a big sensibility, and as it was positioned or stimulated, considerable changes appeared in the final electric energy generated. That's why it's important to emphasize that its functioning depends on many factors, physical and ambiental, where its position influences on the final result. This way, it was sought to keep the initial position of the prototype so that this vibration wouldn't be so considerable.

Keywords: Piezoelectric generator, piezoelectricity, Energy Harvesting .

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	9
1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO E MOTIVAÇÃO	9
1.2 OBJETIVOS.....	10
1.1.1 Objetivo Geral	10
1.1.2 Objetivos Específicos	11
1.3 JUSTIFICATIVA.....	11
1.4 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO	11
2 PIEZOELETRICIDADE.....	12
2.1 EFEITO PIEZOELÉTRICO	12
2.2 MATERIAIS PIEZOELÉTRICOS	15
2.2.1 Cristais	16
2.2.1.1 Quartzo (SiO ₂)	16
2.2.2 Cerâmicas	19
2.2.3 Polímeros	20
2.3 COLHEITA DE ENERGIA (<i>ENERGY HARVESTING</i>).....	20
2.4 MODELAGEM DO TRANSDUTOR PIEZOELÉTRICO	21
3 METODOLOGIA E RESULTADOS	24
3.1 BANCADA EXPERIMENTAL	24
3.1.1 Protótipo para simulação da vibração.....	24
3.1.1.1 Eletroíma	25
3.1.1.2 Diodo	27
3.1.1.3 Transdutor Piezoelétrico.....	30
3.1.1.4 Transistor MOSFET NMOS.....	31
3.1.1.5 Optoacoplador	34
3.1.2 Circuito responsável por estimular a vibração no protótipo.....	35
3.1.2.1 Análise com Modulação PWM senoidal	38
3.1.2.2 Análise com Modulação por Pulsos Quadrados	41
3.1.3 Concepção do protótipo em bancada experimental.....	45
3.2 RESULTADOS	47
3.2.1 Resultados com Modulação PWM Senoidal	47
3.2.2 Resultado com Modulação por Pulsos Quadrado.....	52
3.2.3 Circuito Extrator	58
4 CONCLUSÃO.....	62
Referências Bibliográfica	63

1 INTRODUÇÃO

Este capítulo apresenta inicialmente uma contextualização acerca de algumas fontes de energia existentes na atualidade, disponibilizando dados sobre o desempenho energético brasileiro de 2016, com o intuito de demonstrar a importância de se ter fontes energéticas auxiliares, como por exemplo, o material piezoelétrico, que é o foco de estudo deste trabalho.

Diante destes dados é apresentada uma proposta de trabalho para analisar o comportamento do transdutor piezoelétrico. Em seguida, são apresentados os objetivos e a justificativa do trabalho.

1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO E MOTIVAÇÃO

As fontes de energia são materiais e recursos, capazes de gerar energia por meio de algum tipo de transformação. Segundo Lavoisier “Na natureza nada se cria, nada se perde, tudo se transforma”, esta afirmação gera o pensamento e a curiosidade de como podemos produzir energia elétrica tendo em vista estas fontes energéticas dentro da natureza.

A natureza reserva-nos inúmeras fontes energéticas como, por exemplo, o sol, a água, os ventos, a madeira, o carvão, o petróleo, entre outras fontes, e para que elas possam gerar o que conhecemos como energia elétrica é essencial que sejam transformadas de um estado para outro por meio de técnicas e equipamentos adequados para um fim específico.

No Brasil, de acordo com Ministério de Minas e Energia (2017), em 2016 a oferta interna de energia elétrica do País teve uma participação de 83,3% das hidroelétricas, seguida de 7% do bagaço de cana, 6,6% da energia eólica, 0,0168% da energia solar e 3,1% de outras energias renováveis. Com estes dados pode-se observar a supremacia das hidroelétricas para geração de energia elétrica e isso se dá ao fato desta possuir uma alta oferta de potência de energia nesta área detendo uma porcentagem de 65,7% para o ano de 2016 incluindo a importação.

A alta porcentagem tanto na participação quanto na potência fornecida pelas hidroelétricas, na geração de energia elétrica, não impedem que novas fontes energéticas possam ser estudadas e transformadas para fins energéticos. No Brasil, por exemplo, já se pode observar um crescimento de 54,9% na oferta eólica com relação ao ano de 2014 (Ministério de Minas e Energia, 2017).

As fontes de energia citadas até agora possuem uma oferta de potência elevada se comparadas a outras fontes. O material piezoelétrico é uma fonte de energia de baixa potência

encontrada na natureza que pode transformar energia de vibrações (energia mecânica) em energia elétrica capaz de ser armazenada em dispositivos como baterias e supercapacitores, podendo ser utilizadas em algumas aplicações, como por exemplo, na alimentação de semáforos por meio da vibração gerada nos solos pelo tráfego, em danceterias que utilizam a vibração gerada nas pistas de dança. Este é um novo conceito que vem sendo proposto, mais conhecido como colheita de energia ou o termo em inglês *energy harvesting*.

O tipo de energia extraído do material piezoelétrico possui uma baixa oferta de potência energética, mas que pode ser muito útil em aplicações eletrônicas ao se conseguir armazená-las para uma posterior utilização. Com isso a motivação para o desenvolvimento deste trabalho está relacionada à alimentação energética de um sistema de segurança automotivo, utilizando as suas formas de vibrações para extrair energia elétrica do material que é o foco deste estudo.

Segundo RAO (2009) *apud* Macedo de Lima (2014) vibrações podem ser definidas como qualquer movimento que se repita após um intervalo de tempo. Movimento este que possui um ciclo de oscilação completo que, por sua vez, contém um tempo para se completar denominado período.

A repetição desse movimento é chamada vibração por unidade de tempo e a quantidade de ciclos presente nessa unidade de tempo é caracterizada frequência de movimento (Silva, 2012) *apud* (Macedo de Lima, 2014).

O projeto em questão propõe a construção de um protótipo, que será capaz de realizar estímulos em forma de vibração mecânica para gerar energia elétrica em transdutores piezoelétricos. Com isso serão tabulados os dados experimentais para as frequências de vibrações aplicadas, realizando análises para os mesmos.

1.2 OBJETIVOS

1.1.1 Objetivo Geral

Analisar o comportamento do transdutor piezoelétrico para um dado regime de vibrações mecânicas em diferentes frequências e amplitudes.

1.1.2 Objetivos Específicos

A finalidade deste estudo é a análise do transdutor piezoelétrico para um determinado regime de vibrações mecânicas, com isso, objetivos específicos devem ser traçados para que se possa alcançar o mesmo.

Desta forma, faz-se necessário conhecer cada um dos componentes utilizados na construção do protótipo, analisando as suas limitações e funcionamento com base em levantamento teórico e simulações dos circuitos utilizados no processo, desenvolvendo uma topologia com o melhor desempenho possível para as condições de trabalho disponíveis.

Com base no desenvolvimento do protótipo a análise possui o objetivo de demonstrar a viabilidade tecnológica do transdutor estudado, enfatizando as condições em que o mesmo possui respostas satisfatórias.

1.3 JUSTIFICATIVA

O estudo acerca de novas fontes de energia, observando seu funcionamento, assim como novas maneiras de utilizá-las, possui sua importância principalmente para trabalhos futuros que poderão utilizar os dados coletados neste trabalho como um passo inicial para alguma aplicação ou aperfeiçoamento.

1.4 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

Este trabalho é constituído por quatro capítulos. Este primeiro capítulo apresentou um contexto sobre as fontes de energia elétrica mais utilizadas atualmente, e sobre o objeto de estudo deste trabalho, o material piezoelétrico. Sendo descrito a motivação para o desenvolvimento do mesmo, assim como os objetivos e justificativas para sua realização.

O capítulo dois apresenta o referencial teórico abordando os conceitos sobre o objeto de estudo, descrevendo o seu funcionamento, formas de trabalho e como são encontrados.

O terceiro capítulo aborda a criação e concepção do protótipo utilizado para realizar a conversão da energia mecânica de vibração em energia elétrica, apresentando os resultados obtidos durante o experimento em bancada e por simulações via software. Juntamente com a análise realizada com base nos resultados adquiridos.

No último capítulo é apresentada a conclusão com os resultados alcançados, suas limitações e proposta para trabalhos futuros.

2 PIEZOELETRICIDADE

2.1 EFEITO PIEZOELÉTRICO

A piezoeletricidade foi descoberta no ano de 1880 por dois irmãos, Pierre e Jacques Curie. Os irmãos demonstraram que quando se comprimem alguns cristais uma diferença de potencial era gerada caracterizando o efeito piezoelétrico. Segundo Iliuk (2012) piezoeletricidade é uma forma de acoplamento entre os comportamentos mecânicos e elétricos de certos materiais.

A palavra piezo é derivada do grego e significa pressão, a piezoeletricidade pode ser direta ou inverso, sendo que o efeito inverso foi previsto pelo físico franco-luxemburguês, Gabriel Lippmann, que provou matematicamente este efeito inverso por meios de princípios da termodinâmica em 1881, gerando desta forma a possibilidade de comprovação demonstrativa por meio dos irmãos Curie no mesmo ano.

Até a primeira guerra mundial a piezoeletricidade era vista como algo curioso, e foi só depois da sua primeira aplicação que este fato mudou, podendo-se atribuir este feito a Paul Langevin (físico francês - 1921) que desenvolveu um sonar, utilizando o quartzo como elemento piezoelétrico (GABOR, 1951) *apud* (FREITAS, 2012).

O efeito piezoelétrico de uma forma geral pode ser descrito como a propriedade que alguns materiais possuem em gerar energia elétrica ao sofrerem uma pressão mecânica em suas extremidades, caracterizando o efeito direto, ou em gerar uma deformação ao serem submetidos a uma diferença de potencial em todos os seus eletrodos, caracterizando o efeito inverso como pode ser demonstrado na Fig. (1) a seguir:

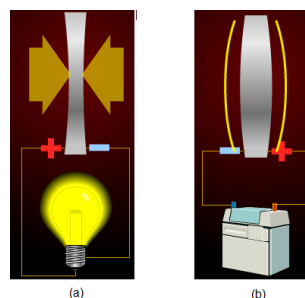


Figura 1. Efeito piezoelétrico (a) direto e (b) inverso. Fonte: PRADO JUNIOR, 2013.

Existem alguns fatos interessantes a respeito do efeito piezoelétrico direto e inverso, um deles está relacionado à intensidade elétrica gerada pelo material piezoelétrico que depende da intensidade da força exercida sobre a sua superfície, quanto maior a pressão sobre o material maior será a energia elétrica gerada pelo mesmo, outro fato é que dependendo do

tipo de esforço mecânico (tração ou compressão) a polarização é invertida, ou seja, se comprimido o material piezoelétrico gera uma polarização positiva e se tracionado ele provoca uma polarização negativa. O mesmo acontecerá se a piezoelectricidade em questão for a inversa, ao se aplicar um campo elétrico de sentido positivo o material irá sofrer tração, e no sentido negativo obterá um material comprimido (SILVA *et al*, 2009) *apud* (ILIUK, 2012). Este efeito pode ser visualizado a seguir na Fig. (2):

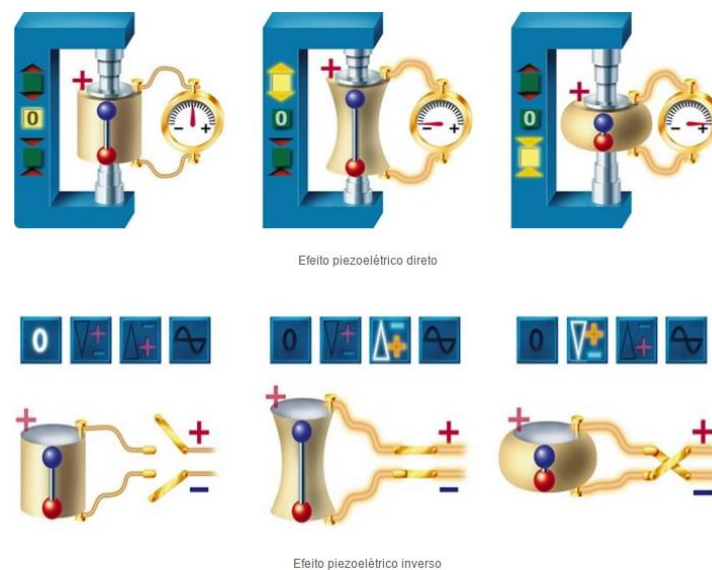


Figura 2. Demonstração física da piezoelectricidade nos materiais. Fonte: CERAMTEC, 2013.

De acordo com Schulz (2012) o efeito piezoelétrico só pode ser exibido por materiais cuja estrutura cristalina não tem centro de simetria. Observe na Fig. (3) a estrutura cristalina dos materiais.

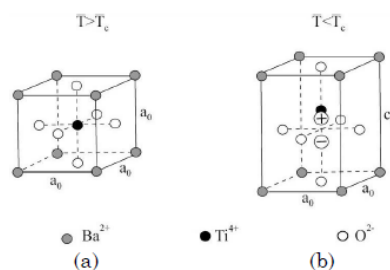


Figura 3. Estrutura cristalina (a) centrossimétrica (b) não centrossimétrica. Fonte: KALTEMBACHER, 2007 *apud* SCHULZ, 2012.

A Figura (3) (a) apresenta um arranjo simétrico de uma estrutura cristalina e a Fig. (3) (b) corresponde uma estrutura com o centro deslocado, apresentando desta forma uma

característica piezoelétrica. Nesta figura Ba, Ti, e O são os elementos bário, titânio e oxigênio respectivamente, T é a temperatura e T_c é a temperatura de curie (SCHULZ, 2012).

Segundo Gaudenzi (2009) *apud* Schulz (2012) apenas vinte das trinta e duas classes de cristais podem ser piezoelétricas, e na maioria dos casos esses materiais são também ferroelétricos, onde a sua característica piezoelétrica deixa de existir quando submetido a altas temperaturas. Observe na Fig. (4) a seguir a classificação desses cristais segundo a sua simetria.

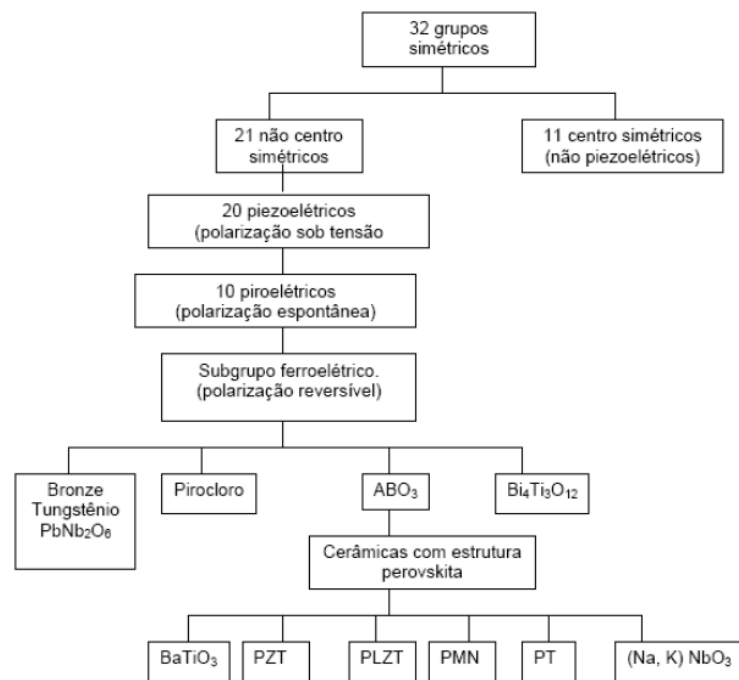


Figura 4. Relação dos piezoelétricos e subgrupos baseados na simetria. Fonte: SILVA et al, 2009.

A respeito da estrutura cristalina um fato interessante foi observado pelos irmãos Curie. Eles notaram que estas estruturas apresentam uma geometria molecular bipolar com alinhamento assimétrico. Por ter este tipo de geometria uma polarização é produzida na superfície do material, induzindo cargas elétricas e mantendo a estrutura em equilíbrio elétrico. Quando este material é submetido a uma perturbação, como por exemplo, uma força mecânica, o equilíbrio elétrico que existia na superfície é perturbado proporcionando uma reorganização das cargas e como consequência, um fluxo de corrente é gerado, fluxo este que pode ser facilmente mensurado (BOTTOM, 1968; TRAINER, 2003) *apud* (PALITÓ, 2015).

2.2 MATERIAIS PIEZOELÉTRICOS

Segundo Kaltembacher (2007) *apud* Schulz (2012) materiais piezoelétricos podem ser divididos em três categorias: cristais isolados, como o quartzo; cerâmicas piezoelétricas como titanato de bário (BaTiO_3) ou titanato zirconato de chumbo (PZT) e polímeros como fluoreto de polivinilideno (PVDF). O efeito piezoelétrico é fraco nos cristais e nas cerâmicas sendo utilizados em sensores.

Os materiais piezoelétricos podem ter origem natural ou artificial e segundo Santos (2016) em condições naturais estes não possuem um acoplamento eletromecânico entre os comportamentos mecânico e elétrico suficientemente forte que permitam que sejam usados em aplicações de engenharia. Sendo assim, um tratamento metalúrgico é essencial para que o efeito piezoelétrico seja apresentado de forma aplicável em um material com essas propriedades.

Ainda de acordo com Santos (2016) para se realizar a polarização do material alguns passos devem ser seguidos e o primeiro deles é o aquecimento do mesmo até a temperatura de curie (T_c – que é a temperatura onde os materiais ferroelétricos e piezoelétricos deixam de apresentar propriedades elétricas diferenciadas). Após a perda da propriedade magnética o material é submetido a um forte campo elétrico, o que reorienta os dipolos de acordo com o campo. Logo após o material é resfriado, e os dipolos manterão a orientação induzida pelo campo elétrico permitindo que o material esteja polarizado, apresentando assim, o tão desejado efeito piezoelétrico. Concluindo dessa forma que a orientação dos dipolos amplifica a piezoeletricidade no material. Observe este processo na Fig. (5).

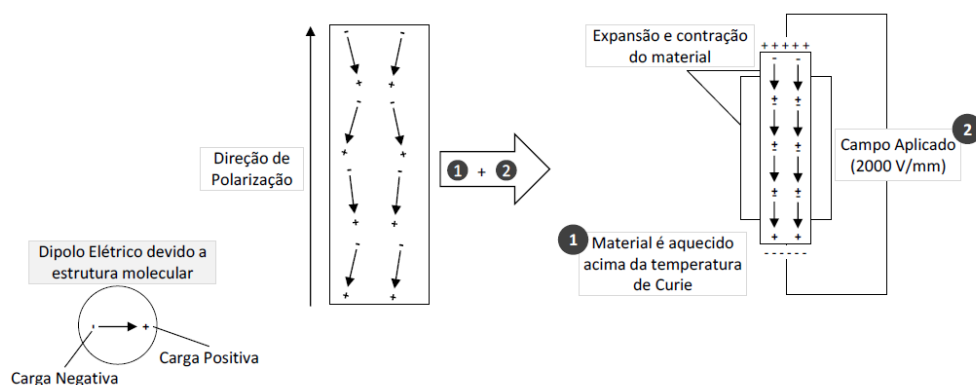


Figura 5. Processo de polarização dos materiais piezoelétricos. Fonte: LEO, 2007 *apud* SANTOS, 2016.

Atualmente os materiais piezoelétricos são aplicados a tecnologias que utilizam desde baixas frequências, na ordem de Hz, até altas frequências, na ordem de GHz, podendo ser utilizados como sensores e atuadores, onde materiais do tipo policristalinos, como por exemplo, cerâmicas, polímeros e compósitos, são aproveitados para realizar aplicações de baixas frequências, enquanto que cristais e filmes finos são usados para frequências elevadas (EIRAS, 2004).

As primeiras aplicações dentro da piezoeletricidade aconteceram com a utilização de cristais, em particular o quartzo, porém o crescimento destas aconteceu quando foram descobertos os piezoelétricos cerâmicos baseados no PZT nos anos 50 e desde então as piezocerâmicas são empregadas em diversas aplicações (EIRAS, 2004).

Entretanto, cristais piezoelétricos seguem sendo os mais utilizados para aplicações como osciladores estabilizados e componentes que funcionam com ondas acústicas de superfície. Com principais vantagens dos cristais, frente às piezocerâmicas, pode-se destacar suas altas temperaturas de Curie, alta estabilidade térmica (pequenas alterações de suas propriedades piezoelétricas em função da temperatura) e alto fator de qualidade mecânico. Por sua vez, a obtenção de cristais de alta qualidade requer processos ou muito demorados, ou processos de crescimento muito caros, como os métodos Czochralski ou Bridgeman, por exemplo. Por serem anisotrópicos os cristais requerem, todavia cortes em orientações específicas para que se possa utilizá-los de forma adequada. Materiais cerâmicos (policristalinos), por sua vez, apresentam as seguintes vantagens, frente aos cristais: processo de obtenção mais barato, a possibilidade de serem preparado em uma grande variedade de composições, o que permite controlar ou alterar suas propriedades físicas, e a possibilidade de serem produzidos numa maior variedade de geometrias (EIRAS, 2004, p. 7).

As propriedades a serem analisadas em um material piezoelétrico visando obter aplicações tecnológicas eficientes dentro do proposto efeito piezoelétrico são as propriedades dielétricas, elásticas e piezoelétricas, embora nem sempre seja necessário determinar todas essas propriedades, dependendo muito da aplicação que se deseja utilizar (EIRAS, 2004).

A seguir serão colocados alguns dos materiais piezoelétricos mais utilizados em aplicações tecnológicas.

2.2.1 Cristais

2.2.1.1 Quartzo (SiO_2)

O quartzo é um cristal que possui a sua palavra derivada da germânica, a seguir será dada uma descrição detalhada do seu significado.

s.m. Mineal comum, encontrado em muitas rochas. (Sin.: cristal de rocha.) &151; Sua fórmula química é SiO_2 . Pode ser facilmente reconhecido porque se assemelha a pedaços de vidro quebrado. Também se apresenta sob a forma de pequenos grãos em arenito, quando calcita ou mica o aglutinam. O quartzo é o mais duro de todos os

minerais comuns. Somente minerais raros como topázio, coríndon e diamante são mais duros. O quartzo não é facilmente alterado por condições climáticas ou pela umidade (PORTUGUÊS, 2009).

De acordo com Eiras (2004) cristais de quartzo são encontrados na natureza (minerais de quartzo, que para crescer naturalmente demoram muitos anos) ou podem ser crescidos artificialmente, por exemplo, por processos hidrotérmicos. Este processo hidrotérmico consiste na dissolução e recristalização deste cristal quando são submetidos a altas pressões e temperaturas (DOMINGOS *et al*, 2013).

Segundo Brice (1985) *apud* Luz e Lins (2008) quartzo – α é o material mais utilizado para produção de dispositivos piezoelétricos para medidas de grandezas físicas por meio do monitoramento da frequência de ressonância no domínio dos ultra-sons. Na indústria mundial o quartzo natural existente no Brasil ocupa um papel de destaque no suprimento deste insumo em diversos segmentos, sendo ele o material mais utilizado dentro da indústria eletrônica após o silício (LUZ e LINS, 2008). No entanto, Eiras (2004) afirma que desde o descobrimento por Roberts de que a cerâmica de titanato de bário podiam ser polarizadas e apresentar o efeito piezoelétrico, materiais cerâmicos são os mais utilizados como elementos piezoelétricos na maioria das aplicações tecnológicas.

Silva *et al* (2009) aponta os locais mais significativos de onde se encontrar o quartzo no Brasil e no mundo, veja na Tab. (1) a seguir:

Tabela 1. – Quartzo no Brasil e no mundo.

No Brasil
<ul style="list-style-type: none"> • Na Bahia (Campo Formoso); Novo Horizonte – quartzo rutilado); • Goiás (Depósito do granito Pedra Branca); • Minas Gerais (Distrito Pegmatítico de Juiz de Fora, Araçuaí, Jequitinhonha, Corinto e Diamantina; Lavra da Ilha, em Itinga); • Pará (Depósitos de Alto Bonito, Pau D'Arco e Conceição do Araguaia – ametista); • Piauí (Pedro II – opala); • Rondônia (Depósito de Bom Futuro, em Ariquemes); • Mato Grosso do Sul; • Tocantins; • Amazonas; • Rio Grande do Sul (maior produtor de ametista do mundo, no Alto e Médio Uruguai

– Ametista do Sul, e ágata, no Salto do Jacuí).
No mundo
<ul style="list-style-type: none"> • Afeganistão (Depósitos de Pech, Kunar e Nuristan); • Alemanha (Idar-Oberstein); • Austrália (Broken Hill, em Nova Gales do Sul – opala); • Canadá (minas de Thunder Bay e Rose Quartz, Quadeville, em Ontário – quartzo róseo); • Casaquistão (Agadir); • Egito (Depósitos da Península do Sinai); • Escócia (Cairngorm Mountains – quartzo enfumaçado); • Espanha (depósitos de Valência); • Estados Unidos da América (minas de Oxford, no Maine; Hot Springs, no Arkansas – cristal-de-rocha; Little Falls, Herkimer e Ellenville, em Nova Iorque – cristal-de-rocha; Virgin Valley e Humboldt, em Nevada – opala; Pikes Peak, no Colorado – quartzo-enfumaçado; Jaspe, no Oregon – Jaspe); • França (La Gardette – cristal-de-rocha); • Índia (depósitos de Swda, Jalgaon e Maharashtra); • Inglaterra (depósitos de Dover); • Itália (Ossola, em Novara; Montes Apeninos, Carrara, Ilha de Elba, Turim e Grosseto – opala); • Madagascar (depósitos de Mahariha, Betafo e Ambrosita – quartzo-róseo); • Marrocos (Monte Atlas – calcêdônia); • México (Minas de Julimes, em Chihuahua e Querétaro – opala; Charcas, em São Luís de Potosí – citrino); • Polônia (Szklary – crisoprásio); • República Tcheca (minas de Podrlikonosi, Ofiovice e Nova Paka – cornalina, Suki e Netin); • Romênia (minas de Baldut e Căvnic, em Maramures); • Rússia (minas de Murzinka, nos Montes Urais – ametista e Jaspe; First Soviety, em Dalgenorsk); • Suíça (São Gotardo, em Uri; Maderanertal, Grimsel, Furka e Mont Blanc);

- Ucrânia (Maciço de Korostenskiy);
- Uruguai (Departamento de Artigas – excepcionais ametistas).

2.2.2 Cerâmicas

Após o descobrimento de Roberts, de que as cerâmicas possuem características piezoelétricas, uma nova era foi iniciada, a era das piezocerâmicas.

As piezocerâmicas são materiais ferroelétricos que se obtém através de métodos de preparação de cerâmicas avançadas. Em seu estado não polarizado (e não texturadas) são isotrópicas. Para sua utilização como elementos piezoelétricos precisam ser polarizadas sob a aplicação de um campo elétrico dc da ordem de alguns quilovolts por milímetro (Kv/mm). O fato de ser ferroelétrico permite que se reoriente a polarização espontânea, na direção do campo de polarização (EIRAS, 2004).

A estrutura mais utilizada como elemento piezoelétrico é a do tipo perovskita, que é o nome originalmente designado para as estruturas de titanato de bário. Ela pode ser representada pela seguinte fórmula $((A_1, A_2)(B_1, B_2)O_3)$. Estudos em cerâmicas da família das perovskita têm sido centrados em algumas composições bases como o titanato de bário, soluções sólidas de titanato zirconato de chumbo (PZT) e perovskitas complexas (EIRAS, 2004). A Fig. (6) mostra uma representação esquemática de um célula única de uma estrutura peroviskita.

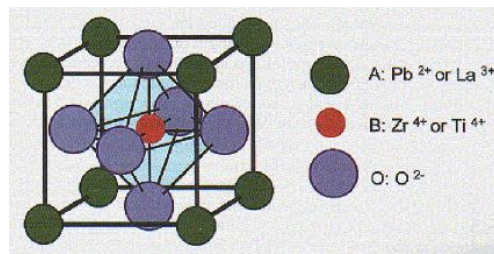


Figura 6. Representação esquemática de uma célula unitária com estrutura peroviskita. Fonte: EIRAS, 2004.

Os materiais cerâmicos apresentam algumas vantagens com relação aos cristais, o processo de obtenção é mais barato, em sua preparação existe a possibilidade de serem preparados em uma grande variedade de composições, permitindo assim, que suas propriedades físicas possam ser controladas e alteradas, podendo ainda ser produzidos em uma grande variedade de geometrias (FREITAS, 2012).

2.2.3 Polímeros

De acordo com Freitas (2012) polímeros são compostos orgânicos ou inorgânicos, naturais ou sintéticos de alto peso molecular, caracterizados pelo tamanho, estrutura química e interações intra e intermoleculares.

Durante os anos 50 descobriu-se que biopolímeros também apresentavam o efeito piezoelétrico, com isso novas pesquisas voltadas a piezoeletricidade foram incentivadas para os polímeros e em 1969 Kawai constatou que filmes de PVDF (polifluoreto de vinilideno) polarizados também possuíam o efeito piezoelétrico, o que desencadeou vantagens sobre os materiais cerâmicos, como por exemplo, a sua flexibilidade, sua menor massa específica e maior facilidade de fabricação (PALITÓ, 2015).

Outros polímeros com estruturas moleculares bipolar foram polarizados para tentar obter características piezoelétricas o que não aconteceu em sua grande maioria, dessa forma, as pesquisas se voltaram para a obtenção de coeficientes piezoelétricos mais elevados. Passou-se então a unir os altos coeficientes das cerâmicas com a flexibilidade dos polímeros formando os materiais conhecidos por compósitos.

2.3 COLHEITA DE ENERGIA (*ENERGY HARVESTING*)

Colheita de energia ou “*energy harvesting*” é o processo pela qual se realiza a obtenção da energia de um sistema, convertido em energia elétrica. As pesquisas nesta área têm aumentado significativamente nos últimos anos, devido ao grande avanço nas tecnologias *wireless* e na eletrônica (mais especificamente nos sistemas micro eletromecânicos) (SANTOS, 2016). Mineto (2013) diz que a geração de energia elétrica através de vibrações estruturais foi inicialmente proposta por Williams e Yates. Os mecanismos básicos da conversão de energia por meio de vibrações são os seguintes: piezoelétricos, eletrostático, eletromagnético e magnetoestrutivo, e o uso dos piezoelétricos é o método mais avançado e utilizado na atualidade (SANTOS, 2016).

A criação de dispositivos que possuem uma auto-alimentação é algo estudado dentro da engenharia, e é uma forma de utilizar a energia produzida pelas vibrações mecânicas se transformando em energia elétrica, armazená-la e utilizá-la para carregar ou manter o dispositivo funcionando (GALHARDI, 2010).

Conforme Iliuk (2013) existem três modos de dispositivos de captura de energia extraídas das vibrações, são elas: dispositivos de captura eletrostática, dispositivos de captura eletromagnético e o piezoelétrico.

Uma das estruturas preferidas para se extrair energia cinética do ambiente e transformar em energia elétrica por meio dos dispositivos piezoelétricos é a viga em balanço, onde ela possui em sua estrutura uma ou duas superfícies cobertas por material piezoelétrico (ILIUK, 2013). Na Fig. (6) pode-se observar um modelo de geração de energia deste tipo e o seu circuito eletrônico equivalente para um sistema linear.

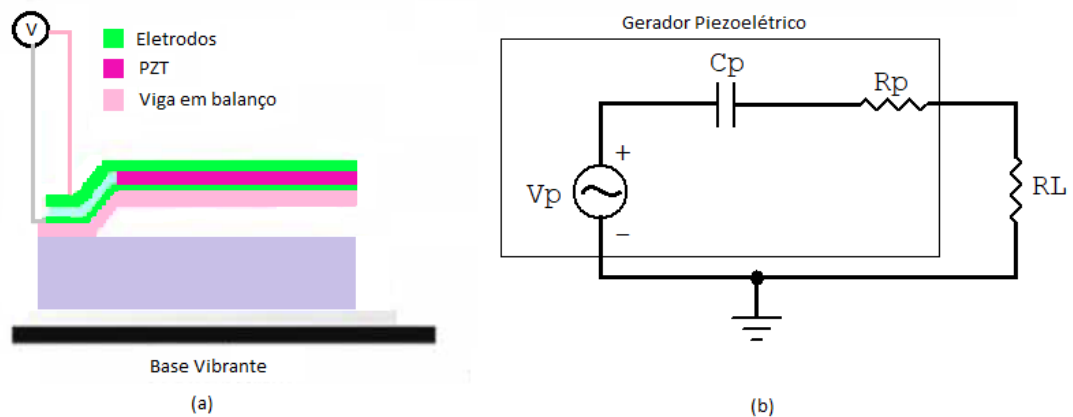


Figura 7. (a) modelo conceitual gerador piezoelétrico, (b) Circuito eletrônico equivalente do piezoelétrico. Fonte: COTTONE, 2007 apud ILIUK, 2013.

Como pode ser visto na Fig. (7b) o elemento piezoelétrico é representado pelo circuito equivalente, com a fonte de tensão V_p , a capacitância C_p e a resistência R_p . É importante ressaltar que a tensão produzida pelo piezoelétrico é proporcional à aceleração (força) depositada no piezogerador.

2.4 MODELAGEM DO TRANSDUTOR PIEZOELÉTRICO

A colheita de energia cinética por sistema inerciais pode ser modelado como sistemas de amortecedor massa mola de segunda ordem. De acordo com Hehn e Manoli (2014) o modelo geral de colheita de energia cinética foi desenvolvido por Willian e Yates. A Fig. (8) mostra este modelo.

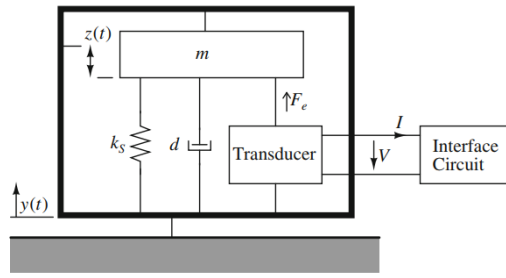


Figura 8. Modelo de sistema massa mola para colheita de energia cinética. Fonte: HEHN e MANOLI, 2014, p.27.

A parte interna do quadro de borda preta representa o sistema responsável por colher a energia cinética e é composto por uma massa m suspensa em uma mola com rigidez k_s , gerando um sistema ressonante de massa mola (HENM e MANOLI, 2014, p.27). Quando uma vibração externa de força senoidal é aplicada à parte ao quadro de colheita de energia o mesmo se move harmonicamente com

$$y(t) = A \sin(\omega t) \quad (1)$$

Onde A representa a amplitude com que se move o quadro, e ω representa a frequência angular de vibração. O movimento da massa m em relação ao quadro de colheita de energia é dado pela Eq. (2),

$$z(t) = A_m \sin(\omega t + \theta) \quad (2)$$

Onde A_m representa a amplitude com que a massa se movimenta, e θ representa a diferença de fase que existe entre $y(t)$ e $z(t)$. O amortecedor d é a representação do amortecimento mecânico devido a fricção, resistência ao ar entre outros fatores. Este movimento pode ser usado para deformar o transdutor convertendo a energia mecânica em energia elétrica, que é o objetivo deste trabalho. Devido ao retorno eletromecânico o transdutor exerce uma força F_e na massa caso tenha um circuito de interface conectado, causando um amortecimento elétrico d_e (HENM e MANOLI, 2014, p.27).

A Equação (3) geral da colheita de energia cinética é dada por,

$$m\ddot{a} = m\ddot{z} + d\dot{z} + k_s z + F_e \quad (3)$$

Onde,

$$a(t) = \ddot{y}(t) = -\omega^2 A \sin(\omega t) = A_a \sin(\omega t) \quad (4)$$

Indicando a aceleração que atua no quadro responsável por colher energia, onde ma representa a força externa aplicada ao sistema de colheita de energia. Se a força F_e for considerada uma força de amortecimento a Eq. (3) pode ser reescrita da seguinte forma (HENM e MANOLI, 2014, p.28),

$$ma = m\ddot{z} + (d + d_e)\dot{z} + k_s z + F_e \quad (5)$$

Para encontrar a função de transferência deve-se encontrar a transformada de laplace da Eq. (5), observe,

$$ms^2 y = ms^2 z + (d + d_e)sz + k_s z \quad (6)$$

Com os termos de amortecimento mecânico e elétrico a seguir,

$$\zeta_d = \frac{d}{2m\omega_n} \quad e \quad \zeta_e = \frac{d_e}{2m\omega_n} \quad (7)$$

Onde $\omega_n = \sqrt{\frac{k_s}{m}}$ é a frequência natural do sistema mecânico e portanto a Eq. (6) pode ser reorganizada resultando na função de transferência $F(s)$ a seguir,

$$\frac{Z(s)}{Y(s)} = \frac{s^2}{s^2 + 2\omega_n(\zeta_d + \zeta_e)s + \omega_n^2} \quad (8)$$

Desta forma o consegue-se chegar em um modelo elétrico para o funcionamento de um sistema responsável por colher energia cinética em geral. Este modelo é um circuito RLC de segunda ordem e pode ser visto na Fig. (9).

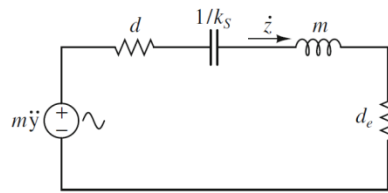


Figura 9. Modelo de sistema massa mola para colheita de energia cinética. Fonte: HEHN e MANOLI, 2014, p.29.

Tomando como referencia estas considerações pode-se modelar o transdutor piezoelétrico, por meio de associações. Esta modelagem fica como sugestão para futuros trabalhos utilizando a forma de colher energia do transdutor como foi realizado no presente trabalho.

3 METODOLOGIA E RESULTADOS

Este capítulo apresentará o protótipo capaz de gerar energia elétrica do transdutor piezoelétrico assim como seus resultados.

Na primeira parte será detalhado o protótipo utilizado para realizar a simulação vibracional exercida no transdutor em bancada experimental. Com a construção do sistema vibracional, será realizado a análise do mesmo computacionalmente, o software utilizado para o mesmo foi o LTspice XVII.

A segunda parte deste capítulo irá listar os resultados obtidos assim como uma análise destes, por meio de gráficos e tabelas demonstrando sua viabilidade tecnológica para aplicações que não exijam valores altos de tensões.

3.1 BANCADA EXPERIMENTAL

3.1.1 Protótipo para simulação da vibração

O transdutor piezoelétrico necessita de uma excitação (em forma de vibração) para que a energia elétrica possa ser gerada, vibração esta que pode ser simulada de diversas maneiras. O protótipo escolhido e construído para realizar esta tarefa possui os seguintes componentes em seu sistema:

- Eletroíma;
- Diodo 1N4007;
- Fonte de tensão;
- Íma de neodímio;
- Transdutor piezoelétrico;
- MOSFET NMOS 20N60;
- Optoacoplador 4N25;
- Gerador de Função;
- Potenciômetro de 30Ω , 5W;
- Resistor de 1Ω , 5W;

A Figura (10) demonstra o protótipo a ser construído em bancada para simulação real do sistema vibracional.

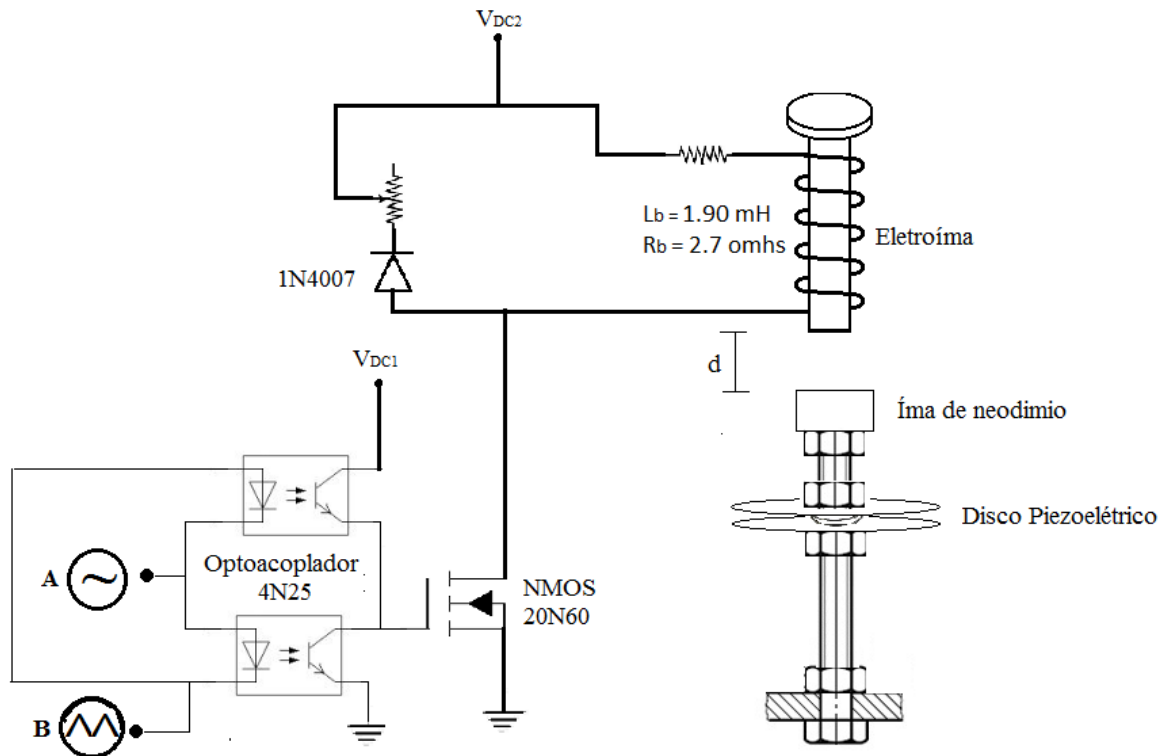


Figura 10. Desenho do protótipo a ser construído em bancada experimental.

3.1.1.1 Eletroíma

Mussoi (2005) afirma que o eletroímã é uma bobina enrolada ao redor de um núcleo de um material ferromagnético para concentrar o campo magnético. O eletroímã utiliza a corrente elétrica para gerar um campo magnético como os encontrados nos ímãs existentes na natureza, quando cortamos a energia fornecida em seus terminais o campo magnético deixa de existir.

O eletroímã usado no protótipo foi construído pelo autor, onde um fio de cobre esmaltado, AWG de número 29, foi enrolado ao redor de um núcleo de ferrite de aproximadamente 9mm de diâmetro. O número de voltas foi de aproximadamente 240.

O fato de o fio ser esmaltado proporciona uma proteção elétrica entre o mesmo, porém, para proteger o fio do núcleo ferromagnético, garantindo que os dois não tenham contato elétrico, uma camada de fita isolante cobriu o núcleo de ferrite, a Fig. (11) mostra o eletromagneto construído.



Figura 11. Eletromagneto com núcleo de ferrite.

O eletroímã possui um valor de resistência e de indutância que podem ser mensuráveis por meio de um multímetro. Posteriormente, ficará claro o motivo pelo qual esses valores são necessários tanto para a construção do protótipo quanto para as simulações que serão realizadas ao longo do capítulo. A resistência e a indutância mensuradas pelo multímetro de marca minipa modelo ET-2082C foi de $2.7 \, \Omega$ e $1.90 \, \text{mH}$ respectivamente.

A resistência tem uma relação direta com o tamanho do fio que foi utilizado para construir o eletromagneto e a indutância possui uma relação direta com o número de voltas dadas ao redor do núcleo ferromagnético, quanto maior o comprimento do fio maior a resistência do eletromagneto e quanto maior o número de voltas maior a indutância do mesmo.

O cálculo da indutância de uma bobina que faz uso de um núcleo pode ser feito por meio da seguinte fórmula:

$$L = \frac{1.257 * (n^2 * S * \mu)}{10^8 * m} \quad (9)$$

Onde n representa o número de espiras, S é a área da secção transversal em centímetro quadrado, μ é a permeabilidade da barra usada como núcleo, no caso a barra de ferrite, e m o comprimento do enrolamento em centímetro.

A barra de ferrite foi encontrada em uma loja que realiza conserto em equipamentos eletrônicos e por este motivo não sabe-se ao certo o valor da sua permeabilidade. Mas com base nos outros dados podemos realizar uma estimativa para este valor.

Para a bobina em questão os seguintes dados foram medidos:

$$n = 240$$

$$S = \pi * 0.45^2 = 0.636 \, \text{cm}^2$$

$$m = 7.8 \text{ cm}$$

$$L = 1.9 \text{ mH}$$

Desta forma a permeabilidade pode ser estimada,

$$1.9 * 10^{-3} = \frac{1.257 * (240^2 * 0.632 * \mu)}{10^8 * 7.8}$$

$$\mu = 32.39$$

3.1.1.2 Diodo

O diodo é um dispositivo semicondutor eletrônico que possui um papel fundamental nos sistemas eletrônicos com uma característica bem semelhante à de uma chave (BOYLESTAD e NASHELSKY, 2005, p.1). A Fig. (12) representa simbolicamente um diodo.

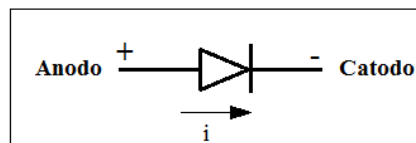


Figura 12. Símbolo de um diodo.

Boylestad e Nashelsky (2005) definem como função básica de um diodo a de conduzir corrente no sentido da seta e agir como um circuito aberto para qualquer tentativa de estabelecer corrente no sentido oposto, como pode ser observado na Fig. (12).

O diodo pode ser considerado como ideal, portanto, suas características seriam como a de uma chave que possui a capacidade de conduzir corrente em um único sentido (BOYLESTAD e NASHELSKY, 2005, p.1). Observe a Fig. (13).

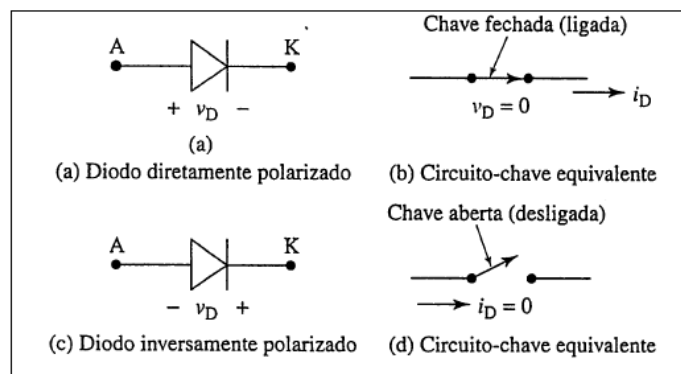


Figura 13. Circuitos com chave equivalentes a um diodo ideal. Fonte: AHMED, 2000, p.34.

Essa chave poderia ligar e desligar por si mesma, dependendo da polaridade de tensão em seus terminais, a Fig. (14) mostra essas características ideais do diodo (AHMED, 2000, p.33). Com estas características pode-se afirmar que o diodo estando polarizado diretamente permitirá a passagem de corrente, corrente esta que dependerá da fonte de tensão e dos outros elementos existentes no circuito, e não terá uma tensão em seu terminal, ou seja, ele não provoca uma queda de tensão ao longo dos seus terminais. Quando o diodo é polarizado inversamente ele não terá corrente passando por seus terminais e a tensão nele dependerá da fonte de tensão e dos outros elementos do circuito.

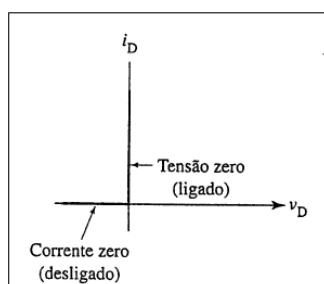


Figura 14. Características de um diodo ideal. Fonte: AHMED, 2000, p.34.

Na prática, diodos ideais não existem e suas características só podem ser utilizadas quando os circuitos trabalhados possuem correntes e tensões altas, podendo-se desconsiderar detalhes como corrente de fuga, tensões reversas, tensões de ruptura, que fazem a diferença na hora de realizar cálculos importantes no circuito. Este trabalho levará em consideração as características do diodo semicondutor e como ele se comporta dependendo da tensão aplicada em seus terminais.

O diodo semicondutor é formado pela junção dos materiais do tipo n (Catodo) e p (Anodo), que devido à suas características possibilitam um fluxo de corrente conforme a polarização inserida no material. O estudo da física e da construção deste material não será realizada neste trabalho.

Como o diodo é um dispositivo de dois terminais a aplicação de uma tensão através de seus terminais permite três possibilidades: nenhuma polarização ($V_D = 0V$), polarização direta ($V_D > 0V$) e polarização reversa ($V_D < 0V$) (BOYLESTAD e NASHELSKY, 2005, p.8).

Na ausência de uma tensão de polarização, o fluxo de carga em qualquer sentido para um diodo semicondutor é zero (BOYLESTAD e NASHELSKY, 2005, p.8).

A corrente existente sob condições de polarização reversa é chamada de corrente de saturação reversa e é representada por I_s , esta corrente geralmente não ultrapassa alguns

microamperes (BOYLESTAD e NASHELSKY, 2005, p.8). O diodo estará inversamente polarizado quando o potencial negativo for estabelecido ao material do tipo p (Ânodo) e o potencial positivo for estabelecido ao material do tipo n (Catodo).

Na polarização direta, de acordo com Boylestad e Nashelsky (2005), um potencial positivo é associado ao material do tipo p e um negativo ao material do tipo n. Nestas condições o diodo se comporta conforme a curva característica V-I da Fig. (15).

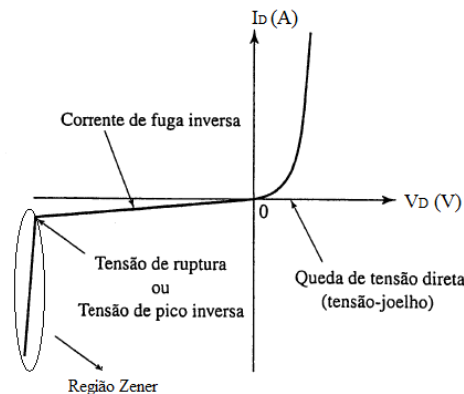


Figura 15. Características V-I de um diodo.

Na Figura (15) vemos uma tensão de joelho, essa tensão mostra que quando ao ser diretamente polarizado o diodo possui uma tensão limitadora que ao ser ligeiramente ultrapassada fará com que a corrente aumente rapidamente. Aumento este que será limitado somente pelas resistências que forem associadas em série com o diodo (AHMED, 2000, p.33).

A Figura (15) mostra também a região de polarização inversa onde aparece a corrente de fuga inversa, esta corrente pequena flui a medida que aumenta a tensão entre o ânodo e o cátodo, indicando que o diodo tem uma resistência alta na direção inversa. Essa característica é mantida com o aumento da tensão inversa, até que a tensão de ruptura seja alcançada (AHMED, 2000, p.33).

Ainda na Fig. (15) pode-se observar uma região chamada zener, observa-se um aumento a uma taxa muito rápida da corrente em sentido oposto ao da tensão positiva. Esta região deve ser evitada, caso contrário o sistema pode ser completamente alterado (BOYLESTAD e NASHELSKY, 2005, p.11). A tensão de pico inversa é o potencial máximo de polarização reversa que pode ser aplicado antes que o diodo entre na região zener.

O protótipo a ser construído e analisado em bancada utilizará um diodo em seu circuito, o diodo 1N4007 como pode ser observado na Fig. (10) da seção 3.1.1. O diodo 1N4007 será polarizado inversamente e estará associado paralelamente ao eletroímã

garantindo que no período do chaveamento realizado pelo transistor NMOS a corrente possa ser descarregada lentamente protegendo o circuito.

Os diodos possuem parâmetros importantes que devem ser analisados ao se projetar circuitos que os contenham, estes parâmetros são encontrados em sua folha de dados (datasheet).

Quando o diodo está polarizado diretamente dois parâmetros devem ser analisados, o primeiro é a corrente direta (forward Current) que é a máxima corrente que o diodo suporta. O segundo é a tensão direta (forward voltage) que é a máxima queda de tensão quando o diodo conduz.

Os parâmetros a se considerar quando o diodo é polarizado inversamente são a corrente reversa ou corrente de fuga (Reverse current) e a tensão reversa (Reverse Voltage). A corrente reversa é a corrente que retorna ao circuito quando o diodo está polarizado inversamente. A tensão reversa é a máxima tensão que o diodo pode absorver nesta polarização. A Tab. (2) descreve estes parâmetros para os diodos que serão utilizados no protótipo do trabalho. Os valores da tabela podem sofrer uma leve alteração por causa da temperatura.

Tabela 2. – Parâmetros dos diodos utilizados no protótipo.

Diodo	1N4007
Corrente direta (I_F)	1 (A)
Tensão direta (V_F)	1.1 (V)
Corrente reversa (I_R)	10 a 50 (μA)
Tensão reversa (V_R)	1000 (V)

3.1.1.3 Transdutor Piezoelétrico

Silva (2008) apud Wernerck (1996, p. 01) diz que é um sistema que transforma duas formas de energia para fins de medida. O transdutor piezoelétrico, como foi dito em sessões anteriores, transforma energia mecânica em energia elétrica, ele possui um disco de latão com 35mm de diâmetro, e o eletrodo de 23mm.

A forma como o transdutor piezoelétrico foi utilizado no protótipo pode ser observada na Fig. (16), um transdutor foi soldado ao outro com uma mola de latão no meio que faz a

conexão elétrica entre as cerâmicas piezoelétricas, gerando uma proteção maior para o material.

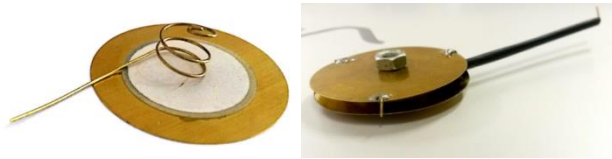


Figura 16. Transdutor Piezoelétrico.

3.1.1.4 Transistor MOSFET NMOS

Os diodos são chaves que não podem ser controladas, pois tem apenas dois terminais. Os transistores têm três terminais, dois deles atuam como contato de uma chave, enquanto o terceiro é usado para ligar e desligar a chave. Assim o circuito de controle pode ser independente do circuito que está sendo controlado (AHMED, 2000, p.56).

Existem vários tipos de transistores, neste trabalho utilizaremos um transistor de efeito de campo, mais especificamente o MOSFET (metal-oxide-semiconductor field-effect transistor). De acordo com Boylestad e Nashelsky (2005), os dispositivos de efeito de campo são controlados por tensão, são unipolares que dependem unicamente da condução de elétrons (canal n) ou de lacunas (canal p) e possuem uma alta impedância de entrada, com valores que podem variar de 1 a centenas de mega-ohms.

Em geral os transistores de efeito de campo são mais estáveis em termos de temperatura e normalmente apresentam menor tamanho (BOYLESTAD e NASHELSKY, 2005, p.175). A Fig. (17) mostra o símbolo de um MOSFET de canal n, ele tem três terminais: a porta ou *gate* G, a fonte ou *source* S e o dreno ou *drain* D (AHMED, 2000, p.71).

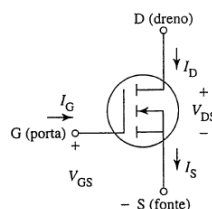


Figura 17. Símbolo MOSFET canal N. Fonte: AHMED, 2000, p.34.

O dreno deve estar ligado à carga. A fonte está sempre em um potencial próximo a da porta. Para a configuração deste dispositivo, o dreno torna-se positivo em relação a fonte e uma tensão positiva (V_{GS}) é aplicada na porta (AHMED, 2000, p.34). A tensão na porta que

realiza o controle de ligado e desligado no MOSFET, quando a tensão é positiva uma corrente de dreno (I_D) circula, o que define o MOSFET como ligado.

Os MOSFETs se subdividem em duas categorias: tipo depleção e tipo intensificação, este trabalho fará uma breve descrição dos MOSFETs tipo intensificação, pois é o tipo de dispositivo utilizado em seu protótipo.

A Figura (18) mostra a construção básica de um MOSFET tipo intensificação de canal n, observe que não existe um canal entre as duas regiões tipo n, e esta é a diferença principal que existe entre a construção do MOSFET tipo depleção e o tipo intensificação (BOYLESTAD e NASHELSKY, 2005, p.190).

Se a tensão entre a porta e a fonte (V_{GS}) é igual a 0V e uma tensão é aplicada entre o dreno e a fonte do dispositivo da Fig. (17) a ausência do canal n não permite que circule uma corrente de dreno pois não existe uma conexão entre os terminais (BOYLESTAD e NASHELSKY, 2005, p.190).

Na Figura (19) tanto V_{DS} quanto V_{GS} são tensões positivas, estabelecendo, desse modo, um potencial positivo para o dreno e para a porta em relação à fonte (BOYLESTAD e NASHELSKY, 2005, p.190). Esta configuração proporcionará a criação de um canal tipo n. Para que ocorra um aumento significativo da corrente de dreno é necessário que a tensão V_{GS} aumente a um ponto em que a região induzida tipo n possa suportar esse fluxo de corrente entre o dreno e a fonte. De acordo com Boylestad e Nashelsky (2005) esta tensão é denominada como tensão de limiar ($V_{GS(Th)}$).

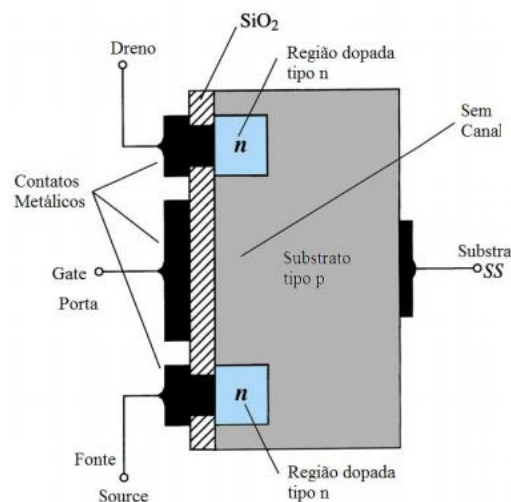


Figura 18. MOSFET tipo intensificação de canal n. Fonte: BOYLESTAD e NASHELSKY, 2005, p.192.

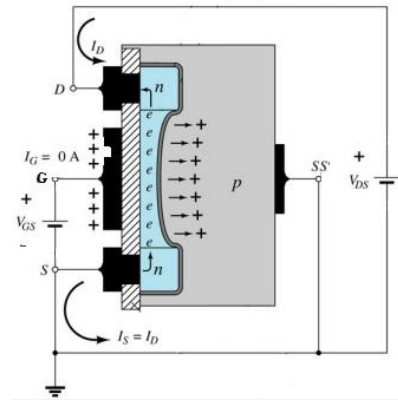


Figura 19. Formação do canal no MOSFET tipo intensificação de canal n.

Fonte:BOYLESTAD e NASHELSKY, 2005, p.192.

Existe um fator descrito por Boylestad e Nashelsky (2005) que deve ser levado em consideração que acontece quando a tensão V_{GS} é mantida em um valor fixo e a tensão V_{DS} é aumentada, este tipo de configuração fará com que a tensão entre a porta e o dreno V_{GD} reduza, tornando a porta cada vez menos positiva com relação ao dreno provocando uma redução na largura do canal que foi induzido até o ponto de pinch-off e uma condição de saturação estará estabelecida. A Fig. (20) demonstra esta alteração no canal.

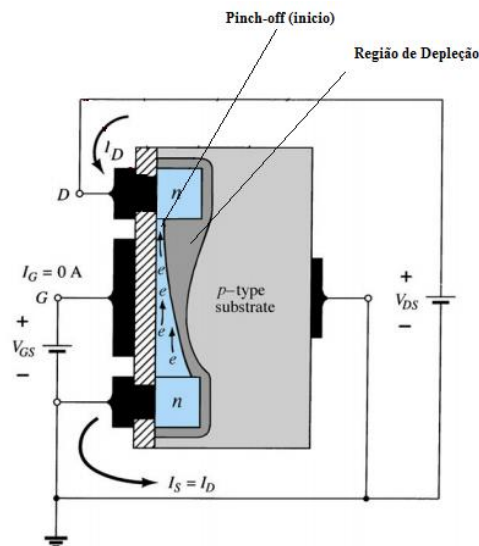


Figura 20. Alteração no canal e na região de depleção com o aumento de VDS para um valor fixo de VGS (BOYLESTAD e NASHELSKY, 2005, p.192).

O MOSFET que será utilizado no protótipo deste trabalho é o 20N60 ele estará sendo usado na região de saturação e os parâmetros a serem considerados para a construção do projeto estão descritos na Tab. (3).

Tabela 3. – Parâmetros do MOSFET 20N60.

Transistor MOSFET NMOS 20N60		
Parâmetros	Valor	Descrição
$I_{D(on)}$	20 (A)	Máxima corrente de dreno suportada no estado ligado
$V_{GS(on)}$	20 (V)	Máxima tensão suportada entre a porta e fonte que libera os 20A
$V_{GS(Th)}$	2-4 (V)	Tensão de limiar
$R_{DS(on)}$	0,45 (Ω)	Resistência existente entre os terminais dreno e fonte quando o MOSFET está ligado.

3.1.1.5 Optoacoplador

O optoacoplador é um circuito integrado utilizado, entre outras aplicações, para proteger uma parte do circuito. Ele possui um led infravermelho e um fototransistor, todas as vezes que acende o led o transistor é polarizado ligando uma carga que não está conectada com a parte do circuito que liga o led, ou seja, podemos proteger o sistema que comanda do sistema da carga que será acionada. Neste trabalho o optoacoplador, além de isolar uma parte do circuito da outra, proporciona o controle que irá caracterizar o transdutor piezoelétrico.

As tensões aplicadas aos terminais dos optoacopladores servirão para alterar a frequência no sistema, proporcionando uma variação na forma com que o eletroímã exerce sua força no sistema que possui o transdutor, variando a vibração no mesmo. Essa função será melhor descrita na seção 3.1.2.

O optoacoplador que será utilizado é o de modelo 4N25, e os seus parâmetros estão descritos na Tab. (4).

Tabela 4. – Parâmetros do 4N25.

LED		Fototransistor	
Corrente direta (I_F)	60 (mA)	Tensão coletor – emissor (V_{CE})	30 (V)
Tensão direta (V_F)	1.15 (V)	Corrente de coletor (I_C)	150 (mA)
Corrente Reversa (I_R)	10 (μ A)	Ganho de corrente (h_{FE})	400
Tensão reversa (V_R)	6 (V)		

3.1.2 Circuito responsável por estimular a vibração no protótipo

O circuito que estimula a vibração responsável por caracterizar o transdutor piezoelétrico, acionando o eletroímã, está descrito nas Fig. (21) e (22). Ele possui os componentes da seção 3.1.1.

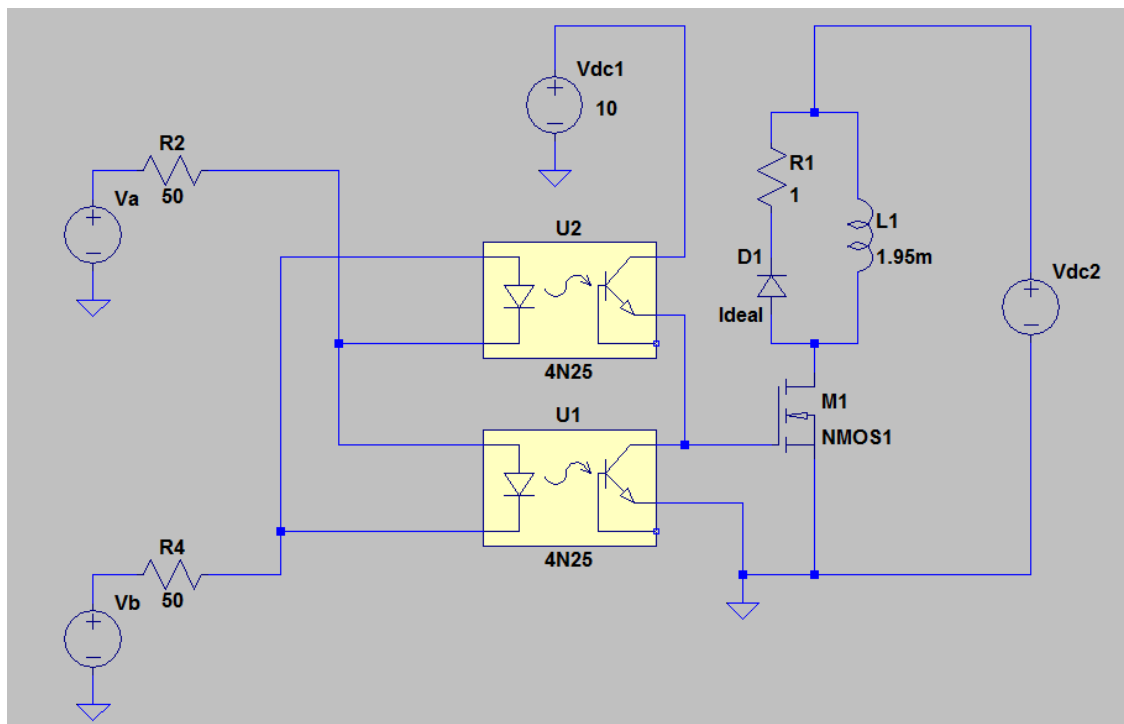


Figura 21. Circuito para acionamento do eletroímã entrada senoidal.

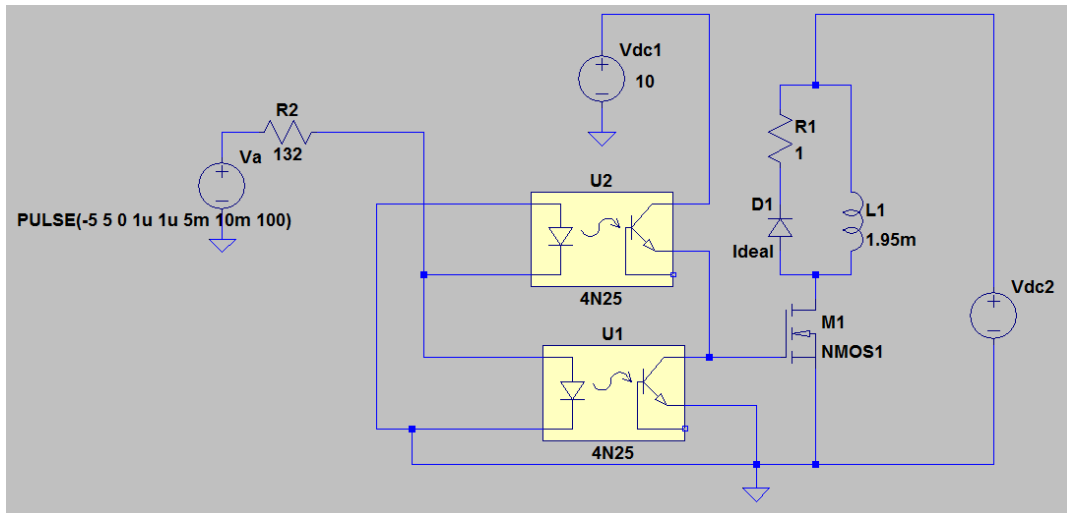


Figura 22. Circuito para acionamento do eletroímã entrada pulso quadrado.

O circuito é dividido em duas partes, uma parte antes do optoacoplador e a outra depois do optoacoplador. A Fig. (23) proporciona uma visualização melhor da primeira parte do circuito tanto para a configuração de entrada senoidal quanto para configuração de pulso quadrado.

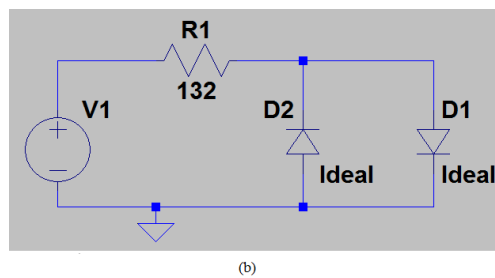
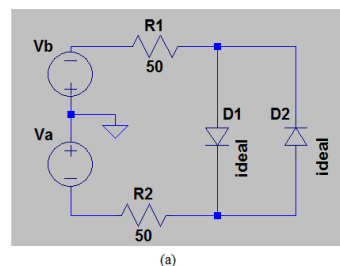
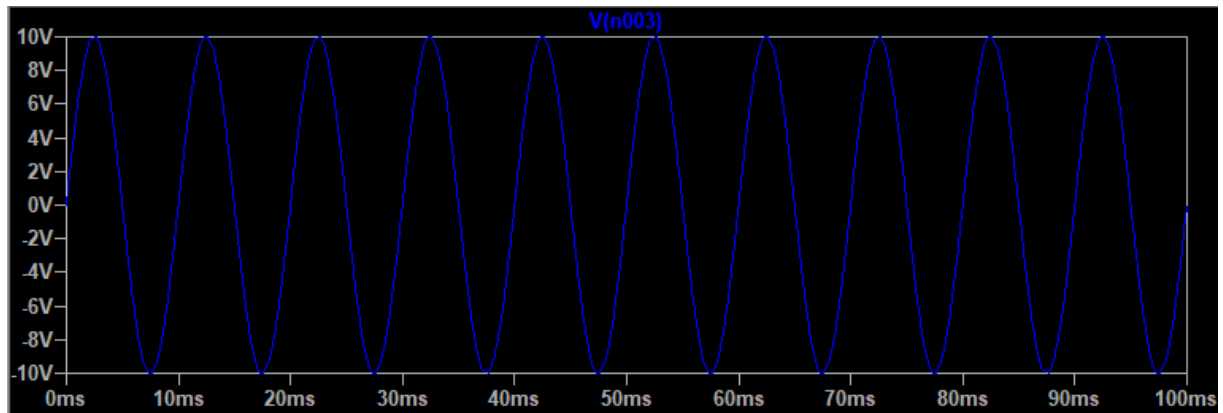


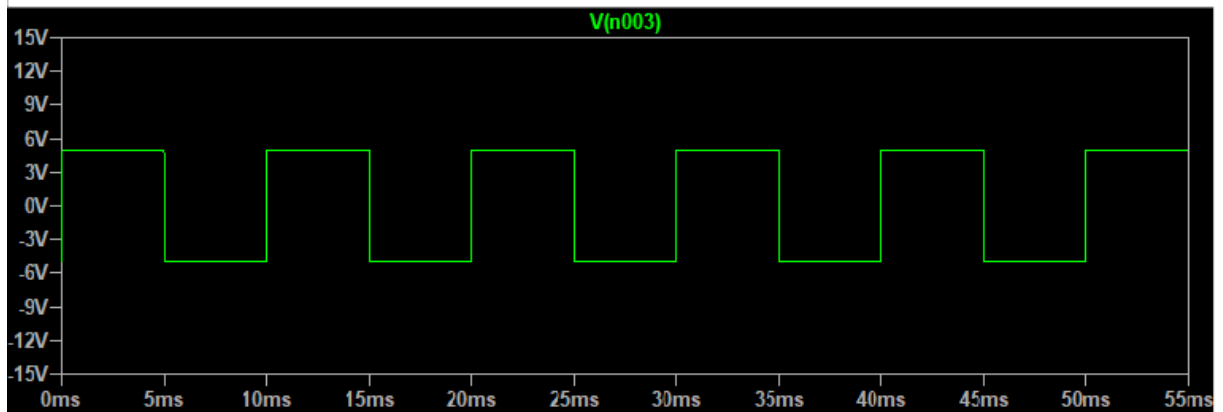
Figura 23. Primeira parte do circuito para acionamento do eletroímã (a) com entrada senoidal
(b) com pulso quadrado.

A primeira parte está realizando a soma das tensões, a tensão V_a primeiramente será uma senoide com amplitude de 10V de pico e uma frequência variando entre 1Hz e 1KHz, e em um segundo momento será um pulso quadrado com amplitude variando no máximo de -5V a 5V com as mesmas variações de frequência e *duty cycle* que vai de 10% a 90%. A

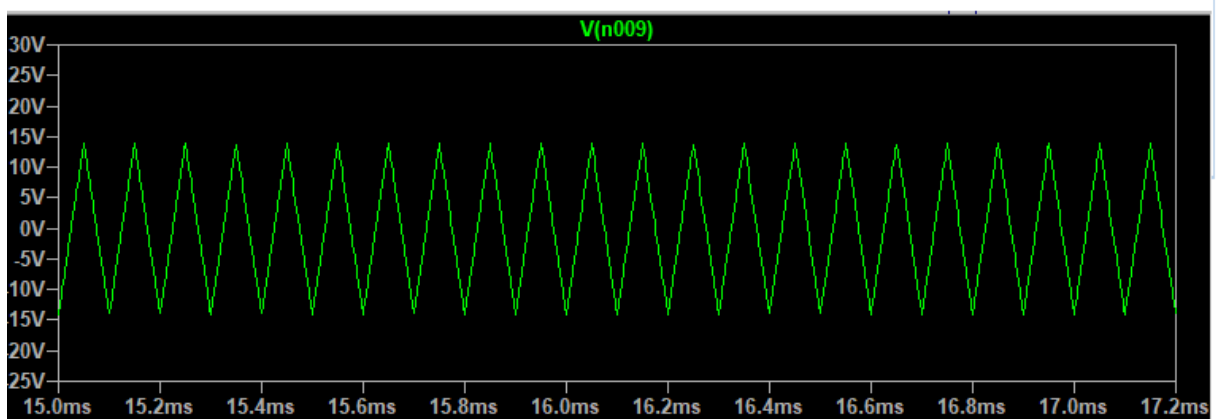
tensão V_b será uma onda triangular de amplitude 14V de pico e 10KHz de frequência. A Fig. (24) mostra as formas de onda de V_{a1} , V_{a2} e V_b que foram simuladas no Ltspice.



(a)



(b)



(c)

Figura 24. Formas de onda da entrada do circuito. (a) Onda senoidal (b) pulso quadrado (c) onda triangular.

A segunda parte do circuito corresponde ao MOSFET 20N60 e a carga, que é o eletroímã e os componentes necessários para realizar um funcionamento mais eficiente do sistema.

A seguir será feita uma análise separada para cada forma de onda de entrada responsável por acionar o eletromagneto utilizado no experimento.

3.1.2.1 Análise com Modulação PWM senoidal

A simulação da soma das tensões da entrada A, sendo uma senóide, pode ser vista na Fig. (25). Para que o diodo ligue e desligue é necessário que a tensão V_a e V_b atendam as seguintes relações. Onde V_F é a tensão direta do diodo conforme especificação na Tab. (3) da seção 3.1.1.5.

$$\begin{aligned} V_a &> (V_b + V_F), & \text{liga o diodo} \\ V_a &< (V_b + V_F), & \text{desliga o diodo} \end{aligned}$$

Com o diodo ligando e desligando o fototransistor também ligará e desligará, quanto maior a corrente que passa pelo diodo infravermelho, maior é a corrente que passa entre o coletor e emissor (I_{CE}).

Quando o diodo liga ele emite uma luz que polariza o fototransistor gerando uma corrente de base (I_B) e consequentemente uma corrente de coletor (I_C). A Fig. (20) mostra que o fototransistor possui a junção coletor-base diretamente polarizada e com isso, quando a junção coletor-base é polarizada diretamente pelo diodo infravermelho, ele passa a operar na região de saturação funcionando como uma chave fechada, ou seja, fototransistor ligado, deixando passar uma corrente de coletor que vai aumentando conforme a corrente do diodo aumenta. Quando a corrente de coletor é máxima a tensão entre coletor-emissor é zero ($V_{CE} = 0$).

Quando o diodo desliga a corrente de base é zero ($I_B=0$) e consequentemente não haverá corrente de coletor e a tensão na junção coletor-emissor é igual a tensão de polarização V_{dc1} . A Fig (26) demonstra esta relação entre a V_{CE} e I_C .

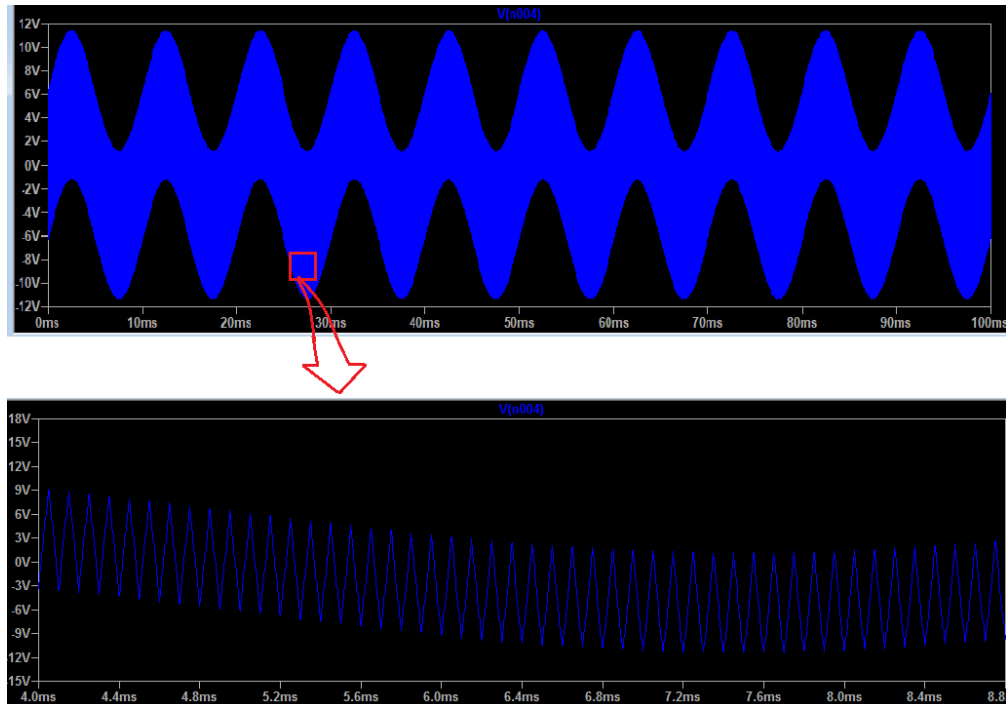


Figura 25. Forma de onda na entrada do diodo 1 simulada no software Ltspice com entrada senoidal .

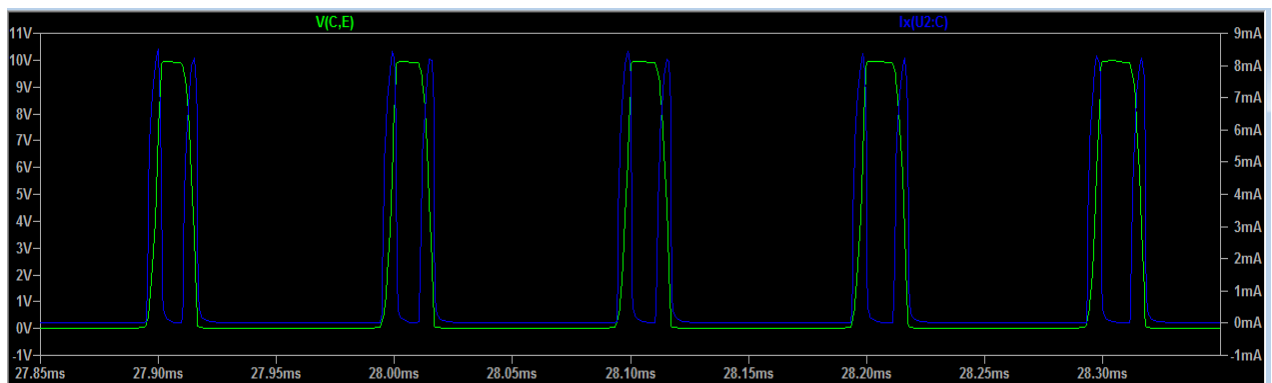


Figura 26. Relação entre VCE e IC, gráfico da cor azul corresponde ao IC e gráfico de cor verde corresponde ao VCE.

O MOSFET por ser um componente controlado por tensão não necessita de uma corrente alta no seu *gate*, e por ser um NMOS tipo intensificação quanto maior a tensão (V_{GS}) nos seus terminais, *gate* e *source*, maior será a abertura do seu canal para que circule uma carga, ou seja, maior a sua corrente de dreno (I_D).

A forma com que o optoacoplador trabalha proporcionou uma tensão no *gate* do MOSFET na forma de PWM como pode ser observado na Fig. (27).

O PWM é uma forma de modular um sinal por largura de pulso, ela pode ser usada tanto em telecomunicações quanto em fontes de alimentação. Este trabalho utiliza o PWM para minimizar as perdas que podem ocorrer em um chaveamento ideal, ou seja, alternar o valor da transferência de potência entregue a carga controlando o fluxo de corrente na carga. Esta relação pode ser vista na Fig. (28). Quanto maior a largura de pulso maior será a corrente.

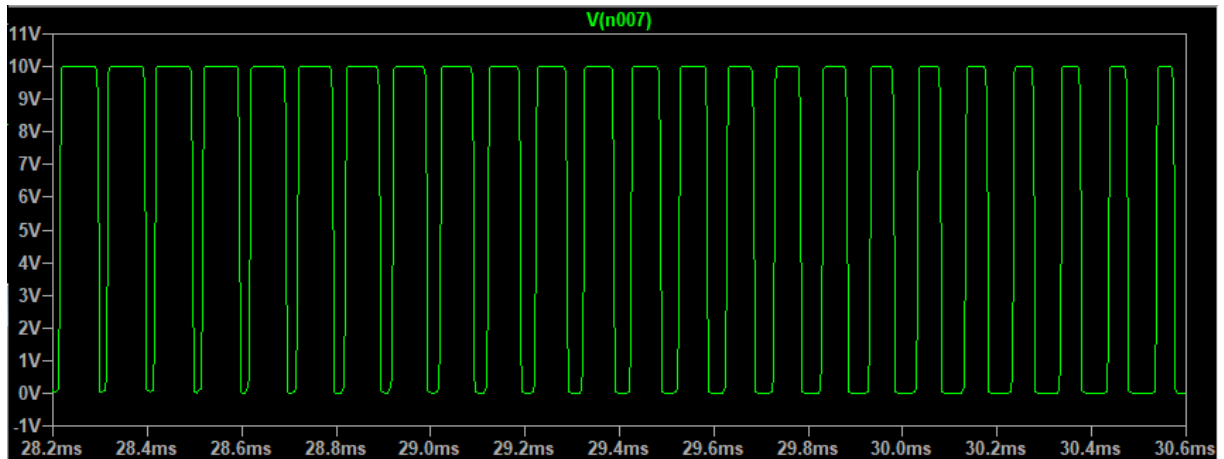


Figura 27. PWM no gate do MOSFET.

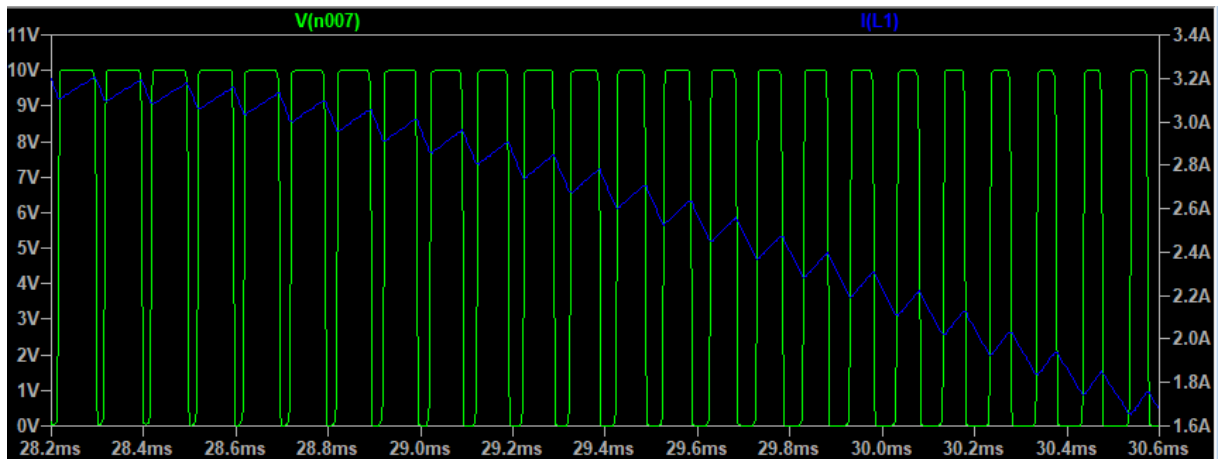


Figura 28. Relação PWM e corrente no eletromagneto, linha azul corresponde à corrente do eletromagneto e linha verde corresponde a tensão entregue ao gate do MOSFET.

Pode-se observar que embora a corrente no eletromagneto chegue perto de 0A ela não se iguala a zero, a explicação para este fenômeno está no diodo que foi associado à carga do MOSFET que proporciona uma descarga de corrente mais lenta do que caso o diodo não estivesse conectado ao circuito. Observe na Fig. (29) e (30) as formas de onda da corrente no eletromagneto sem e com o diodo. Quando o MOSFET está ligado, a corrente passa pelo

eletromagneto e nenhuma corrente passa pelo diodo, quando o MOSFET está desligado a corrente que ficou armazenada no eletromagneto começa a se descarregar pelo diodo. E na ausência do diodo a corrente chega a zero no eletromagneto.

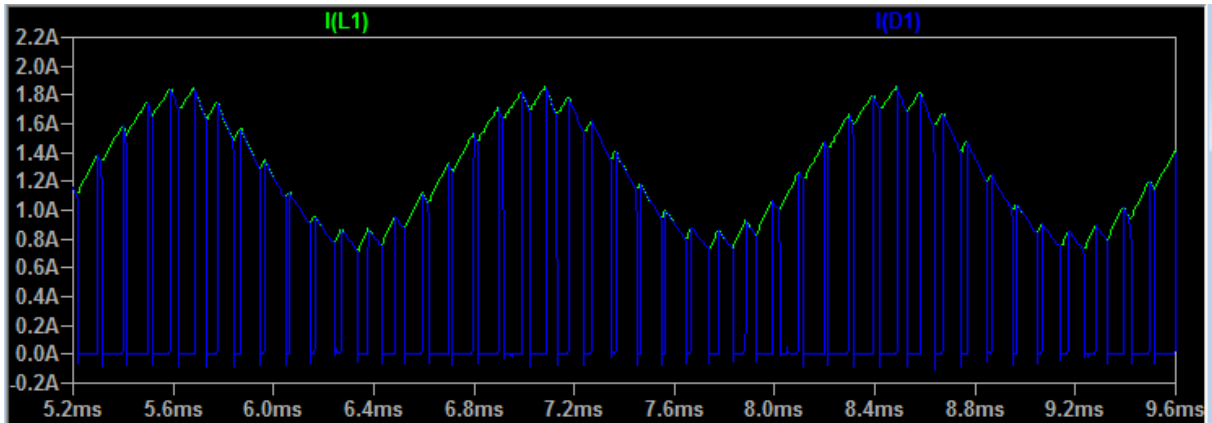


Figura 29. Comportamento da corrente no eletromagneto (gráfico verde) e da corrente no diodo (gráfico azul).

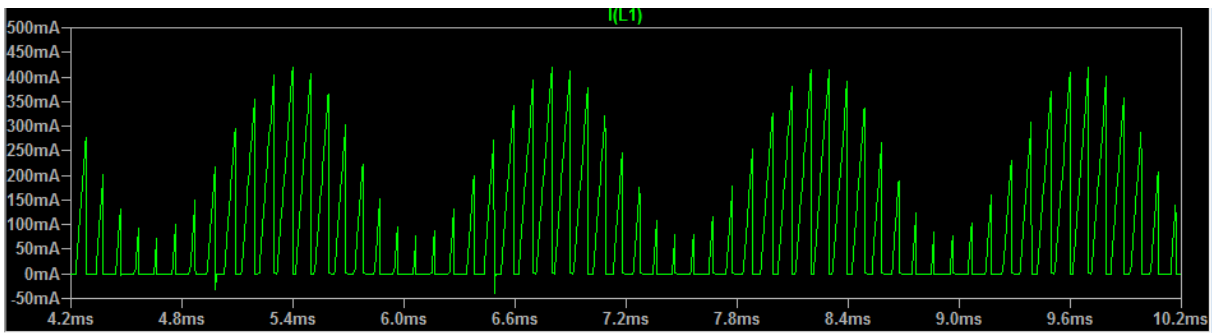


Figura 30. Comportamento da corrente no eletromagneto sem a presença do diodo no circuito.

3.1.2.2 Análise com Modulação por Pulsos Quadrados

O circuito com a entrada de controle por pulso quadrado não usará a modulação PWM como na entrada com onda senoidal, será usado o pulso no terminal A do circuito e o terminal B estará aterrado, usando o controle apenas para ligar e desligar os diodos na entrada do optoacoplador ligando e desligando os fototransistores na saída do mesmo. A Fig. (31) demonstra esse processo.

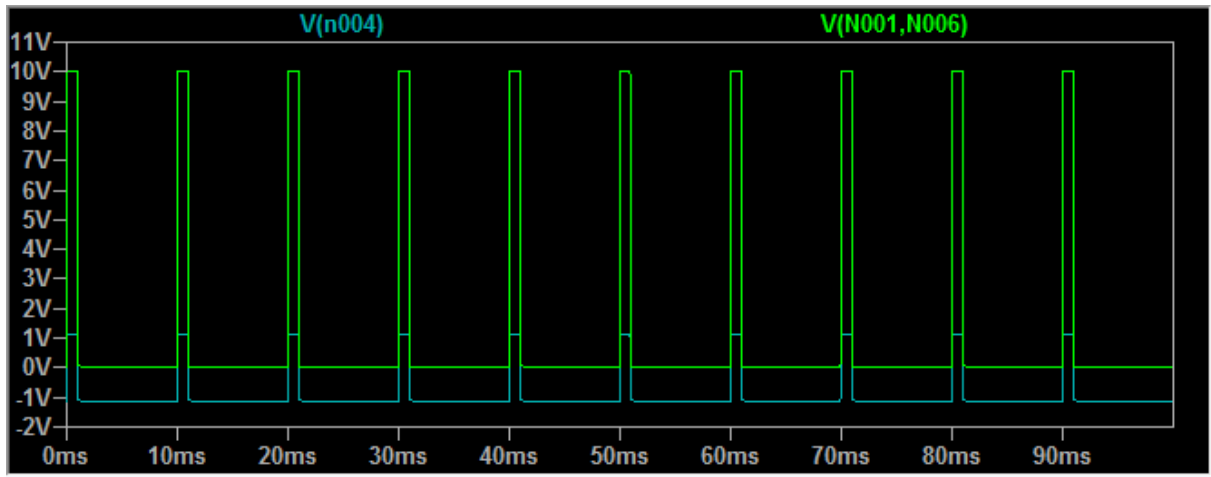


Figura 31. Pulso de entrada V_a (gráfico azul), pulso de saída no optoacoplador VCE (gráfico verde).

O circuito funcionando como chave liga-desliga produz o efeito demonstrado na Fig. (32) sobre a corrente no eletromagneto, relacionada à tensão responsável por controlar o chaveamento no MOSFET.

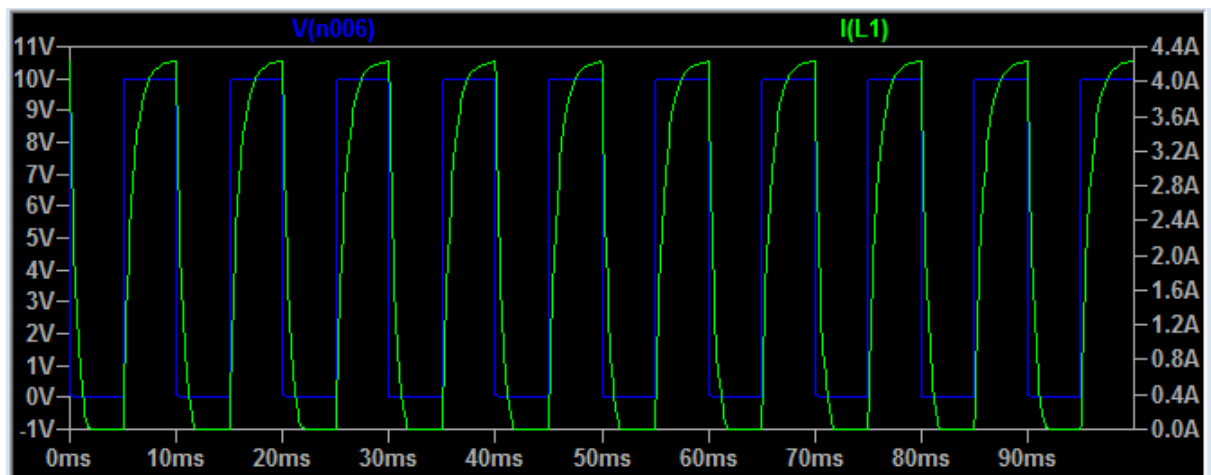
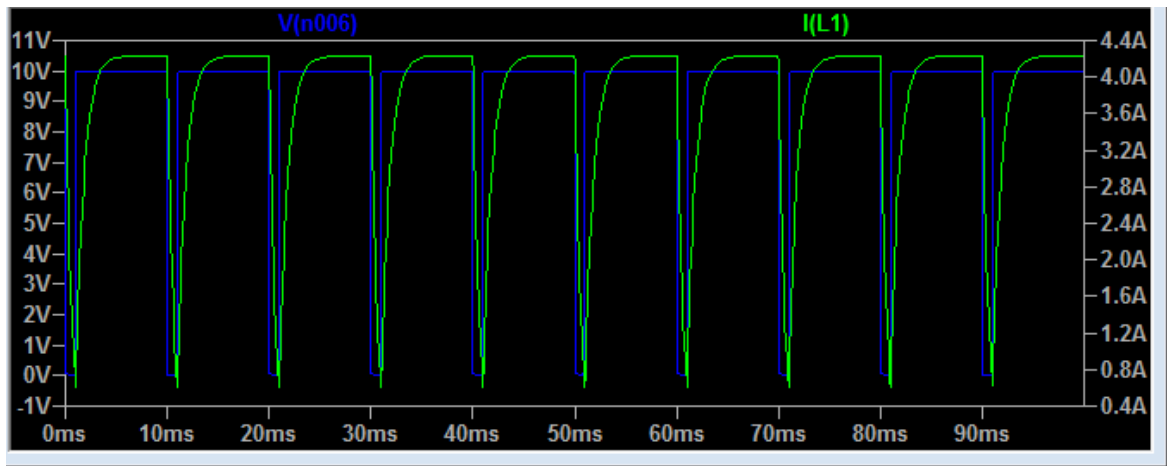
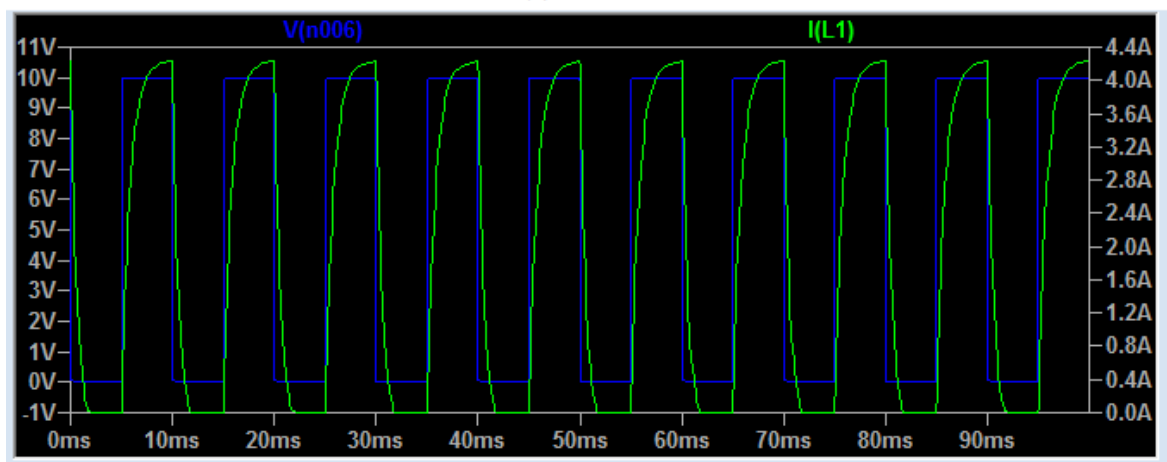


Figura 32. Relação da corrente eletromagneto (gráfico verde) com a tensão no gate do MOSFET VGS (gráfico azul).

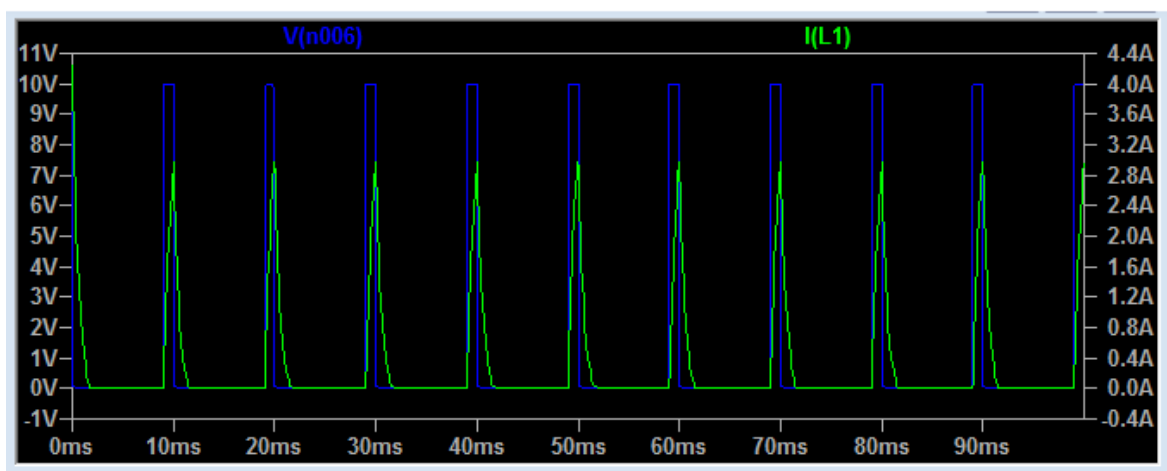
Para cada *duty-cycle* a cada frequência o eletromagneto permanece mais ou menos tempo em funcionamento. Observe algumas variações na Fig. (33) e (34).



(a)

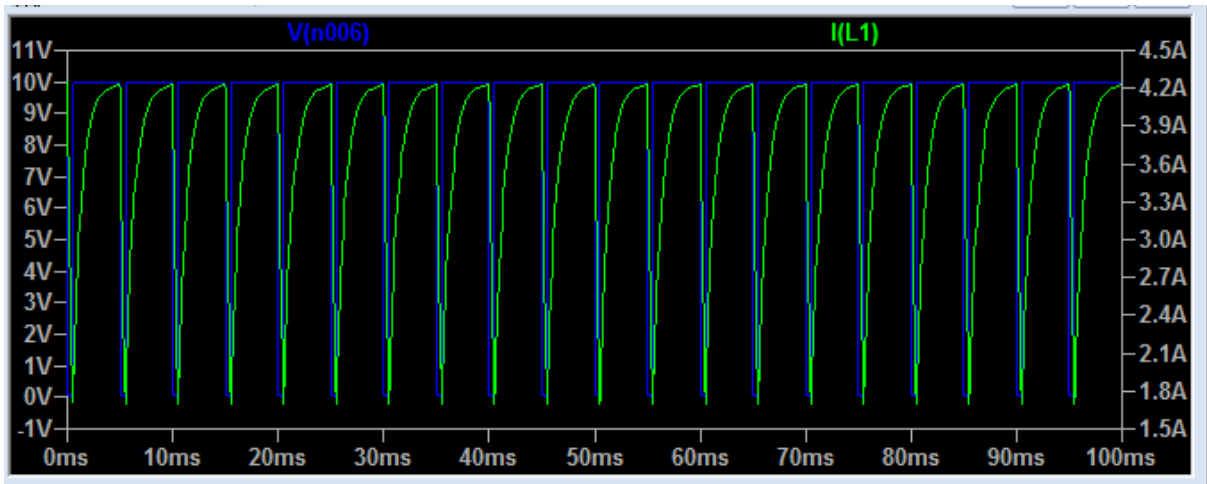


(b)

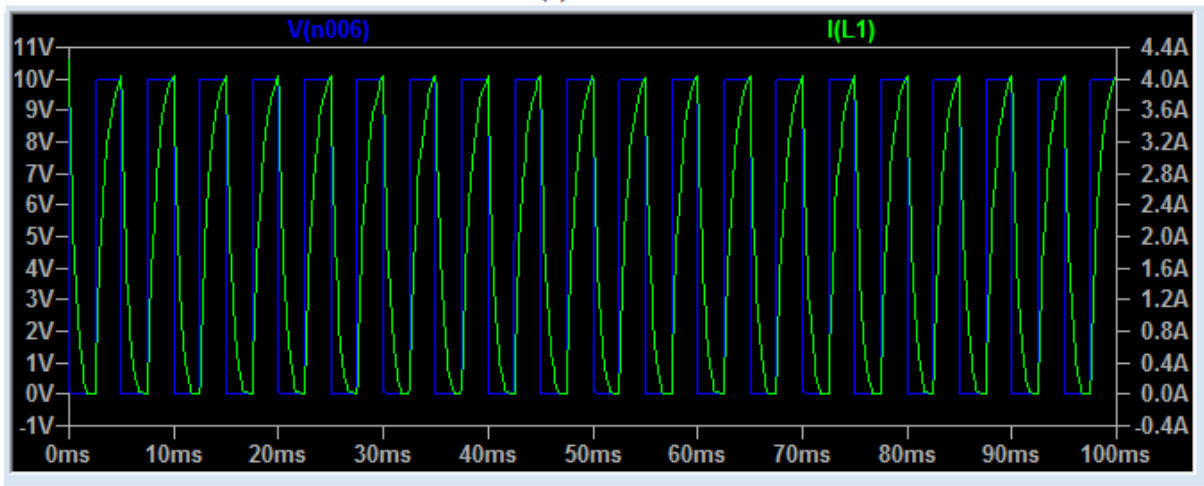


(c)

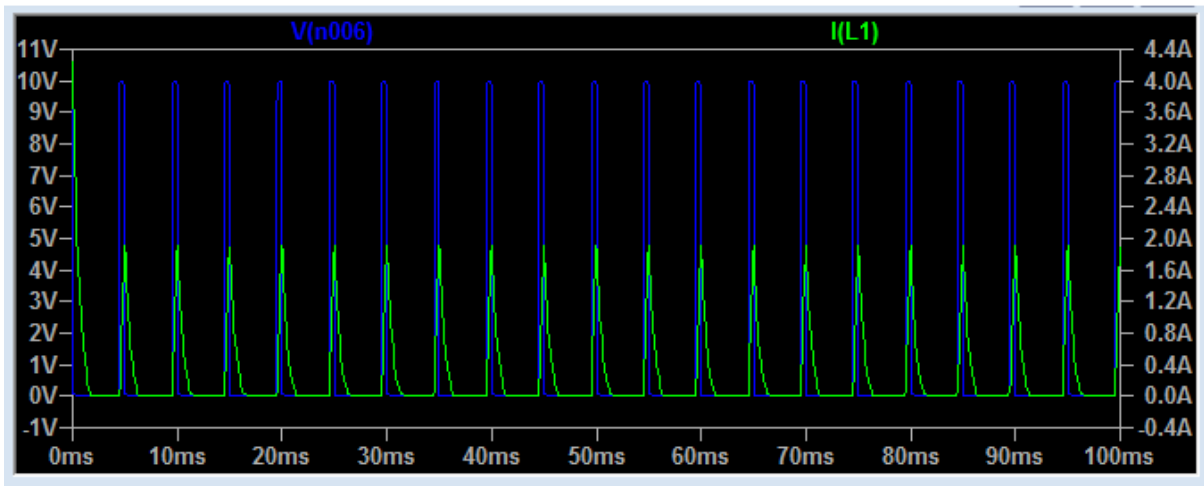
Figura 33. Gráficos VGS e corrente no eletromagneto com 100 Hz e variações do Duty-cycle de (a) 10% (b) 50% e (c) 90%.



(a)



(b)



(c)

Figura 34. Gráficos VGS e corrente no eletromagneto com 200 Hz e variações do Duty-cycle de (a) 10% (b) 50% e (c) 90%.

É importante observar que os gráficos das Fig. (33) e (34) estão invertidos no *duty-cycle*, pois o pulso que chega no *gate* do MOSFET é invertido conforme pode-se observar na Fig. (35).

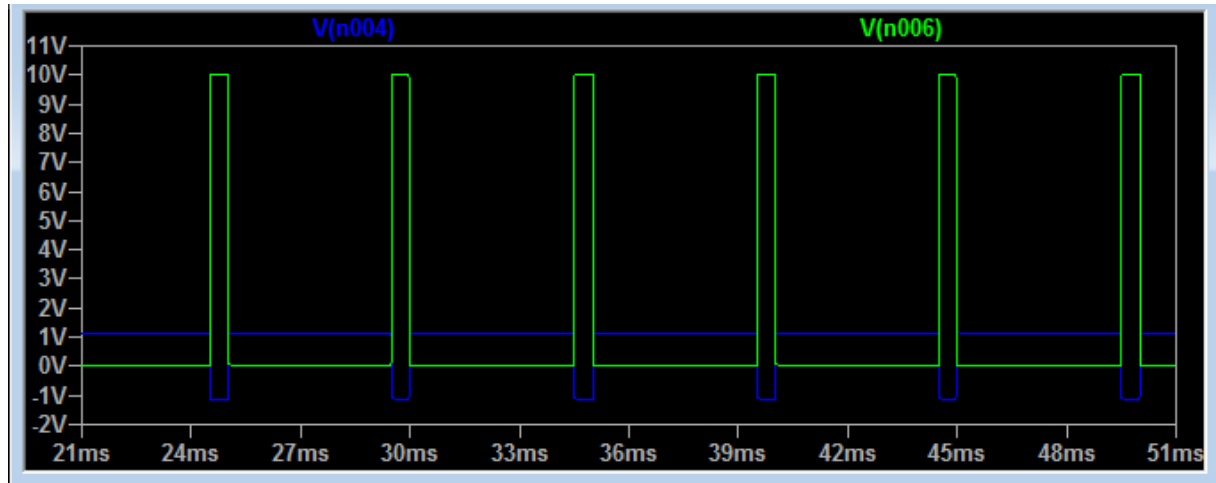


Figura 35. Relação VGS - Duty-cycle de 10% - (gráfico verde) com Va - Duty-cycle 90% - (gráfico azul).

3.1.3 Concepção do protótipo em bancada experimental

O projeto do circuito responsável por simular a vibração que irá extrair energia do transdutor piezoelétrico levou em consideração as restrições de cada um dos componentes que o compunha. Para isso as folhas de dados (*datasheet*) foram consultadas, observando os parâmetros limitadores para cada um. A seção 3.1.1 detalhou cada um desses parâmetros e descreveu o funcionamento de cada um desses componentes. A Fig. (36) mostra o circuito que aciona o eletroímã.

O eletroímã foi fixado em uma caixa de madeira construída pelo autor, possibilitando que o mesmo permaneça imóvel durante o experimento, o arranjo mecânico experimental pode ser visualizado na Fig. (37). O arranjo do experimento completo pode ser visualizado na Fig. (38).

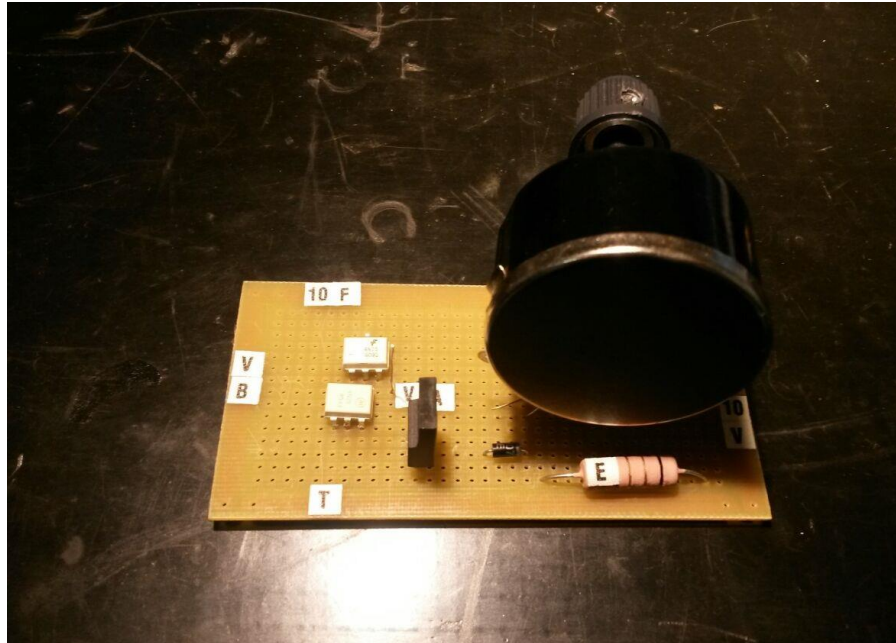


Figura 36. Circuito responsável por acionar o eletroíma.



Figura 37. Arranjo mecânico para simular a vibração e extrair energia do piezoelétrico.

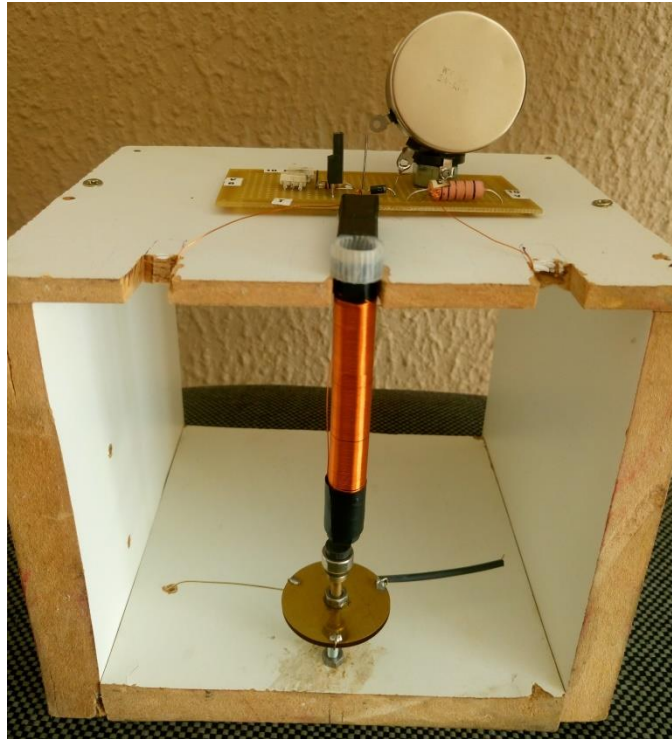


Figura 38. Arranjo experimental completo.

3.2 RESULTADOS

Esta seção será dividida em duas partes, a primeira corresponde aos resultados obtidos durante o procedimento experimental em bancada para a entrada com uma senóide variando a sua frequência e analisando como o transdutor piezoelétrico se comporta. E a segunda parte disponibilizará os resultados para o controle realizado por pulsos quadrados com variações de frequência e *duty-cycle*.

3.2.1 Resultados com Modulação PWM Senoidal

No arranjo experimental existem vários fatores que podem influenciar no resultado final obtido durante o procedimento experimental, entre estes fatores pode-se destacar a distância (d) existente entre o eletromagneto e o ímã, o núcleo que o eletromagneto foi construído, a superfície ao qual o transdutor piezoelétrico está fixada, a forma com que ele está fixado, a forma com que está centrado o objeto responsável por fazer a conexão entre os dois transdutores, a corrente que passa no eletromagneto.

Dos fatores acima listados cada um tem a sua devida importância. Com relação à distância entre o eletromagneto e o ímã de neodímio, quanto menor for esta distância melhor será a resposta em frequência no transdutor, portanto tomou-se cuidado para colocar uma

distância onde o ímã não fosse atraído pelo eletromagneto ao ponto de deslocar em sua direção. A distância obtida foi de $d = 4,4 \text{ mm}$.

Com relação ao núcleo que compunha o eletromagneto foi escolhido um material que possibilitasse a redução por perda de histerese, o material escolhido foi o ferrite. Durante o experimento observou-se que o transdutor é extremamente sensível e a cada variação na superfície, fixação do material ou forma com que está centralizado produzia uma grande alteração na tensão final que o mesmo produzia.

A corrente que passa pelo eletromagneto é outro fator que pode alterar o resultado no transdutor, como o eletromagneto é uma bobina ele armazena corrente, ao armazenar corrente a bobina que está sofrendo uma variação em seu sistema causado pela modulação PWM (anteriormente detalhada) pode não conseguir descarregar a tempo esta corrente armazenada, impossibilitando que o mesmo opere da forma esperada. Para evitar que isso aconteça foi acrescentado o diodo 1N4007 e um potenciômetro para ajustar a taxa com que essa energia é dissipada. A cada frequência foi realizado uma variação na resistência do potenciômetro para ajustar essa distorção no canal.

A Tabela (5) detalha os resultados obtidos em bancada com as variações das frequências, as tensões obtidas na saída do transdutor e as correntes no eletromagneto. Na tabela onde está V_p é tensão de pico e V_{pp} é tensão de pico a pico.

O transdutor começou a medir a partir de 50Hz e foi até 370Hz variando de 10 em 10 Hz. O gráfico que relaciona a tensão obtida no transdutor para cada frequência é demonstrado na Fig. (39). Observa-se que o gráfico possui um pico em uma frequência onde a tensão se eleva de forma considerável. Este ponto é onde existe a frequência de ressonância no transdutor para o arranjo experimento em questão. Portanto para cada tipo de arranjo experimento e situação que o transdutor é submetido observaremos uma frequência de ressonância diferente. A frequência de ressonância obtida possui o valor de $f_0 = 210\text{Hz}$, a Fig. (40) mostra a forma de onda obtida no osciloscópio para a tensão gerada pelo transdutor na frequência de ressonância.

Tabela 5. – Resultados para saída no transdutor piezoelétrico.

Sinais de alimentação	$V_a = 8$ (Vp) com frequência variando, onda senoidal	
	$V_b = 12$ (Vp) e 10 KHz, onda triangular	
	$V_{dc1} = 10V$	
	$V_{dc2} = 10V$	
Frequência F_a (Hz)	Tensão no Piezo V_{pp} (V)	Corrente no eletroímã I_e (A)
50	0.440	0.167
60	0.592	0.167
70	0.780	0.167
80	0.472	0.168
90	0.560	0.168
100	0.808	0.168
110	0.820	0.168
120	0.560	0.171
130	0.540	0.171
140	0.840	0.171
150	0.820	0.174
160	0.860	0.177
170	0.900	0.168
180	1.0	0.167
190	1.30	0.168
200	2.18	0.168
210	9.76	0.172
220	6.00	0.167
230	4.32	0.167
240	3.28	0.167
250	2.32	0.167
260	1.76	0.167
270	1.36	0.167
280	1.00	0.167
290	0.760	0.167
300	0.600	0.167
310	0.540	0.167
320	0.416	0.167
330	0.352	0.167
340	0.304	0.167
350	0.272	0.167
360	0.240	0.167
370	0.246	0.167

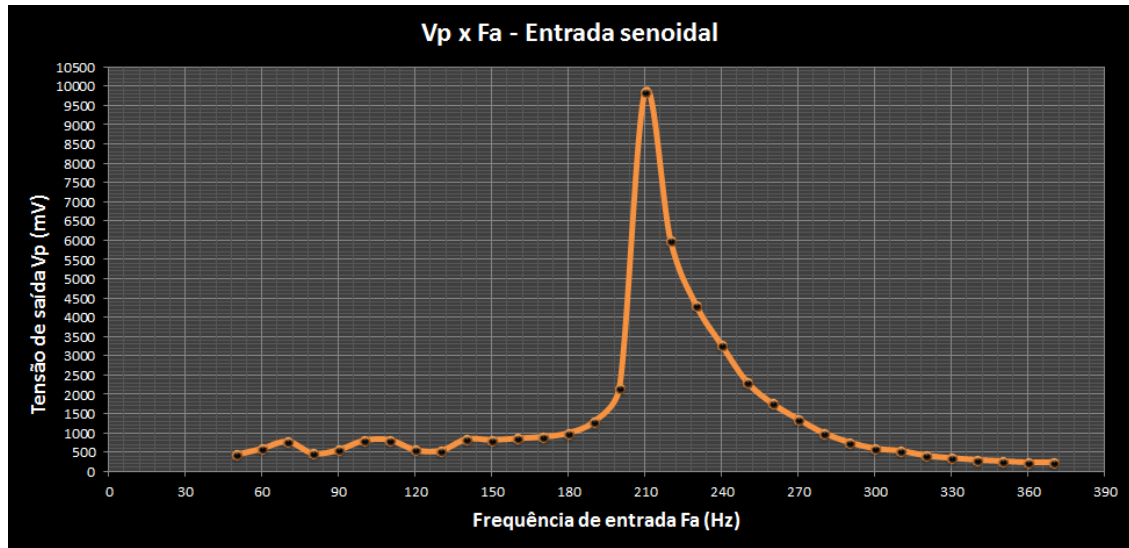


Figura 39. Gráfico V_p X F_a .

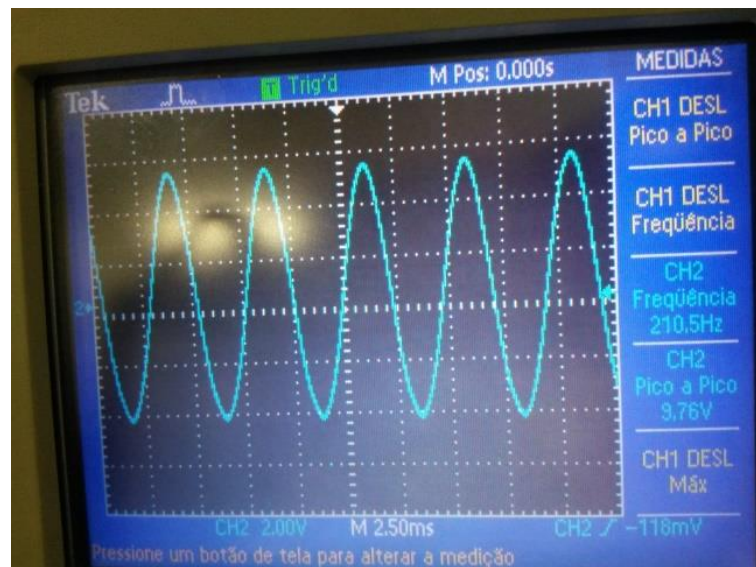


Figura 40. Tensão gerada pelo piezo na frequência de ressonância.

O eletromagneto possui uma força F de 1.96×10^{-3} N, para obter este dado uma balança eletrônica de bolso, do modelo MPS6177 que possui uma capacidade de 200g, foi utilizada. A distância entre a balança e o eletromagneto foi a mesma do arranjo experimental entre o eletromagneto e o ima, $d = 4.4\text{mm}$. Com isso obteve-se o peso de 0.2 g que foi substituído na Eq. (10).

$$F = m * g \quad (10)$$

$$F = 0.2 * 10^{-3} \text{ kg} * 9.8 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} = 1.96 * 10^{-3} \text{ N}$$

Para entender melhor como que a força do eletromagneto funciona é preciso compreender que ela depende da amplitude da corrente que passa pelo eletroímã. Se a amplitude da corrente não variar a força será a mesma. No arranjo experimental montado neste trabalho a amplitude da corrente só variará quando o ajuste do potenciômetro for realizado, por conta da distorção do canal descrita na seção 3.2.1. Se a amplitude da corrente aumentar a força também aumentará. As variações trabalhadas aqui não resultaram em uma variação muito significativa na amplitude da corrente como pode ser vista na Tab. (5) e com isso não existiu uma variação muita brusca na força do eletromagneto.

A Figura (41) mostra a forma como foi medida a força do eletromagneto. Com a força do eletromagneto dimensionada pode-se obter a aceleração ao qual o sistema está trabalhando medindo a massa do conjunto que se move dentro do sistema. O conjunto que se move no sistema é composto pelos dois transdutores soldados, os fios que fazem a conexão entre os transdutores, o parafuso que serviu de suporte para os ímas, a porca que foi fixada aos transdutores e os 3 ímas.

A massa medida m_c foi de 10,3g, que pode ser visualizada na Fig. (41). Com isso pode-se calcular a aceleração do sistema conforme Eq. (11).

$$a = \frac{F}{m} \quad (11)$$

$$\frac{1.96 * 10^{-3} N}{10.3 * 10^{-3} kg} = 0.19 \text{ m/s}^2$$



Figura 41. Método para medir força do eletromagneto.



Figura 42. Dimensionamento massa do conjunto que se move.

3.2.2 Resultado com Modulação por Pulsos Quadrado

A entrada por pulso exige um cuidado adicional que está relacionado à corrente no MOSFET e consequentemente no eletromagneto, para que a corrente não queime o MOSFET foi necessário reduzir a tensão V_{dc1} de 10V para 4V e colocar um resistor de 82Ω na entrada que somado ao resistor do gerador de funções ($R_g = 50\Omega$) resultou em uma resistência de 132Ω .

A Tabela (6) mostra o resultado experimental obtido com a variação tanto da frequência quanto para o duty-cycle da entrada por pulso quadrado, onde F_a significa a frequência do pulso quadrado, V_{pp} significa a tensão de pico a pico da saída no transdutor, D é o duty-cycle e NM significa que o transdutor não mede para esta frequência.

Tabela 6. – Resultados para saída no transdutor piezoelétrico com pulso quadrado.

Sinais de alimentação	$V_a = 5 \text{ (Vp)}$ com frequência variando, pulso quadrado $V_{dc1} = 4V$ $V_{dc2} = 10V$								
	V_{pp} para cada variação de Duty-Cycle (V)								
F_a (Hz)	$V_{pp} - D=10\%$	$V_{pp} - D=20\%$	$V_{pp} - D=30\%$	$V_{pp} - D=40\%$	$V_{pp} - D=50\%$	$V_{pp} - D=60\%$	$V_{pp} - D=70\%$	$V_{pp} - D=80\%$	$V_{pp} - D=90\%$
90	NM	NM	1.0	0.824	NM	0.840	NM	NM	NM
100	NM	NM	NM	NM	NM	NM	NM	NM	NM
110	NM	NM	NM	NM	NM	NM	NM	NM	NM
120	NM	NM	NM	NM	NM	NM	NM	NM	NM
130	NM	NM	0.920	0.880	0.600	0.640	NM	NM	NM
140	NM	NM	0.640	0.544	NM	NM	NM	NM	NM
150	NM	0.416	0.600	0.568	0.680	0.520	NM	NM	NM
160	NM	0.328	0.680	0.648	0.680	0.600	NM	NM	NM
170	0.160	0.304	0.780	0.744	0.760	0.680	NM	NM	NM
180	0.164	0.312	0.920	0.824	0.920	0.760	0.640	NM	NM
190	0.168	0.320	1.02	0.928	1.04	0.880	0.880	NM	NM
200	0.168	0.336	1.62	1.22	1.32	1.04	2.08	0.700	NM
210	0.236	0.392	2.88	1.84	2.36	1.72	3.64	2.48	1.96
220	0.192	0.464	3.80	4.56	4.64	4.56	2.16	1.60	1.32
230	0.248	0.700	2.28	3.04	3.12	2.60	1.52	1.08	0.880
240	0.336	1.70	1.32	2.04	2.04	1.92	1.04	0.800	0.640
250	0.516	1.54	0.920	1.48	1.48	1.36	0.880	0.680	0.480
260	0.920	1.18	0.680	1.08	1.12	1.00	0.720	NM	NM
270	0.832	0.860	NM	0.880	0.840	0.800	NM	NM	NM
280	0.592	0.620	NM	0.680	0.680	0.640	NM	NM	NM
290	0.416	0.500	NM	NM	NM	NM	NM	NM	NM
300	0.312	0.440	NM	NM	NM	NM	NM	NM	NM
310	0.224	0.340	NM	NM	NM	NM	NM	NM	NM
320	0.174	0.280	NM	NM	NM	NM	NM	NM	NM
330	0.144	NM	NM	NM	NM	NM	NM	NM	NM

Para cada duty-cycle obteve-se um gráfico relacionando a frequência do pulso quadrado com a tensão obtida no transdutor. Observe as figuras a seguir.

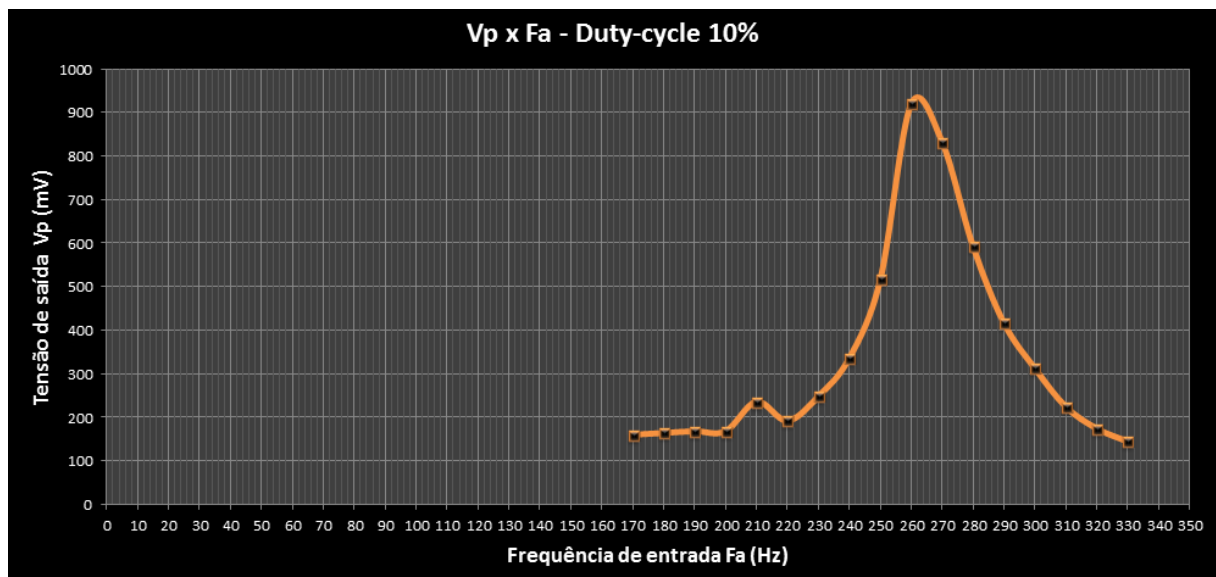


Figura 43. Gráfico V_p x F_a para duty-cycle de 10%.

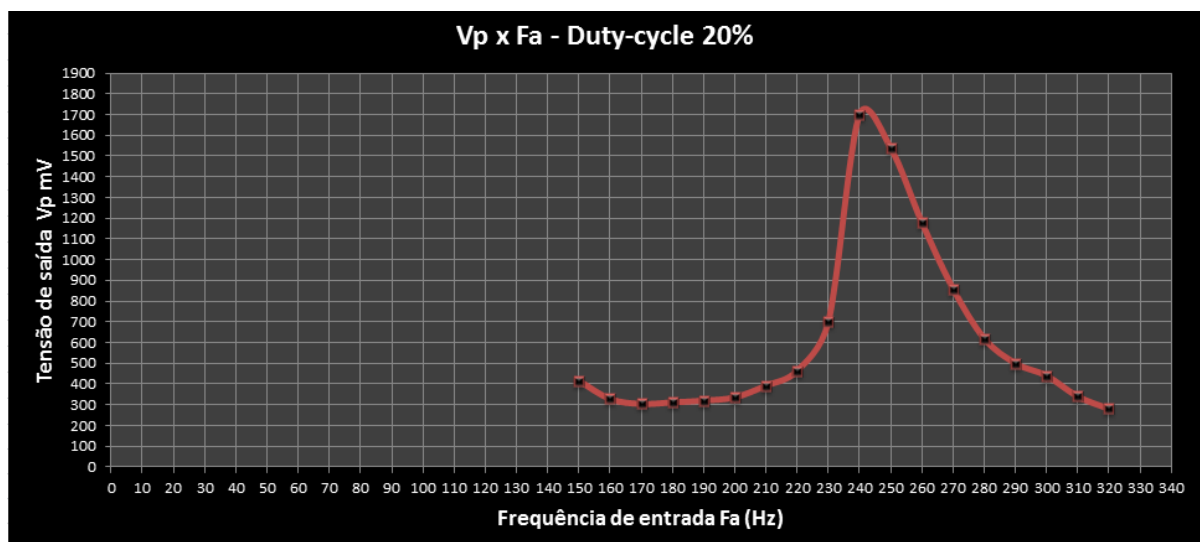


Figura 44. Gráfico V_p x F_a para duty-cycle de 20%.

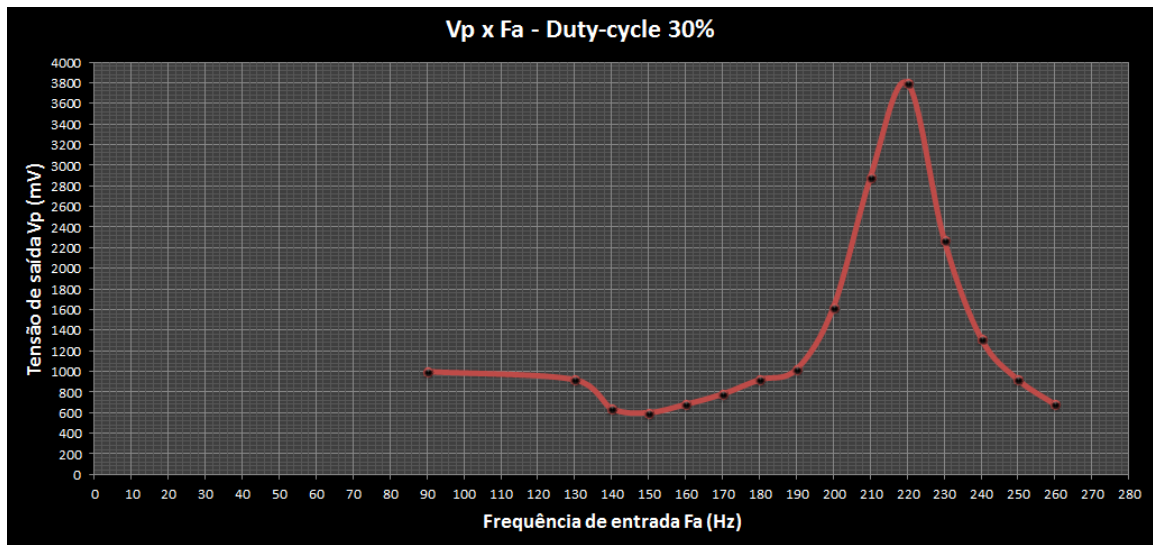


Figura 45. Gráfico Vp x Fa para duty-cycle de 30%.

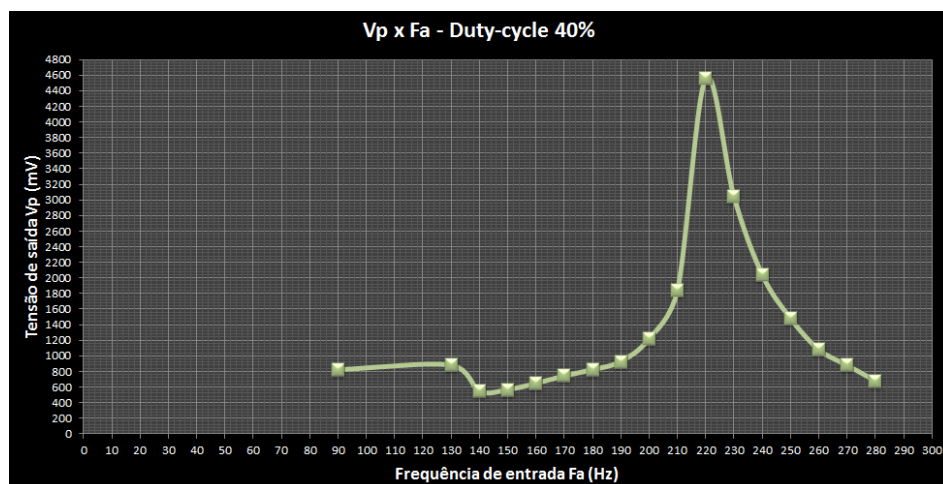


Figura 46. Gráfico Vp x Fa para duty-cycle de 40%.

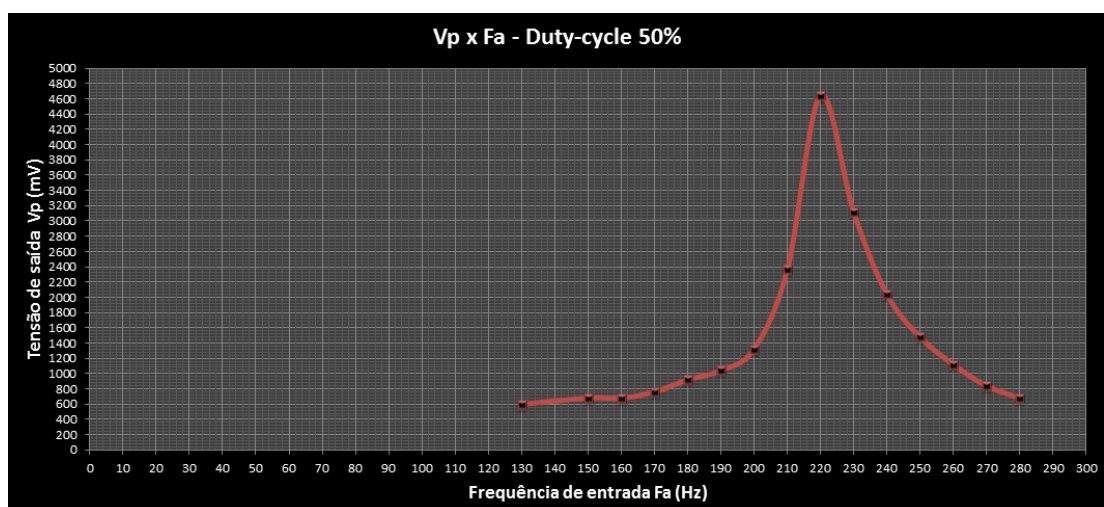


Figura 47. Gráfico Vp x Fa para duty-cycle de 50%.

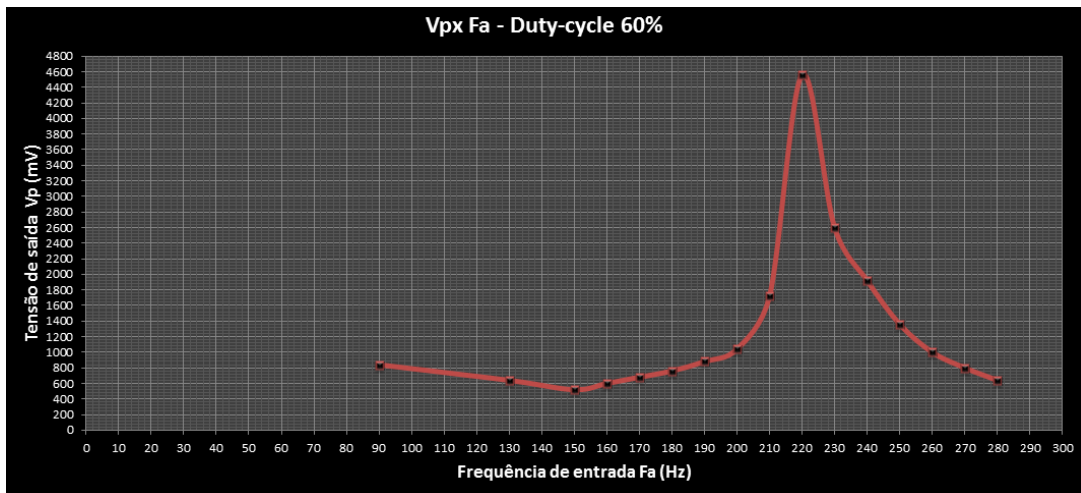


Figura 48. Gráfico Vp x Fa para duty-cycle de 60%.

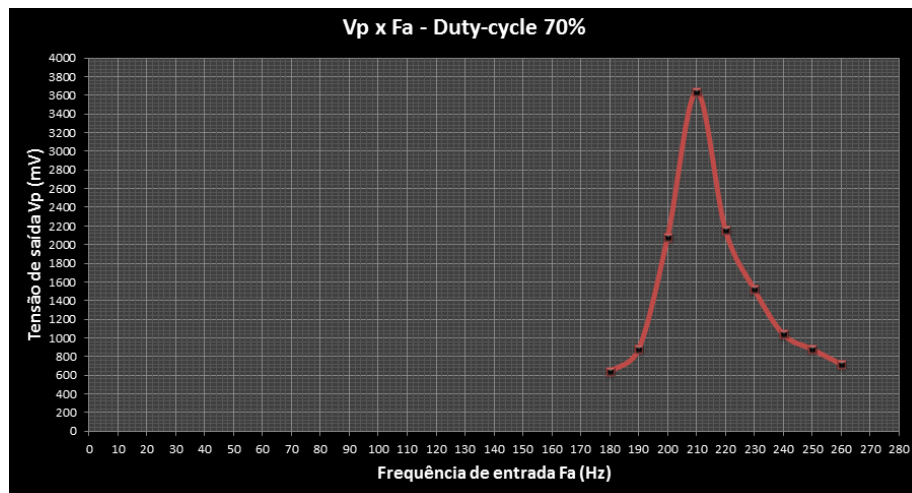


Figura 49. Gráfico Vp x Fa para duty-cycle de 70%.

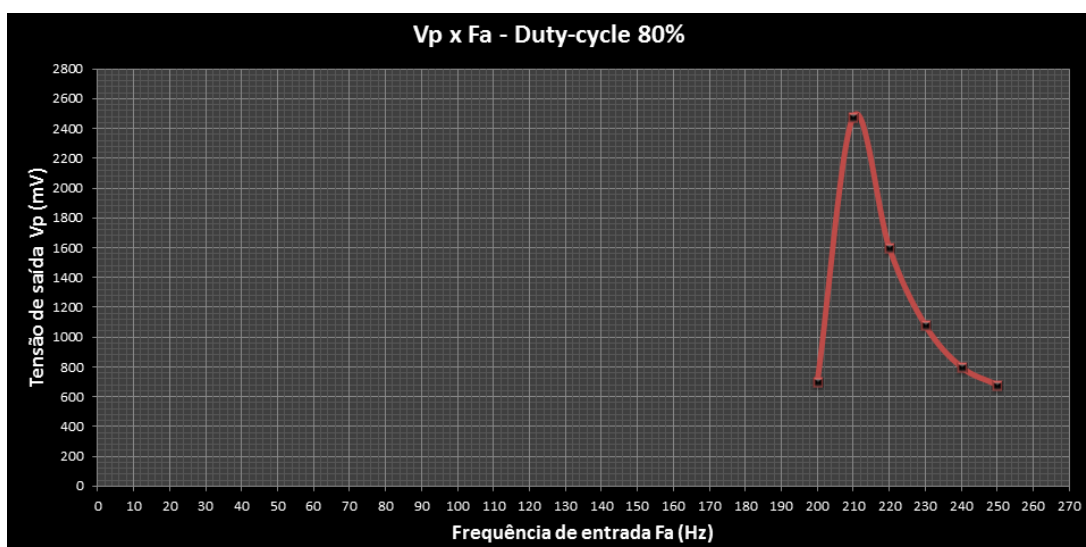


Figura 50. Gráfico Vp x Fa para duty-cycle de 80%.

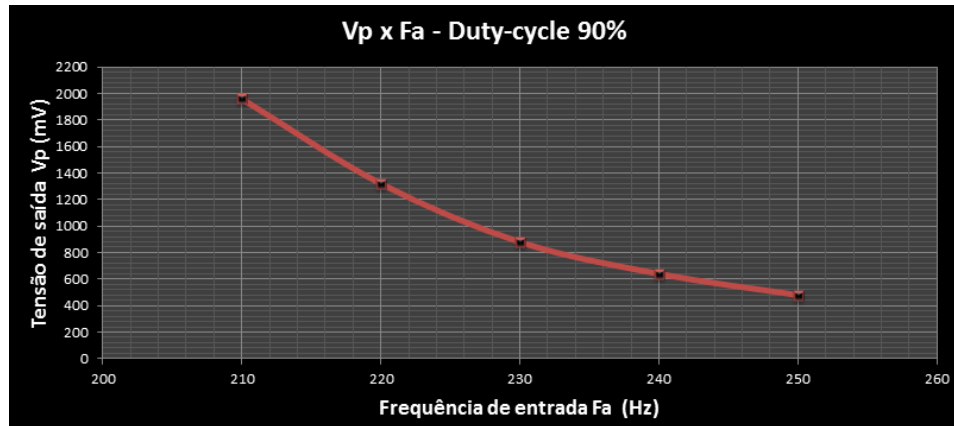


Figura 51. Gráfico V_p x F_a para duty-cycle de 90%.

Observou-se que o sistema funcionou de forma razoável com a variação do ciclo de trabalho (*Duty-cycle*) de 10% até 60%, reduzindo a sua resposta aos ciclos de trabalho que iam de 70% a 90%, onde ficou difícil achar frequências às quais o transdutor piezoelétrico produzia energia. É importante ressaltar que para duty-cycle de 70%, 80% e 90% obteve-se resposta para as frequências que se aproximavam da frequência de ressonância do sistema. Observe o gráfico da Fig. (52) que destaca a frequência de ressonância ao qual o sistema opera e demonstra que só foram obtidas respostas para o transdutor nas frequências que se aproximaram de $f_0 = 210$ Hz.

O fato de certas combinações de *duty-cycle* e de frequência não produzirem respostas ocorreu porque a tensão V_{dc1} não ultrapassou de 4V, pois o aumento desta tensão aumentaria a corrente no eletroímã e no MOSFET, o que danificaria o componente.

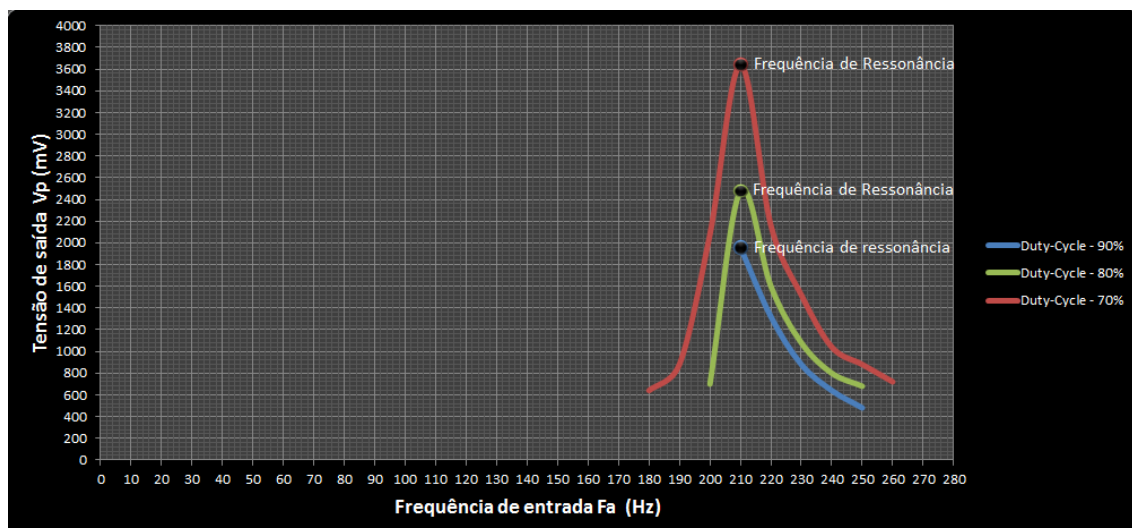


Figura 52. Gráfico comparando as respostas para *Duty-cycle* de 70%, 80% e 90%.

3.2.3 Circuito Extrator

A energia elétrica gerada pelo transdutor piezoelétrico pode ser armazenada em dispositivos que realizam esta função, como a bateria e capacitores. As respostas para as variações em frequência e estímulos realizados durante o experimento em bancada mostraram que o transdutor é capaz de gerar energia suficiente para realizar o armazenamento.

Existem algumas topologias de circuitos para realizar esta tarefa com uma maior eficiência. A tensão gerada pelo transdutor é uma tensão alternada, portanto precisa ser retificada possibilitando a sua utilização em dispositivos que demonstrem a sua aplicabilidade.

Com o intuito de demonstrar que a energia gerada pelo transdutor pode ser armazenada utilizou-se um circuito duplicador de tensão. A Fig. (53) mostra a configuração deste circuito.

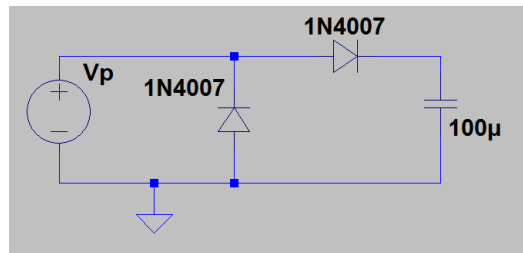


Figura 53. Circuito duplicador.

Para realizar o experimento utilizou-se no circuito que aciona o eletromagneto a entrada por pulso com *duty-cycle* de 40% na frequência de 220Hz, o resultado do armazenamento pode ser visto na Fig. (55), onde a onda semelhante à senoidal é a tensão extraída do transdutor e a linha azul acima da onda é a tensão retificada armazenada no capacitor.

Com *duty-cycle* de 40% na frequência de 220Hz pode-se calcular o tempo em que o pulso permanece *on* e o tempo em que permanece *off* pela Eq. (12):

$$\frac{T_{on}}{T} * 100 = (Duty - cycle \%) \quad (12)$$

Onde T_{on} é o período em que o pulso está ligado e T é o período total do pulso que pode ser encontrado pela Eq. (13):

$$T = \frac{1}{f} \quad (13)$$

Com isso para uma frequência (f) de 220Hz, tem-se um período T de:

$$T = \frac{1}{220 \text{ Hz}} = 4.5 * 10^{-3} \text{ s}$$

E portanto um T_{on} de:

$$T_{on} = \frac{40 * 4.5 * 10^{-3} \text{ s}}{100} = 1.8 * 10^{-3} \text{ s}$$

O período em que o pulso permanece desligado é chamado de T_{off} e pode ser calculado pela Eq. (14):

$$T_{off} = T - T_{on} \quad (14)$$

$$T_{off} = (4.5 * 10^{-3}) - (1.8 * 10^{-3}) = 2.7 * 10^{-3} \text{ s}$$

A Fig. (54) é uma representação desta forma de onda simulada no software Ltspice.

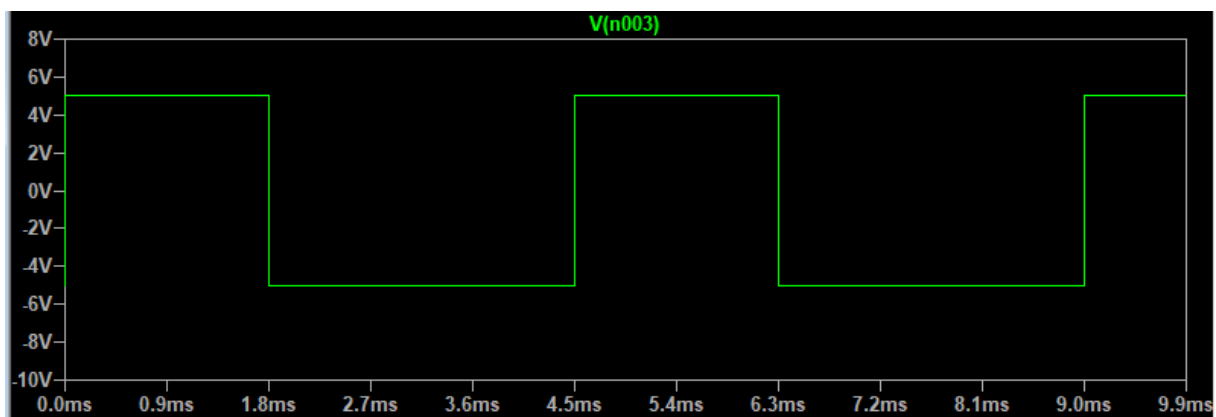


Figura 54. Pulso quadrado com *Duty-cycle* de 40% e frequência 220Hz.

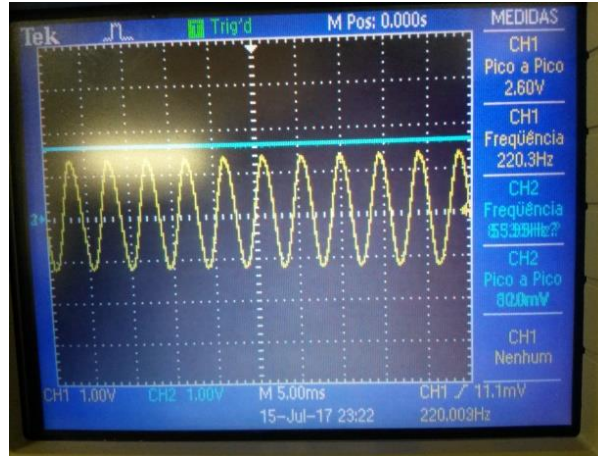


Figura 55. Resultado do armazenamento medido no osciloscópio.

O armazenamento de energia elétrica em um capacitor obedece a relação da Eq. (15):

$$i_c(t) = C * \frac{dv_c(t)}{dt} \quad (15)$$

Para que haja variação na tensão é necessário haver uma corrente, portanto, pode-se inferir que o armazenamento da tensão no capacitor não é instantâneo, desta forma existe uma variação de tempo Δt para que o carregamento se complete.

A variação de tempo medida para o arranjo experimental em questão foi registrado com aproximadamente $\Delta t = 2.1s$. Com isso a quantidade e potência elétrica gerada pelo protótipo pode ser estimada para este regime de vibração por meio da Eq. (16):

$$Pot = \frac{E_{pulso}}{\Delta t} \quad (16)$$

Onde E_{pulso} é a energia cinética do capacitor por pulso quadrado e pode ser obtida com a Eq. (17):

$$E_{pulso} = \frac{E_c}{N} \quad (17)$$

E_c é a energia cinética do capacitor, e N é o número de pulsos necessários para carregar o capacitor. O número de pulsos pode ser obtido dividindo o tempo em que o capacitor carrega ($\Delta t = 2.1s$) pelo período de duração de um pulso nas condições estabelecidas para esta parte do experimento.

$$N = \frac{\Delta t}{T} \quad (18)$$

$$N = \frac{2.1s}{4.5 * 10^{-3}s} = 466,7$$

A energia cinética do capacitor pode ser obtida por meio da Eq. (19):

$$E_c = \frac{1}{2} * C * v_c^2 \quad (19)$$

Onde C é a capacitância e v_c é a tensão armazenada no capacitor. A Fig. (52) permite uma estimativa de v_c , onde o seu valor de pico é considerado 1,6V, com isso a tensão RMS pode ser calculada:

$$v_{cRMS} = 1.6 * 70.7\% = 1.1312 V$$

O v_{cRMS} pode ser substituído na Eq. (19):

$$E_c = \frac{1}{2} * 100 * 10^{-6} * 1.1312^2 = 6.39 * 10^{-5} J$$

O valor encontrado para E_c e N é substituído na Eq. (17) obtendo-se E_{pulso} ,

$$E_{pulso} = \frac{6.39 * 10^{-5} J}{466,7} = 1.37 * 10^{-7} J$$

Substituindo-se os valores de E_{pulso} e Δt na Eq. (16) a potência elétrica gerada pelo protótipo, em RMS, pode ser estimada,

$$Pot_{RMS} = \frac{1.37 * 10^{-7} J}{2.1s} = 65 * 10^{-9} W = 65 nW$$

4 CONCLUSÃO

O estudo desenvolvido concentrou-se em construir um protótipo capaz de simular formas de vibrações variando as suas frequências, o que foi capaz de estimular a geração de energia demonstrando a viabilidade energética do material estudado.

Observações a respeito do funcionamento do sistema são fundamentais para dizer a influencia que o mesmo exerce sobre o transdutor piezoelétrico, destacando-se a sua sensibilidade ao ambiente em que está inserido.

O trabalho tem como proposta demonstrar a viabilidade do mesmo para armazenar energia e aplicá-la a sistemas como o de um alarme antifurto automotivo, considerando que os sistemas utilizados dentro dos automóveis funcionam a uma tensão típica de 12V, é possível dizer que o transdutor associado em série, paralelo ou associações mistas (paralelo/série) pode atender à esta finalidade, levando em consideração que as associações em série possui um resultado melhor na obtenção de maiores valores para a energia elétrica gerada pelo transdutor.

A partir da construção do protótipo pode-se observar uma resposta em ressonância para o regime de modulação PWM senoidal na frequência de 210Hz com uma tensão de saída no transdutor piezoelétrico de 9,76 V de pico a pico, sendo a tensão de pico de 4,88V e uma tensão de pico eficaz de 3,45V.

Existe uma vasta gama de aplicabilidade e estudos que podem ser realizados para o mesmo material. O material piezoelétrico possui uma impedância alta e por isso a corrente que ele produz é baixa além de ser alternada, tornando necessária uma retificação da mesma para que possa ser armazenada e utilizada.

A resposta mais rápida ou mais lenta para o carregamento do dispositivo de armazenamento depende da corrente que o alimenta, se a corrente for maior mais rápido o dispositivo será carregado. Para alcançar uma corrente alta que seja capaz de carregar o componente de armazenamento em um espaço de tempo menor pode-se utilizar o teorema da máxima transferência de potência, que utilizará associações de componentes eletrônicos (como por exemplo, Indutores e capacitores) que façam com que a carga e a fonte possuam a mesma impedância. Esta análise fica como sugestão para trabalhos futuros.

Referências Bibliográfica

- AHMED, A., Tradução: Bazán Tecnologia e Linguística. Eletrônica de Potência. São Paulo: Prentice Hall, 2000.
- BOYLESTAD, R. L., NASHELSKY, L., Tradução: SIMON, R. M.. Dispositivos Eletrônicos e Teoria de Circuitos. 8ª Edição. São Paulo: Prentice Hall, 2005.
- CERAMTEC T. C. E.. “Conceitos Básicos da Tecnologia Piezocerâmica: Princípio de Funcionamento Piezoelétrico, Perovskite e Polarização”. 2013. Disponível em: <http://www.ceramtec.com.br/materiais-ceramicos/piezoceramicos/basicos/>. Acesso em: 04/07/2016.
- DOMINGOS, C. B., WEISS C., WOLF, L. S.. “Transdução da Energia Sonora para Sinais Elétricos Utilizando Material Piezoelétrico”. 2013. 90f., Proposta de trabalho de conclusão de curso (Título de Engenheiro Eletricista) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná “Campus de Curitiba”, Curitiba, 2013.
- EIRAS, J. A.. “Materiais Piezoelétricos”. 2004. Disponível em: <http://www.ebah.com.br/content/ABAAAgqhQAH/capitulo-2-materiais-piezoeltricos>. Acesso em: 02/07/2016.
- FREITAS, R. L. B. de. “Fabricação, Caracterização e Aplicações do Compósito PZT/PVDF”. 2012. 124f., Tese de doutorado (Título de Doutor em Engenharia Elétrica) – Universidade Estadual Paulista “Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira”, Ilha Solteira, 2012.
- GALHARDI, M. A.. “Guia de Power Harvesting: História, Evolução e Fundamentos”. 2010. Trabalho de Graduação – Universidade Estadual Paulista “Faculdade de Engenharia – Campus de Ilha Solteira”, Ilha Solteira, 2010.
- HEHN, T., MANOLI, Y.. CMOS Circuit for Piezoelectric Energy Harvesters: Efficient Power Extraction, Interface Modeling and Loss Analysis. 1ª Edição. Springer, 2014.
- ILIUK, I.. “Fenômenos não-lineares, incluindo-se os não-ideais, em captura de energia utilizando-se dispositivos piezoelétricos”. 2012. 143f., Dissertação de mestrado (Título de Mestre em Engenharia Elétrica) – Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Bauru, 2012.
- LUZ, A. B., LINS, F. A. F.. “Rochas & Minerais Industriais”. 2ª Ed. Rio de Janeiro: CETEM/MCT, 2008.
- MACEDO DE LIMA, I. A.. “Proposta de uma bancada didática para análise de vibrações gerada por desalinhamento e desbalanceamento”. 2014. 84f. Monografia submetida como requisito para obtenção de título de Bacharel em Engenharia Automotiva – Universidade de Brasília “Faculdade do Gama”, Brasília, Distrito Federal, 2014.
- MINETO, A. T.. “Geração de Energia através da Vibração Estrutural de Dispositivos Piezoelétricos Não Lineares”. 2013. 167f., Tese de doutorado (Título de Doutor em Ciência) – Universidade de São Paulo “Engenharia de São Carlos”, São Carlos, 2013.
- MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA. “Resenha Energética Brasileira”. 2017. Disponível em: <http://www.mme.gov.br/documents/10584/3580498/02+-+Resenha+Energ%C3%A9tica+Brasileira+2017+-+ano+ref.+2016+%28PDF%29/13d8d958-de50-4691-96e3-3ccf53f8e1e4?version=1.0>. Acesso em: 28/07/2017.
- MUSSOI, F. L. R.. “Fundamentos de Eletromagnetismo”. 2005. Apostila de Apoio Didático. Centro Federal de Educação Tecnológica de Santa Catarina, Florianópolis, 2005.
- PALITÓ, T. T. C.. “Detecção Acústica de Descargas Parciais com Transdutor Piezoelétrico”. 2015. 117f., Dissertação de mestrado (Título de Mestre em Ciência) – Universidade de São Paulo “Escola de Engenharia de São Carlos”, São Carlos, 2015.
- PORTUGUES, D. O.. “Quartzo”. 2009. Disponível em: <http://www.dicio.com.br/quartzo/>. Acesso em: 04/07/2016.

- PRADO JUNIOR, H.. “Efeito Piezoelétrico”. 2013. Disponível em: <http://artesmedicas.com/piezoeletricidade.htm>. Acesso em: 22/06/2016.
- SANTOS, V. S. dos. “Análise da Colheita de Energia em Geradores Piezoelétricos não Lineares”. 2016. 65f., Relatório submetido como requisito parcial para obtenção do grau de Engenheiro Mecânico – Universidade de Brasília “Faculdade de Tecnologia”, Brasília, 2016.
- SCHULZ, S. L.. “Metodologia para alocação ótima discreta de sensores e atuadores piezoelétricos na simulação do controle de vibrações em estruturas de materiais compostos laminados”. 2012. Tese de doutorado (Título de Doutor em Engenharia) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2012.
- SILVA, A. P., SILVA, D. M., FERREIRA, M.L.S., COSTA, M. C., CORRÊA, P. A.. “Piezoelétricidade”. 2009. Trabalho de integração apresentado ao Departamento de Química da Universidade de Uberaba – Univerdidade de Uberaba, Uberaba, 2009.
- SILVA, L. A. S.. “Medidor de consumo elétrico residencia através de microcontrolador PIC”. 2009. Trabalho de Graduação (Título de Bacharel em Engenharia da Computação) – Centro Universitário de Brasília (UNICEUB), Brasília, 2008.