

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ  
CAMPUS DE CURITIBA  
CURSO DE ENGENHARIA INDUSTRIAL ELÉTRICA

CIRO BEDUSCHI DOMINGOS  
CRISTHOPHER WEISS  
LUCAS SCHWARZ WOLF

**TRANSDUÇÃO DA ENERGIA SONORA PARA SINAIS ELÉTRICOS  
UTILIZANDO MATERIAL PIEZOELÉTRICO**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

CURITIBA  
2013

CIRO BEDUSCHI DOMINGOS  
CRISTHOPHER WEISS  
LUCAS SCHWARZ WOLF

**TRANSDUÇÃO DA ENERGIA SONORA PARA SINAIS ELÉTRICOS  
UTILIZANDO MATERIAL PIEZOELÉTRICO**

Proposta de Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação, apresentado à disciplina Metodologia Aplicada ao TCC, do Curso de Engenharia Industrial Elétrica com Ênfase em Automação do Departamento de Eletrotécnica (DAELT) da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR), como requisito parcial para obtenção do título de Engenheiro Eletricista.

Orientador (a): Antonio Carlos Pinho

CURITIBA  
2013

**Ciro Beduschi Domingos  
Cristhopher Weiss  
Lucas Schwarz Wolf**

**Transdução Da Energia Sonora Para Sinais Elétricos Utilizando Material Piezoelétrico**

**Este Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação foi julgado e aprovado como requisito parcial para a obtenção do Título de Engenheiro Industrial Eletricista, do curso de Engenharia Industrial elétrica ênfase em automação do Departamento Acadêmico de Eletrotécnica (DAELT) da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR).**

**Curitiba, 26 de fevereiro de 2014.**

---

**Prof. Paulo Sérgio Walenia , Esp.  
Coordenador de Curso  
Engenharia Industrial Elétrica Ênfase Automação**

---

**Prof. Marcelo De Oliveira Rosa, Dr.  
Responsável pelos Trabalhos de Conclusão de Curso  
de Engenharia industrial Elétrica ênfase em Automação do DAELT**

**ORIENTAÇÃO**

---

**Antonio Carlos Pinho Dr.  
Universidade Tecnológica Federal do Paraná**

**BANCA EXAMINADORA**

---

**Celso Fabrício de Melo Júnior, Me.  
Universidade Tecnológica Federal do Paraná**

---

**Luiz Fernando Colla , Esp.  
Universidade Tecnológica Federal do Paraná**

---

**Antonio Carlos Pinho Dr.  
Universidade Tecnológica Federal do Paraná**

## RESUMO

BEDUSCHI, Ciro D.; WEISS, Cristhopher; WOLF, Lucas S. **Transdução da energia sonora para sinais elétricos utilizando material piezoelétrico**. 2013. 90 f. Trabalho de conclusão de curso - Engenharia Industrial Elétrica Ênfase em Automação - Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2013.

Na natureza existem cristais que apresentam uma característica interessante: a capacidade de gerar um campo elétrico/magnético quando submetidos a uma força externa. Cristais com essa característica são chamados de “cristais piezoelétricos”. Com o intuito de aproveitar a energia de ondas sonoras presentes no nosso dia a dia e utilizá-la como a força externa aplicada ao cristal, este trabalho visa desenvolver um sistema com diversas topologias no qual se pode medir quanto desta energia sonora pode ser absorvido pelo o cristal piezoelétrico e de quais modos de interligação tem-se o melhor rendimento.

**Palavras-chave:** Efeito piezoelétrico, transdução, frequência, ressonância, ondas sonoras.

## ABSTRACT

BEDUSCHI, Ciro D.; WEISS, Cristhopher; WOLF, Lucas S. **Sound wave energy transduction to electrical signals through piezoelectric material**. 2013. 90 f. Trabalho de conclusão de curso - Engenharia Industrial Elétrica Ênfase em Automação - Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2013.

*In nature some crystals show a interesting characteristic: the capacity of creating an electric/magnetic field when submitted by an external force. Crystals with this characteristic are called "piezoelectric crystals". Willing to harness the sound energy on our daily routine and use this energy as an external force applied on the crystal, on this work it will be developed a system capable of measuring the amount of sound energy the piezoelectric crystals can absorb and what is the best arrange to get the best efficiency.*

**Keywords:** *piezoelectric effect, transduction, frequency, resonance, sound waves.*

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 Esquema de montagem do protótipo.....	16
Figura 2.1 Representação em blocos de um transdutor eletromecânico .....	19
Figura 2.2 Representação geral de conversão eletromecânica de energia .....	22
Figura 2.3 Esquema de uma autoclave (a) Quartzo cultivado com base em sementes barra Y e placa Z. ....	24
Figura 2.4 Efeito piezoelétrico direto. ....	26
Figura 2.5 Efeito piezoelétrico Inverso. ....	27
Figura 2.6 Cristal piezoelétrico gerando ultrassom.....	27
Figura 2.7 Transdutor ultrassônico.....	28
Figura 2.8 Ponte em ressonância por causa da força do vento. ....	30
Figura 2.9 Após ter entrado em ressonância a estrutura da ponte não ponte não aguentou e ela ruiu. ....	31
Figura 2.10 Ligação de amperímetro e voltímetro em uma resistência .....	33
Figura 2.11 Exemplo de decibelímetro e suas especificações técnicas. ....	38
Figura 2.12 Exemplo de estrutura de um alto-falante.....	41
Figura 2.13 Programa NCH Tone Generator.....	43
Figura 2.14 Operação NCH Tone Generator.....	43
Figura 3.1 – Agilent 4294A.....	45
Figura 3.2 – Circuito equivalente simplificado de um transdutor piezoelétrico .....	46
Figura 3.3 – Piezoelétrico capsulado .....	47
Figura 3.4 – Piezoelétrico sem cápsula.....	47
Figura 3.5 – Piezoelétrico capsulado livre conectado aos terminais do analisador. ..	48
Figura 3.6 – Piezoelétrico capsulado livre faixa de 0 a 1.2 MHz.....	49
Figura 3.7 – Piezoelétrico capsulado livre faixa de 0 a 25 khz . ....	49
Figura 3.8 – Piezoelétrico capsulado livre faixa de 3.5KHz a 4.0KHz.....	50
Figura 3.9 Software emitindo 3755 Hz. ....	51
Figura 3.10 – Mesma frequência obtida no analisador de impedância retornando o maior valor de tensão.....	51
Figura 3.11 – Frequência maior que a obtida no analisador de impedância retornando um menor valor de tensão. ....	52
Figura 3.12 – Frequência menor que a obtida no analisador de impedância retornando um menor valor de tensão. ....	52
Figura 3.13 – Ambiente da experiência.....	54
Figura 3.14 – Amplificador e planta.....	54
Figura 3.15 – Ruído Ambiente .....	55
Figura 3.16 – Esquema Construtivo do Material Piezoelétrico .....	56

Figura 3.17 – Foto do material piezoelétrico .....	57
Figura 3.18 – Experiência inicial.....	57
Figura 3.19 – Tensão senoidal nos terminais do material piezoelétrico.....	58
Figura 3.20 – Tensão nos terminais do material piezoelétrico conectado à uma resistência.....	59
Figura 3.21 – Associações de materiais piezoelétricos .....	61
Figura 3.22 – Dois componentes piezoelétricos em série .....	62
Figura 3.23 – Resposta do sistema com 2 piezoelétricos em série .....	63
Figura 3.24 – Três componentes piezoelétricos em série .....	64
Figura 3.25 – Resposta do sistema com 3 piezoelétricos em série .....	64
Figura 3.26 – Dois piezoelétricos em paralelo.....	65
Figura 3.27 – Resposta do sistema com dois piezoelétricos em paralelo.....	65
Figura 3.28 – Três piezoelétricos em paralelo.....	66
Figura 3.29 – Resposta do sistema com três piezoelétricos em paralelo .....	66
Figura 3.30 – Associação mista .....	67
Figura 3.31 – Resposta do sistema com associação mista .....	67
Figura 3.32 – Gráfico dos resultados das associações .....	68
Figura 3.33 – Esquema de ligação do protótipo final.....	69
Figura 3.34 – Protótipo final .....	70
Figura 3.35 – Resultado obtido a partir do protótipo.....	70
Figura 3.36 – Resposta do sistema para frequências variadas .....	75
Figura 3.37 – Sinal obtido para frequência ótima de operação.....	76
Figura 3.38 – Software enviando sinal na frequência de 313 Hz.....	76
Figura 3.39 – Gráfico da resposta do sistema em relação à intensidade sonora incidente .....	78
Figura 3.40 – Esquema da caixa acústica.....	79
Figura 3.41 – Tentativa com solda nos piezoelétricos, .....	81
Figura 3.42 – Circuito montado com 25 piezoelétricos ligados em série, usando fita adesiva e papel alumínio nas ligações .....	82
Figura 3.43 – Detalhe da ligação usando fita adesiva e papel alumínio .....	83
Figura 3.44 – Piezoelétrico adquirido através de compra online na loja virtual da Farnell.....	84
Figura 3.45 – Prévia da planta final utilizando 36 piezoelétricos .....	85
Figura 3.46 – Planta final utilizando 36 piezoelétricos .....	85

## LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 Valores principais da constante piezoelétrica( $d$ ) e constante dielétrica( $\epsilon$ [ $C^2/Nm^2$ ]) de materiais piezoelétricos importantes. ....	25
Tabela 2.2 Velocidade da propagação de ondas em diferentes fluidos. ....	35
Tabela 3.1 Resumo dos resultados das associações.....	68
Tabela 3.2 Coleta dos dados para verificação do comportamento da planta.....	74
Tabela 3.3 Intensidade sonora x Tensão gerada .....	77

## SUMÁRIO

<b>1. INTRODUÇÃO</b> .....	<b>11</b>
<b>1.1 TEMA</b> .....	<b>11</b>
1.1.1 Delimitação do tema .....	12
<b>1.2 PROBLEMA E PREMISSAS</b> .....	<b>12</b>
<b>1.3 OBJETIVOS</b> .....	<b>13</b>
1.3.1 Objetivo Geral .....	13
1.3.2 Objetivos Específicos .....	13
<b>1.4 JUSTIFICATIVA</b> .....	<b>14</b>
<b>1.5 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS</b> .....	<b>14</b>
<b>1.6 ESTRUTURA DO TRABALHO</b> .....	<b>16</b>
<b>2. REFERENCIAL TEÓRICO</b> .....	<b>17</b>
<b>2.1 CONVERSÃO ELETROMECAÂNICA DE ENERGIA</b> .....	<b>17</b>
2.1.1 Transdutores Eletromecânicos.....	18
<b>2.2 PIEZOELETRICIDADE</b> .....	<b>22</b>
2.2.1 História.....	22
2.2.2 Quartzo .....	23
2.2.3 Efeito piezoelétrico .....	24
2.2.4 Aplicações.....	28
2.2.5 Aplicação neste Estudo.....	29
<b>2.3 RESSONÂNCIA</b> .....	<b>29</b>
<b>2.4 RESISTORES DE ALTA PRECISÃO</b> .....	<b>31</b>
2.4.1 Resistência .....	31
2.4.2 Resistores .....	33
2.4.3 Aplicação neste Estudo.....	34
<b>2.5 ONDAS SONORAS</b> .....	<b>35</b>
2.5.1 Conceito Geral .....	35
2.5.2 Potência de Ondas Sonoras .....	36
2.5.3 Intensidade de Ondas Sonoras .....	37
<b>2.6 DECIBELÍMETRO</b> .....	<b>38</b>

<b>2.7</b>	<b>AMPLIFICADORES</b> .....	<b>39</b>
2.7.1	Aplicação neste Estudo .....	40
<b>2.8</b>	<b>ALTO-FALANTES</b> .....	<b>40</b>
2.8.1	Conceito Geral .....	40
2.8.2	Aspectos construtivos .....	41
<b>2.9</b>	<b>SOFTWARE PARA REPRODUÇÃO DE FREQUÊNCIA</b> .....	<b>43</b>
<b>3.</b>	<b>DESCRIÇÃO DOS EXPERIMENTOS</b> .....	<b>44</b>
<b>3.1</b>	<b>RESSONÂNCIA PRÁTICA</b> .....	<b>44</b>
3.1.1	Medidor de Impedância .....	44
3.1.2	Circuito RLC análogo .....	45
3.1.3	Medição .....	46
<b>3.2</b>	<b>EXPERIÊNCIA PRÁTICA</b> .....	<b>53</b>
3.2.1	Ambiente de Trabalho .....	53
3.2.2	Grandezas envolvidas .....	55
<b>3.3</b>	<b>ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DAS VARIÁVEIS NO SISTEMA</b> .....	<b>60</b>
3.3.1	Associação de componentes piezoelétricos .....	61
3.3.2	Rendimento do sistema .....	71
3.3.3	Frequência da onda sonora incidente .....	74
3.3.4	Amplitude sonora incidente .....	76
<b>3.4</b>	<b>PRINCIPAIS PROBLEMAS ENCONTRADOS</b> .....	<b>78</b>
3.4.1	Estrutura do protótipo .....	78
3.4.2	Potencia não suficiente .....	80
3.4.3	Contatos ruins .....	80
<b>3.5</b>	<b>CONCLUSÃO</b> .....	<b>86</b>

# 1. INTRODUÇÃO

## 1.1 TEMA

A percepção que temos de som é dada através do nosso ouvido que capta ondas sonoras, converte-as em impulsos elétricos e transmite-os por fibras nervosas ao cérebro. Estas ondas sonoras nada mais são do que ondas mecânicas, que se propagam através de um meio material, não sendo capaz de se propagar no vácuo, diferentemente das ondas eletromagnéticas.

As ondas sonoras se propagam quando há variação de pressão de um meio, por exemplo, o ar, que se comprime e se rarefaz alternadamente. Elas podem ter qualquer frequência, desde poucos hertz até valores bastante elevados, mas o ouvido humano só consegue perceber frequências de 20 Hz a 20.000 Hz, chamadas de sons. A velocidade de propagação de uma onda sonora depende do meio em que ela se propaga (NEPOMUCENO, Lauro Xavier).

Os sons podem ter diversas origens, sejam elas propositais ou não. Exemplos de sons gerados não propositalmente são os ruídos gerados por motores mecânicos, onde a combustão interna causada para gerar movimento também gera ruído, e, quando em grande escala, podem ser classificados como poluição sonora. Exemplo de sons gerados propositalmente são os sons gerados por instrumentos musicais e/ou alto-falantes.

No início da década de 1880 os irmãos Pierre e Jacques Curie observaram o efeito piezoelétrico, fenômeno que consiste na geração de um campo elétrico/magnético ao se aplicar uma força na superfície de certos cristais. (TICHÝ; ERHART; KITTINGER; PRÍVRATSKÁ, 2010).

O efeito piezoelétrico é utilizado amplamente em vários equipamentos. Um exemplo prático são as máquinas de diagnóstico por imagens, relógios, alto falantes e microfones. (FAWWAZ,2005)

### **1.1.1 Delimitação do tema**

Ao transformar a energia mecânica das ondas sonoras em sinais elétricos por meio de um transdutor piezoelétrico, este sinal dependerá de algumas variáveis, tais como: frequências da onda sonora; amplitude da onda sonora; distância entre o material piezoelétrico e a fonte da onda sonora; características do material piezoelétrico; captador da onda sonora, etc. O objetivo deste estudo é verificar o comportamento de um sistema projetado para transformar energia sonora para energia elétrica em pequena escala.

## **1.2 PROBLEMA E PREMISSAS**

Cada vez mais as fontes complementares de energia ganham força no mundo afora. Preocupações com o meio ambiente, com o bem estar das pessoas e com o futuro do planeta em si, cada vez mais influenciam no rumo para o qual a tecnologia avança. Nos grandes centros urbanos ou industriais, nos veículos utilizados no dia a dia, sejam eles automóveis, ônibus ou metrô, temos muita energia produzida na forma de ondas sonoras. Utilizando material piezoelétrico é possível captar esta energia, transformá-la em sinais elétricos.

A construção de um cenário com uma gama maior e mais eficiente de fontes complementares de energia é um grande desafio para um país como o Brasil, que precisa satisfazer as necessidades energéticas da sua população em proporções justas e sempre levando em conta as responsabilidades ambientais. (BERMANN, Célio).

Como vantagem de um processo de geração de energia elétrica através das ondas sonoras, pode-se apontar seu aspecto “verde”, contribuindo para a preservação do meio ambiente, e de sua fácil aplicabilidade. Entretanto, no patamar em que hoje se encontra esse tipo de processo e devido ao seu baixo rendimento, apenas é viável para aplicações bastante reduzidas. Seu princípio construtivo é bastante simples e funcional, podendo se tornar viável para reduzir gastos com energia elétrica onde exista nível de ruído elevado.

O problema é como captar estas ondas sonoras e convertê-las em sinais elétricos. O trabalho tratará de aplicações reduzidas. Alto-falantes são fontes de ondas sonoras, neste trabalho eles serão os instrumentos que fornecerão as ondas sonoras para que o material piezoelétrico capte e converta essas ondas em sinais elétricos. Serão realizados testes com diferentes frequências e intensidades. Este estudo possibilitará uma estimativa da capacidade de geração de energia elétrica, em pequena escala, de um sistema composto por captadores piezoelétricos.

As análises realizadas neste projeto fornecerão dados sobre as proporções que podem tomar a geração de energia elétrica através de ondas sonoras, e poderá ser analisado que tipo de estrutura será necessário para aplicações simples. Espera-se obter resultados de baixa escala devido às características de alta dispersão de energia das ondas sonoras.

### **1.3 OBJETIVOS**

#### **1.3.1 Objetivo Geral**

Desenvolver um sistema que transforme a energia contida na forma de ondas sonoras para energia elétrica em pequena escala, utilizando material piezoelétrico.

#### **1.3.2 Objetivos Específicos**

- Estudar o Efeito Piezoelétrico;
- Projetar, desenvolver e implantar sistemas para que seja possível a realização de testes e ensaios práticos;
- Realizar os devidos ensaios e analisar/estudar os resultados obtidos, traçando um paralelo entre os resultados obtidos e possíveis aplicações;
- Identificar as vantagens e desvantagens da geração de energia elétrica em pequena escala através de ondas sonoras.

#### **1.4 JUSTIFICATIVA**

Este trabalho irá verificar como um sistema gerador de energia elétrica (em pequena escala) por ondas sonoras se comporta diante de diferentes características simuladas em laboratório, tais como frequências, intensidades, estruturas de captação e sua disposição em relação ao sistema.

Para realizar este estudo será necessário projetar e construir o sistema que captará a energia sonora e a transformará em sinais elétricos para análises em laboratório diante de diferentes cenários. Objetiva-se deixar um referencial teórico consistente para futuras aplicações práticas e acadêmicas.

#### **1.5 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS**

- Etapa 1 – Pesquisa bibliográfica

A pesquisa é o principal responsável pelo desenvolvimento de novas tecnologias e aplicações. Ela é responsável pela estrutura científica do trabalho e precisa ser praticada antes e durante o desenvolvimento do mesmo. A bibliografia utilizada para o projeto conta como fonte de pesquisa o acervo da Universidade Tecnológica Federal do Paraná e outras instituições com Pontifícia Universidade

Católica do Paraná e Universidade Positivo e artigos científicos, livros e outros meios de divulgação científica necessários para o Referencial Teórico.

- Etapa 2 – Estudo do Efeito Piezoelétrico.

Antes que seja desenvolvido um estudo sobre transdução de sinais elétricos por meio de ondas sonoras, é necessário compreender o Efeito Piezoelétrico que é o princípio fundamental para que se possa realizar o estudo proposto.

- Etapa 3 – O que é uma onda sonora e como ela se propaga?

Não há como estudar uma possível geração de energia elétrica por meio de ondas sonoras, sem saber o que são e como se propagam.

- Etapa 4 – Princípios de funcionamento de um alto-falante.

Conhecendo o funcionamento de um alto-falante será possível definir um modelo ideal para a transdução de energia, visto que este será o meio utilizado para captar as ondas sonoras.

- Etapa 5 – Montagem do sistema transdutor.

Com base nos estudos será identificada qual é a frequência de ressonância do material, que é a que se espera o melhor desempenho. Também será feita uma análise de como a estrutura do sistema deve ser montada para aumentar o desempenho do protótipo.

O protótipo será composto por um alto-falante disposto de forma a emitir ondas sonoras em direção ao material piezoelétrico. O alto-falante será responsável por gerar ondas sonoras em diversas frequências (escolhidas pelo usuário) e o material piezoelétrico será responsável por captar essas ondas sonoras, transformando-as em sinais elétricos, conforme ilustra a Figura 1.1.

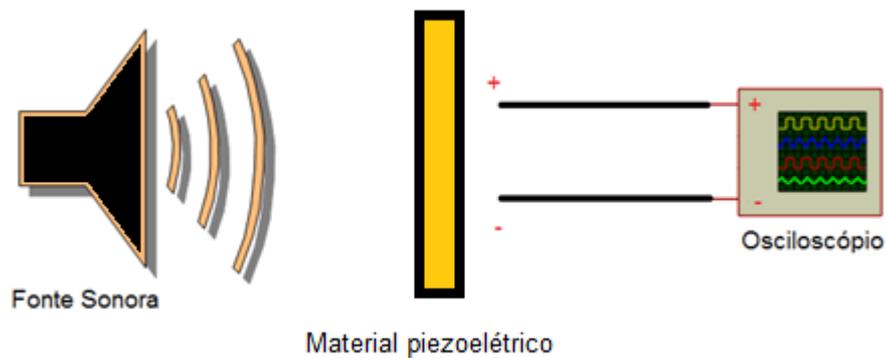


Figura 1.1 Esquema de montagem do protótipo  
Fonte: Própria

- Etapa 6 – Levantamento das curvas correlacionadas ao rendimento do sistema.

Utilizando o material piezoelétrico como transdutor das ondas sonoras, um osciloscópio e um alto-falante como emissor de ondas sonoras, será possível levantar as curvas que caracterizarão o comportamento do sistema diante às diferentes condições impostas.

- Etapa 7 – Documentação.

Esta etapa consiste em encerrar o projeto, registrando todas as etapas para a realização do trabalho seguindo as normas de trabalho de conclusão de curso da UTFPR. Será apresentado por escrito como foi desenvolvido o projeto, os métodos de pesquisa, a fundamentação teórica e os resultados obtidos, para por fim apresentar a conclusão.

## 1.6 ESTRUTURA DO TRABALHO

- 1ª Parte – Introdução.

- 2ª Parte – Embasamento teórico.
- 3ª Parte – Projeto e montagem do sistema de geração.
- 4ª Parte – Possíveis locais ruidosos.
- 5ª Parte – Conclusões.
- 6ª Parte – Referências bibliográficas, anexos e apêndices.

## **2. REFERENCIAL TEÓRICO**

Neste capítulo serão apresentados os referenciais teóricos dos principais assuntos que serão abordados neste trabalho, como: a Conversão Eletromecânica de Energia; Efeito Piezoelétrico; funcionamento de alto-falantes e amplificadores; ondas sonoras e, por fim, o efeito da ressonância. Cada característica do sistema pertinente à realização do estudo será explicada e detalhada, assim como os componentes do protótipo construído para coleta de dados.

### **2.1 CONVERSÃO ELETROMECÂNICA DE ENERGIA**

A energia raramente é utilizada na forma elétrica. A conversão para esta forma só é feita para facilitar seu processamento e transmissão. Normalmente converte-se a energia para a forma elétrica na entrada de um sistema e de volta para a não elétrica na saída do mesmo. Citando como exemplo um reator nuclear, onde a energia mecânica é convertida para elétrica na unidade geradora, transmitida pelas linhas de transmissão e distribuição, até que finalmente é convertida novamente para energia mecânica por um motor elétrico. (FITZGERALD, 1975).

Grandes mudanças foram introduzidas no campo da Engenharia Elétrica durante e após a Segunda Guerra Mundial devido às novas tecnologias, o que exigiu uma visão mais acurada dos fenômenos envolvidos. Novas disciplinas começaram a ser incluídas nas grades curriculares e as especializações substituíram a visão mais generalista menos detalhada. A Conversão Eletromecânica de Energia é uma

disciplina que se encaixa nessa nova visão e necessidade de parte da formação do engenheiro eletricitista. (SIMONE; CREPPE, 2002).

A Conversão Eletromecânica de Energia, é fundamentada nos fenômenos físicos há muito tempo descritos pela Física (como os Princípios da Conservação de Energia, da Reversibilidade e dos Trabalhos Virtuais, conhecidos como os “pilares básicos”). (SIMONE; CREPPE, 2002).

### **2.1.1 Transdutores Eletromecânicos**

A conversão eletromecânica ocorre quando um dispositivo, normalmente chamados de transdutores ou conversores, transforma a energia elétrica em mecânica ou energia mecânica em elétrica. Um campo elétrico ou magnético estabelecido no dispositivo é a base de operação e de conversão de energia. Ao ser aplicado corrente no transdutor, o movimento relativo é estabelecido entre as partes móveis e fixas que o constituem, efetuando-se a conversão eletromecânica de energia. Por outro lado, ao receber energia mecânica de uma fonte externa poderá convertê-la em elétrica utilizando como base o campo elétrico ou magnético. (SIMONE; CREPPE, 2002)

A quantidade de transdutores eletromecânicos presentes no dia-a-dia do homem moderno é enorme, citando os mais comuns têm-se os geradores eletromecânicos, eletroímãs, microfones, alto-falantes, etc. Sendo impossível estudar um a um, a Conversão Eletromecânica de Energia procura fornecer as bases e os métodos utilizando para estudo alguns exemplos de dispositivos mais comuns. (FALCONE, 1979).

De acordo com Falcone (1979, p. 1) “Na Conversão Eletromecânica de Energia são estudados os princípios e processos de conversão de energia elétrica em mecânica e vice-versa, e desenvolvem-se meios para se obterem modelos dos transdutores eletromecânicos que podem fazer parte de sistemas eletromecânicos mais complexos.”.

Um transdutor eletromecânico pode ser considerado como constituído da parte mecânica, elétrica e uma parte eletromecânica propriamente dita, conforme mostra a Figura 2.1. (FALCONE, 1979),

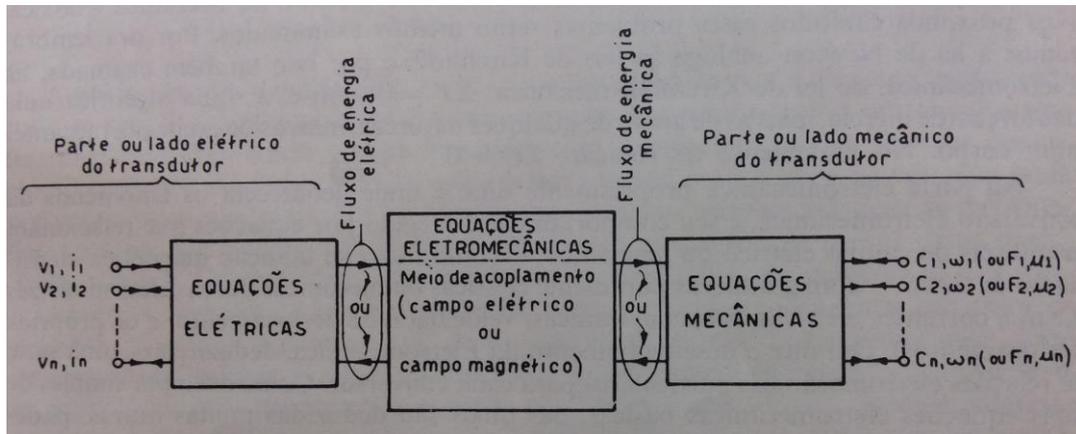


Figura 2.1 Representação em blocos de um transdutor eletromecânico  
 Fonte: Falcone, 1979, p.1

A energia total da parte elétrica, entrando ou saindo do transdutor, pode ser representada pela soma algébrica de cada entrada ou saída parcial, com tensões e correntes  $v_1, i_1; v_2, i_2; \dots; v_n, i_n$ . Estas entradas e saídas são as conexões entre o circuito elétrico do conversor com o sistema elétrico de tensões:  $v_1, v_2, \dots, v_n$ . Num intervalo de tempo infinitesimal, teremos: (FALCONE, 1979).

$$dE_{elet} = \sum_{i=1}^n v_i i_i dt \quad (2.1.1)$$

As equações que regem o comportamento do lado elétrico do transdutor são estabelecidas pelas leis de Kirchhoff das correntes e das tensões. O lado mecânico possui comportamento similar ao elétrico, onde cada entrada ou saída parcial, num certo intervalo de tempo, contribui com uma energia relacionada com o conjugado mecânico e a velocidade angular ou de translação. No movimento de rotação de massas temos:

$$dE_{mec} = \sum_{i=1}^n c_i \Omega_i dt \quad (2.1.2)$$

Na translação:

$$dE_{mec} = \sum_{i=1}^n F_i u_i dt \quad (2.1.3)$$

Onde:

$\Omega$  – velocidade angular;

$u$  – velocidade de translação;

$F$  – força;

$c$  – momento de inércia.

As entradas e saídas no caso do lado mecânico são os acoplamentos mecânicos existentes entre as partes móveis do conversor e o sistema mecânico externo, e as equações mecânicas que regem este comportamento são as estabelecidas pelas leis de Newton da Mecânica Clássica. Lembrando a Lei de Newton, análoga às Leis de Kirchhoff:  $\sum F = 0$ , isto é, a soma algébrica das forças atuantes em um corpo é nula, e no movimento de rotação:  $\sum c = 0$ . (FALCONE, 1979).

Como afirma Falcone (1979, p. 2) “Na parte eletromecânica propriamente dita, é onde acontecem os fenômenos da conversão eletromecânica, e seu comportamento é regido por equações que relacionam grandezas de campo elétrico ou magnético – como o fluxo de indução magnética, densidades de fluxo – com grandezas puramente elétricas ou mecânicas (forças eletromotrizes, correntes elétricas, forças mecânicas, velocidade de deslocamento, e os próprios deslocamentos).”.

Segundo Fitzgerald (1975, p. 80) “[...] Embora os vários dispositivos de conversão funcionem baseados em princípios físicos similares, as estruturas dos dispositivos dependem da sua função. Os dispositivos para medição e controle são frequentemente chamados transdutores; eles geralmente funcionam sob condições lineares saída proporcional à entrada e com sinais relativamente pequenos. Os muitos exemplos incluem motores de conjugado, microfones, fonocaptadores, e alto-falantes. Numa segunda categoria estão os dispositivos que produzem força, como os atuadores e solenoides, os relés, e eletroímãs. A terceira categoria de dispositivos inclui equipamento de conversão contínua de energia, tais como motores e geradores.”.

O princípio da *conservação da energia*, que afirma que a energia não é criada nem destruída, é um meio conveniente para determinar as relações características do acoplamento eletromecânico, juntamente com as leis de campos elétricos e magnéticos, de circuitos elétricos, e a mecânica newtoniana. Portanto, pode-se concluir que:

$$\left( \begin{array}{c} \textit{Entrada de} \\ \textit{energia de} \\ \textit{fonte elétrica} \end{array} \right) = \left( \begin{array}{c} \textit{Saída} \\ \textit{de energia} \\ \textit{mecânica} \end{array} \right) + \left( \begin{array}{c} \textit{Aumento na} \\ \textit{energia armaze -} \\ \textit{nada no campo} \end{array} \right) + \left( \begin{array}{c} \textit{Energia} \\ \textit{convertida} \\ \textit{em calor} \end{array} \right) \quad (2.1.4)$$

A conversão de energia em calor do sistema irreversível e vem de três causas: parte da energia elétrica é convertida diretamente em calor nas resistências encontradas pela corrente, parte da energia mecânica desenvolvida dentro do dispositivo é transformada em calor no atrito e, finalmente, parte da energia dos campos magnéticos e/ou elétricos também é convertida em calor, chamadas de perda magnética e perda dielétrica respectivamente. Sendo assim, chega-se à representação geral de conversão eletromecânica de energia, conforme Figura 2.2. (FITZGERALD, 1975).

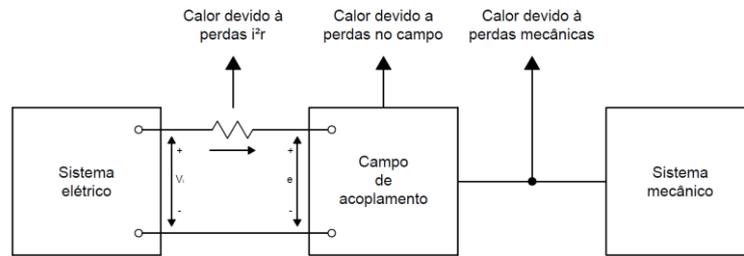


Figura 2.2 Representação geral de conversão eletromecânica de energia  
Adaptado de: Fitzgerald, 1975, p. 82.

## 2.2 PIEZOELETRICIDADE

### 2.2.1 História

A Piezoeletricidade foi descoberta pelos irmãos Curie: Pierre e Jacques. Em 1880 eles descobriram que alguns cristais quando comprimidos em uma certas direções apresentavam cargas positivas e negativas em algumas partes da superfície do cristal. Essas cargas eram proporcionais a pressão aplicada e desapareciam quando não havia mais pressão. (TICHÝ; ERHART; KITTINGER; PRÍVRATSKÁ, 2010).

A descoberta não foi ao acaso, tinha sido influenciada por estudos que Pierre Curie havia desenvolvido em piroeletricidade e simetria de cristais. Ele descobriu que polos são produzidos apenas em algumas direções dependendo da simetria particular do cristal. Um pouco antes outra descoberta tinha sido feita a piroeletricidade, uma variação de temperatura pode ocasionar uma serie de efeitos elétricos no cristal conhecida como piroeletricidade. O efeito piezoelétrico está relacionado muito perto do efeito piroelétrico. A conexão entre piroeletricidade e piezoeletricidade é fundamental. Todos os materiais piroelétricos são intrinsecamente piezoelétricos. (TICHÝ; ERHART; KITTINGER; PRÍVRATSKÁ, 2010).

Segundo (NATAL, 2008) “A piezoelectricidade inversa foi deduzida matematicamente dos princípios fundamentais da termodinâmica por Lippmann em 1888”.

A aplicação feita por Paul Langevin foi o desenvolvimento de sonares na primeira guerra mundial. Langevin utilizou cristais de quartzo acoplados a massas metálicas (inventado o transdutor tipo Langevin) para gerar ultrassom na faixa de algumas dezenas de kHz. A utilização da piezoelectricidade no sonar, e o sucesso deste projeto, causaram um intenso interesse no desenvolvimento de dispositivos piezoelétricos. (LUZ;LINS;PQUET;COSTA;COELHO,2003).

Após a primeira guerra mundial, devido à dificuldade de se excitar transdutores construídos com cristais de quartzo, por estes demandarem geradores de alta tensão, iniciou-se o desenvolvimento de materiais piezoelétricos sintéticos. Estes esforços levaram à descoberta e aperfeiçoamento nas décadas de 40 e 50, das cerâmicas piezoelétricas de Titanato de Bário pela então URSS e Japão, e das cerâmicas piezoelétricas de Titanato Zirconato de Chumbo (PZT's) pelos EUA.(CADY,1964)

### **2.2.2 Quartzo**

Atualmente, quase todas as aplicações piezolétricas e da óptica são atendidas pelo quartzo cultivado Figura 2.3-(b). (DIANA, F. R.,2004).

O quartzo cultivado (ou quartzo sintético) é obtido pela dissolução e recristalização do quartzo natural sob altas pressões e temperaturas, sendo denominado crescimento hidrotérmico. Neste processo, o cristal cresce com base em sementes posicionadas na parte superior de um vaso de pressão de aço denominado autoclave Figura 2.3-(a). A autoclave pode chegar a ter até 15 m de altura e 80 cm de diâmetro interno.

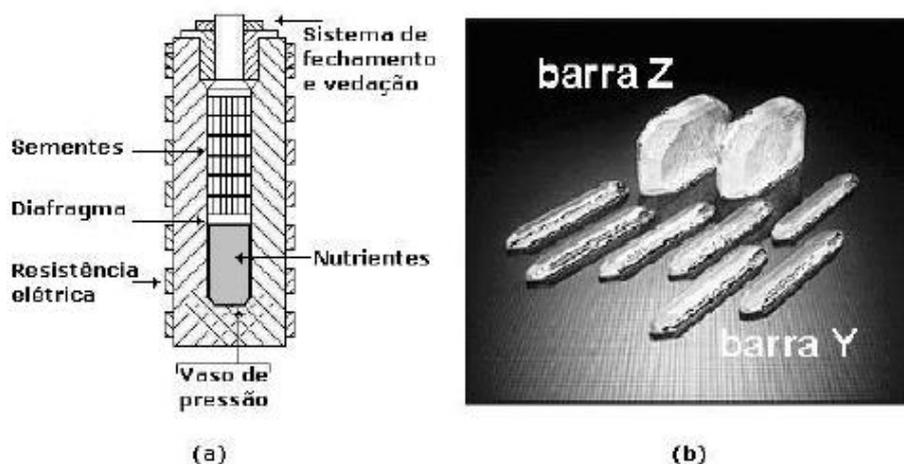


Figura 2.3 Esquema de uma autoclave (a) Quartzo cultivado com base em sementes barra Y e placa Z.

Fonte: DIANA, F. R., 2004 (a) adaptado de Brice, 1985(b)

Segundo (W. A. Deer – R. A. Howie – J. Zussman, 2000) a intensa procura por quartzo de alta qualidade, em aplicações piezoelétricas, tem impulsionado os estudos para sua produção sintética, já consegue-se produzir cristais com mais de 300g em um curto espaço de tempo, aproximadamente um mês.

### 2.2.3 Efeito piezoelétrico

De acordo com (TICHÝ; ERHART; KITTINGER; PRÍVRATSKÁ, 2010). “Piezoeletricidade é uma interação linear entre sistemas mecânicos e elétricos em cristais sem centro de simetria”.

Segundo (VIVES, 2004) “A palavra piezoeletricidade vem do grego e significa “Eletricidade por pressão” (Piezo significa pressão). Este nome foi proposto por Hankel em 1881 um ano após sua descoberta.”

Cada material piezoelétrico possui uma constante piezoelétrica (d) própria, a Tabela 2.1 exemplifica alguns destes valores para os respectivos materiais.

Material	$d$ ( $10^{-12}$ m/V)	$\epsilon$
<b>Piezoelétricos genuínos</b>		
Quartzo (SiO <sub>2</sub> )	-2,3	4,5
Turmalina	-3,7	6,3
KDP (KH <sub>2</sub> PO <sub>4</sub> )	21	40
<b>Ferroelétricos</b>		
Titanato de bário (BaTiO <sub>3</sub> )	390	2.900
PZT (Pb <sub>0,5</sub> Zr <sub>0,5</sub> TiO <sub>3</sub> )	370	1.700

Tabela 2.1 Valores principais da constante piezoelétrica( $d$ ) e constante dielétrica( $\epsilon$  [C<sup>2</sup>/Nm<sup>2</sup>]) de materiais piezoelétricos importantes.  
Fonte: (NDK, 2004).

### 2.2.3.1 Efeito piezoelétrico direto

A Piezoeletricidade direta pode ser definida como a mudança de polaridade de acordo com a deformação aplicada. Um material é dito piezoelétrico se ao aplicar uma força externa obtém-se uma polarização elétrica interna, com intensidade diretamente relacionada a simetria do material. (TICHÝ; ERHART; KITTINGER; PRÍVRATSKÁ, 2010).

$$P_p = dT \quad (2.2.1)$$

$P_p$  é o vetor de polarização piezoelétrica,  $d$  coeficiente de pressão piezoelétrica e  $T$  é a tensão mecânica a que o material piezoelétrico está submetida.(VIVES,2004)

Na Figura 2.4 ao se aplicar uma força de compressão no material piezoelétrico uma corrente circula pelo circuito fazendo com que a lâmpada acenda.

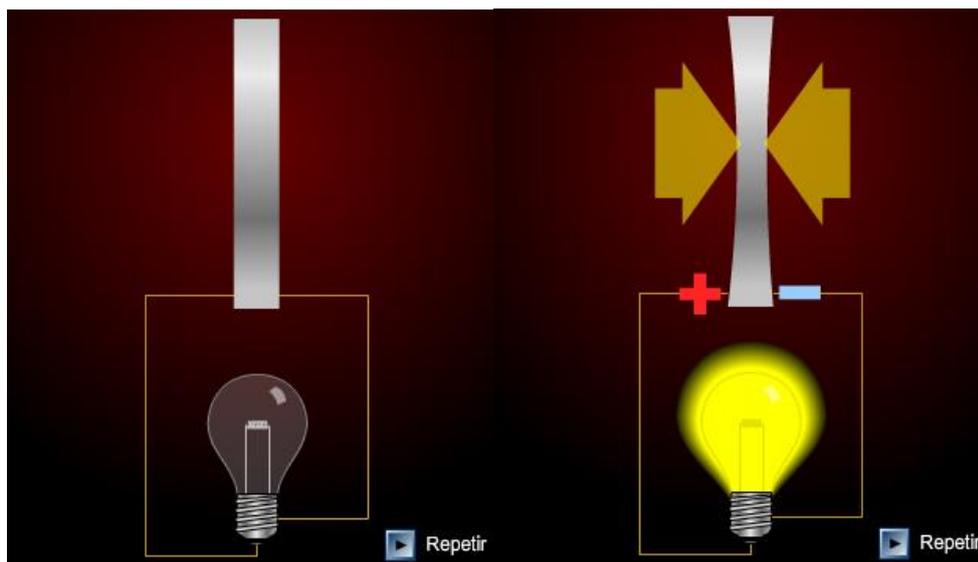


Figura 2.4 Efeito piezoelétrico direto.  
 Fonte: (Hermes Prado Jr,MD) <http://artesmedicas.com/piezoelasticidade.htm>

### 2.2.3.2 Efeito piezoelétrico inverso

Na forma reversa tem-se o efeito piezoelétrico inverso que, ao se aplicar um campo elétrico externo, o cristal se deforma. Ambos os efeitos são manifestações da mesma propriedade fundamental dos cristais acêntricos. Apenas por uma questão histórica o termo “DIRETO” é utilizado para referenciar o efeito piezoelétrico direto. (TICHÝ; ERHART; KITTINGER; PRÍVRATSKÁ, 2010).

$$S_p = dE \quad (2.2.2)$$

$S_p$  é a tensão produzida pelo efeito piezoelétrico, e  $E$  magnitude do campo elétrico aplicado.(VIVES,2004).

Na Figura 2.5 ao se aplicar uma diferença de potencial na superfície do material piezoelétrico tem-se uma contração/expansão (dependendo da polaridade da fonte) que gera um distúrbio no ar, no caso uma onda sonora.

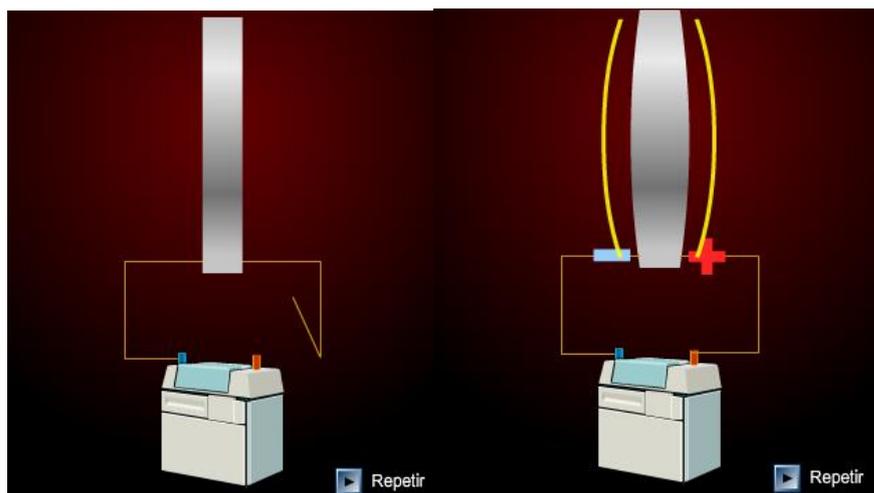


Figura 2.5 Efeito piezoelétrico Inverso.

Fonte: (Hermes Prado Jr,MD) <http://artesmedicas.com/piezoeltricidade.htm>

Quando aplicado um sinal com frequência superior a 20kHz é gerado o ultrassom conforme Figura 2.6.



Figura 2.6 Cristal piezoelétrico gerando ultrassom.

Fonte: (Hermes Prado Jr,MD) <http://artesmedicas.com/piezoeltricidade.htm>

Utilizado em ensaios não destrutivos de investigação por imagem, diagnósticos médicos por imagem, sonar marinho (para encontrar peixes ou

simplesmente verificar a profundidade do local), para verificar corrosão por exemplo. A Figura 2.7 apresenta um transdutor ultrassônico, o equipamento emite um sinal ultrassônico, por meio de um dispositivo piezoelétrico. Ao encontrar uma barreira reflete retornando para o dispositivo piezoelétrico que recebe as ondas e transformando-as em sinais elétricos que são convertidos em imagens.



Figura 2.7 Transdutor ultrassônico.  
Fonte: FAWWAZ,2005 p.189

#### 2.2.4 Aplicações

Cristais piezoelétricos são utilizados em microfones para converter as vibrações mecânicas provocadas pelas ondas acústicas em um sinal elétrico correspondente. O mesmo processo, só que ao contrário, é encontrado nos alto-falantes que convertem os sinais elétricos em som. (FAWWAZ, 2005).

Por apresentarem uma grande sensibilidade a forças externas, podem ser utilizados para medir deformações em superfícies com valores tão pequenos quanto alguns nanômetros ( $10^{-9}$  m) o que os torna ótimos na utilização como sensores de posicionamento em microscópios de varredura por tunelamento eletrônico. Também utilizados como acelerômetros eles podem medir desde níveis de aceleração tão baixos quanto ( $10^{-4}$  g) e tão altos quanto 100g. (FAWWAZ, 2005).

Dentre outras várias aplicações podem-se citar: gerar centelhas em isqueiros e geradores a gás, em relógios e circuitos eletrônicos como osciladores de precisão. (FAWWAZ, 2005).

Na eletrônica pode-se citar o transformador piezoelétrico. Com dois transdutores, primário e secundário, eletricamente isolados por uma membrana. Aplica-se uma tensão alternada no primário, essa tensão faz com que o transdutor primário produza ondas (sonora) mecânicas (efeito piezoelétrico inverso) que se propagam até o segundo transdutor, secundário, que absorve estas ondas sonoras (vibrações mecânicas) e transforma em sinais elétricos (efeito piezoelétrico direto). Para uma carga de  $1M\Omega$  tendo uma tensão de entrada de 220V tem-se no secundário 6V. (BRAGA, 2006).

### **2.2.5 Aplicação neste Estudo**

Neste trabalho será utilizado o efeito piezoelétrico direto. O material piezoelétrico será utilizado para captar as ondas sonoras emitidas por um alto-falante e então gerar um sinal elétrico.

## **2.3 RESSONÂNCIA**

Segundo (Lauro Xavier, 1922) quando perguntado a um eletricista, eletrônico ou físico o que é ressonância, a resposta é : “ Quando as componentes reativas são iguais e de sinais contrários, apresentando-se o circuito como uma resistência pura”.

Segundo (Menezes; F.F, 2004) por definição ressonância é quando corpo vibra espontaneamente quando submetido a uma força externa, cujas frequências coincidem com os períodos próprios e naturais de vibração de sua matéria.

A ressonância significa, assim uma vibração com amplitude relativamente maior que aparece quando a frequência da força externa aplicada se iguala a frequência característica do sistema o qual atua.

Toda ressonância implica em alguma perda de energia tendo em vista que movimentos de amplitude acentuada sempre ocasionam uma maior transformação da energia de vibração em outras formas de energia.

Um exemplo histórico do fenômeno de ressonância foi a queda da ponte pênsil do estreito de Tacoma (Washington, EUA), quando ventos soprando sobre a ponte provocaram oscilações de ressonância, conforme mostrado na Figura 2.8 e na Figura 2.9, que levaram à sua destruição em novembro de 1940, quatro meses depois de ter sido inaugurada (HECHT, 1994).

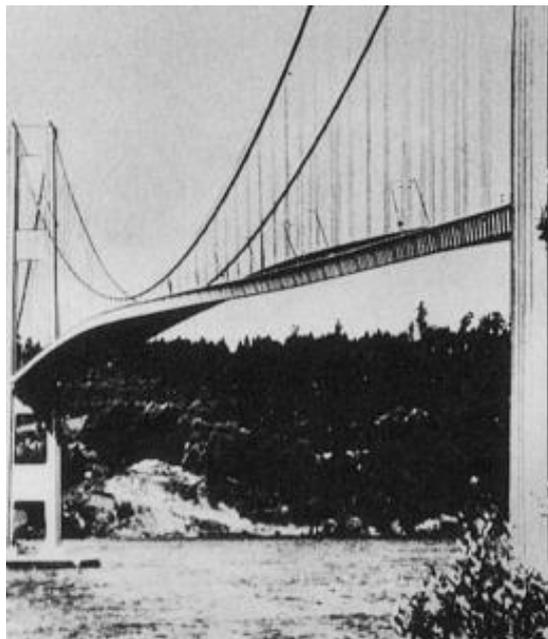


Figura 2.8 Ponte em ressonância por causa da força do vento.  
Fonte: (HECHT, 1994)



Figura 2.9 Após ter entrado em ressonância a estrutura da ponte não aguentou e ela ruiu.  
Fonte: (HECHT, 1994)

## 2.4 RESISTORES DE ALTA PRECISÃO

Os circuitos elétricos possuem três componentes fundamentais: o resistor; o capacitor e o indutor, com os quais se pode desenvolver circuitos na forma mais ampla, simulando trabalho e armazenamento de energia e analisando suas características e suas propriedades. (SIMONE, 2002).

### 2.4.1 Resistência

A passagem de elétrons livres através de um elemento resistivo necessita que energia seja despendida em forma de trabalho realizado por uma fonte externa de energia elétrica, por exemplo uma bateria, para vencer a resistência que o material apresenta. Como trabalho por unidade de carga é a tensão ( $V$ ), então:

$$V \propto R \quad (2.4.1)$$

Ou seja, tensão é diretamente proporcional ao valor da resistência.

Para um valor específico de uma dada resistência, quanto maior a tensão aplicada mais energia cinética das cargas é transferida através do elemento, resultando em uma maior circulação de cargas livres. Como a quantidade de carga em movimento por unidade de tempo é a corrente elétrica ( $I$ ), tem-se:

$$V \propto I \quad (2.4.2)$$

Ou seja, a tensão é diretamente proporcional ao valor da corrente resultante. Combinando as equações ( 2.4.1 ) e ( 2.4.2 ), tem-se:

$$V \propto RI$$

Portanto:

$$V = kRI$$

Como a unidade de  $R$  ainda não foi definida especificamente, a constante de proporcionalidade  $k$  pode ser combinada com  $R$ , assim:

$$V = RI \quad (2.4.3)$$

Esta relação foi descoberta pelo físico Alemão Georg Ohm e a ela foi atribuída o nome de *Lei de Ohm*. Ela é uma lei básica e importante em circuitos elétricos e é aplicada de maneira apropriada em diferentes situações em análises de circuitos (BOCTOR, 1992).

Para medir a corrente que flui através de uma resistência, um amperímetro é ligado em série à resistência conforme mostra a Figura 2.10. O amperímetro monitora a corrente que flui através da resistência, que é igual à corrente em  $R$  caso o voltímetro não esteja ligado ou seja um voltímetro ideal (com resistência infinita) pois não haverá corrente fluindo pelo voltímetro. O amperímetro é um instrumento polarizado, ou seja, é necessário que a corrente esteja no sentido de entrada pelo

lado positivo para obter indicação positiva do ponteiro. Um amperímetro ideal possui resistência igual à zero. A tensão aplicada na resistência é medida através do voltímetro ligado em paralelo, assim como o amperímetro, o voltímetro também é polarizado, portanto seu terminal positivo deve ser conectado ao ponto de maior potencial para obter indicação positiva do ponteiro. (BOCTOR, 1992).

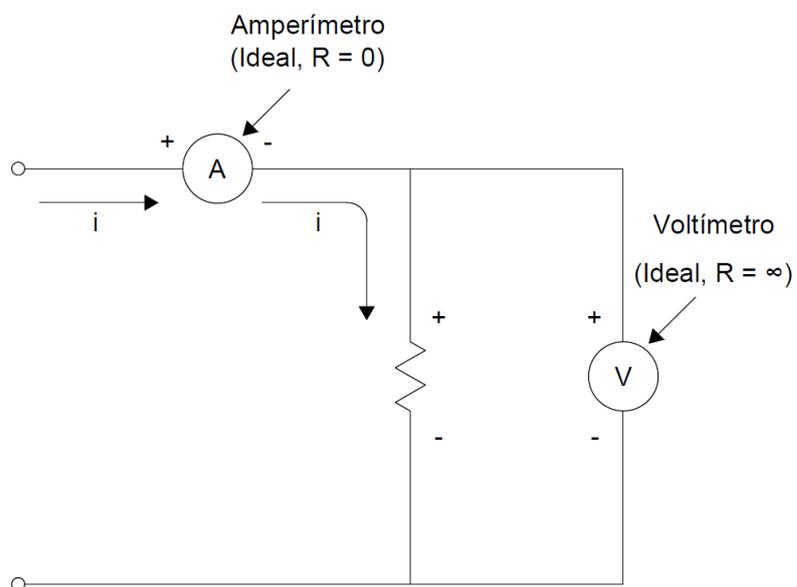


Figura 2.10 Ligação de amperímetro e voltímetro em uma resistência  
Adaptado de: Boctor, 1992, p. 35

## 2.4.2 Resistores

Existem diferentes tipos, tamanhos e formas de resistores na prática. Resistores são especificados, basicamente, por:

- Seu valor, que é indicado ou por impressão ou por códigos de cores no corpo cilíndrico do resistor. Resistores variam desde frações de ohm até muitos megahms. (BOCTOR, 1992).

- Sua potência, que é geralmente indicado no resistor ou identificado pelo tamanho de resistores padrões. A potência varia desde frações de *watt* até muitas dezenas de *watts*. (BOCTOR, 1992).

#### **2.4.2.1 Valores padrão de resistência e tolerância**

Os valores de resistência para os resistores são tabelados e nem todos os resistores são comumente fabricados. Estes valores tabelados são chamados de *valores nominais* já que o valores reais dos resistores provavelmente não são os mesmos, mas são muito próximos a este valor nominal. Esta variação é chamada de *tolerância* e geralmente são expressas em porcentagem. As tolerâncias mais comuns encontradas são de 5%, 10% e 20%, indicando que o valor real do resistor pode variar até  $\pm 5\%$ ,  $\pm 10\%$  e  $\pm 20\%$ . (BOCTOR, 1992).

#### **2.4.3 Aplicação neste Estudo**

Para o sistema previsto neste trabalho resistores serão utilizados como carga, podendo, assim, calcular a potência gerada a partir da tensão nos seus terminais e da corrente que passará por ele.

Devido às condições de trabalho esperadas para este estudo (baixas potências, correntes e tensões), resistores de baixo valor e alta precisão serão utilizados. Os valores dos resistores deverão variar entre  $0,01 \Omega$  à  $0,1 \Omega$ , com tolerância de  $\pm 1\%$  e potências entre 1 W à 10 W.

## 2.5 ONDAS SONORAS

### 2.5.1 Conceito Geral

Se define por ondas sonoras as vibrações longitudinais existentes no meio material, seja ele sólido, líquido ou gasoso, e que são propagadas através dele com velocidade aferida através das propriedades mecânicas do próprio meio. Normalmente, a origem das ondas sonoras se dá através de alguma espécie de vibração mecânica ocasionada por batidas, atrito ou qualquer outro tipo de agitação e outras formas dissipação de energia. As frentes de onda de uma onda sonora são superfícies esféricas que se expandem e estão sujeitas a toda e qualquer dificuldade como qualquer outro tipo de onda. (JR., LEMON, STEPHENSON).

O exemplo mais importante que temos de ondas longitudinais são as ondas sonoras no ar. Entretanto, as ondas sonoras podem se propagar através de qualquer meio material. Abaixo é apresentada a com alguns exemplos de meios materiais e a respectiva velocidade que as ondas sonoras atingem em tal meio.

<b>Meio gasoso</b>	<b>V (m/s)</b>	<b>Meio líquido</b>	<b>V (m/s)</b>	<b>Meio sólido</b>	<b>V (m/s)</b>
Ar (0°C)	331	Querosene	1324	Chumbo	1322
Ar (20°C)	343	Mercúrio	1450	Ouro	3240
Hélio	972	Água	1393	Ferro	5130
Hidrogênio	1286	Glicerol	1904	Diamante	12000

Tabela 2.2 Velocidade da propagação de ondas em diferentes fluidos.

Adaptado de: Serway p.458

As velocidades de propagação das ondas sonoras no ar são diretamente influenciadas por alguns fatores como: pressão, temperatura e umidade. A ação destes fatores é diretamente proporcional à velocidade de propagação, ou seja, se houver aumento de pressão atmosférica, temperatura ou umidade, teremos aumento da velocidade de propagação da onda sonora no meio, mesmo que em alguns casos

essas mudanças sejam bastante pequenas: “A velocidade do som no ar à pressão de 100 atm foi achada aproximadamente 351 m/s a 0°C.” (JR., LEMON, STEPHENSON, p 33).

### 2.5.2 Potência de Ondas Sonoras

“Quando a onda se desloca, cada elemento de fluido exerce uma força sobre o elemento a sua frente. Se o aumento de pressão no elemento de fluido é  $\Delta p$ , a força exercida por ele no elemento seguinte será  $F_x = A \Delta p$ , onde  $A$  é a área da seção transversal do elemento fluido.” (RESNICK, HALLIDAY, KRANE, p 151).

A variação de pressão citada no parágrafo acima pode ser calculada através da seguinte equação:

$$\Delta p(x, t) = \Delta p_m \text{sen}(kx - \omega t) \quad (2.5.1)$$

E tal expressão pode ser usada para se encontrar a força ( $F_x$ ) que cada elemento sob pressão exerce no elemento subsequente:

$$F_x = A \Delta p_m \text{sen}(kx - \omega t) \quad (2.5.2)$$

Considerando que o valor médio de  $\text{sen}^2 \theta$  é igual a  $\frac{1}{2}$ , a potência média pode ser expressa através da seguinte fórmula:

$$P_{med} = \frac{A(\Delta p_m)^2}{2\rho v} \quad (2.5.3)$$

Onde “ $A$ ” é a área da seção transversal do elemento do fluido, “ $\Delta p_m$ ” é a variação máxima de pressão no elemento fluido, “ $\rho$ ” é a massa específica do meio e “ $v$ ” é a velocidade do som.

### 2.5.3 Intensidade de Ondas Sonoras

A intensidade das ondas sonoras se refere à quantidade de energia que a onda sonora transfere. É a qualidade que nos permite observar se um som é forte ou fraco, e as unidades mais usadas são  $J/m^2$  e  $W/m^2$ .

Pode-se calcular a intensidade sonora através da seguinte fórmula:

$$I = \frac{P_{med}}{A} = \frac{(\Delta p_m)^2}{2\rho v} \quad (2.5.4)$$

Entretanto, o ser humano possui a peculiaridade de possuir ouvidos que são sensíveis a variações em escala logarítmica enquanto os estímulos captados variam exponencialmente, portanto, o nível de intensidade sonora (*NIS*) é convenientemente mensurado em decibéis (*dB*).

“A resposta do ouvido humano ao aumento de intensidade sonora é aproximadamente logarítmica, então, é conveniente introduzir uma escala logarítmica chamada de *nível de intensidade sonora NIS (SL – sound level)*”. (RESNICK, HALLIDAY, KRANE, p 151).

$$NSI = 10 \log \frac{I}{I_0} \quad (2.5.5)$$

Onde  $I_0$  é uma intensidade referência usada como base, que vale  $10^{-12} W/m^2$ . Deste equacionamento pode-se concluir que o limiar inferior da audição humana, que seria de 0 dB, corresponde a um som de intensidade  $I_0$ . O limite superior da audição humana é de 120 dB ( $1 W/m^2$ ).

## 2.6 DECIBELÍMETRO

Um decibelímetro é um equipamento que mede a pressão do ar, ou seja, o som ou ruído em dB (decibéis). Existem vários tipos de medidores de som, estes são regidos pelas normas IEC 60651, IEC 60804 and ANSI S1.4

Hoje em dia a maioria dos aparelhos disponíveis no mercado são digitais. Figura 2.11, mas aparelhos analógicos também podem ser encontrados. Os decibelímetros tendem a ser pontiagudos na sua parte superior diminuindo assim a reflexão das ondas.

Basicamente são compostos por um microfone que capta as ondas e é interpretado pelo sistema do aparelho devolvendo o valor em dB. (<http://www.npww.com/help/soundlevelmeter.asp>)

### REF. H004-034 MODELO SL-4012 DECIBELÍMETRO DIGITAL MARCA HOMIS

#### Características

Fabricado conforme norma IEC 651 tipo 2  
Escala automática e manual  
Curvas de ponderação A/C  
Modos de leitura rápido e lento  
Saída RS - 232 para comunicação via PC  
Função DATA HOLD Registro da última leitura  
Função PEAK HOLD Valor máximo de leitura  
Construído com plástico ABS (leve e resistente)  
Compacto e leve  
Display LCD (5 dígitos)  
Microfone eletrocondensado de 1/2"

#### Especificações

Escala: 30 - 130dB (automática)  
30 à 80 - 50 à 100 - 80 à 130 dB (manual)  
Resolução: 0,1dB  
Precisão: 31,5Hz - ±3dB / 63Hz - ±2dB / 125Hz - ±1,5dB /  
250Hz - ±1,5dB / 500Hz - ±1,5dB / 1KHz - ±1,5dB /  
2KHz - ±2dB / 4KHz - ±3dB / 8KHz - ±5dB

#### Frequência

Escala: 31,5Hz / 8KHz  
Tempo (Rápido/ Lento)  
Rápido: t = 200mS  
Lento: t = 500mS



Figura 2.11 Exemplo de decibelímetro e suas especificações técnicas.  
Fonte: <http://www.impac.com.br/decibelometro/decibelimetrodigital.htm>

## 2.7 AMPLIFICADORES

Todos os tipos de informação de áudio gravados para reprodução começaram como sinais elétricos muito baixos. Por exemplo, o nível de sinal nas saídas de microfones, captadores de instrumentos musicais, ou fitas de áudio geralmente chegam a somente alguns milivolts. Tais tensões a níveis de sinais precisam ter suas amplitudes aumentadas (amplificadas) para que possam ser utilizadas. Amplificadores de tensão projetados a cumprir esta tarefa são chamados de *pré-amplificadores*. Para aplicações de áudio convencionais, as tensões a níveis de sinais são pré-amplificadas para aproximadamente 1 ou 2 volts RMS. Este nível é conhecido como *nível de linha*, e é o nível de saída mais comum encontrado em equipamentos de áudio para consumidores (por exemplo, tocadores de fitas, *CD players*, receptores de ondas FM, etc.). (SLONE, 1999).

Todos os pré-amplificadores são amplificadores de tensão. Sua função é de condicionar e amplificar um sinal de tensão à nível de linha, como preparação para enviá-lo à um amplificador de potência de áudio, que, por sua vez, é responsável por amplificar este sinal de linha à um nível alto de tensão e corrente, capaz de mover um alto-falante de baixa impedância (geralmente de 4  $\Omega$  ou 8  $\Omega$ ). (SLONE, 1999).

Um amplificador de áudio de potência de alta qualidade é dito ser “transparente”. Isso significa que a tensão de saída é (quase) uma réplica exata da tensão de entrada, sem que nenhuma modificação tenha sido feita nas relações de fase, integridade harmônica, resposta de transitório, ou resposta em frequência. Se um amplificador “perfeito” pudesse ser construído, a única diferença entre o sinal de linha de entrada e o sinal de saída seria a amplitude aumentada na saída (tanto corrente quanto tensão). Qualquer outra diferença entre o sinal de entrada e o de saída de um amplificador de áudio de potência é chamada de *distorção*. (SLONE, 1999).

Embora todos os amplificadores de áudio de potência executem essencialmente a mesma função, as suas aplicações são variadas. Amplificadores de áudio de potência são normalmente utilizados por clientes finais em aparelhos de som domésticos, sistemas de multimídia de computadores, *home theater*, etc. E também, músicos utilizam um tipo de instrumento amplificador (combinação de pré-amplificador, amplificador de potência e alto-falantes, geralmente em um só compartimento). (SLONE, 1999).

### **2.7.1 Aplicação neste Estudo**

Será utilizado um amplificador da **Meteoro Atomic Drive 50w** que possui um auto falante de 12” que receberá o sinal de um computador (com frequências definidas), amplificará este sinal (pré-amplificador e amplificador) e o enviará ao alto-falante, reproduzindo, assim, as ondas sonoras nas frequências e intensidades desejadas para que o estudo proposto por este trabalho seja realizado.

## **2.8 ALTO-FALANTES**

### **2.8.1 Conceito Geral**

“Dá-se o nome de *alto-falante* ao elemento final de toda etapa amplificadora de baixa frequência, mediante o qual é possível transformar em ondas sonoras de certa potência, as oscilações da corrente elétrica fornecida pela última etapa amplificadora do amplificador.” (VASSALLO, p 7).

O alto-falante também pode ser chamado de transdutor eletroacústico, pois transforma energia elétrica em energia acústica. A energia acústica é transportada pelas ondas sonoras que são captadas pelo aparelho auditivo do homem, mais precisamente pelos tímpanos, que são um tipo de membrana capazes de captar a vibração ocasionada pelas ondas sonoras. O aparelho auditivo humano capta a energia dessas ondas sonoras (ondas mecânicas) e as transforma em impulsos

nervosos (energia elétrica) transmitidos ao cérebro, que por sua vez interpreta tais sinais como “som”.

### 2.8.2 Aspectos construtivos

Na Figura 2.12 podem-se visualizar as principais partes construtivas de um alto-falante: estrutura, flange de fixação, suspensão, capa, cone, aranha, bobina, circuito magnético do ímã e o entreferro ou *GAP*.

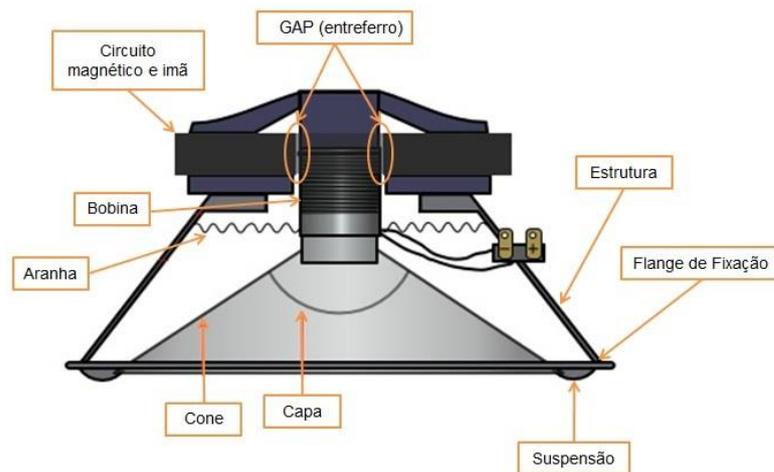


Figura 2.12 Exemplo de estrutura de um alto-falante.  
Fonte: <http://www.centerpointaudio.com/HowSpeakersWork.aspx>

- Sistema do ímã e circuito magnético: o ímã deve possuir o maior fluxo possível. Quanto maior for a capacidade (Tesla) do ímã, mais elevado será o grau de qualidade do alto-falante (e maior será sua capacidade de reproduzir sinais de baixas intensidades);
- Entreferro (gap): este é um ponto crítico do sistema, pois grande parte da eficiência do alto-falante está diretamente ligada às corretas dimensões do entreferro;
- Abertura: quando empregada, sua principal função é diminuir a pressão no cone na região da bobina, na intenção de se obter uma velocidade maior na resposta;

- Bobina: é o componente responsável pelo estímulo do cone aos sinais elétricos. Deve possuir baixa reatância para que se evite sintonia em certa frequência, isso possibilita que o leque de frequências ao qual a bobina é projetada para operar seja expandido. Geralmente, bobinas de diâmetros menores são mais eficientes, entretanto, conduzem a um maior acúmulo de calor no sistema podendo queimar se receberem sinais muito fortes. Por este motivo, o material mais usado pelos fabricantes para constituição da bobina é o alumínio, pois tal material possui uma ótima dissipação de calor;
- Aranha: o conjunto formado por aranha, cone e suspensão é o responsável pelo grau de fidelidade com o qual o som será reproduzido pelo alto-falante. A aranha deve possuir o maior grau possível de resiliência, ou seja, deve voltar a posição de repouso o mais rápido possível quando não estiver sendo estimulada (ausência de sinais elétricos);
- Cone: deve possuir o mais alto grau de rigidez possível para evitar vibrações e ser resistente a deformações. Também deve ter o peso minimizado para que seu tempo de resposta seja o menor possível.
- Suspensão: a suspensão deve ser fixa para não influenciar no movimento do cone e vedada para manter o aspecto de estanqueidade do sistema;
- Estrutura: deve ser forte e resistente sem introduzir qualquer tipo de som ou ressonância no sistema, para que também seja resistente a distorções mecânicas e para que suporte o peso do ímã, aranha, cone e outros componentes.
- Vedação: a vedação deve ser impecável para que o sistema do alto-falante opere com precisão. O movimento de pistão que o cone sofre é diretamente influenciado pelo grau de vedação do sistema, pois a estanqueidade interna ajuda o cone a retornar para sua posição inicial após cada estímulo recebido.

## 2.9 SOFTWARE PARA REPRODUÇÃO DE FREQUÊNCIA

Para alcançar diferentes frequências e assim conseguir verificar o melhor rendimento do sistema, será utilizado o software NCH Tone Generator Figura 2.13. Com este software é possível criar sons com diferentes frequências.

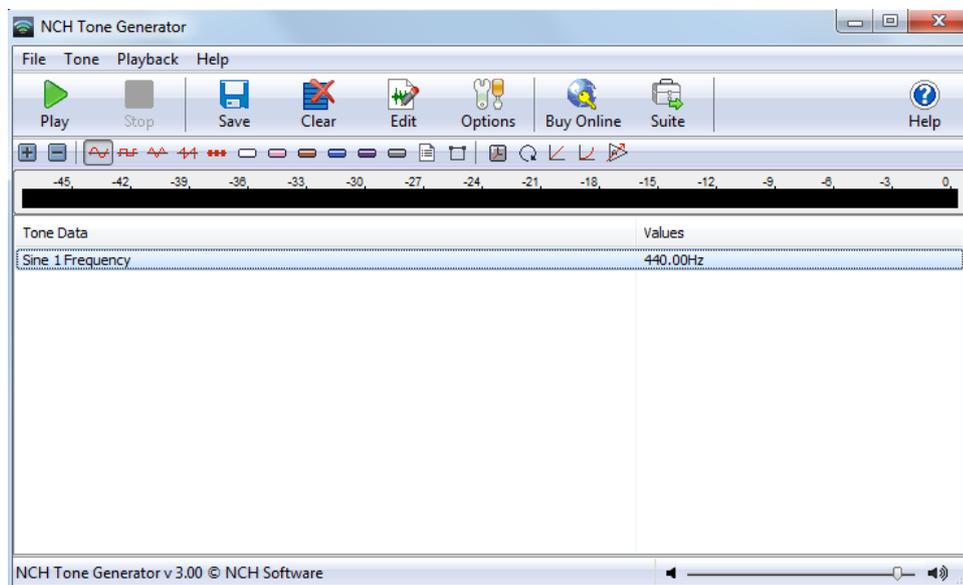


Figura 2.13 Programa NCH Tone Generator.  
Fonte: [www.nch.com.au/tonegen](http://www.nch.com.au/tonegen)

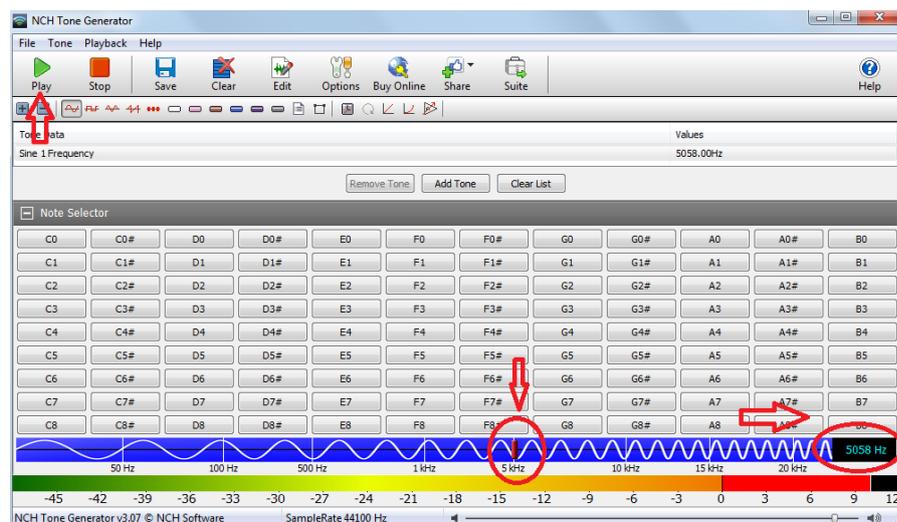


Figura 2.14 Operação NCH Tone Generator.

A operação do software é bastante simples, basta variar o cursor para selecionar a frequência desejada e então pressionar o Play. Neste estudo, além disso, foi conectado um cabo na saída (*Out*) de áudio no notebook e conectado na entrada de um amplificador.

### **3. DESCRIÇÃO DOS EXPERIMENTOS**

A fim de analisar o comportamento da transdução de energia sonora em energia elétrica utilizando materiais piezoelétricos, experimentos serão realizados expondo o sistema a sinais sonoros externos e configurações de ligação diferentes.

#### **3.1 RESSONÂNCIA PRÁTICA**

Para verificar qual é a melhor frequência para ser utilizada no sistema, ou seja, qual a frequência de ressonância que o material tem maior tendência em vibrar, tema já abordado no segundo capítulo deste trabalho, foi utilizado um medidor de impedância, pois na faixa de ressonância pode-se considerar o comportamento de um piezoelétrico análogo a um circuito RLC.

##### **3.1.1 Medidor de Impedância**

O equipamento utilizado foi um analisador da Agilent modelo 4294A mostrado na Figura 3.1 com as seguintes características :

- Frequência de operação de 40Hz a 110MHz;
- Precisão da impedância de  $\pm 0.08\%$
- Range da impedância 3 m $\Omega$  to 500 M $\Omega$ .

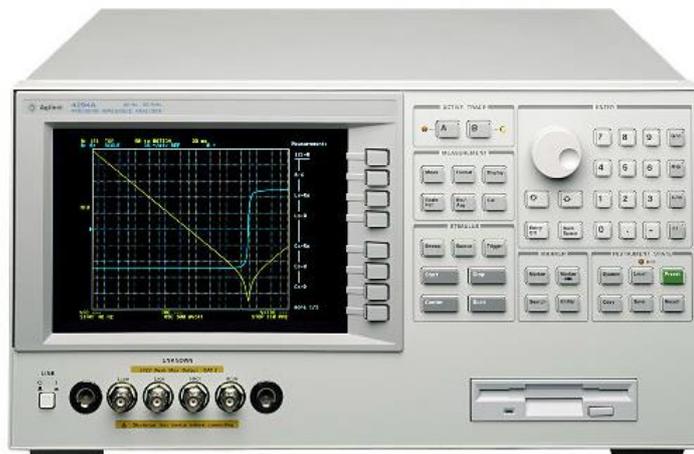


Figura 3.1 – Agilent 4294A  
Fonte: <http://www.home.agilent.com>

### 3.1.2 Circuito RLC análogo

Segundo (EMETERIO et al., 1988) o modelo do circuito elétrico para um piezoelétrico é representado por um circuito RLC. Esse circuito é simples, sendo válido na forma aproximada em uma pequena região ao redor da frequência de ressonância da cerâmica. Nessa região a excitação elétrica utilizada deve ser por onda contínua. A representação elétrica deste modelo é feita por dois ramos em paralelo (Figura 3.2). O primeiro contém um capacitor  $C_0$  e o segundo possui uma resistência  $R$ , um indutor  $L$  e um capacitor  $C$  em série. Uma primeira ressonância ocorre para o ramo serial RLC do circuito, a uma determinada frequência (onde a impedância do circuito equivalente é mínima). A antirressonância ocorre na frequência de ressonância paralela (entre os dois ramos). Neste circuito (Figura 3.2),  $C_0$  representa a capacitância entre os eletrodos do transdutor e os parâmetros restantes  $R$ ,  $L$ ,  $C$  se dispõem de tal maneira que as frequências de ressonância do circuito e o fator  $Q$  da linha R-L-C coincidam com os valores experimentalmente medidos no transdutor. O circuito RLC para a ressonância fundamental de um

transdutor vibrando em modo espessura pode ser deduzido do modelo de Mason (EMETERIO et al., 1988).

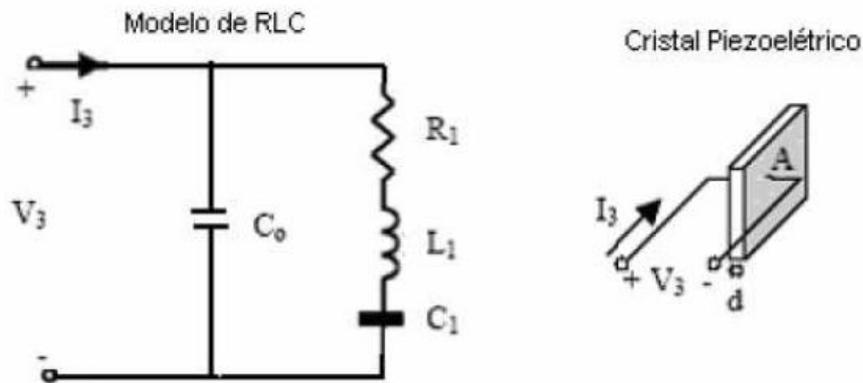


Figura 3.2 – Circuito equivalente simplificado de um transdutor piezoelétrico  
Fonte: EMETERIO et al., 1988

### 3.1.3 Medição

Para a avaliação da impedância, foram utilizados 2 tipos de piezoelétricos: um capsulado (Figura 3.3) e um sem a cápsula (Figura 3.4). O piezoelétrico capsulado foi conectado aos terminais do medidor de impedância sem ancoragem como mostra a Figura 3.17. O próprio aparelho emite um sinal com a faixa de frequência determinada e ao mesmo tempo mede qual a impedância do componente.

O piezoelétrico sem capsula não foi testado pois como foi importado, demorou a chegar e o tempo disponível para os testes era muito curto

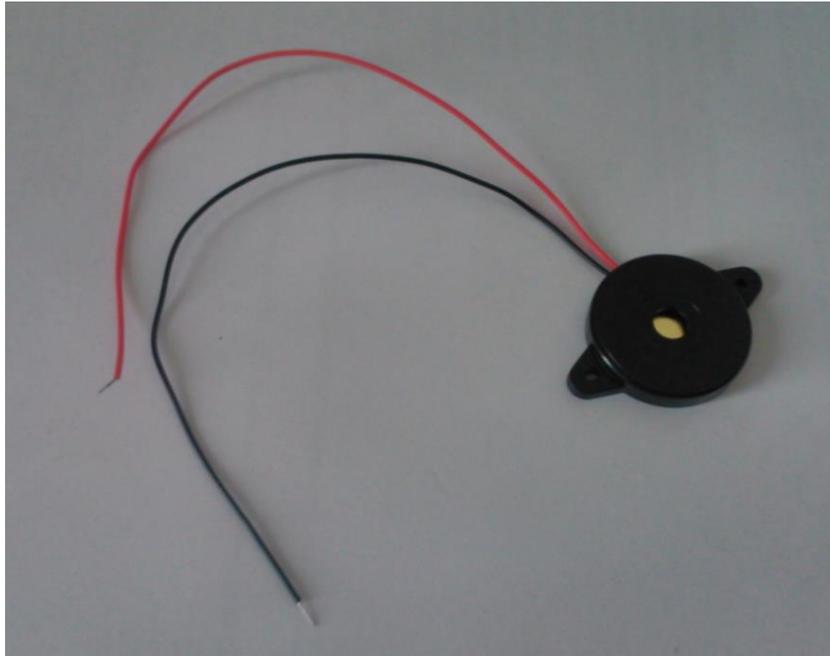


Figura 3.3 – Piezoelétrico capsulado

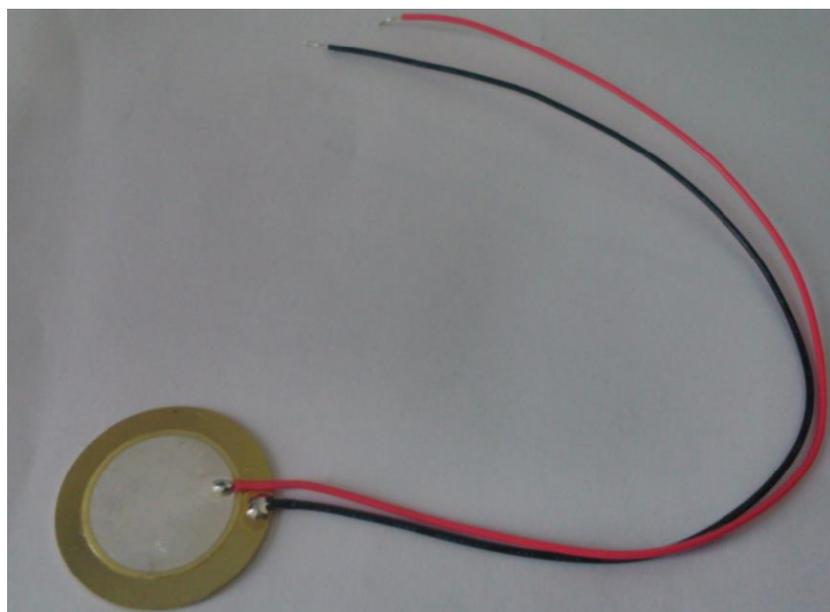


Figura 3.4 – Piezoelétrico sem cápsula.

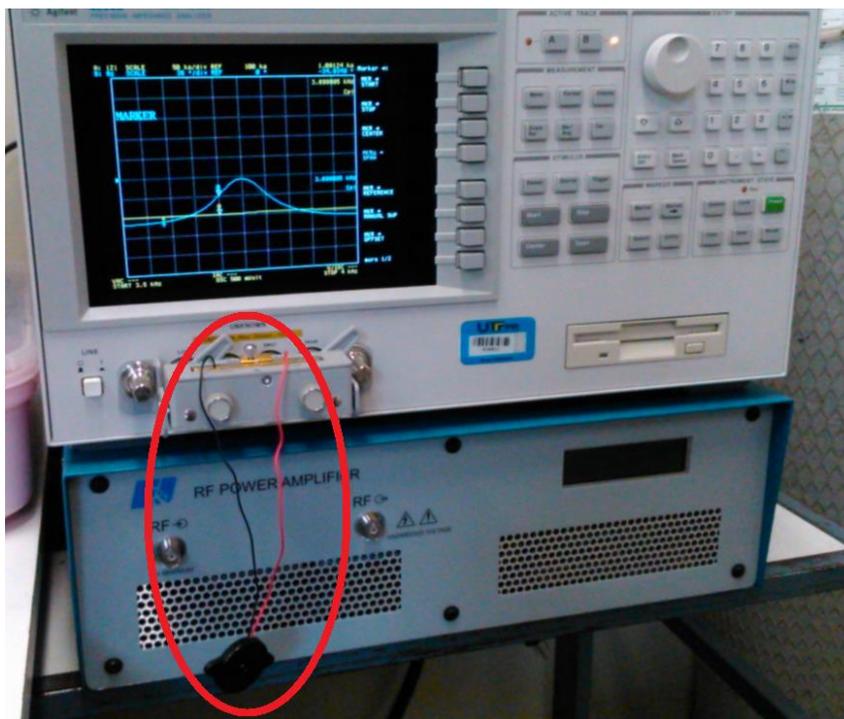


Figura 3.5 – Piezoelétrico capsulado livre conectado aos terminas do analisador.

Durante as medições foram observados alguns fatores que poderiam influenciar no resultado obtido:

- O comprimento do fio, que aumenta a indutância do circuito fazendo com que a faixa da frequência de ressonância se altere.
- O apoio do material piezoelétrico, sendo ele fixado em algum anteparo, livre ou segurado apenas com a mão. Isso devido a perdas de energia denominadas amortecimento, que tem alta influencia na faixa da frequência de ressonância, mas que não cabe no escopo do trabalho.

Um detalhe interessante observado é que existe mais de uma frequência em que o sistema demonstra comportamento ressonante e não apenas um valor específico. Os valores de frequência em que a impedância mais se aproxima de zero, são muito altos e estão dentro da faixa do ultrassom, maior que 20.000Hz.

Para o piezoelétrico capsulado foi feita uma varredura por entre as faixas de frequência que foram consideradas interessantes, Figura 3.6 de 0 a 1.2 MHz, Figura 3.7 de 0 a 20 kHz e Figura 3.8 de 3.5 kHz a 4.0 kHz.

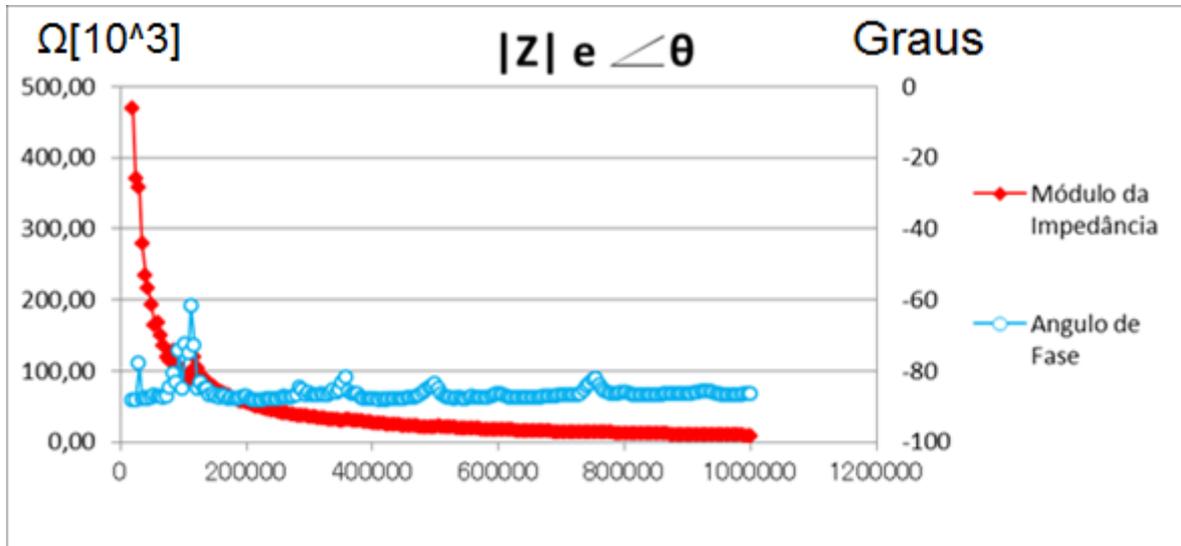


Figura 3.6 – Piezoelétrico capsulado livre faixa de 0 a 1.2 MHz.

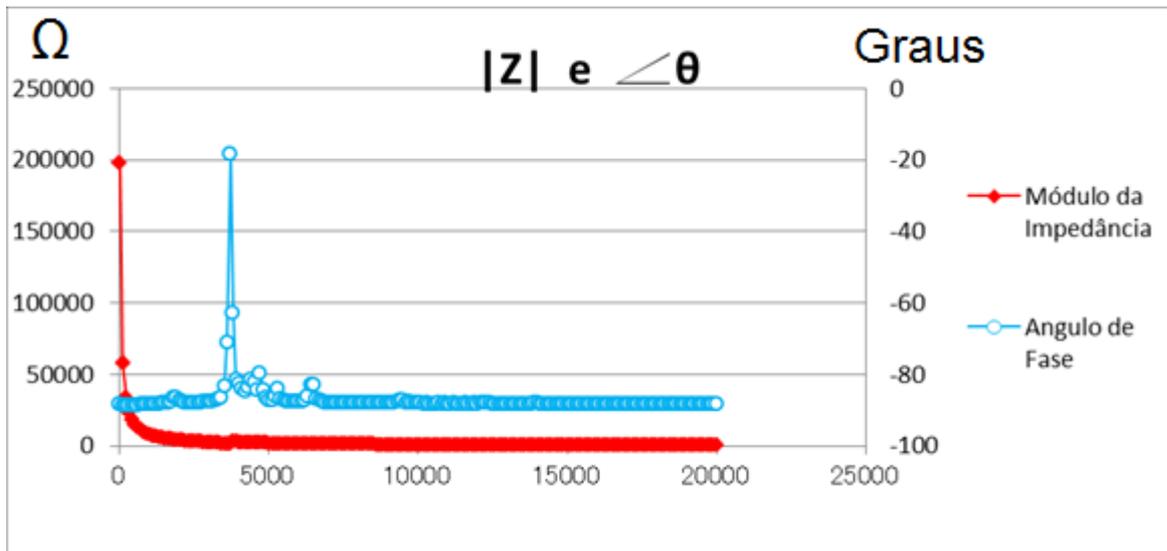


Figura 3.7 – Piezoelétrico capsulado livre faixa de 0 a 25 khz .

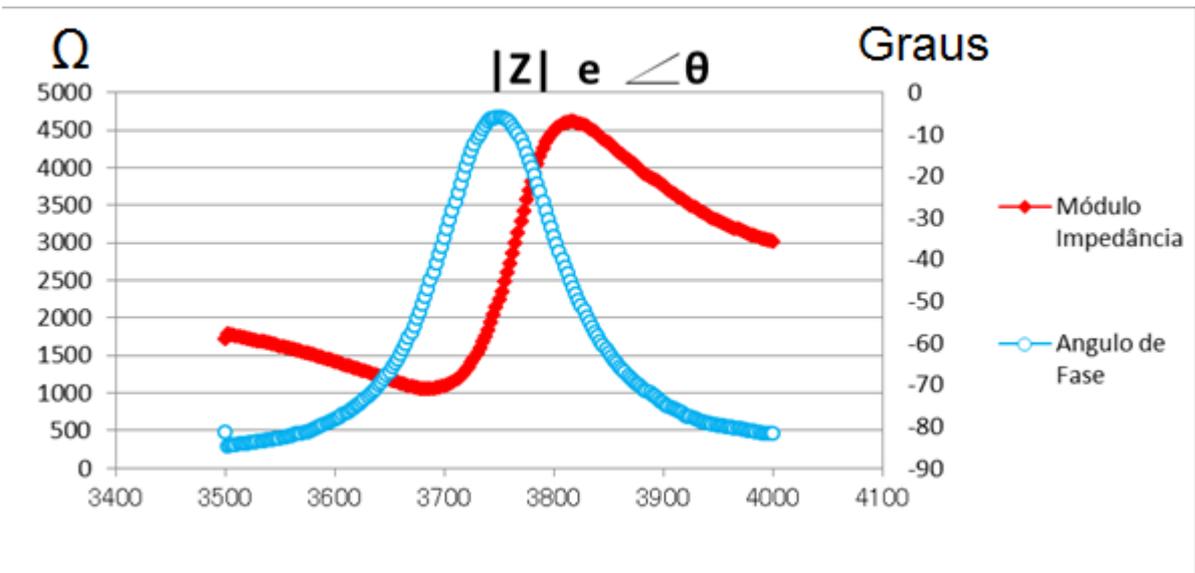


Figura 3.8 – Piezoelétrico capsulado livre faixa de 3.5KHz a 4.0KHz.

O objetivo foi avaliar uma faixa de frequência grande e depois ir aproximando a uma faixa mais viável de utilização, que tivesse uma frequência de ressonância que pudesse ser reproduzida por alto-falantes, que foi o caso da Figura 3.8.

Em comum nos gráficos tem-se o ângulo de fase da impedância e o módulo da impedância. Analisando o gráfico da Figura 3.8, percebe-se que o ponto em que o ângulo mais se aproxima de zero é o de 3750 Hz que é aproximadamente o mesmo em que se obtêm o menor valor de impedância, ou seja quanto mais próximo de zero mais puramente resistivo é o sistema, sem carga indutiva e nem capacitiva, que é onde se tem a frequência de ressonância.

Comparando o resultado retirado do gráfico de impedância e ângulo de fase com o resultado prático obtido com o piezoelétrico capsulado, pode-se ver que a frequência de ressonância nós dois casos é quase a mesma. Para demonstrar isso foi incidida uma onda sonora de mesma intensidade com frequência de 3750 Hz e outras duas com valores abaixo e acima desta.

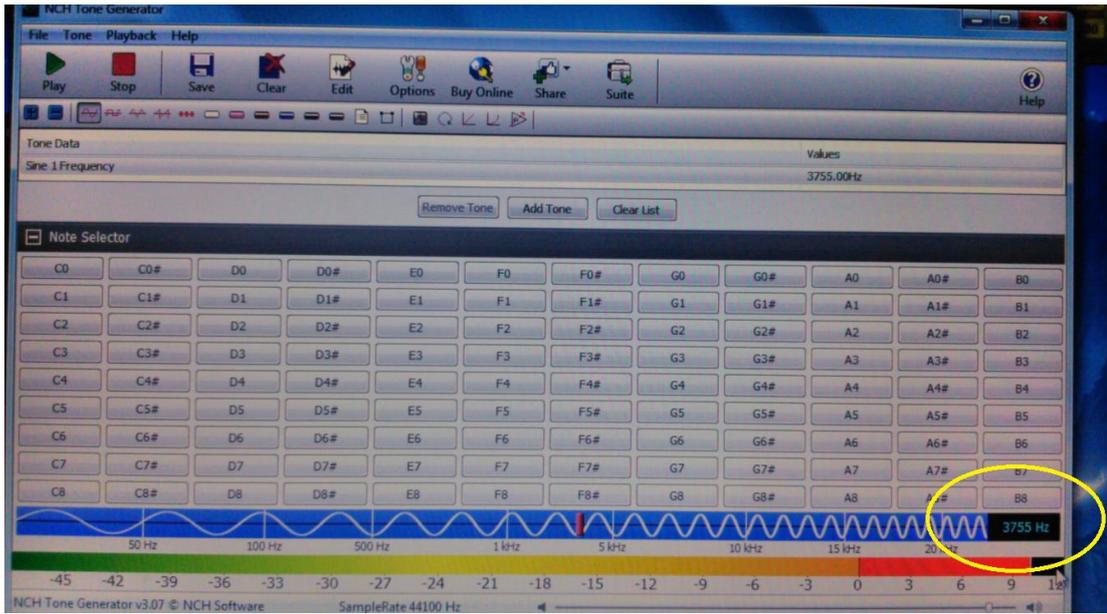


Figura 3.9 Software emitindo 3755 Hz.

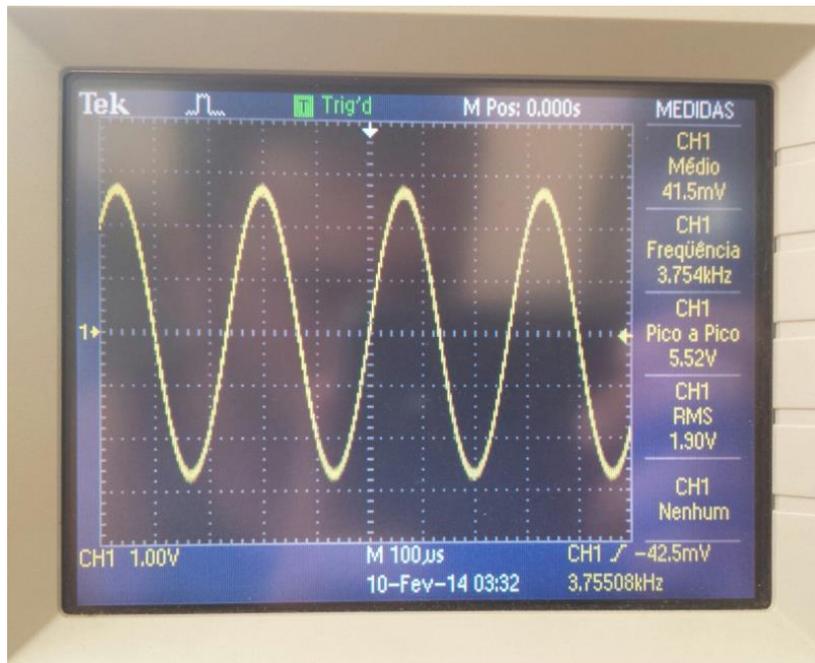


Figura 3.10 – Mesma frequência obtida no analisador de impedância retornando o maior valor de tensão.

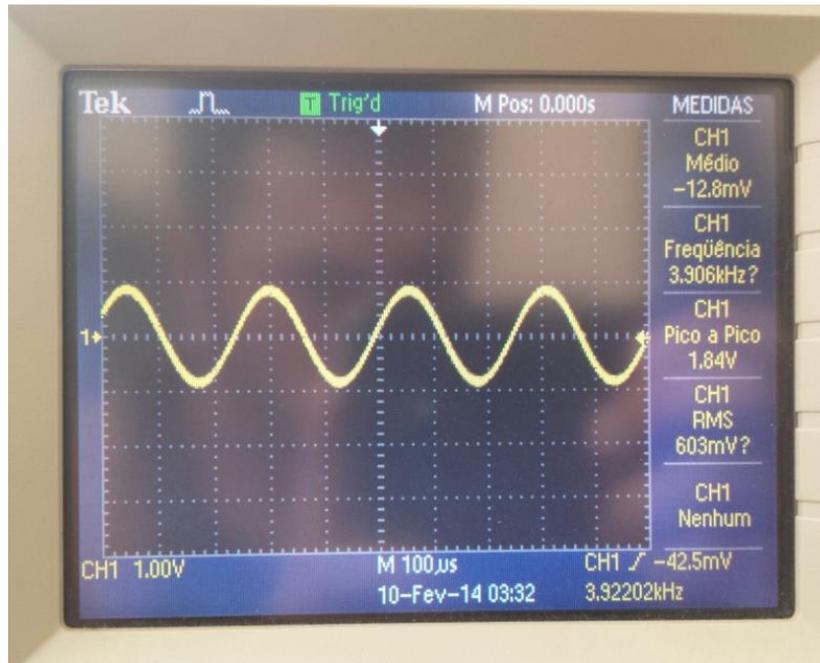


Figura 3.11 – Frequência maior que a obtida no analisador de impedância retornando um menor valor de tensão.

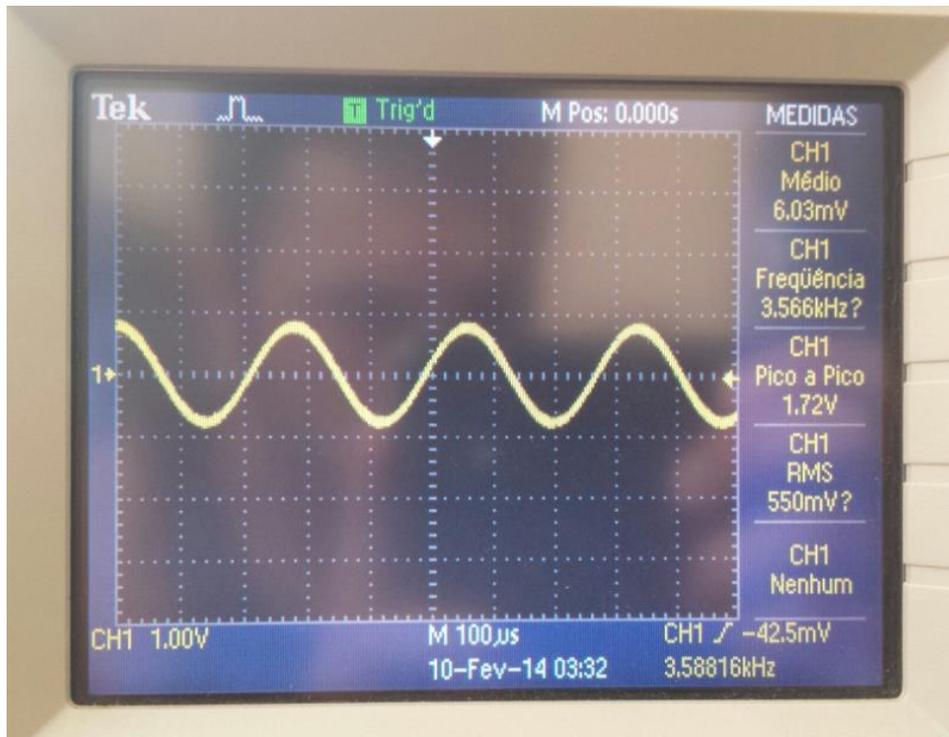


Figura 3.12 – Frequência menor que a obtida no analisador de impedância retornando um menor valor de tensão.

Observa-se que para 3754 Hz(valor aproximado encontrado com o medidor de impedância) o valor de tensão pico a pico é de 5.52 V (Figura 3.10), para 3906 Hz o valor da tensão é de 1.84 V (Figura 3.11) e para 3566 Hz o valor de tensão é de 1.72 V (Figura 3.12). Comprova-se assim que 3754 Hz é a frequência de ressonância do sistema.

## 3.2 EXPERIÊNCIA PRÁTICA

### 3.2.1 Ambiente de Trabalho

Para realização da experiência foram utilizados os seguintes componentes e equipamentos:

- Amplificador **Meteoro Atomic Drive** 50 W para emissão das ondas sonoras;
- Laptop com software para reprodução de ondas sonoras com controle da frequência;
- Osciloscópio digital para coleta de dados;
- Decibelímetro digital **Extech** modelo 407730.
- Planta com material piezoelétrico para transdução da energia sonora;
- Resistores de diferentes valores de resistência;
- Protetores auriculares devidos à alta intensidade sonora.

A Figura 3.13 e Figura 3.14 ilustram a configuração final do ambiente de trabalho.



Figura 3.13 – Ambiente da experiência



Figura 3.14 – Amplificador e planta

Para mensurar a influência do ruído do ambiente nos resultados coletados, o osciloscópio foi conectado à planta com material piezoelétrico e o amplificador foi mantido desligado. Os valores encontrados foram de 0,18 V pico a pico e uma frequência inconstante. O comportamento da onda obtida do sinal da planta pode ser visualizado na Figura 3.15.

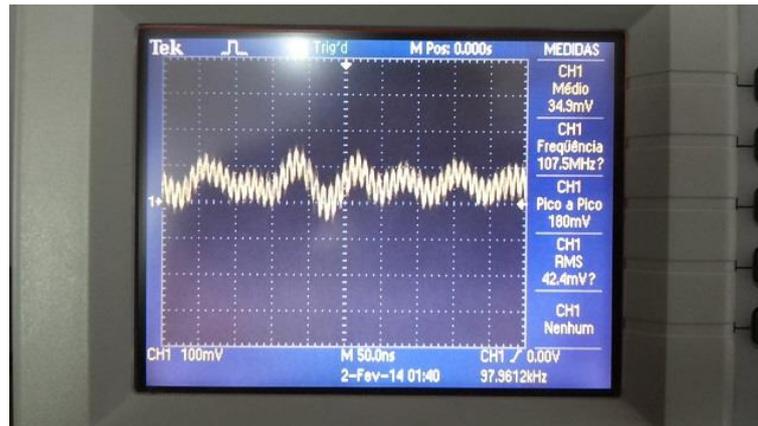


Figura 3.15 – Ruído Ambiente

Embora a resposta obtida seja bastante variável devido aos ruídos do ambiente não serem constantes, pode-se observar que a tensão pico a pico da planta era mantida próximo a 180 mV. Após a coleta dos resultados da experiência será avaliado a influência que este valor tem sobre os dados.

### 3.2.2 Grandezas envolvidas

Para se saber a ordem das grandezas presentes no trabalho, foi feito um primeiro teste prático para medir o potencial do material piezoelétrico. Neste teste já foi utilizado o material piezoelétrico que comporá o protótipo, comprado no site da loja Farnell internacional, número da peça ABT-441-RC e as características deste elemento piezoelétrico são:

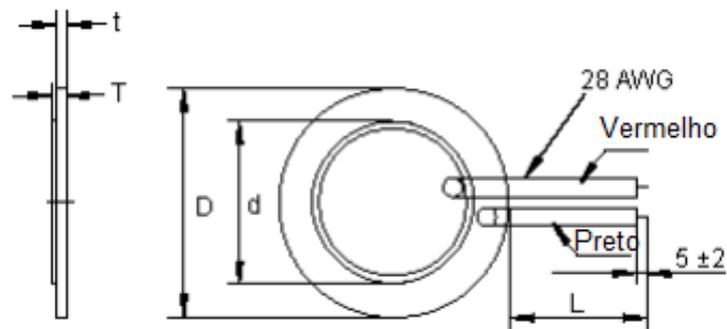


Figura 3.16 – Esquema Construtivo do Material Piezoelétrico  
 Adaptado de: <http://www.farnell.com/datasheets/1662482.pdf>

- Tensão máxima = 30 Vpp;
- Capacitância = 20,000 pF  $\pm$ 30%;
- Frequência de ressonância = 4.200  $\pm$  500 Hz;
- Impedância de ressonância = 300  $\Omega$ ;
- Dimensões = D = 27  $\pm$ 0,1 mm, d = 20  $\pm$  0,3 mm, t = 0,3  $\pm$  0,02 mm, T = 0,52  $\pm$  0,1 mm;
- Fio condutor: 28 AWG;

Na Figura 3.17 pode-se ver o material piezoelétrico e na Figura 3.18 como a ligação foi feita para a realização do experimento.



Figura 3.17 – Foto do material piezoelétrico

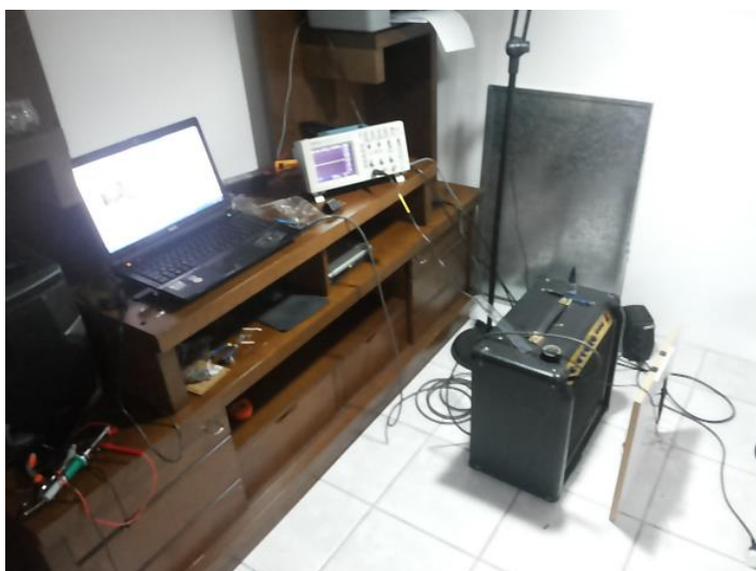


Figura 3.18 – Experiência inicial

Lembrando que a maneira que o piezoelétrico é ancorado também tem influência sobre o resultado obtido. Nesta etapa, a fim de realizar testes em

condições próximas ao protótipo final, o piezoelétrico foi fixado com cola em um painel de madeira.

Primeiramente o osciloscópio foi conectado diretamente ao material piezoelétrico e ondas sonoras de diferentes frequências foram direcionadas ao material. A frequência de 264 Hz da onda sonora foi a que mais retornou tensão, esta frequência ótima de operação é diferente da frequência encontrada no item 3.1.3, pois conforme apontado no item 3.3 o modo em que o material é ancorado influencia na sua frequência de ressonância, neste caso a ancoragem foi feita com cola em painel de madeira. O resultado no display do osciloscópio foi de uma tensão senoidal com frequência 265 Hz e tensão de 4,83 V RMS.



Figura 3.19 – Tensão senoidal nos terminais do material piezoelétrico

A intensidade sonora emitida sobre o piezoelétrico foi de 112,5 dB medido por meio do decibelímetro. Como a amplitude sonora é muito elevada, a utilização de EPIs foi necessária.

Para determinar a corrente que o material piezoelétrico é capaz de conduzir, foi feita a ligação de um resistor de 3,3 M $\Omega$  e o mesmo experimento foi realizado, resultando em uma tensão senoidal com frequência 263 Hz, e tensão 4,64 V RMS.

O alto valor de resistência do resistor se deve ao fato de que para baixas tensões, baixas resistências funcionam como circuito fechado, impossibilitando que se meça a queda de tensão em cima do componente, portanto altos valores de resistência garantem que haverá uma queda de tensão possível de ser medida. A Figura 3.20 ilustra o sinal obtido nos terminais da material.

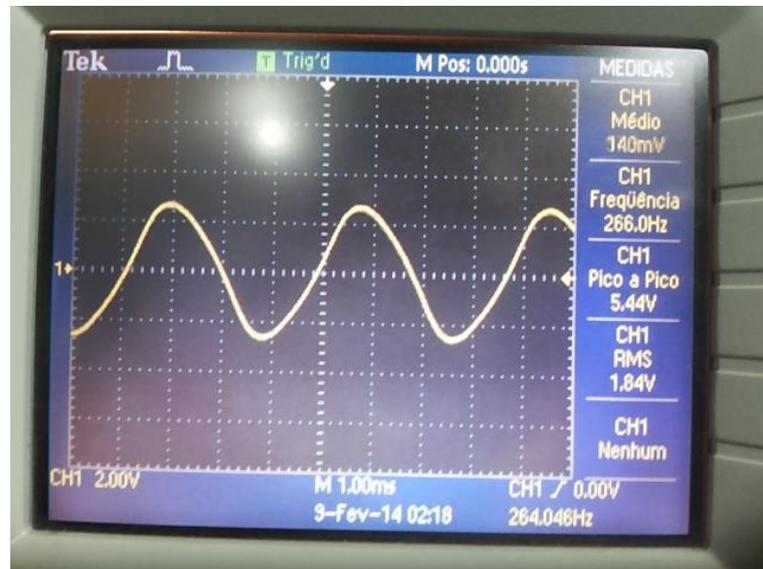


Figura 3.20 – Tensão nos terminais do material piezoelétrico conectado à uma resistência

Utilizando a Lei de Ohm para achar a corrente:

$$U = Ri \quad (3.2.1)$$

$$U_{rms} = R * i$$

$$1,84 = 3.3 * 10^6 * i$$

$$i = 0,56 \mu A$$

Para encontrar a potência do sistema:

$$P = iU \quad (3.2.2)$$

$$P = 0,56 \times 10^{-6} * 1,84$$

$$P = 1,03 \mu W$$

Portanto a conclusão é de que o trabalho que será realizado terá uma resposta em escalas muito baixas. Para aumentar a confiabilidade dos resultados foi decidido que vários componentes piezoelétricos devem ser conectados em série e em paralelo, aumentando, assim, a capacidade de tensão e corrente do sistema. Infelizmente não há como determinar quantos componentes são necessários, pois a impedância do sistema muda conforme a quantidade de materiais piezoelétricos, mudando também a sua resposta em frequência e naturalmente a tensão obtida do sistema.

### **3.3 ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DAS VARIÁVEIS NO SISTEMA**

Sabe-se que a tensão, corrente e, conseqüentemente, potência que o material piezoelétrico fornece como resposta depende de vários fatores, sejam eles externos ao sistema ou da própria planta. Analisando a teoria apresentada até o momento, pode-se concluir que as características que mais influenciam na resposta do sistema com materiais piezoelétrico são:

- Associação de materiais piezoelétricos;
- Frequência da onda sonora incidente;
- Amplitude sonora incidente;
- Características construtivas do material piezoelétrico;
- Ancoragem do material piezoelétrico;
- Distância entre a planta e o alto-falante;

O objetivo, com as experiências, é verificar como cada uma destas características pode influenciar na resposta do sistema e, finalmente, fazer a montagem de um protótipo para simular em maior escala as respostas obtidas.

### 3.3.1 Associação de componentes piezoelétricos

Uma das variáveis que possui grande influência sobre o sistema é a quantidade de componentes piezoelétricos conectados e o tipo de associação feita entre eles, pois desta maneira aumentamos a superfície de contato que o material transdutor possui com a onda incidente e também aumentamos a capacidade de geração de tensão (quando associados em série) e corrente (quando associados em paralelo).

Para analisar a influência desta característica na resposta obtida do sistema, 5 configurações de ligações foram propostas:

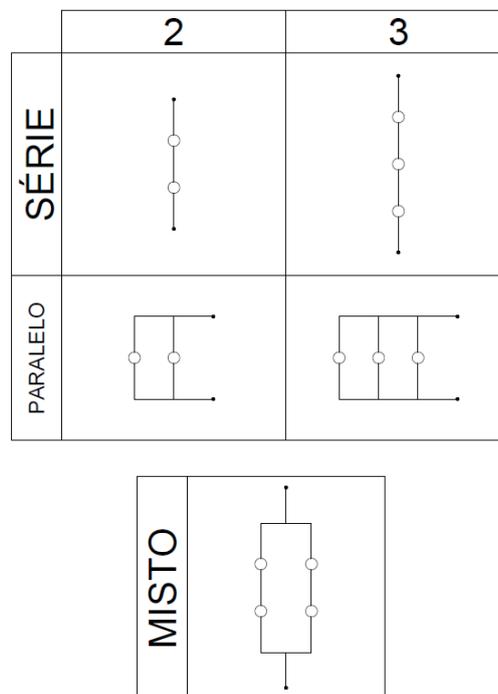


Figura 3.21 – Associações de materiais piezoelétricos

Lembrando que para analisarmos somente a influência desta variável sobre o sistema, todas as outras variáveis foram mantidas constantes:

- Intensidade da onda sonora = 112,5 dB;

- Frequência sonora = 264 Hz;
- Material piezoelétrico = ABT-441-RC, elemento Piezo, 27 mm, 4.200 Hz;
- Ancoragem = fixação com cola em painel de madeira.

Mesmo sabendo-se que as associações influenciam na frequência de ressonância, foi verificado que esta influência é desprezível para casos em que se adiciona ou remove pequenas quantidades de componentes, e no caso em estudo a diferença é de no máximo 2 componentes entre as associações.

Associações de fontes em série têm maior influência sobre a tensão fornecida pelo sistema, e associações em paralelo tem maior influência sobre a corrente fornecida pelo sistema.

### 3.3.1.1 Dois piezoelétricos em série

Como análise para o primeiro caso foram conectados dois piezoelétricos em série e uma resistência de 3,3 M $\Omega$  foi adicionada nos terminais do sistema, conforme mostrado pela Figura 3.22. A onda senoidal resultante teve tensão de 5,79 V RMS e frequência de 265,4 Hz, na Figura 3.23 pode-se verificar os detalhes.

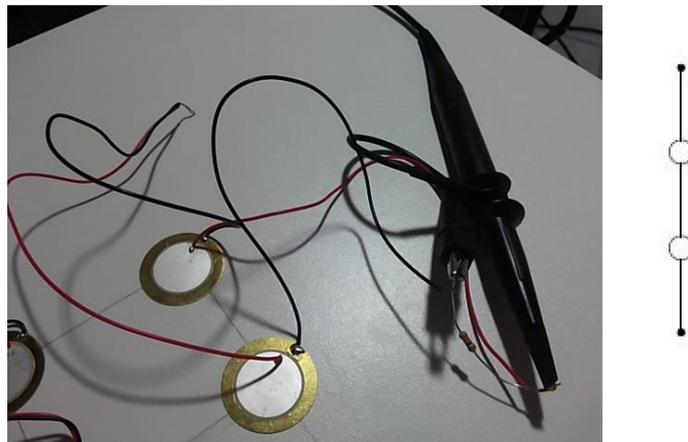


Figura 3.22 – Dois componentes piezoelétricos em série

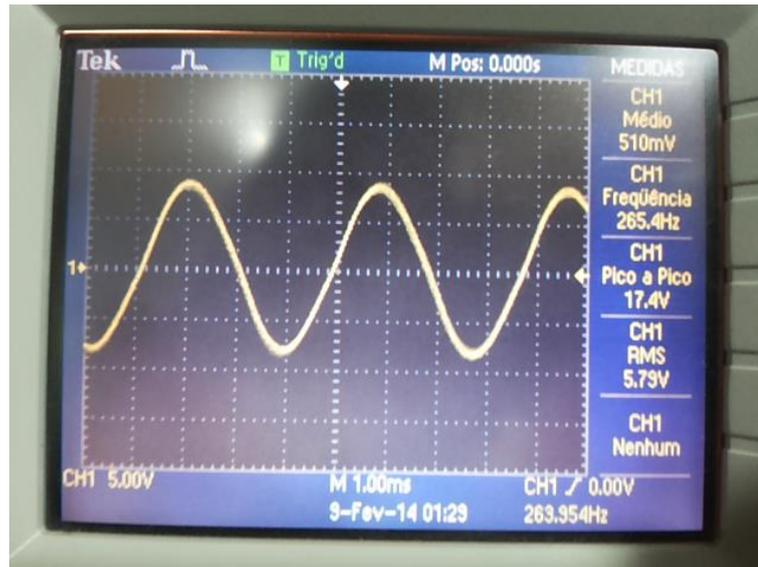


Figura 3.23 – Resposta do sistema com 2 piezoelétricos em série

### 3.3.1.2 Três piezoelétricos em série

Continuando a análise da influência na resposta do sistema das diferentes associações que podem ser realizadas, foi conectado um terceiro piezoelétrico junto aos outros 2 da análise anterior, conforme ilustrado na Figura 3.24, mantendo todos os outros parâmetros constantes. A resposta obtida foi de uma onda senoidal com 263,5 Hz de frequência e 9,20 V de tensão RMS, e pode ser visualizada na Figura 3.25.

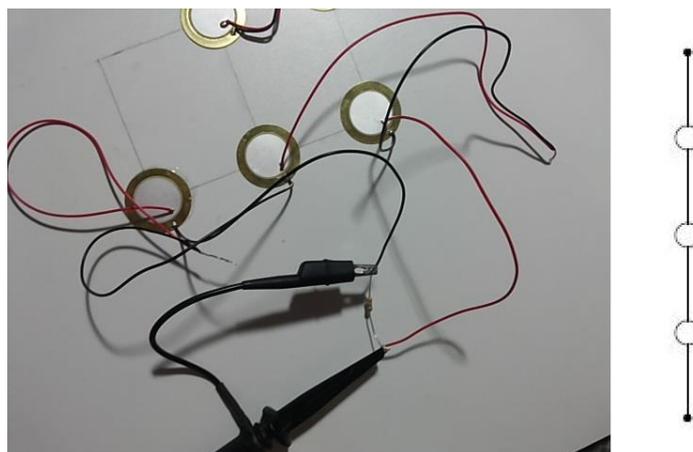


Figura 3.24 – Três componentes piezoelétricos em série

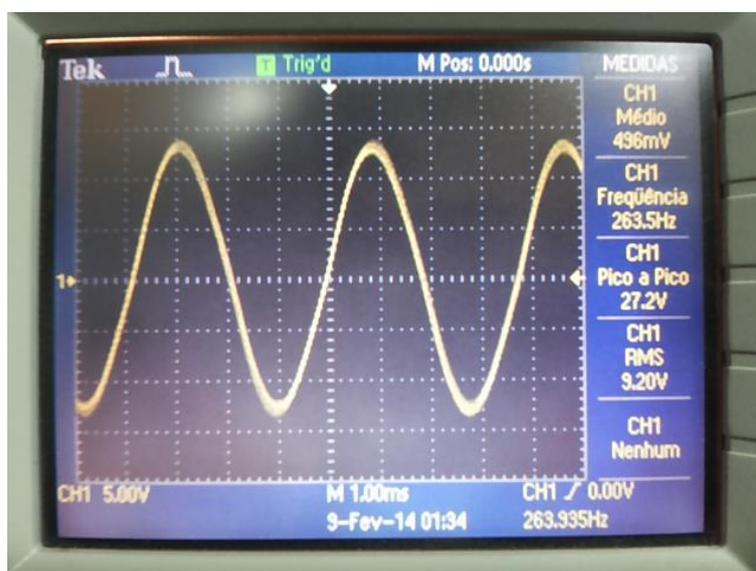


Figura 3.25 – Resposta do sistema com 3 piezoelétricos em série

### 3.3.1.3 Dois piezoelétricos em paralelo

Nesta abordagem, ao contrário do item 3.3.1.2, onde foram conectados dois piezoelétricos em série, eles foram conectados em paralelo entre si e uma resistência de 3,3 M $\Omega$  também foi conectada, a fim de medir a influência de associações em paralelo sobre a corrente e tensão, conforme Figura 3.26.

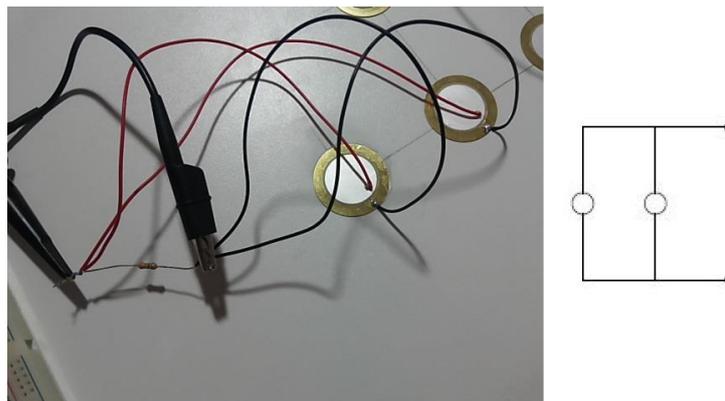


Figura 3.26 – Dois piezoelétricos em paralelo

A resposta do sistema foi de uma onda senoidal de 263,4 Hz de frequência e 3,18 V de tensão RMS, e pode ser conferida na Figura 3.27.

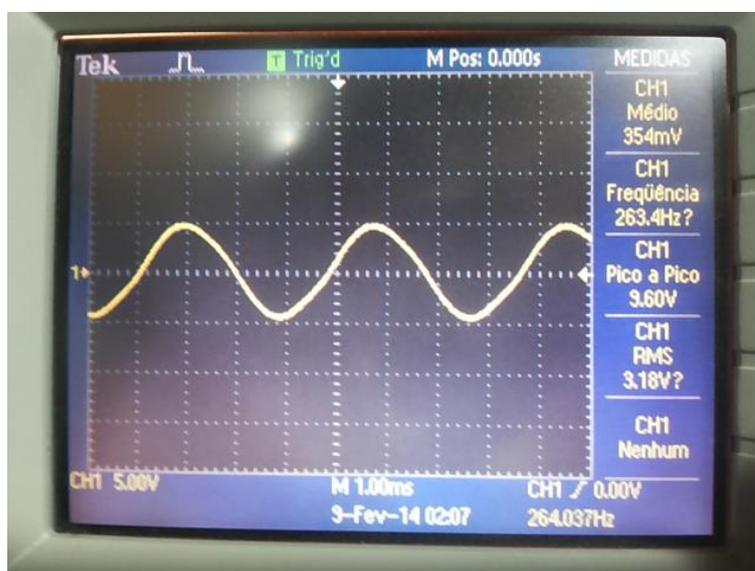


Figura 3.27 – Resposta do sistema com dois piezoelétricos em paralelo

#### 3.3.1.4 Três piezoelétricos em paralelo

Continuando a análise sobre como as associações dos componentes piezoelétricos influenciam na resposta do sistema, foi conectado um terceiro piezoelétrico também em paralelo com os outros dois da análise do item 3.3.1.3,

mantendo todos os outros parâmetros constantes. Pode-se visualizar a montagem na Figura 3.28 e a onda senoidal resultante na Figura 3.29, com frequência de 263,1 Hz e tensão RMS de 3,22 V.

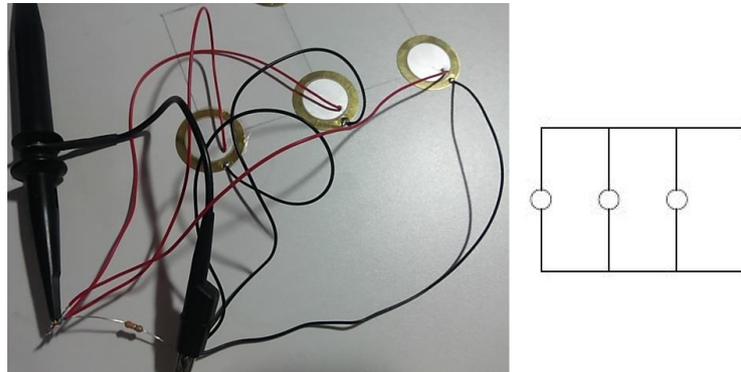


Figura 3.28 – Três piezoelétricos em paralelo

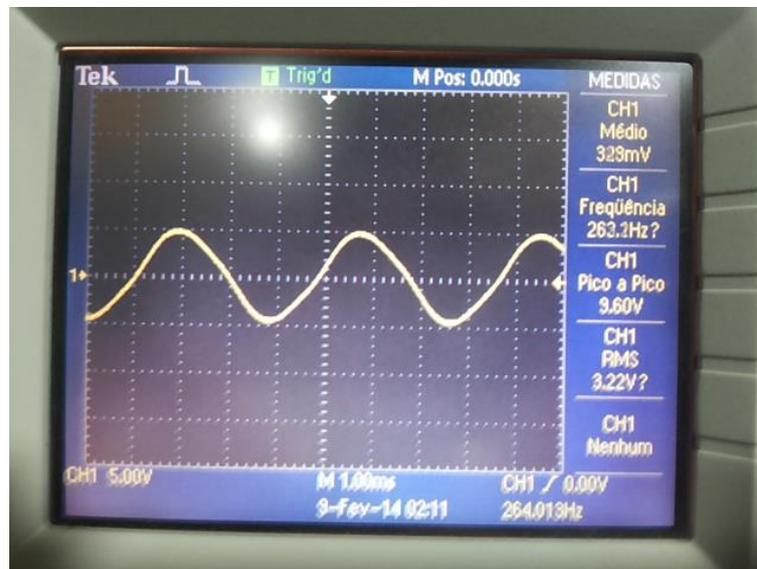


Figura 3.29 – Resposta do sistema com três piezoelétricos em paralelo

### 3.3.1.5 Associação mista

Para se concluir com maior precisão a influência das associações na resposta do sistema, decidiu-se realizar uma associação mista, com 2 piezoelétricos em série

conectados em paralelo com outros 2 piezoelétricos também em série, conforme ilustra a Figura 3.30. O resultado obtido pode ser visualizado na Figura 3.31.

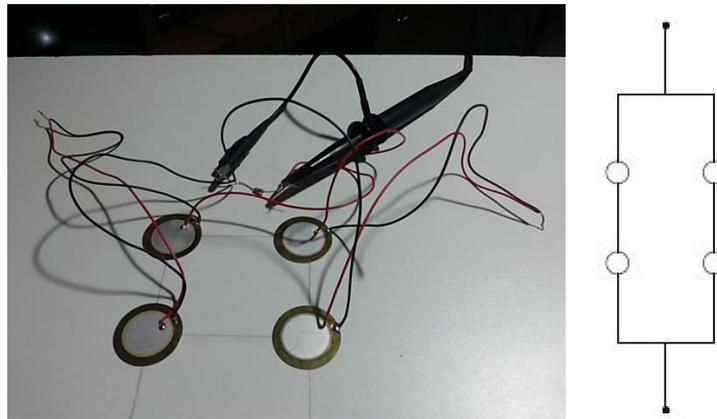


Figura 3.30 – Associação mista

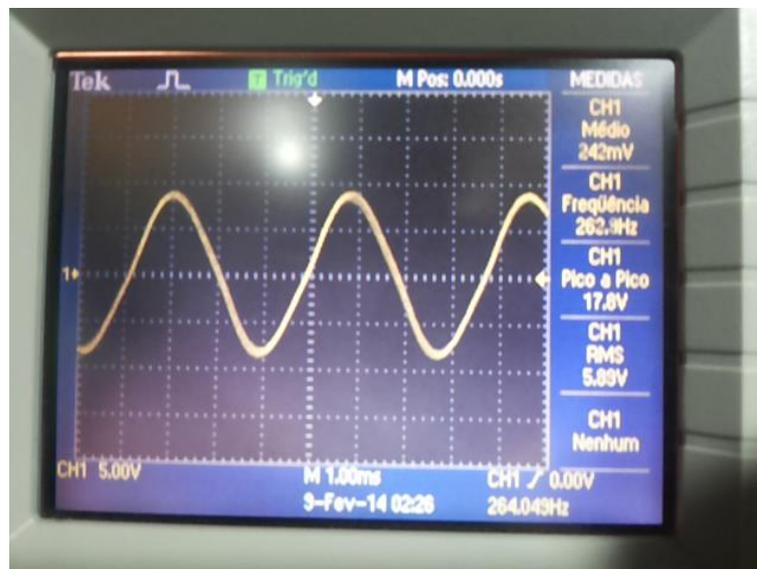


Figura 3.31 – Resposta do sistema com associação mista

### 3.3.1.6 Resumo da influência das associações

Para facilitar a compreensão da influência de cada associação na resposta do sistema, a Tabela 3.1 foi montada.

	Tensão RMS (V)	Corrente RMS ( $\mu A$ )	Potência RMS ( $\mu W$ )
1 piezoelétrico	1,84	0,5576	1,0259
2 em série	5,79	1,7545	10,1588
3 em série	9,2	2,7879	25,6485
2 em paralelo	3,18	0,9636	3,0644
3 em paralelo	3,22	0,9758	3,1419
2x série em paralelo	5,89	1,7848	10,5128

Tabela 3.1 Resumo dos resultados das associações

Pode-se visualizar o gráfico dos resultados na Figura 3.32.

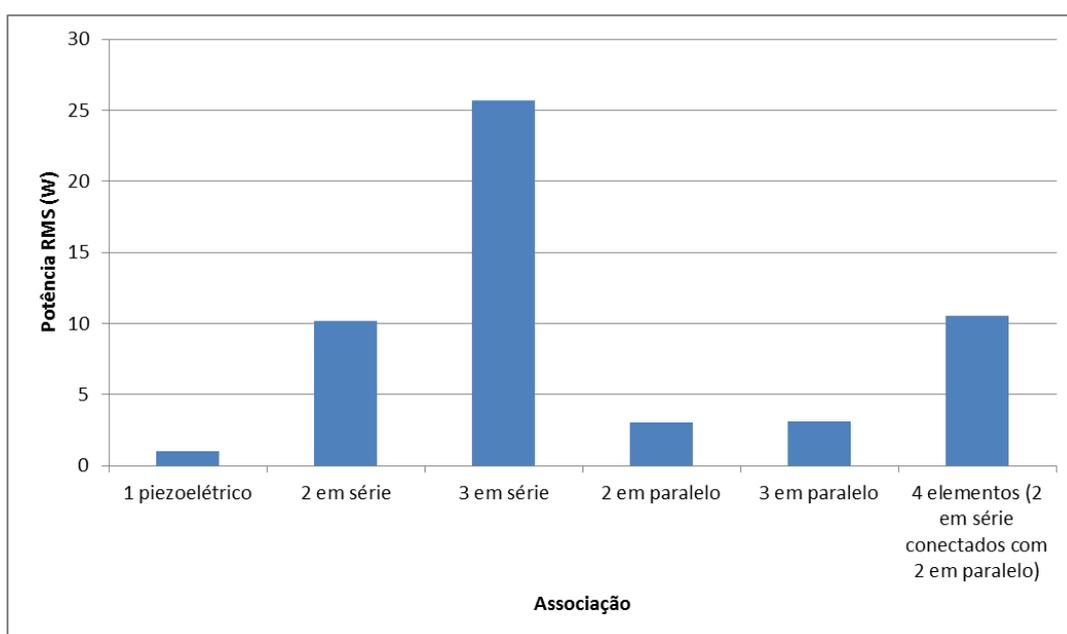


Figura 3.32 – Gráfico dos resultados das associações

Analisando os dados da tabela e o gráfico, observa-se que associações de piezoelétricos em série possuem maior impacto na tensão fornecida pelo sistema e, conseqüentemente, o circuito fornece mais corrente à carga, portanto a associação que retornou o resultado mais interessante foi a associação de 3 piezoelétricos em série, resultando em uma potência RMS de 25,64  $\mu W$ . Mas ligações em paralelo também são necessárias para casos em que se é necessário aumentar a

capacidade de corrente fornecida pelos piezoelétricos, que não foi o caso deste experimento que teve como carga um resistor de 3,3 MΩ.

### 3.3.1.7 Protótipo final

Foi verificado que associações em série aumentam a tensão do sistema, mas como o trabalho será realizado em baixas tensões e o que irá limitar os resultados obtidos é a corrente fornecida pelos componentes piezoelétricos, foi decidido conectar 36 materiais piezoelétricos, sendo 2 em série conectados em paralelo com outros 2 em série, 18 vezes. Conforme mostrado na Figura 3.33.

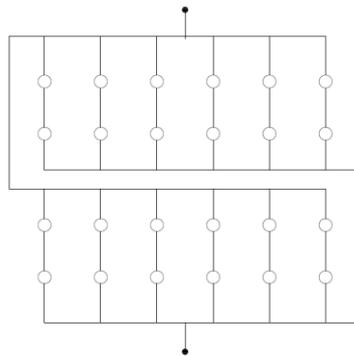


Figura 3.33 – Esquema de ligação do protótipo final

A Figura 3.34 ilustra como o protótipo ficou após sua montagem.

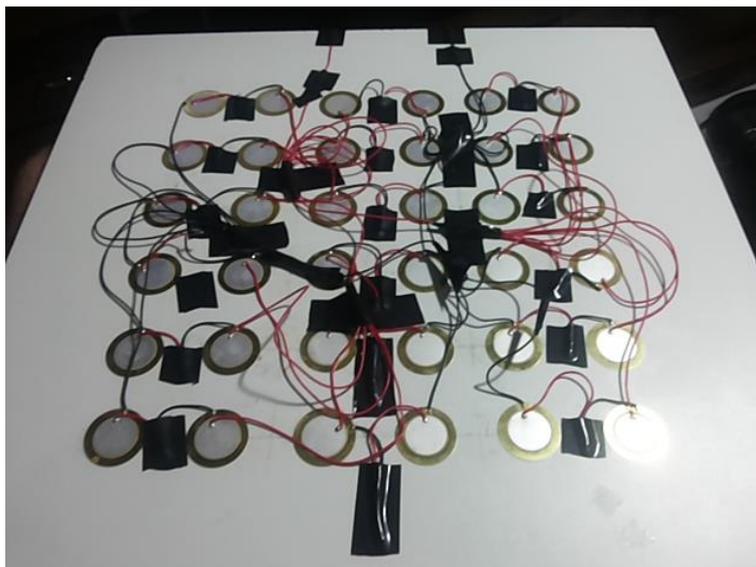


Figura 3.34 – Protótipo final

Pode-se visualizar a onda senoidal resultante do protótipo conectado a um resistor de  $3,3\text{ M}\Omega$  ao se incidir uma onda sonora de frequência igual a  $308\text{ Hz}$  (melhor valor encontrado) e chegando com intensidade  $112,5\text{ dB}$  na planta.

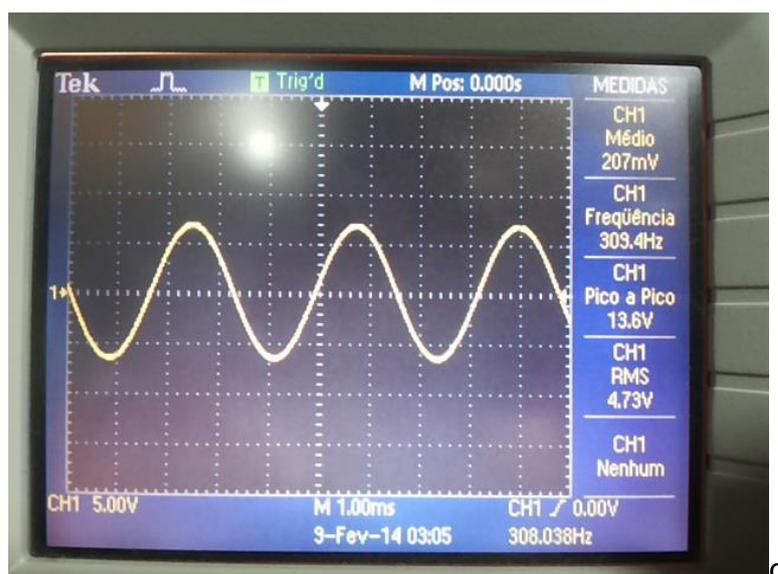


Figura 3.35 – Resultado obtido a partir do protótipo

Utilizando a Lei de Ohm para achar a corrente:

$$U = Ri$$

$$U_{rms} = R * i$$

$$4,73 = 3.3 * 10^6 * i$$

$$i = 1,43 \mu A$$

Para encontrar a potência de saída do sistema:

$$P = iU$$

$$P = 0,56x10^{-6} * 1,84$$

$$P = 2,64 \mu W$$

Conclui-se, a partir das análises sobre os resultados obtidos, que a quantidade de componentes piezoelétricos conectados ao sistema influencia na frequência em que a planta tem o melhor rendimento, esta informação é muito importante para experimentos futuros.

### 3.3.2 Rendimento do sistema

Todas as vezes que uma máquina realiza um trabalho, parte de sua energia total é dissipada, seja por motivos de falha ou até mesmo devido ao atrito. Lembrando que essa energia dissipada não é perdida, ela é transformada em outros tipos de energia. Assim sendo, considera-se a seguinte relação para calcular o rendimento: (HALLIDAY; RESNICK, 1975).

$$\eta = \frac{P_s}{P_e} \quad (3.3.1)$$

Onde:

$\eta$  é o rendimento da máquina;

$P_s$  é a potência de saída da máquina;

$P_e$  é a potência de entrada da máquina.

Aplicando a teoria para o sistema desenvolvido neste trabalho, sabe-se que a potência de saída é a potência elétrica fornecida à carga, ou seja  $P_s = 2,64 \mu\text{W}$ , e a potência de entrada  $P_e$  é a intensidade sonora incidente vezes a superfície total de materiais piezoelétricos, ou seja:

$$P_e = I * A \quad (3.3.2)$$

Onde:

$I$  é a intensidade sonora ( $\text{W}/\text{m}^2$ );

$A$  é a área total de materiais piezoelétricos que absorvem as ondas sonoras.

Para se determinar a intensidade sonora incidente a partir da intensidade medida em decibéis, a seguinte fórmula deve ser utilizada: (HALLIDAY; RESNICK, 1975).

$$dB_{IL} = 10 \log\left(\frac{I}{I_0}\right) \quad (3.3.3)$$

Onde:

$dB_{IL}$  é a intensidade sonora medida em decibéis;

$I_0$  é a intensidade acústica de referência (constante) =  $10^{-12} \text{ W}/\text{m}^2$ ;

$I$  = intensidade sonora incidente no sistema.

Portanto:

$$112,5 = 10 \log\left(\frac{I}{10^{-12}}\right)$$

$$I = 0,1778 \frac{W}{m^2}$$

Para sabermos a potência fornecida ao sistema, multiplicamos a intensidade encontrada pela área total dos piezoelétricos:

$$A_t = n * A \quad (3.3.4)$$

Onde:

n é o número de piezoelétricos no sistema;

A é a área de cada componente transdutor do sistema.

Sendo assim:

$$A_t = 36 * (\pi * 0,0135^2)$$

$$A_t = 2,06 \times 10^{-2} \text{ m}^2$$

Portanto:

$$Pe = 0,1778 * 2,06 \times 10^{-2}$$

$$Pe = 3,66 \text{ mW}$$

Aplicando a equação ( 3.3.1 ):

$$\eta = \frac{2,64 \times 10^{-6}}{3,66 \times 10^{-3}} \times 100$$

$\eta = 0,0721 \%$
--------------------

Conclui-se que, embora o protótipo não apresentar condições perfeitas para a otimização, o rendimento é considerado extremamente baixo para sistemas de transformação de energia, o que faz com que este tipo de transdução seja restrita a aplicações muito específicas.

### 3.3.3 Frequência da onda sonora incidente

A fim de determinar o comportamento da planta frente a diferentes frequências, foi mantida uma distância de 15 cm entre a fonte sonora e o painel com material piezoelétrico, intensidade das ondas sonoras incidindo na planta mantida a 102,5 dB e a frequência das ondas emitidas foram variadas segundo a Tabela 3.2.

Freq. Som (Hz)	Freq. Planta (Hz)	Tensão Pico a Pico (V)	Tensão RMS (V)
1	0*	0*	0*
150	150	1,9	0,63
200	0*	0*	0*
225	225	0,8	0,25
299	299	0,8	0,25
315	315	3,24	1,1
351	351	1.08	0,335
400	0*	0*	0*
450	0*	0*	0*
900	0*	0*	0*
1350	0*	0*	0*
1800	0*	0*	0*
2250	0*	0*	0*
2700	0*	0*	0*
3150	0*	0*	0*
3600	0*	0*	0*
3958	4000	0,58	0,145

Tabela 3.2 Coleta dos dados para verificação do comportamento da planta

\* Foi considerado valor 0 para resposta indesejável do sistema para facilitar a compreensão do gráfico

Foi observado que o sistema não retorna bons resultados para todas as frequências, somente para algumas, conforme ilustra o gráfico da Figura 3.36.

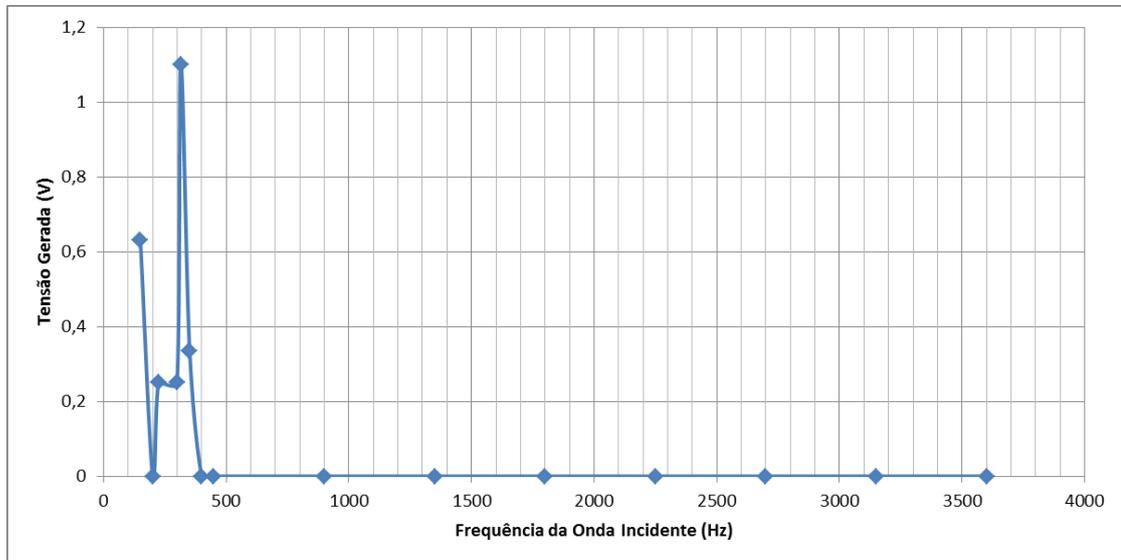


Figura 3.36 – Resposta do sistema para frequências variadas

Observando os dados coletados, o gráfico e com uma análise mais detalhada na prática, a conclusão é de que o sistema responde melhor em baixas frequências, e a frequência ótima de operação é de 313 Hz, conforme ilustrado na Figura 3.37, que retornou uma onda senoidal com tensão RMS de 1,20 V. Lembrando que para somente um material piezoelétrico a frequência ótima de operação é de 4729 Hz, o resultado obtido neste experimento comprova que a quantidade de piezoelétricos conectados ao sistema e a maneira que eles são ancorados alteram sua impedância, influenciando na sua resposta em frequência.

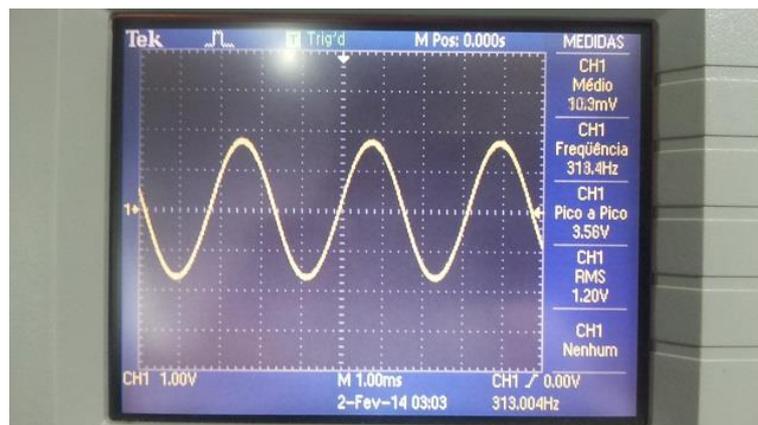


Figura 3.37 – Sinal obtido para frequência ótima de operação

Também a partir dos dados, foi concluído que a resposta do sinal elétrico nos terminais do material piezoelétrico tem a mesma frequência da onda sonora incidente.

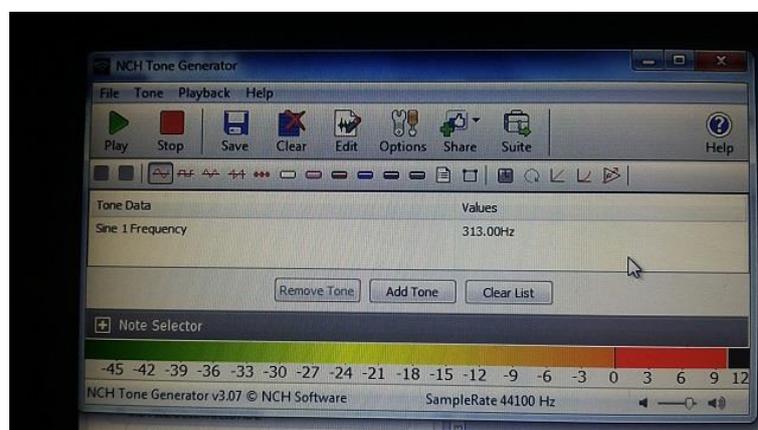


Figura 3.38 – Software enviando sinal na frequência de 313 Hz

### 3.3.4 Amplitude sonora incidente

A amplitude sonora incidente sobre o sistema pode ser considerada a mais importante para o nosso estudo, uma vez que é a única que não depende das características construtivas da planta, e sim do meio em que ela é inserida.

Para realizar o experimento que determinará qual é a influência da intensidade sonora incidindo sobre a planta, será utilizado o protótipo final, com resistor de 3,3 M $\Omega$  como carga e a frequência da onda sonora será mantida em 308 Hz, que é a frequência ótima de operação identificada.

Com a ajuda do decibelímetro e do osciloscópio, a Tabela 3.3 pode ser montada:

Intensidade sonora (dB)	Tensão RMS (V)
45	0
70	0
80	0
90	0,1
100	0,53
105	1,21
110	3,54
112,5	4,52
115	6,37
120	10,43
125	18,9

Tabela 3.3 Intensidade sonora x Tensão gerada

O gráfico apresentado na Figura 3.39 facilita a compreensão dos resultados.

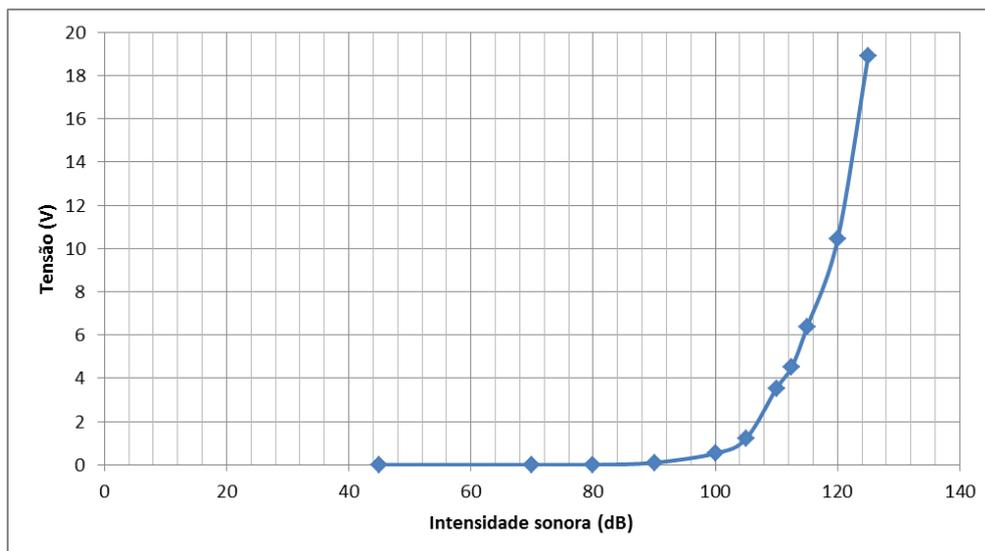


Figura 3.39 – Gráfico da resposta do sistema em relação à intensidade sonora incidente

A conclusão é de que o comportamento da curva da tensão gerada vs. a intensidade sonora incidente é próximo ao comportamento logarítmico da curva de intensidade sonora em dB. Também se conclui que os ruídos provenientes do ambiente em que o sistema está inserido não influenciam nos resultados obtidos, uma vez que a medição da intensidade sonora do ambiente sem a ação do amplificador é de 45 dB.

### 3.4 PRINCIPAIS PROBLEMAS ENCONTRADOS

#### 3.4.1 Estrutura do protótipo

Inicialmente foi considerada a possibilidade de se fixar os piezoelétricos no fundo de uma caixa acústica, como pode ser visto na Figura 3.40. A tampa frontal da caixa teria um perfil removível para que fosse possível ser variada a área de incidência das ondas que entrariam na estrutura, para isso, cada perfil teria uma medida diferente de diâmetro da abertura (D). Seria verificada a influência da resposta do circuito perante a variação da área de incidência das ondas.

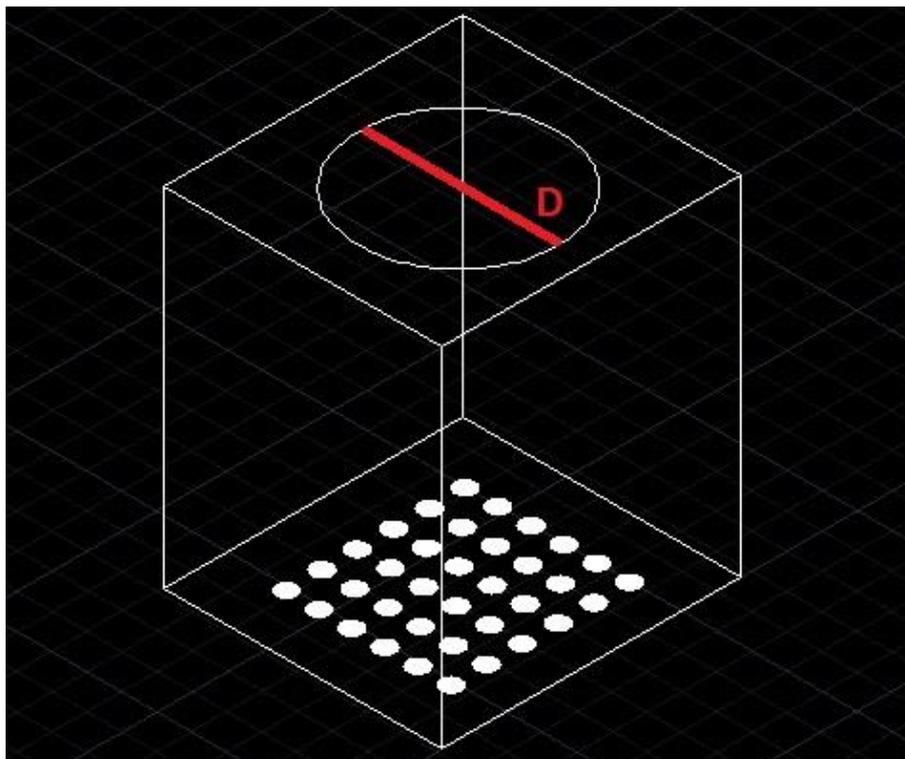


Figura 3.40 – Esquema da caixa acústica

Entretanto, já haviam sido encontradas inúmeras dificuldades nos experimentos devido a não se conhecer previamente todas as variáveis que influenciariam nos resultados obtidos. Somando isso a problemas com custos e disponibilidade de tempo, optou-se por realizar os procedimentos utilizando um método mais simples e dinâmico, usando uma planta plana sem nenhum tipo de estrutura de isolamento em volta.

A escolha por se utilizar a planta plana, que basicamente consiste em uma placa de madeira para se fixar os piezoelétricos sobre a sua superfície, possibilitou que os experimentos fossem realizados de forma mais dinâmica, facilitando o processo de montagem dos circuitos que seriam propostos na sequência do trabalho.

### **3.4.2 Potencia não suficiente**

Nos primeiros ensaios realizados foram ligados os piezoelétricos em série visando acender um LED através da energia fornecida pelas ondas sonoras, contudo a corrente resultante no sistema era tão baixa que não se obteve potência suficiente para acender o LED. Isso pode ser explicado, pois toda fonte de tensão possui um limite de fornecimento de corrente, para atingir um nível de corrente superior é necessário conectar mais fontes em paralelo. O estudo de como as associações em série e paralelo influenciam nos resultados obtidos foi abordado no capítulo 3.3.1.

### **3.4.3 Contatos ruins**

No primeiro experimento realizado, foi utilizado materiais piezoelétricos sem fios condutores previamente soldados nos seus terminais, portanto foi verificado como se comportava o circuito depois de os fios condutores serem soldados no material piezoelétrico. Foi encontrada grande dificuldade para aferição das ondas no osciloscópio, e assim concluiu-se que, talvez, a temperatura da solda estivesse afetando o material piezoelétrico, então se optou por procurar alternativas.

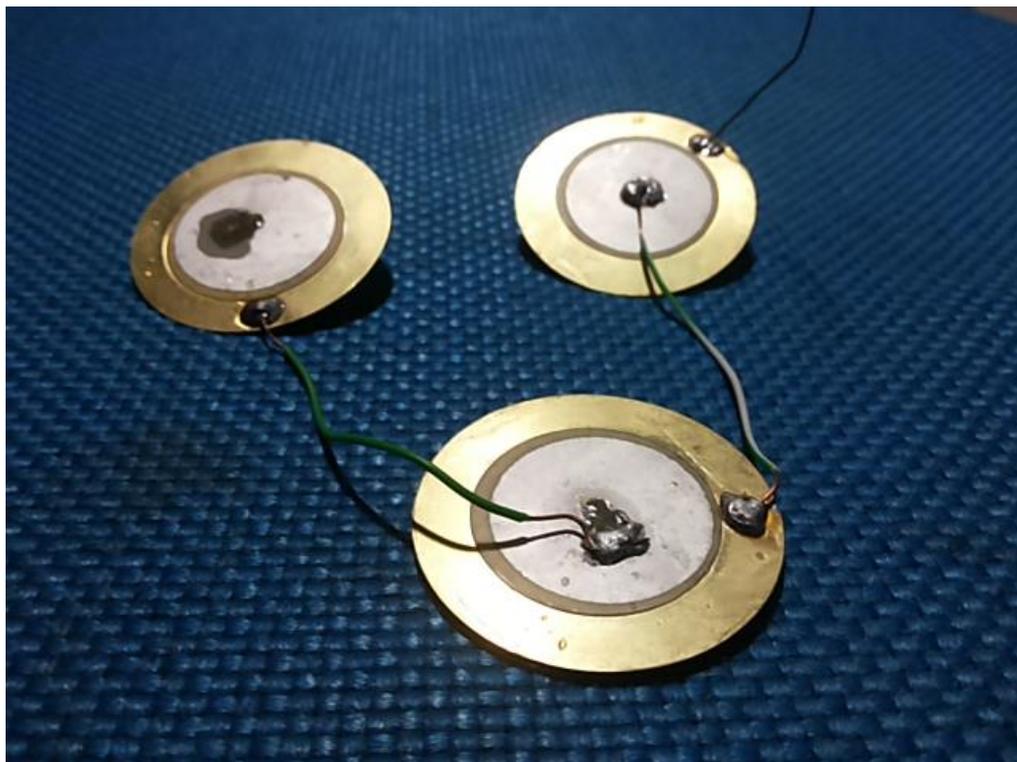


Figura 3.41 – Tentativa com solda nos piezoelétricos,

Uma segunda opção foi utilizar fita adesiva para fixar os fios na cápsula piezoelétrica, mas os problemas com mau contato foram constantes e não foi possível se obter uma operação estável do circuito para verificar as formas onda de tensão no osciloscópio.

Em seguida, optou-se por utilizar papel alumínio para envolver a ponta dos fios e usar a fita adesiva para fixar, no intuito de se ter uma maior área de contato com a superfície do piezoelétrico para melhorar a condução e com a superfície da fita adesiva para melhorar a fixação. Novamente foram encontradas as mesmas dificuldades com mau contato e com a fita adesiva se soltando de um dia para o outro nos intervalos dos ensaios.

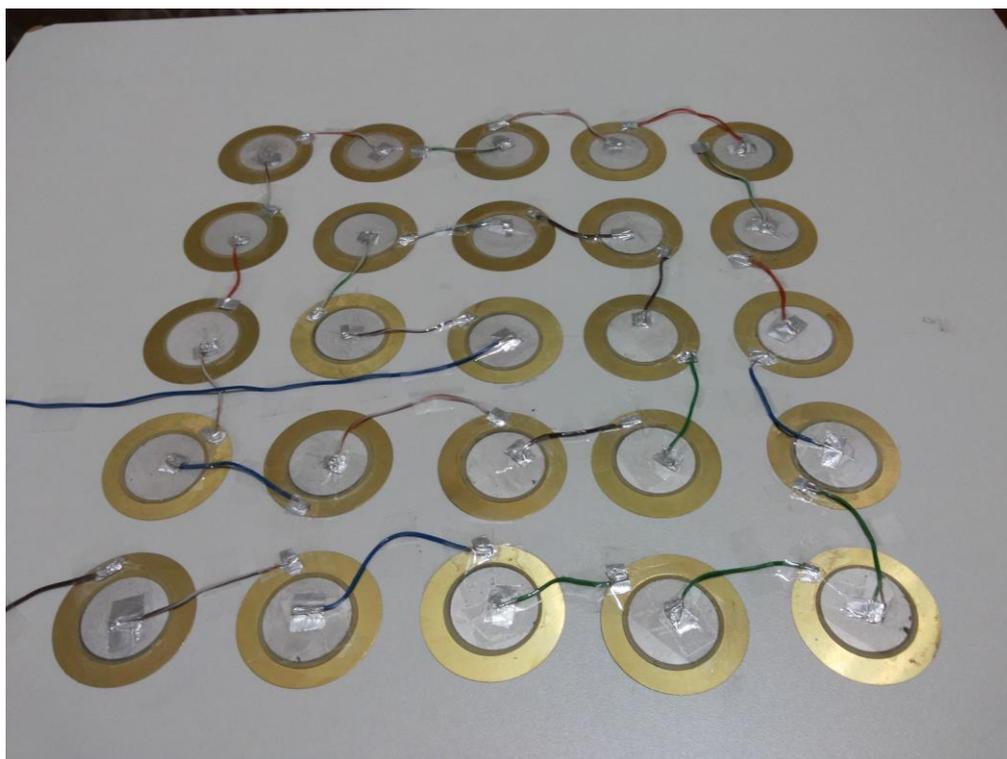


Figura 3.42 – Circuito montado com 25 piezoelétricos ligados em série, usando fita adesiva e papel alumínio nas ligações

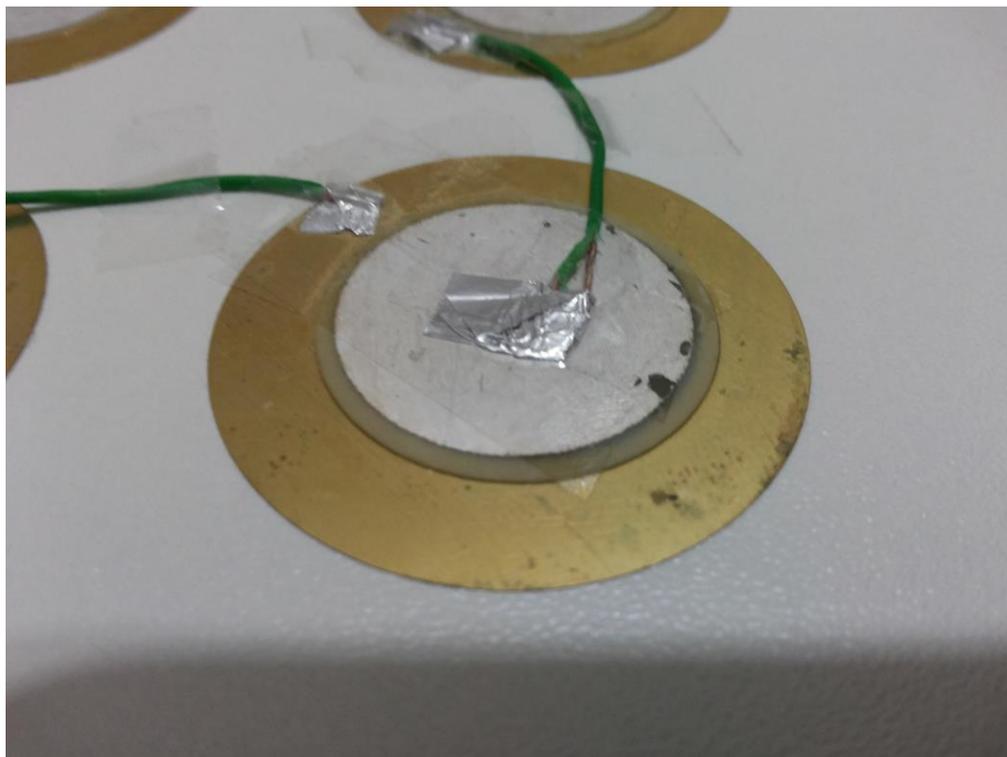


Figura 3.43 – Detalhe da ligação usando fita adesiva e papel alumínio

Em uma última tentativa de utilizar as cápsulas piezoelétricas sem os fios já soldados, foi utilizado esponja de aço, novamente no intuito de melhorar a área de contato com o piezo. Sem sucesso novamente.

Mudando de diretriz, foi verificada no mercado a disponibilidade de piezoelétricos com os fios condutores já conectados. Foi feito um pedido junto ao site de vendas online da Farnell, e então o material foi enviado dos EUA para o Brasil.

Com a chegada dos piezoelétricos importados novos testes foram realizados e constatou-se que, desta vez, com o material piezoelétrico já soldado com os fios condutores, pode-se verificar o funcionamento do circuito sem os constantes problemas com mau contato. Na Figura 3.44 pode-se ver um dos piezoelétricos que foram usados nesta montagem.



Figura 3.44 – Piezoelétrico adquirido através de compra online na loja virtual da Farnell.

Na Figura 3.45 pode-se ver como ficou a planta em um estágio prévio utilizando o material importado. Foi realizado um esquema de ligação combinando 36 piezoelétricos, sendo 2 em série conectados em paralelo com outros 2 em série, 18 vezes sucessivamente. A Figura 3.46 apresenta o estado final da planta.

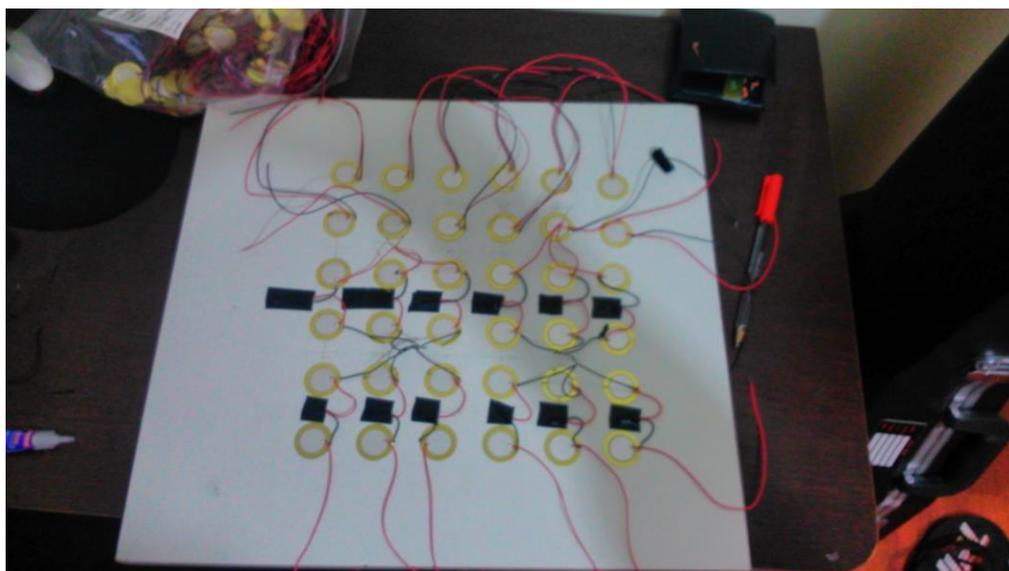


Figura 3.45 – Prévia da planta final utilizando 36 piezoelétricos

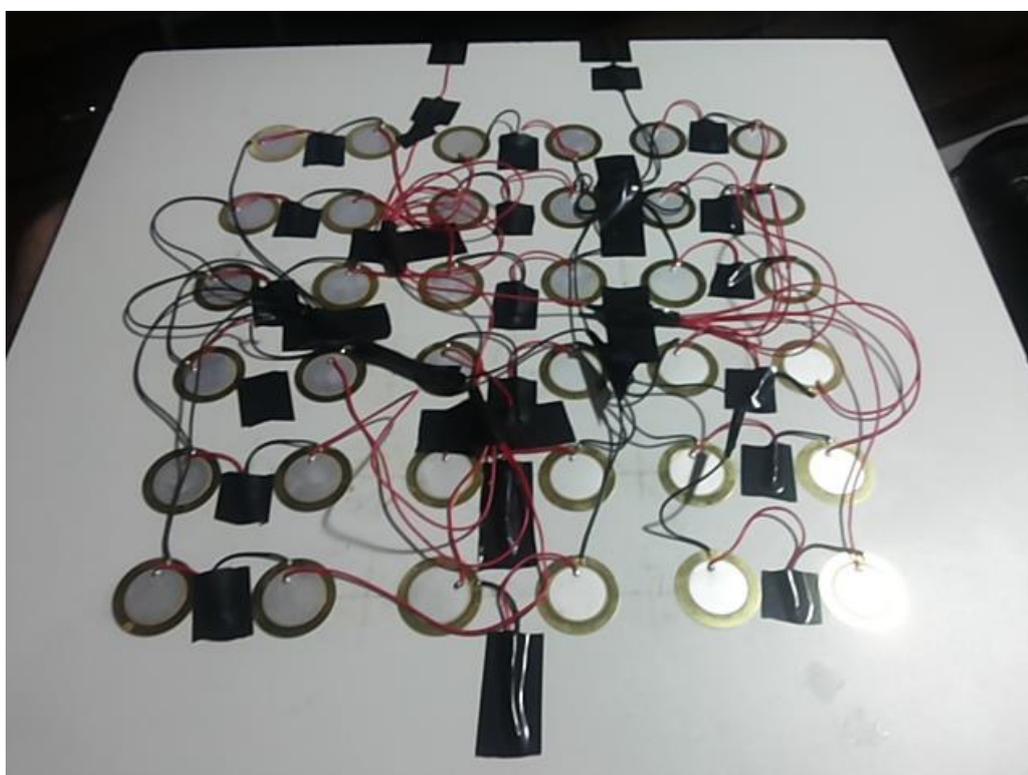


Figura 3.46 – Planta final utilizando 36 piezoelétricos

De forma geral, foi encontrado bastante dificuldade em trabalhar com os piezoelétricos principalmente por se tratar de um material que anteriormente não se conhecia e, portanto, se tinha pouca familiaridade com eles. Isso é evidenciado pelo fato de que no início das atividades se tinha uma preocupação grande com a influência do ruído ambiente, por isso da intenção de se criar uma estrutura de isolamento acústico para a planta, mas com o decorrer dos experimentos se percebeu que este fator tinha uma influência praticamente irrisória nos resultados obtidos. Até que fosse encontrada uma alternativa eficaz para o problema dos maus contatos, muitos experimentos foram feitos sem sucesso. Por fim, com os piezoelétricos adequados pode-se executar os ensaios de maneira satisfatória e os resultados coerentes foram aparecendo.

### **3.5 CONCLUSÃO**

A tecnologia que visa à obtenção de energia elétrica utilizando material piezoelétrico não se encontra mais em fase embrionária, pois apesar de ainda não encontrarmos uma gama larga de informações e estudos a cerca de métodos que utilizam material piezoelétrico para obtenção de energia, alguns experimentos já comprovaram que é possível carregar pequenas baterias fazendo uso destes componentes, como a camisa “*Sound Charge*” da empresa *Orange* ([http://web.orange.co.uk/article/news/t\\_shirt\\_recharges\\_mobile\\_phones](http://web.orange.co.uk/article/news/t_shirt_recharges_mobile_phones)).

Através das análises realizadas durante os ensaios que foram desenvolvidos constatamos que são muitas as variáveis que influenciam no rendimento do sistema, somando isto ao fato de que cada uma destas variáveis são extremamente sensíveis, uma engenharia avançada é necessária para que o rendimento do circuito seja otimizado. Este pode ser um dos motivos que fazem com que este tipo de aplicação não seja tão difundido, além de que o próprio baixo rendimento do sistema faça com que o tempo de retorno sobre o investimento seja muito longo. Evidenciamos, também, que da forma como foi montado o circuito para captação

das ondas tornou pouco viável a utilização do método quando se fala em cargas de tamanhos consideráveis, por apresentar baixa eficiência.

O material piezoelétrico já possui diversas aplicações, mas muito desenvolvimento ainda é necessário para que sua utilização como transdutor de energia sonora em energia elétrica se torne viável a níveis comerciais.

As análises desenvolvidas neste trabalho possibilitam que outros trabalhos mais aprofundados possam ser realizados para o desenvolvimento de novas tecnologias de transdução de energia sonora em sinais. Podem-se citar algumas propostas, como:

- Estudo de diferentes materiais piezoelétricos (forma e composição);
- Formas de associações e ancoragens do material piezoelétrico;
- Adaptação do sistema para obter rendimento ótimo em diferentes ambientes;
- Diferentes estruturas do sistema para absorção das ondas sonoras;
- Desenvolvimento de um produto capaz de carregar baterias de pequenas capacidades;
- Viabilidade do uso de transdução de energia utilizando material piezoelétrico para ambientes variados;

## REFERÊNCIAS

BERMANN, Célio. **Energia no Brasil: para quê? Pra quem? Crise e alternativas para um país sustentável.** São Paulo. Editora Livraria da Física: FASE, 2001.

BOCTOR, S. A.. **Electric circuit analysis.** 2 ed. Englewood Cliffs: Prentice-Hall, c1992. 856 p.

BRANCO, P. M. **Glossário Geomológico.** Ed. Da UFRS, Porto Alegre, 2004. p. 154

BRAGA, Newton C. **Transformadores piezoelétricos transformadores.** Saber Eletrônica, São Paulo v. 42, n. 402, p.36-37 (julho 2006).

CADY, W. G.; **Piezoelectricity: An Introduction to the Theory and Applications of Electromechanical Phenomena in Crystals,** Dover Press, 1964

DANA, James D. **Manual de Mineralogia.** 16ª edição. Rio de Janeiro: Editora da Universidade de São Paulo, 1969. 534 p.

DEER, W.A; HOWIE, R.A; ZUSSMAN, J. **Minerais Constituintes das Rochas: Uma Introdução.** 2ª edição. Lisboa: Fundação Calouste Gulbenkian, 2000. p.473-486.

DIANA, F. R. **Pedras Brasileiras.** 2ª edição. Rio de Janeiro, 2004. p. 110

EMETERIO, San Prieto **On the Measurement of the Mechanical Loss of Low Qm Piezoelectric Materials.** 1988 San Emeterio Prieto p.257-256

FALCONE, Aurio Gilberto. **Eletromecânica: transformadores e transdutores, conversão eletromecânica de energia, máquinas elétricas.** São Paulo: E. Blücher, c1979. 478 p.

FAWWAZ T. Ulaby. **Eletromagnetismo para Engenheiros**. Bookman, 2007  
p.382

FEYNMAN, Richard; LEIGHTON, Robert; SANDS, Matthew. **The Feynman Lectures on Physics**. Curitiba. UTFPR. 2009.

FITZGERALD, A. E.; KINGSLEY, Charles; KUSKO, Alexander. **Máquinas elétricas: conversão eletromecânica da energia, processos, dispositivos e sistemas**. Sao Paulo, SP: McGraw-Hill, c1975. 623 p.

HALLIDAY, David; RESNICK, Robert. **Gravitação, Ondas e Termodinâmica**. Curitiba. UTFPR. 2012.

HECHT. E, **Physics** ; Brooks & Cole, 1994.

JR., Ference M.; LEMON, H. B.; STEPHENSON, R.J. **Curso de Física: Ondas (Som e Luz)**. São Paulo, Editora Edgard Blucher Ltda., p 1-83.

LUZ, A. B.; LINS, F. A. F.; PIQUET, B.; COSTA, M. J.; COELHO, M. J. **Pegmatitos do Nordeste: Diagnóstico sobre o Aproveitamento Racional e Integrado – Série Rochas e Minerais Industriais**. 9ª edição. Rio de Janeiro: Ed. CETEM/MCT, 2003. p. 79.

MENEZES, Florivaldo Filho.; **A Acústica Musical em Palavras e Sons**. 2004. 308 p.

NATAL, G. S. **Nanoposicionamento de precisão por controle adaptativo binário de atuadores piezoelétricos**. Rio de Janeiro, 2008.

NEPOMUCENO, Lauro Xavier. **Acústica**. UTFPR. 1977.

RESNICK, Robert; HALLIDAY, David. **Física II**. Rio de Janeiro: LTC, 1973-1975. 2 v.

REZENDE, Sergio M. **Materiais e Dispositivos Eletrônicos**. Editora Livraria da Física, 2004 - 542 páginas.

SERWAY, Raymond A.; JR, John W. Jewett. **Princípios da Física: Movimento Ondulatório e Termodinâmica**. 3ª edição. São Paulo, Editora Cengage Learning, 2004, p 458-460.

SIMONE, Gilio Aluisio; CREPPE, Renato Crivallari. **Conversão Eletromecânica de Energia**. São Paulo: Érica, 1999. 324 p.

SLONE, G. Randy. **High Power Audio Amplifier Construction Manual**. US: McGraw-Hill, 1999. 476 p.

TICHÝ, Jan ; ERHART, Jirí ; KITTINGER, Erwin; Prívratská, Jana . **Fundamentals of Piezoelectric Sensorics: Mechanical, Dielectric, and Thermodynamical Properties of Piezoelectric Materials**. Springer, 2010. Pg. 219

VASSALLO, Francisco R. **Manual de Caixas Acústicas e Alto-falantes**. 1ª Edição. Editora Hemus, 2005, 168 páginas.

VIVES, Antonio Arnau. **Piezoelectric Transducers and Applications**. Springer , 2004 Pg.319

<http://www.centerpointaudio.com/HowSpeakersWork.aspx> . Acessado dia 14/09/2013 as 16:30.

<http://www.impac.com.br/> . Acessado dia 14/09/2103 as 11:35.

<http://www.npww.com/help/soundlevelmeter.asp> . Acessado dia 14/09/2013 as 13:49.