

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ  
CAMPUS CURITIBA  
CURSO SUPERIOR DE BACHARELADO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

FERNANDA TIEMI BEPPU  
JOÃO GASPAR NUNES E SOUZA  
TIAGO KUSAKARIBA

**CONVERSÃO DE ENERGIA SONORA PARA ENERGIA ELÉTRICA  
UTILIZANDO ALTO-FALANTES**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

CURITIBA  
2015

FERNANDA TIEMI BEPPU  
JOÃO GASPAR NUNES E SOUZA  
TIAGO KUSAKARIBA

## **CONVERSÃO DE ENERGIA SONORA PARA ENERGIA ELÉTRICA UTILIZANDO UTILIZANDO ALTO-FALANTES**

Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação, apresentado à disciplina de TCC 2 do curso de Bacharelado em Engenharia Elétrica do Departamento Acadêmico de Eletrotécnica (DAELT) da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR), como requisito parcial para obtenção do título de Engenheiro Eletricista.

Orientador: Prof. Dr. Antônio Carlos Pinho

CURITIBA  
2015

Fernanda Tiemi Beppu

João Gaspar Nunes e Souza

Tiago Kusakariba

# CONVERSÃO DE ENERGIA SONORA PARA ENERGIA ELÉTRICA UTILIZANDO ALTO-FALANTES

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

Curitiba, 24 de novembro de 2015.

---

Prof. Emerson Rigoni, Dr.  
Coordenador de Curso  
Engenharia Elétrica

---

Profa. Annemarle Gehrke Castagna, Mestre  
Responsável pelos Trabalhos de Conclusão de Curso  
de Engenharia Elétrica do DAELT

## ORIENTAÇÃO

---

Antonio Carlos Pinho, Dr.  
Universidade Tecnológica Federal do Paraná  
Orientador

## BANCA EXAMINADORA

---

Alvaro Augusto W. de Almeida, Me.  
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

---

Antonio Carlos Pinho, Dr.  
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

---

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

## **AGRADECIMENTOS**

O presente trabalho de conclusão de curso é consequência de um grande esforço de todos os membros dessa equipe desde a metodologia de pesquisa até a finalização do TCC 2. Agradecemos ao nosso orientador, Dr. Antonio Carlos Pinho por todo o apoio no desenvolvimento do trabalho, e também por toda a dedicação nas revisões e sugestões para o aperfeiçoamento deste projeto.

Eu, Tiago, agradeço a minha família por estarem sempre ao meu lado e por sempre incentivarem os meus estudos por todos esses anos. Agradeço aos meus colegas João e Fernanda, por toda a dedicação e atenção que tiveram nessa importante etapa final de curso e por fim, um agradecimento para todas as pessoas que de algum modo sempre estiveram ao meu lado durante essa jornada.

Eu, João Gaspar, gostaria de agradecer primeiramente a minha mãe, Aline e ao meu pai Adriano, a toda minha família e a minha namorada Ana Carla, que sempre me apoiaram e estiveram comigo durante toda a minha formação pessoal, acadêmica e profissional. Agradeço a também a minha equipe, Fernanda e Tiago, pelo esforço, dedicação e destreza despendidos neste projeto que caracteriza o término de uma importante etapa de estudos de nossas vidas.

Eu, Fernanda, primeiramente gostaria de agradecer meus pais e minhas irmãs por todo o apoio, incentivo e motivação. Por permitir minha transferência de cidade e ter a chance de recomeçar. Agradeço também minha família, cada um me ajudando e apoiando de alguma maneira. Fernando, acho que tudo que eu agradecer aqui não vai ser suficiente para expressar todo o sentimento que tenho por você. Desde o princípio, quando mais sofri, mas precisava de alguém, era você quem estava. Nas provas mais tensas, era você quem me ajudava. Nos momentos sozinha, podia sempre contar com a sua presença. E agora, mesmo distante, continua sempre me ajudando como pode. Aos meus amigos e amigas, citando especialmente alguns: Lygia, Luiza, Caroline, Andressa, Dário, Faxinal, Rafael, Lucas e Mário. Obrigada por tudo! Não seria nada sem vocês. Por fim, agradeço aos meus colegas João e Tiago, por toda a atenção, dedicação e empenho nesse trabalho. Com certeza sem vocês nada disso aconteceria.

## RESUMO

SOUZA, João G. N. e; BEPPU, Fernanda T.; KUSAKARIBA, Tiago. **Conversão de energia sonora para energia elétrica utilizando alto-falantes**. 2015. 140 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) – Curso de Engenharia Elétrica. Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2015.

A energia elétrica utilizada para algum tipo de realização de trabalho gera uma energia dissipada que não é aproveitada, como por exemplo, a energia sonora dissipada em processos mecânicos. Apesar de a energia contida na dissipação ser pequena, é possível fazer a análise de reaproveitamento através do estudo da conversão de energia. O presente trabalho tem como objetivo estudar o processo de conversão de energia sonora para energia elétrica por meio do princípio de indução de Faraday, utilizando transdutores acústicos: *woofer*, *subwoofer* e *tweeter*. Por meio de trabalhos experimentais, o estudo verificou qual dos transdutores realizou o melhor rendimento na transdução da energia sonora para energia elétrica em diversas faixas de frequências e intensidades sonoras. Para uma análise mais detalhada, foram apresentadas as curvas de tensão por frequência de todos os dispositivos eletroacústicos estudados. Através das curvas geradas, observou-se quais foram as faixas de frequências em que se obtém o melhor aproveitamento da energia dissipada. Além disso, apresenta conceitos sobre onda sonora, campo magnético, conversão eletromecânica de energia e técnicas de medição.

**Palavras-chave:** Conversão de energia. Transdutores acústicos. Tensão *RMS*. Energia sonora. Energia elétrica.

## ABSTRACT

SOUZA, João G. N. e; BEPPU, Fernanda T.; KUSAKARIBA, Tiago. **Sound energy conversion to electricity using loudspeakers**. 2015. 140 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) – Curso de Engenharia Elétrica. Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2015.

The electric energy used for any type of conducting generates some work which is not used, for example, sound energy dissipated in mechanical processes. Despite the dissipation of this energy is small, it is possible to analyze the reuse through energy conversion study. This work aims to study the sound energy conversion to electricity through Faraday's induction principle, using acoustic transducers as: woofer, subwoofer and tweeters. With experimental works, this study verified which transducer had the best performance in transduction of sound energy to electricity in several frequency bands and sound intensities. For a more detailed analysis, we presented voltage-frequency curves of all studied electroacoustic devices. Through all these curves, we noticed what frequency bands we got the best result. Furthermore, it shows concepts about sound wave, magnetic field, electromechanical energy conversion and measurement techniques.

**Keywords:** Energy conversion. Acoustic transducers. RMS voltage. Sound Energy. Electricity.

## LISTA DE FIGURAS

|  |    |
|--|----|
| Figura 1 - Propagação de onda em um determinado espaço.....  | 13 |
| Figura 2 - Onda Sonora Propagando-se Através de um Tubo Cheio de Ar. ....  | 16 |
| Figura 3 - Limiar de Audição.....  | 18 |
| Figura 4 - Forma de Onda de um Sinal Sonoro de Instrumento.....  | 19 |
| Figura 5—Propagação do som pela vibração de uma parede, por efeito de choque de ondas sonoras. ....  | 20 |
| Figura 6 - Fio circular conduzindo corrente contínua I. ....   | 24 |
| Figura 7 - Campo Magnético de uma Espira Circular. ....  | 26 |
| Figura 8 – Solenóide.....  | 27 |
| Figura 9 - Campo gerado por um solenóide ideal.....  | 28 |
| Figura 10 - Microfone de carbono.....  | 31 |
| Figura 11 - Diagrama de microfone condensador com circuito de realimentação mecânica.....  | 33 |
| Figura 12 - Microfone Condensador.....   | 34 |
| Figura 13 - Microfone de fibra ótica.....  | 34 |
| Figura 14 - Intensidade representada como função da fase da luz refletida.....   | 35 |
| Figura 15 - Microfone piezoelétrico. ....  | 36 |
| Figura 16 - Estrutura geral de um microfone de eletreto. ....  | 38 |
| Figura 17 - Microfone Dinâmico: a) de Bobina móvel; b) de faixa móvel.....   | 39 |
| Figura 18 - O primeiro protótipo de um alto-falante dinâmico.....  | 41 |
| Figura 19 - Corneta usada em fonógrafos e gramofones.....  | 43 |
| Figura 20 - Cornetas atualmente comercializadas.....   | 43 |
| Figura 21 - Interação do conjunto magnético, bobina móvel percorrida por corrente, magnetização do ímã permanente e força resultante em um alto-falante..... | 44 |
| Figura 22 - Alto-falante eletrodinâmico.....   | 44 |
| Figura 23 - Corte esquemático do alto-falante dinâmico, magnético.....   | 46 |
| Figura 24 - Circuito elétrico equivalente de um alto-falante dinâmico, magnético.....  | 52 |
| Figura 25 - Curvas de Compensação para Medidas do Nível de Pressão Sonora.....   | 55 |
| Figura 26- Decibelímetro Digital e suas Especificações Elétricas.....  | 56 |
| Figura 27 - Diagrama de blocos do set-up de medição.....   | 57 |
| Figura 28 - Setup padrão definido para todos os experimentos.....  | 63 |
| Figura 29 - <i>Software Online Tone Generator</i> .....  | 64 |
| Figura 30 - Setup da conversão de energia sonora para energia elétrica utilizando <i>subwoofer</i> com corneta.....  | 67 |
| Figura 31 - Setup da conversão de energia sonora para energia elétrica utilizando <i>subwoofer</i> sem corneta.....  | 67 |
| Figura 32 - Curva de Frequência x Tensão com intensidade sonora de 95 dB utilizando corneta.....   | 72 |
| Figura 33 - Curva de Frequência x Tensão com intensidade sonora de 100 dB utilizando corneta.....  | 72 |

|  |    |
|--|----|
| Figura 34 - Curva de Frequência x Tensão com intensidade sonora de 110 dB utilizando corneta .....   | 73 |
| Figura 35 - Curva de Frequência x Tensão com intensidade sonora de 115 dB utilizando corneta. ....   | 73 |
| Figura 36 - Curvas de Tensão x Frequência com todas as intensidades sonoras sobrepostas.....   | 74 |
| Figura 37 - Forma de onda de tensão <i>RMS</i> com intensidade sonora de 115 dB e frequência 120 Hz. ....  | 75 |
| Figura 38 - Forma de onda de tensão <i>RMS</i> nos terminais do resistor shunt com intensidade sonora de 115 dB e frequência 120 Hz. ....        | 75 |
| Figura 39 - Corneta de papel paraná para subwoofer 6x9. ....   | 77 |
| Figura 40- Curva de frequência x tensão <i>RMS</i> utilizando <i>subwoofer</i> 6x9 com corneta a uma distância de 4,5 cm. ....                   | 80 |
| Figura 41 - Curva de frequência x tensão <i>RMS</i> utilizando <i>subwoofer</i> 6x9 sem corneta a uma distância de 4,5 cm. ....                  | 81 |
| Figura 42 - Curva de frequência x tensão <i>RMS</i> utilizando <i>subwoofer</i> 6x9 com e sem corneta a uma distância de 4,5 cm. ....            | 81 |
| Figura 43 - Forma de onda da tensão <i>RMS</i> com intensidade sonora de 95 dB e frequência 120 Hz. ....   | 82 |
| Figura 44 - Setup da conversão de energia sonora para energia elétrica utilizando <i>woofer</i> com corneta.....                                 | 84 |
| Figura 45 - Gráfico de potência por frequência utilizando corneta a 95 dB.....   | 88 |
| Figura 46 - Gráfico de potência por frequência utilizando corneta a 115 dB.....  | 88 |
| Figura 47 - Curva de Frequência x Tensão com a utilização de corneta e intensidade sonora de 95 dB.....  | 89 |
| Figura 48 - Curva de Frequência x Tensão sem a utilização de corneta e intensidade sonora de 95 dB.....  | 90 |
| Figura 49 - Curva de Frequência x Tensão, com intensidade sonora de 95 dB, com corneta e sem corneta sobrepostas. ....                           | 90 |
| Figura 50 - Curva de Frequência x Tensão com intensidade sonora de 115 dB.....   | 91 |
| Figura 51 - Forma de onda de tensão <i>RMS</i> com intensidade sonora de 115 dB e frequência 120 Hz. ....  | 92 |
| Figura 52 - Forma de onda de tensão <i>RMS</i> nos terminais do resistor <i>shunt</i> com intensidade sonora de 115 dB e frequência 120 Hz. .... | 92 |
| Figura 53 - Corneta de papel paraná para tweeter.....  | 94 |
| Figura 54 – Curva de Frequência x Tensão com a utilização de corneta e intensidade sonora de 95 dB.....  | 97 |
| Figura 55 – Curva de Frequência x Tensão sem a utilização de corneta e intensidade sonora de 95 dB.....  | 97 |
| Figura 56 – Curva de Frequência x Tensão, com intensidade sonora de 95 dB, com corneta e sem corneta sobrepostas.....                            | 98 |
| Figura 57 – Forma de onda de tensão <i>RMS</i> com intensidade sonora de 95 dB e frequência 5 kHz com a utilização de corneta. ....              | 99 |
| Figura 58 – Forma de onda de tensão <i>RMS</i> com intensidade sonora de 95 dB e frequência 5 kHz sem a utilização de corneta. ....              | 99 |



|  |     |
|--|-----|
| Figura 59 – Forma de onda de tensão RMS nos terminais do resistor shunt com intensidade sonora de 95 dB e frequência 5 kHz sem a utilização de corneta. .... | 100 |
| Figura 60 - Frentes de onda de uma fonte pontual e isotrópica. ....  | 102 |
| Figura 61 - Os três primeiros modos normais ou harmônicos em um tubo aberto e em um tubo fechado.....  | 109 |
| Figura 62 - O ar em tubo aberto é forçado a oscilar com a mesma frequência que as ondas senoidais oriundas de um alto-falante. ....                          | 109 |
| Figura 63 - Curva de ressonância do tubo aberto.....   | 110 |
| Figura 64 - Transdução da energia sonora em <i>subwoofer</i> utilizando corneta cônica. ....   | 112 |
| Figura 65 - Transdução da energia sonora em <i>subwoofer</i> utilizando estrutura semi-esférica na recepção da onda de pressão. ....                         | 112 |
| Figura 66 - Transdução da energia sonora em <i>subwoofer</i> sem a utilização de corneta. ....   | 113 |
| Figura 67- Gráfico de tensão x frequência com os seguintes transdutores: <i>Woofers</i> , <i>Subwoofers</i> , <i>Subwoofers 6x9</i> e <i>Tweeter</i> . ....  | 115 |
| Figura 68 - Corneta de plástico acoplada ao alto-falante woofer. ....  | 117 |
| Figura 69 - Circuito retificador onda completa com diodos de germânio. ....  | 117 |
| Figura 70 - Conexão dos terminais do alto-falante com o circuito retificador em ponte de onda completa. ....   | 118 |
| Figura 71 - Protótipo conversor de energia sonora para energia elétrica em corrente contínua. ....   | 118 |
| Figura 72 - Forma de onda nas terminais adquirida diretamente nos terminais do alto-falante. ....  | 119 |
| Figura 73 - Forma de onda adquirida após a retificação com ponte retificadora de onda completa. ....   | 119 |
| Figura 74 - Forma de onda adquirida após a inserção de um capacitor na saída da ponte retificadora. ....   | 120 |
| Figura 75 - Corneta de plástico utilizada no protótipo. ....   | 122 |

## LISTA DE TABELAS

|  |    |
|--|----|
| Tabela 1 - Valores Típicos de Intensidade de Nível Sonoro.....               | 6  |
| Tabela 2 - Relação entre Nível de Intensidade Sonora por Metro Quadrado..... | 7  |
| Tabela 3 - A Velocidade do Som .....   | 15 |

## LISTA DE QUADROS

|  |     |
|--|-----|
| Quadro 1 - Resumo dos resultados das associações.....  | 60  |
| Quadro 2 - Valores de tensão e corrente produzidas na transdução de energia sonora para energia elétrica com corneta de reverberação.....              | 70  |
| Quadro 3- Valores de tensão e corrente produzidas na transdução de energia sonora para energia elétrica sem corneta de reverberação.....               | 71  |
| Quadro 4 - Valores de potência <i>RMS</i> produzidas.....  | 71  |
| Quadro 5 - Valores de tensão e corrente produzidos utilizando subwoofer 6x9 com corneta.....   | 79  |
| Quadro 6 - Valores de tensão e corrente produzidos utilizando subwoofer 6x9 sem corneta.....   | 79  |
| Quadro 7 - Valores de tensão e corrente produzidos utilizando <i>woofer</i> com corneta.....   | 85  |
| Quadro 8 - Valores de tensão e corrente produzidas na transdução de energia sonora para energia elétrica sem corneta a 95 dB.....                      | 85  |
| Quadro 9 - Valores de tensão e corrente produzidas na transdução de energia sonora a 115 dB para energia elétrica com corneta.....                     | 87  |
| Quadro 10 - Valores de potência <i>RMS</i> produzidas pelo woofer com corneta e fonte sonora a 95 dB e 115 dB.....                                     | 87  |
| Quadro 11 - Valores de tensão e corrente produzidas na transdução de energia sonora para energia elétrica com corneta a 95 dB.....                     | 95  |
| Quadro 12- Valores de tensão e corrente produzidas na transdução de energia sonora para energia elétrica sem corneta a 95 dB.....                      | 96  |
| Quadro 13 – Valores de potência <i>RMS</i> produzidas pelo <i>tweeter</i> com corneta e fonte sonora a 95 dB e 115 dB.....                             | 96  |
| Quadro 14 – Resultados dos rendimentos dos alto-falantes testados com corneta.....   | 106 |
| Quadro 15 - Resultados dos rendimentos dos alto-falantes testados sem corneta.....   | 107 |
| Quadro 16 - Valores de frequência de ressonancia para primeiro e segundo harmônico de corneta.....   | 111 |
| Quadro 17 - Quadro comparativo dos melhores resultados dos transdutores acústicos utilizando corneta.....  | 113 |
| Quadro 18 - Quadro comparativo dos transdutores acústicos com mesma intensidade sonora utilizando corneta.....   | 114 |
| Quadro 19 - Quadro comparativo dos melhores resultados utilizando transdutores acústicos sem corneta.....  | 114 |
| Quadro 20 - Valores de tensão em corrente contínua produzidos na transdução de energia sonora para energia elétrica através do protótipo a 115 dB..... | 123 |

## SUMÁRIO

|          |   |    |
|----------|---|----|
| 1        | INTRODUÇÃO .....                              | 1  |
| 1.1      | TEMA .....                                    | 1  |
| 1.1.1    | Delimitação do Tema .....                     | 2  |
| 1.2      | PROBLEMAS E PREMISSAS.....                    | 2  |
| 1.3      | OBJETIVOS .....                               | 8  |
| 1.3.1    | Objetivo Geral .....                          | 8  |
| 1.3.2    | Objetivos específicos .....                   | 9  |
| 1.4      | JUSTIFICATIVA .....                           | 9  |
| 1.5      | PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS.....              | 10 |
| 1.6      | ESTRUTURA DO TRABALHO.....                    | 11 |
| 2        | REFERENCIAL TEÓRICO .....                     | 12 |
| 2.1      | ONDAS SONORAS:.....                           | 12 |
| 2.2      | VELOCIDADE DO SOM:.....                       | 13 |
| 2.3      | PROPAGAÇÃO DAS ONDAS SONORAS:.....            | 15 |
| 2.4      | QUALIDADES FISIOLÓGICAS DO SOM: .....         | 17 |
| 2.4.1    | Altura .....                                  | 17 |
| 2.4.2    | Intensidade .....                             | 17 |
| 2.4.3    | Timbre .....                                  | 19 |
| 2.5      | PROPRIEDADES DAS ONDAS SONORAS .....          | 19 |
| 2.5.1    | Reflexão sonora .....                         | 19 |
| 2.5.2    | Refração e difração sonora .....              | 20 |
| 2.5.3    | Interferência sonora .....                    | 21 |
| 2.6      | LEI DE INDUÇÃO DE FARADAY.....                | 21 |
| 2.7      | LEI DE AMPÈRE .....                           | 23 |
| 2.7.1    | Campo Magnético de uma espira circular .....  | 24 |
| 2.7.2    | Campo magnético criado por um solenóide ..... | 27 |
| 2.8      | CONVERSÃO ELETROMECAÂNICA DE ENERGIA .....    | 28 |
| 2.8.1    | Sensores e Transdutores .....                 | 29 |
| 2.8.2    | Transdutores e Sensores Acústicos .....       | 30 |
| 2.8.2.1. | Microfones .....                              | 30 |

|            |   |           |
|------------|---|-----------|
| 2.8.2.1.1. | Tipos de microfone .....  | 31        |
| 2.8.3      | Alto-falantes .....   | 40        |
| 2.8.3.1.   | Cornetas .....  | 41        |
| 2.8.3.2.   | Alto-falantes Eletrodinâmicos .....   | 43        |
| 2.9        | TÉCNICAS DE MEDIÇÃO .....   | 53        |
| 2.9.1      | Nível Sonoro .....  | 53        |
| 2.9.2      | Pressão Sonora .....  | 53        |
| 2.9.3      | Medidores de Nível de Pressão Sonora .....  | 54        |
| 2.9.3.1.   | Decibelímetro .....   | 55        |
| 2.10.1     | Medição de tensão em alto-falante .....   | 57        |
| 2.11       | RESISTORES DE ALTA PRECISÃO .....   | 58        |
| 2.11.1     | Resistência .....   | 58        |
| 2.11.2     | Resistores .....  | 59        |
| 2.12       | RUÍDO E TÉCNICAS DE MINIMIZAÇÃO .....   | 59        |
| 2.12.1     | Definição de ruído .....  | 60        |
| 2.12.2     | Procedimentos para redução de ruído em cabeamento .....                                   | 60        |
| <b>3</b>   | <b>DESCRIÇÃO DOS EXPERIMENTOS</b> .....   | <b>62</b> |
| 3.1        | Setup Padrão .....  | 62        |
| 3.2        | Transdução de Energia Sonora em Energia Elétrica utilizando<br><i>Subwoofer</i> 66 .....  |           |
| 3.2.1      | Objetivo .....  | 66        |
| 3.2.2      | Materiais Utilizados .....  | 66        |
| 3.2.3      | Metodologia Adotada .....   | 66        |
| 3.2.4      | Resultados .....  | 68        |
| 3.2.5      | Comentários .....   | 75        |
| 3.3        | Transdução de Energia Sonora em Energia Elétrica utilizando<br><i>Subwoofer</i> 6x9 ..... |           |
| 3.3.1      | Objetivo .....  | 76        |
| 3.3.2      | Materiais Utilizados .....  | 76        |
| 3.3.3      | Metodologia Adotada .....   | 77        |
| 3.3.4      | Resultados .....  | 78        |
| 3.3.5      | Comentários .....   | 82        |
| 3.4        | Transdução de Energia Sonora em Energia Elétrica utilizando <i>Woofers</i><br>83 .....    |           |

|          |  |     |
|----------|--|-----|
| 3.4.1    | Objetivo   | 83  |
| 3.4.2    | Materiais Utilizados   | 83  |
| 3.4.3    | Metodologia Adotada  | 84  |
| 3.4.4    | Resultados   | 84  |
| 3.4.5    | Comentários  | 92  |
| 3.5      | Transdução de Energia Sonora em Energia Elétrica utilizando <i>Tweeter</i> | 93  |
| 3.5.1    | Objetivo   | 93  |
| 3.5.2    | Materiais Utilizados   | 93  |
| 3.5.3    | Metodologia Adotada  | 94  |
| 3.5.4    | Resultados   | 95  |
| 3.5.5    | Comentários  | 100 |
| <b>4</b> | <b>ANÁLISE DOS RESULTADOS E DISCUSSÕES</b> .....                           | 101 |
| <b>5</b> | <b>DESENVOLVIMENTO DO PROTÓTIPO</b> .....                                  | 116 |
| 5.1.     | Materiais Utilizados   | 116 |
| 5.2.     | Montagem do protótipo  | 116 |
| 5.3.     | Funcionamento do protótipo   | 118 |
| 5.4.     | Transdução de Energia Sonora em Energia Elétrica utilizando o protótipo    | 120 |
| 5.4.1.   | Objetivo   | 120 |
| 5.4.2.   | Materiais utilizados   | 120 |
| 5.4.3.   | Metodologia adotada  | 121 |
| 5.4.4.   | Resultados   | 122 |
| 5.4.5.   | Comentários  | 123 |
| <b>6</b> | <b>CONCLUSÃO</b> .....   | 124 |
|          | <b>REFERÊNCIAS</b> .....   | 126 |

# 1 INTRODUÇÃO

## 1.1 TEMA

Um grande número de processos de conversão de energia ocorrem na natureza. O homem foi capaz de projetar alguns processos de conversão de energia adicionais por meio de diversos dispositivos inventados durante a história da humanidade. tais dispositivos podem ser classificados de acordo com o tipo de construção usada, de acordo os seus princípios físicos ou químicos, ou de acordo com as formas de energia que emergem anteriormente ou posteriormente à ação realizada pelo dispositivo.(SØRENSEN, 2007, p.3).

A energia elétrica é um dos recursos básicos que possibilitaram ao ser humano o avanço tecnológico e a qualidade de vida da sociedade contemporânea. Pois é essa energia que move indústrias, alimenta computadores e celulares, ilumina os ambientes, etc. Esta é utilizada para alimentar sistemas que não são conservativos, como por exemplo, os sistemas mecânicos das máquinas elétricas, que utilizam-se de uma porcentagem da energia fornecida pela fonte para realizar o trabalho efetivo, e dissipam uma porcentagem menor, porém não irrelevante, na forma de calor, vibrações, energia sonora, etc (ELETROBRÁS PROCEL E CEPEL, 1998).

A necessidade do desenvolvimento de novas tecnologias para a otimização do uso da energia elétrica se torna uma questão importante, visando reaproveitar algumas formas de energia residuais resultantes de processos que envolvem inerentemente o uso do recuso citado. Uma forma específica de reaproveitamento dessa energia residual pode ocorrer através da reutilização de ondas sonoras dissipadas de diversos processos.

Segundo Nussenzveig (2002, p.123), “O deslocamento de ar provocado por uma fonte sonora muda a densidade do ar na camada adjacente, o que provoca uma mudança de pressão. Por sua vez, a variação de pressão produz o deslocamento da camada de ar contígua, e assim por diante”.

Para Halliday, Resnick e Walker. (2001, p.93), tem-se como uma característica da ondulatória, o fato de que uma onda não transporta matéria, mas

sim transmite energia, logo se pode dizer que as ondas de pressão transmitem certa quantidade de energia que através dos meios corretos pode ser reaproveitada.

### 1.1.1 Delimitação do Tema

Neste trabalho apresenta-se o interesse em estudar o processo de conversão de energia sonora em energia elétrica por meio do princípio de indução de Faraday, ou seja, através da utilização de alto-falantes, como *woofers*, *subwoofers* e *tweeters*, a fim de verificar a viabilidade da utilização desses dispositivos de baixo rendimento eletro acústico para a obtenção de um nível energético significativo em termos de baixa potência.

## 1.2 PROBLEMAS E PREMISSAS

No âmbito da utilização da energia elétrica quando se realiza algum tipo de trabalho não se tem um aproveitamento eficaz da parte da energia que é dissipada no processo. Cita-se o exemplo de um motor de corrente contínua onde uma parte da energia que é utilizada para alimentá-lo transforma-se em trabalho mecânico e a outra parte composta por vibrações, energia sonora e calor não é reaproveitada e simplesmente se dispersa no meio. Embora a energia contida nessas formas dissipativas seja pequena pode-se analisá-la e verificar assim a viabilidade para que se possa reaproveitar de alguma forma essas perdas.

Perdas mecânicas são responsáveis por 2 a 15% das perdas totais em motores elétricos de indução e ocorrem devido ao atrito nas escovas, mancais e ventilação. No processo citado pode-se dizer que as perdas mecânicas mencionadas originam outras formas de energias dissipadas como a térmica e a acústica (ELETROBRÁS, PROCEL e CEPEL, 1998). Entretanto restringindo-se a análise para processos envolvendo a energia sonora dissipada observa-se que se manipulada de forma correta, através de ampliações acústicas e/ou elétricas,



talvez resulte em pequenas potências capazes de alimentar uma pequena carga. Neste trabalho avalia-se a eficiência para se efetuar uma conversão de energia sonora para energia elétrica através de conversores eletroacústicos de baixo rendimento. Esses dispositivos e seus princípios de funcionamento são descritos a seguir juntamente com alguns conceitos de acústica.

Durante a década de 1830, diversas experiências pioneiras sobre uma força eletromotriz induzida (f.e.m) magneticamente foram feitas. A mais conhecida dessas experiências envolve uma bobina conectada a um galvanômetro e um ímã. Quando o ímã está em repouso, o galvanômetro não acusa nenhuma corrente. Entretanto quando o ímã se move o galvanômetro acusa uma corrente no circuito (YOUNG, 2005).

Segundo Halliday, Resnick e Walker (1996, p.238). Se colocarmos uma bobina condutora fechada num campo magnético externo e enviarmos uma corrente através dela, um torque atuara sobre a bobina fazendo-a girar. Este fenômeno físico é basicamente o mesmo que possibilita o funcionamento do princípio do gerador elétrico. Em 1831, Michael Faraday, a partir de seus experimentos de indução eletromagnética, formulou a lei de indução que consiste em: A força eletromotriz induzida em uma espira condutora é igual ao negativo da taxa que o fluxo magnético através da espira esta variando com o tempo. Conforme a equação (1).

$$f.e.m = -\frac{d\phi_B}{dt} \quad (1)$$

- $f.e.m$  é a força eletromotriz (em V);
- $\phi_B$  é o fluxo magnético (em Wb);
- $t$  é o tempo (em s).

Por volta de 1834, Heinrich Friedrich Lenz, postulou uma regra que mais tarde seria chamada de Lei de Lenz, A qual afirma que uma corrente induzida surgirá numa espira fechada com um sentido contrário à variação do fluxo magnético que a produziu.

Entretanto se colocarmos um anel de cobre de raio “r” num campo magnético externo uniforme que desprezando as distorções preenche um volume cilíndrico de raio “R” e supondo-se um aumento deste campo a uma taxa constante, o fluxo

magnético através do anel, variará também de forma constante. Assim, pela lei de Faraday, uma força eletromotriz induzida e conseqüentemente uma corrente induzida e utilizando a lei de Lenz pode-se constatar que o sentido da corrente induzida será anti-horário.

Com a existência desta corrente no anel de cobre, um campo elétrico produzido pela variação de fluxo magnético deve estar presente em todos os pontos do interior do objeto citado. Este campo elétrico induzido é um campo não conservativo gerado de forma diferente do campo elétrico criado por cargas estáticas, conhecido como campo conservativo (Bastos, 2012). Tem-se então que todo o campo magnético variável produz um campo elétrico, ou seja, ocorrerá indução mesmo sem a presença do anel de cobre. Por isso, segundo Halliday, Resnick e Walker (1996, p.238), deve-se complementar a lei de Faraday da seguinte forma:

$$\oint \mathbf{E} \cdot d\mathbf{l} = -\frac{d\Phi_B}{dt} \quad (2)$$

- $\mathbf{E}$  é o campo elétrico (em  $\frac{V}{m}$ );
- $d\mathbf{l}$  é o comprimento (em  $m$ );

Uma das aplicações práticas da teoria apresentada acima é o princípio de funcionamento dos alto-falantes, que de forma simplista, convertem energia elétrica em energia sonora.

Os primeiros alto-falantes surgiram entre 1924 e 1925, como equipamento capaz de ampliar o som produzido pelos fonógrafos elétricos primitivos. O alto-falante é um transdutor eletroacústico, da mesma forma que o microfone, no entanto a função do alto-falante é converter um sinal elétrico em vibração sonora. Seu princípio de funcionamento consiste em dois ímãs, um permanente e outro um eletroímã, que tanto podem se atrair como se repelir.

O ímã gera um campo magnético fixo, enquanto a bobina, ao ser percorrida por uma corrente elétrica, também gera um campo magnético que tanto pode se opor como se igualar ao sentido do ímã permanente. Isto acontece porque o sinal aplicado à bobina do alto-falante é de corrente alternada, assim sendo quando a corrente circula em um determinado sentido, por exemplo, é criado um campo magnético que faz com que a bobina seja repelida e quando a polaridade se inverte

faz com que a corrente circule no sentido contrário e com isso a bobina seja atraída pelo imã.

A conversão do sinal elétrico para sonoro se dá ao prender a bobina em um cone que por sua vez encontra-se fixo a estrutura. O movimento da bobina para frente e para trás da bobina faz com que o cone ao se deslocar movimente o ar gerando uma onda de pressão.(Haical, 2003, p.11).

Haical (2003, p.14) afirma que existem vários tipos de alto-falantes, e dentre eles citam-se os *woofers* que são propícios para sons graves, sua faixa de resposta a frequência situa-se entre 40 Hz e 1 kHz e suas dimensões são as maiores dentre estes equipamentos. Os *mid-range* possuem faixa de trabalho entre 200 Hz e 7 kHz, possuem uma forma construtiva similar aos anteriores, porém são mais leves, o que possibilita a extensão da sua faixa de resposta. Existem também os *full-range*, que cobrem entre 100 Hz e 10 kHz. E finalmente os *tweeters*, que são ideais para respostas aos agudos e possuem frequência operacional entre 5 kHz e quase 20 kHz, que é o final da faixa audível.

Tem-se por definição que o som é uma perturbação de pressão que se propaga seguindo as características de uma onda através de um meio material. Na propagação através do ar, tem-se que a velocidade do som em condições normais de temperatura e pressão é de aproximadamente 344 m/s. A típica faixa de frequência audível para o homem é de 20Hz a 20 kHz. A onda sonora envolve uma grande faixa de níveis de potência, como por exemplo, um sussurro humano produz cerca de  $10^{-10} W$ , um grito humano  $10^{-5} W$ , e um avião a jato  $10^5 W$ . Devido a esta grande variação de níveis energéticos envolvidos, e a percepção sonora no ouvido de uma pessoa ocorrer segundo uma escala logarítmica, utiliza-se o decibel para expressar o nível sonoro, conforme a equação abaixo (HIRCHBERG; RIENSTRA 2006, p.13).

$$PWL = 10 \cdot \log_{10} \left( \frac{Pot}{10^{-12}} \right) \quad (3)$$

Onde:

- $PWL$  é o nível de intensidade sonora(em dB);
- $Pot$  é a potência transmitida pela onda de pressão  $\left( em \frac{W}{m^2} \right)$ .

A partir destes resultados ocorre a possibilidade de associar a alguns níveis de intensidade sonora, típicos de atividades humanas, ao nível de potência que a energia transmitida pela onda pode fornecer.

A Tabela 1 apresenta alguns valores típicos de intensidade de nível sonoro.

**Tabela 1 - Valores Típicos de Intensidade de Nível Sonoro.**

| Fonte Sonora                                   | Power/ $10^{-12}$ ( $I/I_0$ ) | dB  | Descrição         |
|--|-------------------------------|-----|-------------------|
| Respiração Normal                              | $10^1$                        | 10  | Limiar da audição |
| Farfalar                                       | $10^2$                        | 20  | Quieto            |
| Murmúrio (a 5m)                                | $10^3$                        | 30  | Quieto            |
| Bibliotecas                                    | $10^4$                        | 40  | Quieto            |
| Escritório                                     | $10^5$                        | 50  | Quieto            |
| Conversa normal (a 1m)                         | $10^6$                        | 60  |                   |
| Tráfego intenso                                | $10^7$                        | 70  |                   |
| Escritório c/ máquinas e fábricas médias.      | $10^8$                        | 80  |                   |
| Caminhão Pesado (a 15m)                        | $10^9$                        | 90  | Prejudicial       |
| Trem antigo de metrô                           | $10^{10}$                     | 100 | Prejudicial       |
| Obra de construção civil (a 3m)                | $10^{11}$                     | 110 | Prejudicial       |
| Concerto de rock com amplificadores (a 2m)     | $10^{12}$                     | 120 | Limiar da dor     |
| Rebitador Automático e metralhadoras (próximo) | $10^{13}$                     | 130 |                   |
| Motor de Foguete grande (próximo)              | $10^{18}$                     | 180 |                   |

Fonte: Tipler; Mosca (2006).

Se forem aplicados os dados acima na equação (3), apresentam-se as seguintes considerações:

Supondo um ambiente onde existe um nível de intensidade sonora por volta de 120 dB, calcula-se a quantidade de potência em  $W/m^2$  que é transmitida pela onda de pressão, conforme mostra-se abaixo.

$$PWL = 10 \ln\left(\frac{Pot}{10^{-12}}\right) \quad [dB]$$

$$120 = 10 \ln\left(\frac{Pot}{10^{-12}}\right)$$

$$12 = \ln\left(\frac{Pot}{10^{-12}}\right)$$

$$10^{12} = \frac{Pot}{10^{-12}}$$

$$Pot = 10^0 = 1 [W/m^2] \quad (4)$$

Na sequência extrapolam-se os cálculos acima e estimam-se, em condições ideais, os resultados obtidos para outros níveis de intensidade sonora, Conforme a Tabela 2.

**Tabela 2 - Relação entre Nível de Intensidade Sonora por Metro Quadrado.**

| Fonte Sonora                                   | dB  | [W/m <sup>2</sup> ]   |
|--|-----|-----------------------|
| Respiração Normal                              | 10  | 1 x 10 <sup>-11</sup> |
| Farfalhar                                      | 20  | 1 x 10 <sup>-10</sup> |
| Murmúrio (a 5m)                                | 30  | 1 x 10 <sup>-9</sup>  |
| Bibliotecas                                    | 40  | 1 x 10 <sup>-8</sup>  |
| Escritório                                     | 50  | 1 x 10 <sup>-7</sup>  |
| Conversa normal (a 1m)                         | 60  | 1 x 10 <sup>-6</sup>  |
| Tráfego intenso                                | 70  | 1 x 10 <sup>-5</sup>  |
| Escritório c/ máquinas e fábricas médias.      | 80  | 1 x 10 <sup>-4</sup>  |
| Caminhão Pesado (a 15m)                        | 90  | 1 x 10 <sup>-3</sup>  |
| Trem antigo de metrô                           | 100 | 1 x 10 <sup>-2</sup>  |
| Obra de construção civil (a 3m)                | 110 | 1 x 10 <sup>-1</sup>  |
| Concerto de rock com amplificadores (a 2m)     | 120 | 1                     |
| Rebitador Automático e metralhadoras (próximo) | 130 | 10                    |
| Motor de Foguete grande (próximo)              | 180 | 10 <sup>6</sup>       |

Fonte: Tipler; Mosca (2006).

Considerando-se a conversão de um som de 120 dB através de um transdutor eletroacústico de baixo rendimento, como por exemplo, alto falantes de 4 ohms e 20

Watts e rendimento médio de 7%, desconsiderando-se as perdas devido a dispersão da onda de pressão. Vem que:

Segundo a equação (4):

$$Pot = 1 [W/m^2]$$

Considerando uma superfície ideal de captação com 1 m<sup>2</sup>:

$$Pot_{tot} = 1 [W]$$

Tem-se que o rendimento médio do alto-falante é 2%, então tem-se uma potência convertida ( $P_C$ ), em condições ideais de aproximadamente (SILVA, 2004, p.6):

$$P_C = 1 [W].\eta = 1 \times 2/100$$

$$P_C = 20 \text{ m} [W]$$

A partir da equação acima, tem-se que uma fonte sonora de 120 dB pode ser obtido um nível de energia na ordem de dezenas de miliwatts. Logo, a conversão realizada pode atender potências necessárias para alimentar vários circuitos, tais como amplificadores de instrumentação INA118 que possuem potência máxima consumida de 6mW (FELER, et al.,p5. 2014), ou ainda segundo Apinex (2015) níveis de potência entre 1 a 20 mW podem ser aplicados em módulos laser para uso industrial, médico e de aplicação científica.

## 1.3 OBJETIVOS

### 1.3.1 Objetivo Geral

Desenvolver um protótipo de um conversor eletroacústico utilizando alto-falantes que sejam capazes de converter energia sonora em energia elétrica.

### 1.3.2 Objetivos específicos

- Analisar a eficiência da conversão acústico-elétrica envolvendo os vários tipos de alto-falantes como woofers, subwoofers e tweeters, para selecionar o transdutor que será utilizado;
- Verificar o comportamento na frequência das tensões e correntes resultantes para o transdutor escolhido;
- Selecionar e testar os possíveis níveis sonoros e frequências que aumentem a intensidade de energia;
- Desenvolver uma estrutura acústica que contribua para a eficiência na captação da onda de pressão;
- Desenvolver um sistema que converta energia sonora em elétrica pelo princípio da Lei de *Faraday*, utilizando alto-falantes.
- Levantar possíveis usos para energia gerada.

## 1.4 JUSTIFICATIVA

Pretende-se converter a energia sonora em elétrica, pois é notado que em diversas situações há muita energia acústica sendo dissipada e sem reaproveitamento.

O que se pretende com esse projeto é aproveitar a energia dissipada do som que seria jogada para o meio, para a sua conversão em energia elétrica e assim poder alimentar sistemas de reduzida potência, como carregadores de pilha, que apresentam tensão aproximada de 1,2V e correntes de 140 a 360mA e sensores remotos, os quais demandam uma potência similar de 90mW a 5W.

Um dos principais motivos da escolha do tema é a possibilidade de desenvolver novas formas de conversão de energia elétrica utilizando os princípios da acústica, o que poderá resultar em benefícios e praticidade para a sociedade.

## 1.5 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

- **Etapa 1 – Pesquisa bibliográfica**

Por trás do surgimento de novas ideias e teorias, há sempre pesquisas e muita leitura envolvida. Essas pesquisas são muito importantes para o desenvolvimento de novas aplicações. A bibliografia utilizada para este projeto vêm de pesquisas em livros relacionados, acervo de universidades, artigos científicos e outros meios de pesquisa que possam auxiliar no desenvolvimento do projeto.

- **Etapa 2 – Onda sonora e sua propagação**

É necessário o estudo sobre ondas sonoras e sua propagação para que se possa entender seu mecanismo de funcionamento e posteriormente, utilizando os conhecimentos obtidos, aplicá-lo no projeto.

- **Etapa 3 – Estudo dos alto-falantes**

Devem-se pesquisar vários tipos de alto-falantes, analisar sua eficiência, preço para compra e desempenho para então decidir qual será utilizado no projeto.

- **Etapa 4 – Geração do ruído através do *software***

Será feito um levantamento com alguns locais que possuem maior intensidade sonora, a qual gerará a potência desejada. Em seguida, com auxílio do *software* para geração de ondas sonoras, verificar-se-á a eficiência de diversas faixas de frequência e intensidade do som.

- **Etapa 5 – Captação do som**

A próxima etapa depois de selecionado um alto-falante que atenda aos requisitos do projeto é a captação do som. Utilizar-se um dispositivo conversor eletroacústico a fim de gerar uma potência que possa ser reaproveitada.



- **Etapa 6 – Montagem do protótipo**

Após definido o melhor alto-falante, será feita uma análise de como o protótipo deverá ser estruturado, priorizando seu desempenho e custo benefício. A montagem do protótipo consiste na adequação do alto-falante a uma caixa acústica a fim de aumentar a intensidade sonora incidente no dispositivo.

- **Etapa 7 – Documentação**

Esta etapa consiste em encerrar o projeto, registrando todos os procedimentos realizados, desde os métodos de pesquisa, fundamentação teórica até o desenvolvimento experimental e os resultados obtidos, seguindo as normas de trabalho de conclusão de curso da Universidade Tecnológica Federal do Paraná.

## 1.6 ESTRUTURA DO TRABALHO

- 1ª Parte – Introdução sobre geração de energia e a conversão de energia sonora em elétrica.
- 2ª Parte – Embasamento teórico explicitando a conversão de energia, tabelas referência e equações que poderão auxiliar no desenvolvimento do trabalho.
- 3ª Parte – Desenvolvimento do projeto, testes e posterior montagem de protótipo.
- 4ª Parte – Conclusão do trabalho, comparando os valores calculados com os medidos e verificando sua aplicação.
- 5ª Parte – Referências bibliográficas, anexos e apêndices.

## 2 REFERENCIAL TEÓRICO

O presente capítulo tem como objetivo detalhar os aspectos teóricos dos assuntos abordados neste trabalho, como o estudo da propagação das ondas sonoras, a transdução do som, a conversão eletromecânica de energia, o funcionamento e características dos alto-falantes e amplificadores, e os métodos de medição utilizados para mensurar o fenômeno em estudo.

### 2.1 ONDAS SONORAS:

Denomina-se onda uma perturbação que se propaga num meio sólido, líquido ou gasoso. A onda transfere energia de um ponto a outro sem o transporte de matéria entre os pontos.

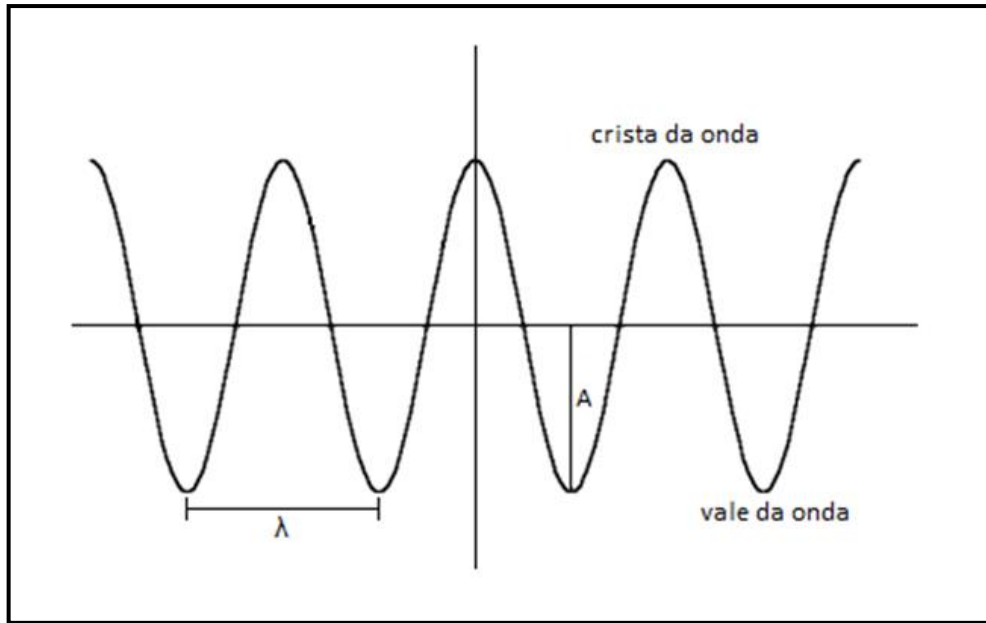
Ondas sonoras tem origem mecânica, pois são produzidas por deformações em um meio elástico, são longitudinais, que são aquelas que a direção de propagação da onda coincide com a direção de vibração e não se propagam no vácuo.

O ar ou outro meio torna-se alternadamente mais denso ou mais rarefeito quando uma onda sonora se propaga através dele. As variações na pressão fazem com que os nossos tímpanos vibrem com a mesma frequência da onda, o que produz a sensação auditiva (RAMALHO; NICOLAU; TOLEDO, 1999).

O sistema auditivo de uma pessoa é sensibilizado pelas ondas sonoras de frequências entre 20 Hz e 20 kHz. Frequências inferiores a 20 Hz são denominados infrassons e ocorrem, por exemplo, precedendo abalos sísmicos. Ondas superiores a 20 kHz são os ultrassons.

O comprimento de onda é a menor distância que vai de uma crista à outra ou de uma depressão à outra. A amplitude é a distância que vai de uma crista ao eixo de propagação da onda. Período é o tempo gasto para que uma oscilação seja completada. A velocidade de propagação das ondas é constante para um determinado meio. Vale ressaltar que o que se propaga é o movimento e não as partículas do meio.

Na figura 1 tem-se o gráfico de uma onda que se propaga da esquerda para a direita nos instantes  $t_1, t_2, t_3$ , onde  $A$  é a amplitude,  $S$  é o espaço e  $\lambda$  é o comprimento de onda. A partícula  $p$  localizada no espaço permanece aproximadamente na mesma posição, já que esta não se propaga com a onda.



**Figura 1 - Propagação de onda em um determinado espaço.**  
**Fonte: UFSC (2015).**

A frequência de uma onda representa o número de oscilações por segundo. As ondas têm sempre a mesma frequência da fonte que as emitiu, independentemente do meio em que se propagam.

## 2.2 VELOCIDADE DO SOM:

A velocidade das ondas mecânicas depende das propriedades inerciais do meio para poder armazenar energia cinética e também das propriedades elásticas para armazenar energia potencial. De modo geral, a velocidade de propagação do som nos sólidos é maior do que nos líquidos, que por sua vez é maior do que nos gases. Nos líquidos e nos sólidos as moléculas estão mais próximas umas das outras, justificando a maior velocidade de propagação. Generalizando, tem-se que a equação de velocidade de uma onda transversal numa corda esticada é:

$$v = \sqrt{\frac{\tau}{\mu}} \quad (5)$$

Onde:

- $v$  é a velocidade de onda transversal em uma corda esticada ( $em \frac{m}{s}$ );
- $\tau$  é a tração na corda ( $em N$ );
- $\mu$  é a massa específica linear da corda ( $em \frac{kg}{m}$ ).

Quando uma onda sonora se propaga através do ar ou de qualquer outro gás, a energia potencial é associada a compressões e rarefações periódicas de pequenos elementos de volume do gás. A propriedade que determina o quanto um elemento do gás modifica é seu volume. Quando a pressão sobre ele aumenta ou diminui, o módulo de compressão  $B$ , em pascal, é definido como: (HALLIDAY; RESNICK; WALKER, 1996, p. 139).

$$B = -\frac{\Delta p}{\frac{\Delta V}{V}} \quad (6)$$

Onde:

- $B$  é o módulo de compressão ( $em Pa$ );
- $\Delta p$  é a variação da pressão ( $em Pa$ );
- $\frac{\Delta V}{V}$  é a mudança de volume em relação ao volume original.

Assim, a partir da equação de velocidade acima citada e substituindo por  $B$  e  $\mu$  por  $\rho$ , tem-se:

$$v = \sqrt{\frac{B}{\rho}} \quad (7)$$

Onde:

- $v$  é a velocidade de onda transversal em uma corda esticada ( $em \frac{m}{s}$ );
- $\rho$  é a massa específica ( $em \frac{kg}{m^3}$ ).

A tabela 3 mostra a velocidade do som em vários meios.

**Tabela 3 - A Velocidade do Som**

| <b>Meio</b>              | <b>Velocidade (m/s)</b> |
|--------------------------|-------------------------|
| <i>Gases</i>             |                         |
| Ar (0°C)                 | 331                     |
| Ar (20°C)                | 343                     |
| Hélio                    | 965                     |
| Hidrogênio               | 1284                    |
| <i>Líquidos</i>          |                         |
| Água (0°C)               | 1402                    |
| Água (20°C)              | 1482                    |
| Água do mar <sup>1</sup> | 1522                    |
| <i>Sólidos</i>           |                         |
| Alumínio                 | 6420                    |
| Aço                      | 5941                    |
| Granito                  | 6000                    |

<sup>1</sup>A 20°C e salinidade de 3,5%

**Fonte: Halliday; Resnick; Walker (1996, p. 139).**

### 2.3 PROPAGAÇÃO DAS ONDAS SONORAS:

Como já mencionado, as ondas sonoras se propagam em um meio material (sólido, líquido ou gasoso). Esse meio pode ser unidimensional, como uma corda esticada; bidimensional, como a membrana de um tambor ou tridimensional como a atmosfera.

O que se propaga é o movimento e não as partículas do meio, já que estas apenas oscilam próximas as suas posições de repouso. A onda pode transportar energia ou informação de um lugar a outro do meio, sem que o meio seja

transportado. Pode-se expressar o deslocamento da onda sonora  $S$  como uma função senoidal, seno ou cosseno.

$$S(x, t) = S_m \cos(kx - \omega t) \quad (8)$$

Onde:

- $S$  é o deslocamento (em m);
- $S_m$  é amplitude de deslocamento (em m);
- $k$  é o número de onda angular (em  $\frac{rad}{m}$ );
- $\omega$  é a frequência angular (em  $\frac{rad}{s}$ ).

À medida que a onda se propaga, a pressão do ar, em qualquer posição  $x$  na Fig. 2, aumenta e diminui com o tempo, a variação de pressão,  $\Delta p$ , sendo dada por:

$$\Delta p(x, t) = \Delta p_m \sin(kx - \omega t) \quad (9)$$

Onde:

- $\Delta p_m$  é amplitude de pressão (em Pa);

Um valor negativo de  $\Delta p$  na equação (9) corresponde a uma expansão, enquanto que um positivo equivale a uma compressão.

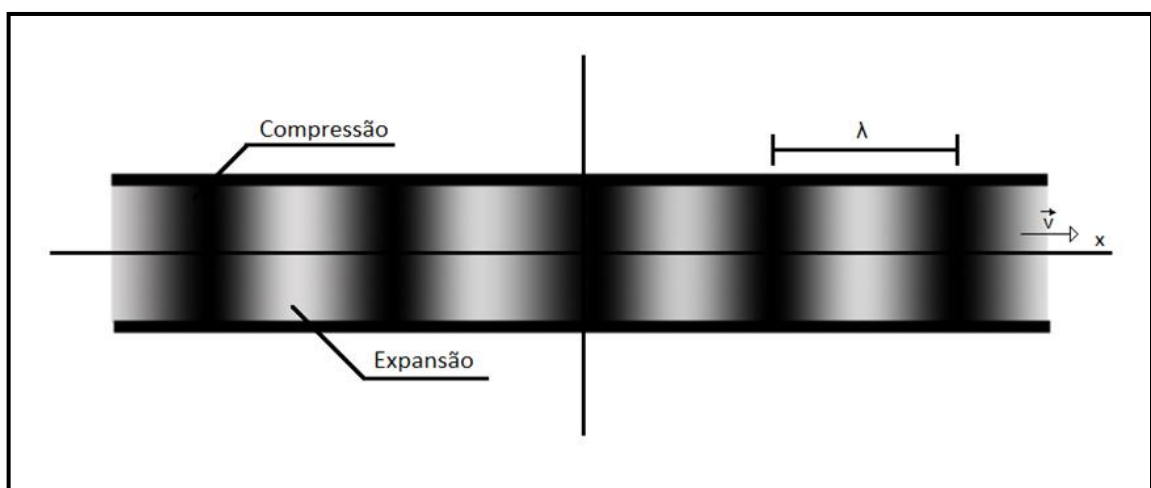


Figura 2 - Onda Sonora Propagando-se Através de um Tubo Cheio de Ar.  
Fonte: Halliday; Resnick; Walker (1996, p. 141).

## 2.4 QUALIDADES FISIOLÓGICAS DO SOM:

### 2.4.1 Altura

A altura é a qualidade pela qual se diferencia sons graves e agudos. Depende apenas da frequência do som.

O som será mais grave quanto menor a frequência e mais agudo quanto maior for a frequência.

### 2.4.2 Intensidade

A intensidade é a qualidade fisiológica pela qual se diferencia os sons fracos dos sons fortes. Depende da energia transportada pela onda sonora e, portanto, de sua intensidade física.

A intensidade física,  $I$ , de uma onda é o quociente entre a energia  $\Delta E$  que atravessa uma superfície na unidade de tempo e a área  $A$  da superfície.

$$I = \frac{\Delta E}{A \cdot \Delta t} \quad (10)$$

Onde:

- $I$  é a intensidade da onda ( $em \frac{J}{m^2 \cdot s}$ );
- $\Delta E$  é variação de energia que atravessa uma superfície ( $em J$ );
- $A$  é a área da superfície ( $em m^2$ );
- $\Delta t$  é a variação de tempo ( $em s$ ).

Como o termo  $\frac{\Delta E}{\Delta t}$  constitui a potência da onda, tem-se que:

$$I = \frac{Pot}{A} \quad (11)$$

Onde:

- $I$  é a intensidade da onda (em  $\frac{W}{m^2}$ );
- $Pot$  é a potência da onda (em  $W$ );

Em vez de falar da intensidade  $I$  de uma onda sonora, é muito mais conveniente falar do nível sonoro  $\beta$ , definido como:

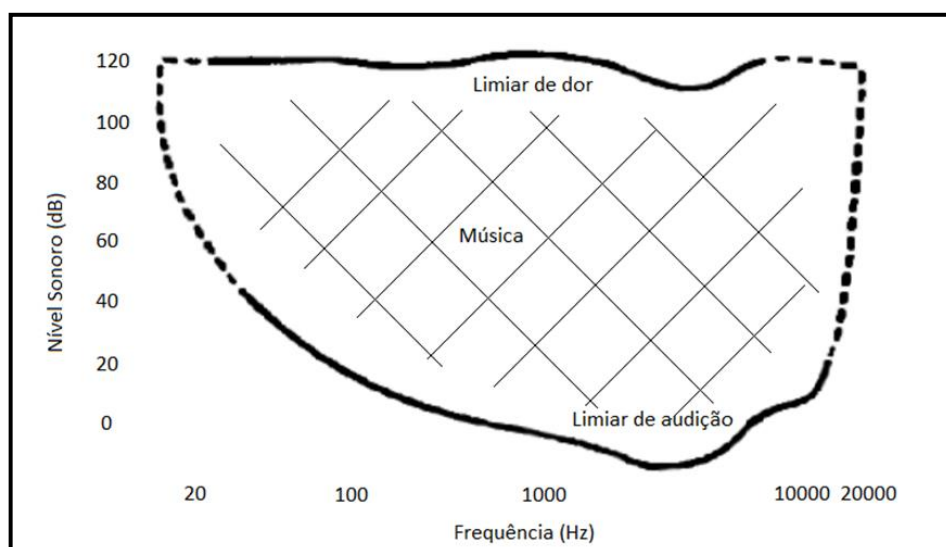
$$\beta = (10) \log \frac{I}{I_0} \quad (12)$$

Onde:

- $\beta$  é o nível sonoro (dB);
- $I$  é a intensidade de uma onda sonora ( $\frac{W}{m^2}$ );
- $I_0$  é igual a  $10^{-12}$  ( $\frac{W}{m^2}$ ).

A intensidade de referência padrão,  $I_0$ , é a mínima intensidade física que uma onda sonora deve ter para ser audível e é aproximadamente  $10^{-12}$  W/m<sup>2</sup>.

A figura 3 mostra como os limiares de audições e de sensação dolorosa variam, através do espectro sonoro, para pessoas com audição média.



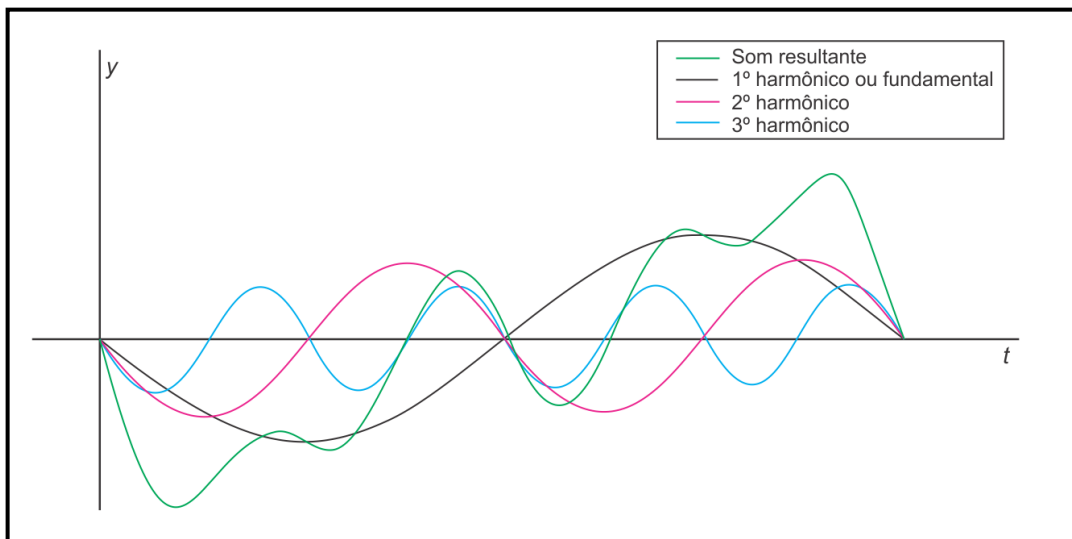
**Figura 3 - Limiar de Audição.**

Fonte: Halliday; Resnick; Walker (1996, p. 144).



### 2.4.3 Timbre

O som de menor frequência emitido, por exemplo, por um instrumento musical, constitui o som fundamental, e os demais, com frequência múltipla, são os harmônicos. A superposição do som fundamental com os harmônicos determina a forma da onda emitida pelo instrumento, como representada na figura 4.



**Figura 4 - Forma de Onda de um Sinal Sonoro de Instrumento.**  
 Fonte: Ramalho; Nicolau; Toledo (2007, p. 466)

O som fundamental ou primeiro harmônico está sempre presente e é ele que determina a frequência do som emitido. Essa característica de sons de mesma altura emitidos por instrumentos diferentes, mesmo que esses sons tenham a mesma intensidade é chamada de timbre.

## 2.5 PROPRIEDADES DAS ONDAS SONORAS

### 2.5.1 Reflexão sonora

A reflexão do som pode dar origem ao reforço, reverberação ou eco, dependendo do intervalo de tempo entre a percepção do ouvinte ao som direto e refletido.

Se o obstáculo que reflete o som estiver muito próximo, o som direto e o refletido chegam praticamente no mesmo instante, dando a sensação ao ouvinte de um som mais forte. Esse fenômeno é chamado de reforço.

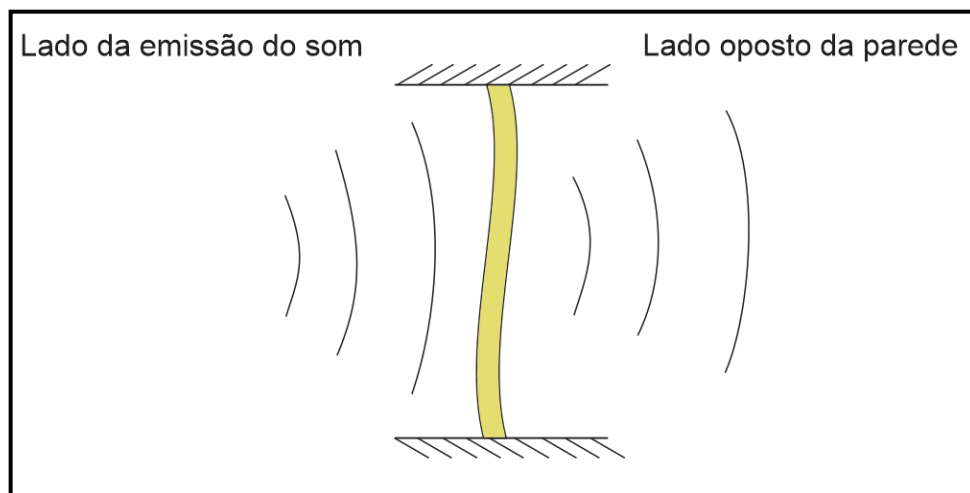
Quando o obstáculo refletor está mais afastado, de modo que o intervalo entre a percepção do som direto e do som refletido é menor que 0,1 segundos (não desprezível), ocorre a reverberação. Nesse caso o som refletido chega ao sistema auditivo, enquanto a sensação do som direto ainda não se extinguiu e o ouvinte tem a impressão de um prolongamento do som.

O eco ocorre quando o som refletido é recebido pelo ouvinte depois que o som direto já se extinguiu. O ouvinte percebe dois sons distintos. Para que isso aconteça, o intervalo de tempo entre a percepção dos dois sons (direto e refletido) deve ser maior que 0,1 segundos.

## 2.5.2 Refração e difração sonora

A refração do som ocorre quando uma onda sonora produzida em um meio passa para outro com velocidade diferente, como visto na figura 5. A frequência do som permanece a mesma, modificando-se seu comprimento de onda.

A difração do som possibilita que as ondas sonoras contornem obstáculos com dimensões de até 20m.



**Figura 5–Propagação do som pela vibração de uma parede, por efeito de choque de ondas sonoras.**

Fonte: Morechi (2012).

### 2.5.3 Interferência sonora

A interferência do som ocorre quando um ponto do meio recebe dois ou mais sons originados por várias fontes ou por reflexões em obstáculos. As condições estabelecidas para as ondas em geral valem para a interferência em ondas sonoras. (RAMALHO; NICOLAU; TOLEDO, 2007, p. 470).

Fontes em concordância de fase:

$$d = p \cdot \frac{\lambda}{2} \text{ (Sendo } p = 0, 2, 4, 6 \dots \text{): interferência construtiva} \quad (13)$$

$$d = i \cdot \frac{\lambda}{2} \text{ (Sendo } i = 1, 3, 5, 7 \dots \text{): interferência destrutiva} \quad (14)$$

Onde:

- **$d$  é a diferença entre as distâncias percorridas pelas ondas desde as respectivas fontes até o ponto de superposição (em  $m$ );**
- **$p$  é a interferência construtiva;**
- **$i$  é a interferência destrutiva;**
- **$\lambda$  é o comprimento de onda (em  $m$ ).**

Fontes em oposição de fase:

$$d = p \cdot \frac{\lambda}{2} \text{ (Sendo } p = 0, 2, 4, 6 \dots \text{): interferência destrutiva} \quad (15)$$

$$d = i \cdot \frac{\lambda}{2} \text{ (Sendo } i = 1, 3, 5, 7 \dots \text{): interferência construtiva} \quad (16)$$

## 2.6 LEI DE INDUÇÃO DE FARADAY

Também chamada de lei da indução magnética, a Lei de Faraday quantifica a indução eletromagnética. Esta lei pode ser enunciada em termos de corrente  $i$  induzida em uma única espira  $C$  de fio, imersa num campo magnético  $B$ , que varia com o tempo:

$$i = -\frac{1}{R} \frac{d\Phi_C}{dt} \quad (17)$$

Onde:

- $i$  é a corrente induzida numa espira de contorno  $C$  (em  $A$ );
- $R$  é a resistência (em  $\Omega$ );
- $\frac{d\Phi_C}{dt}$  é a taxa de variação do fluxo magnético com o tempo (em  $\frac{Wb}{s}$ ).

Um campo magnético variável produz uma força eletromotriz  $\varepsilon$  que pode estabelecer uma corrente em um circuito condutor fechado. A força eletromotriz é uma tensão que aparece nos condutores que se movem em um campo magnético ou nos quais atuam campos magnéticos variáveis. A lei de Faraday pode então ser estabelecida como:

$$fem = \varepsilon = -\frac{d\Phi_C}{dt} \quad (18)$$

Onde:

- $\varepsilon$  é a força eletromotriz (em  $V$ );

A equação acima implica em um percurso fechado condutor. O fluxo magnético,  $\Phi_C$ , é o fluxo que atravessa cada superfície genérica, cujo perímetro é o percurso fechado e  $\frac{d\Phi}{dt}$  é a razão de variação deste fluxo no tempo.

Um valor de  $\frac{d\Phi}{dt}$  diferente de zero pode resultar de uma das seguintes situações:

- Um fluxo variável no tempo envolvendo um trajeto fechado estacionado
- Movimento relativo entre um fluxo e um trajeto fechado
- Uma combinação dos dois.

A lei da indução pode também ser representada na sua forma integral:

$$\oint_C \mathbf{E} \cdot d\mathbf{l} = \varepsilon = -\frac{d\Phi_C}{dt} \quad (19)$$

Onde:

- $E$  é o campo elétrico (em  $\frac{V}{m}$ );

Não havendo mais força de Lorentz, a força eletromotriz corresponde um campo elétrico  $\mathbf{E}$ , que não é mais eletrostático, devido à variação com o tempo, e adquire assim uma circulação diferente de zero ao longo de uma curva  $C$  fechada: (NUSSENZVEIG, 1997, p. 164).

$$\varepsilon = \oint_C \mathbf{E} d\mathbf{l} = - \int_S \frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} d\mathbf{S} \quad (20)$$

Onde:

- $\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t}$  é a taxa de variação do campo magnético com o tempo ( $em \frac{T}{s}$ );
- $S$  é a superfície ( $em m^2$ ).

Por outro lado, o teorema do rotacional

$$\oint_C \mathbf{E} d\mathbf{l} = - \int_S \text{rot} \mathbf{E} d\mathbf{S} \quad (21)$$

Como o resultado vale qualquer valor que seja o circuito  $C$ , infere-se que

$$\text{rot} \mathbf{E} = - \frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} \quad (22)$$

Que é a forma diferencial da lei de indução de Faraday, e corresponde a uma das equações de Maxwell. Interpretando o resultado fisicamente, o campo magnético variável com o tempo produz um campo elétrico que não é mais eletrostático, chamado campo não conservativo (Bastos, 2012).

## 2.7 LEI DE AMPÈRE

O cálculo de um campo magnético a partir de uma corrente elétrica estacionária é regido pela lei circuital de Ampère.

Segundo Hayt (2003, p.136), a lei de Ampère é definida como a integral de linha de  $\mathbf{H}$  percorrendo um caminho fechado, seja igual à corrente contínua que envolve o caminho. Pode-se escrever a equação da seguinte forma:

$$\int \mathbf{H} \cdot d\mathbf{L} = \mu_0 \cdot I \quad (23)$$

Onde:

- $H$  é a intensidade de campo magnético ( $em \frac{A}{m}$ );
- $I$  é a corrente que atravessam o circuito ( $em A$ );
- $\mu_0$  é a permeabilidade magnética ( $em \frac{H}{m}$ ).

Na figura 6 tem-se um fio conduzindo corrente contínua  $I$  por três caminhos diferentes,  $a$ ,  $b$  e  $c$ . Apesar de os caminhos  $a$  e  $b$  resultarem em uma mesma resposta, os integrantes do caminho percorrido será diferente. Isso se deve ao fato de que  $H$  irá variar de ponto para ponto. Como  $a$  e  $b$  não percorrem o mesmo caminho, as contribuições para cada integral serão diferentes. Para o caminho  $a$  e  $b$ , a integral de linha nos caminhos fechados  $a$  e  $b$  resultam em uma resposta  $I$ . Já para o caminho  $c$  que passa através do condutor, tem uma resposta menor de  $I$  e é exatamente aquela porção da corrente total que é envolvida pelo caminho  $c$ . (HAYT, 2003, p. 137).

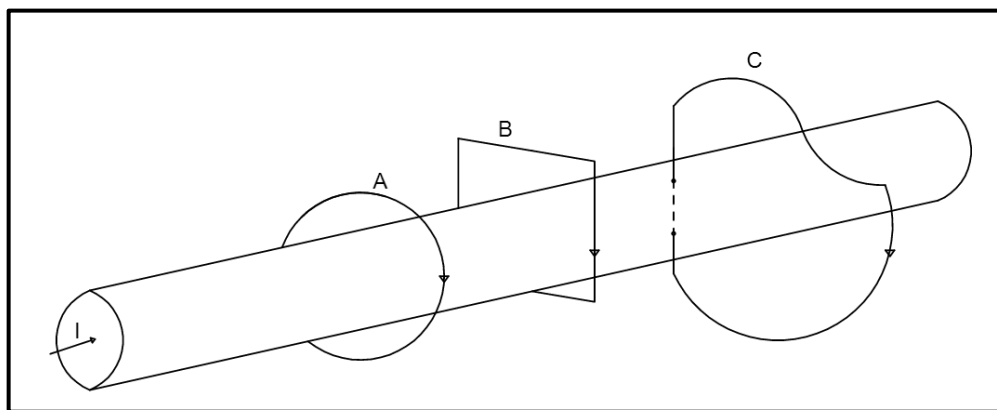


Figura 6 - Fio circular conduzindo corrente contínua  $I$ .  
Fonte: Hayt (2003, p.137)

### 2.7.1 Campo Magnético de uma espira circular

Observa-se que dentro de um alto-falante ou de um eletroímã, possuem diversas bobinas, com um grande número de espiras agrupadas de modo tão

compacto que cada volta do fio pode ser considerada uma espira circular. O campo magnético produzido por uma única espira circular é devido a corrente que passa pelas espiras, assim a expressão do campo magnético pode ser deduzida em função da corrente e das características físicas da espira circular. Na figura 7 tem-se uma espira circular conduzindo corrente  $I$ , com raio  $a$ . A corrente entra e sai através de dois fios retilíneos colocados um ao lado do outro, fazendo assim com que as correntes percorram os fios em sentidos contrários, resultando em um campo magnético zero. Como a figura 7 mostra,  $\vec{dl}$  e  $\vec{r}$  são perpendiculares e a direção de  $d\vec{B}$  produzida por esse elemento  $\vec{dl}$  particular está sobre o plano  $xy$ . Como  $r^2 = x^2 + a^2$ , o módulo do campo magnético produzido pelo elemento  $\vec{dl}$  é: (YOUNG; FREEDMAN, 2005, p.253).

$$dB = \mu_0 \cdot I \cdot \frac{dl}{4\pi (x^2 + a^2)} \quad (24)$$

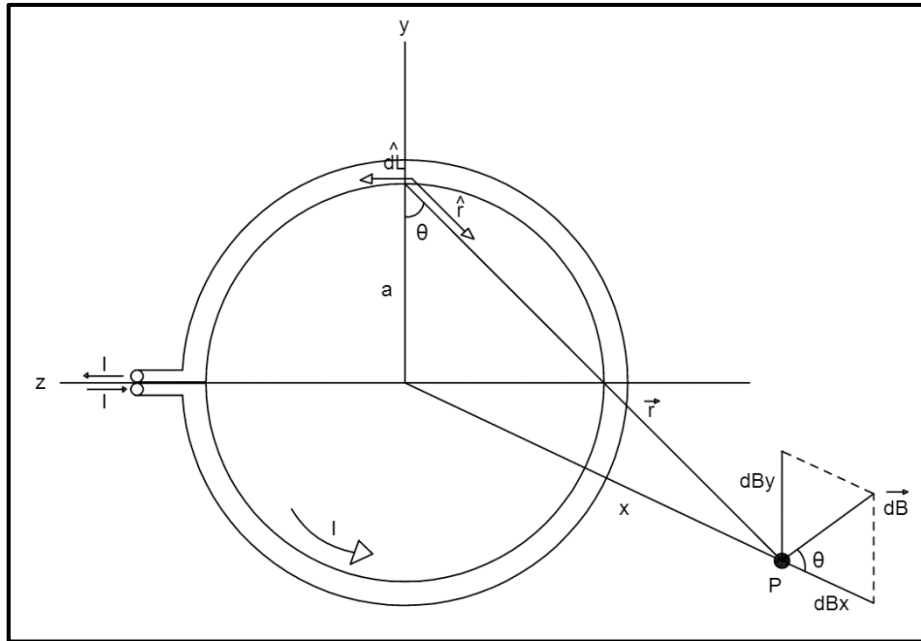
Onde:

- $d\vec{B}$  é o campo magnético infinitesimal (em T);
- $I$  é a corrente que circula pelo espira (em A);
- $x$  é a componente do eixo x do campo magnético (em m);
- $a$  é o raio da espira circular (em m).

Os componentes do vetor  $d\vec{B}$  são dados por:

$$dB_x = dB \cos \theta = \mu_0 \cdot I \cdot dl \cdot \frac{a}{4\pi \cdot (x^2 + a^2) \cdot (x^2 + a^2)^{1/2}} \quad (25)$$

$$dB_y = dB \sin \theta = \mu_0 \cdot I \cdot dl \cdot \frac{x}{4\pi \cdot (x^2 + a^2) \cdot (x^2 + a^2)^{1/2}} \quad (26)$$



**Figura 7 - Campo Magnético de uma Espira Circular.**  
**Fonte: Young; Freedman (2005, p. 253).**

“A situação possui simetria rotacional em torno do eixo x, portanto não existe componente do campo magnético total  $\vec{B}$  no sentido y. Para cada elemento  $\vec{dl}$ , existe um elemento correspondente do lado oposto da espira, com sentido oposto. Esses dois elementos opostos fornecem contribuições iguais para o componente x de  $\vec{B}$ , porém os componentes no sentido y possuem sentidos opostos, fazendo com que as componentes perpendiculares se anulem e somente os componentes paralelos ao eixo x sejam diferentes de zero”. (YOUNG; FREEDMAN, 2005, p. 253)

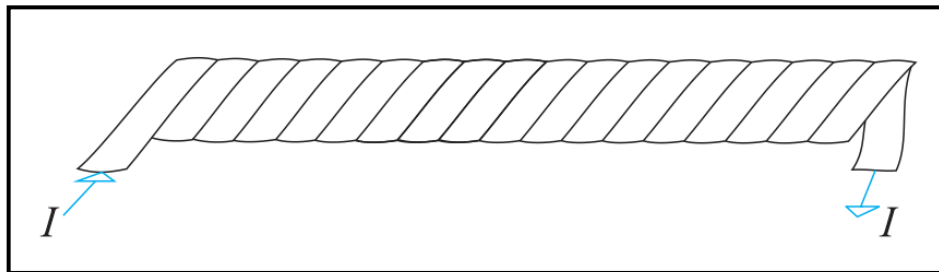
A integral de  $dl$  é dada pelo comprimento da circunferência,  $\int dl = 2\pi a$ , então a componente em x do campo magnético é dado pela equação 27. (YOUNG; FREEDMAN, 2005, p. 254).

$$B_x = \frac{\mu_0 I a^2}{2 \cdot \left( (x^2 + a^2)^{\frac{3}{2}} \right)} \quad (27)$$



## 2.7.2 Campo magnético criado por um solenóide

Existem diversas maneiras para aplicação de um campo magnético uniforme, produzindo um campo com mesmo módulo e direção em qualquer ponto de uma região no espaço. Um exemplo de aplicação é no solenóide. Na prática um campo magnético uniforme é gerado com um solenóide. Um solenóide é uma bobina helicoidal de fio com a mesma corrente  $I$  passando em cada espira do enrolamento. Na figura 8 é representado um solenóide com  $n$  espiras. (KNIGHT, 2009, p. 1015).



**Figura 8 – Solenóide.**  
Fonte: Knight (2009, p.1015).

O campo gerado por um solenóide ideal pode ser calculado usando a lei de Ampère. A figura 8 mostra uma seção transversal de um solenóide infinitamente longo. O caminho fechado usado é um retângulo de comprimento  $l$ , que encerra  $N$  espiras do solenóide. Cada uma das  $N$  espiras encerradas pelo caminho de integração conduzem uma corrente  $I$ , assim a corrente total através do retângulo é  $I = NI$ . Portanto tem-se a seguinte forma: (KNIGHT, 2009, p. 1015)

$$\oint \mathbf{B} \cdot d\mathbf{s} = \frac{\mu_0 NI}{l} \quad (28)$$

Onde:

- $N$  é o número de espiras;
- $l$  é o comprimento do solenóide (em m).

A integral de linha ao longo desse caminho é a soma das integrais de linha ao longo de cada lado.

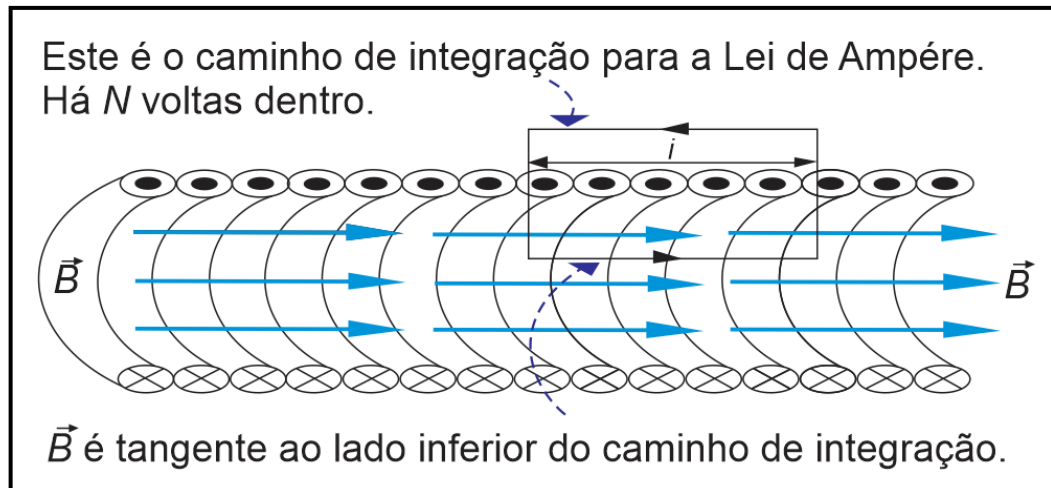


Figura 9 - Campo gerado por um solenóide ideal.  
Fonte: Knight (2009, p.1015).

## 2.8 CONVERSÃO ELETROMECÂNICA DE ENERGIA

A conversão eletromecânica ocorre quando um dispositivo, normalmente chamado de transdutor ou conversor, 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 aplicada a corrente elétrica 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. (Creppe, 2002, p. 83)

O processo de conversão eletromecânica de energia utiliza como meio o campo elétrico ou magnético do dispositivo de conversão. E ainda que os dispositivos de conversão operem com princípios similares, as estruturas dependem de suas funções. Os dispositivos de medida e controle são classificados como transdutores. Estes geralmente operam com sinais relativamente pequenos e sob condições lineares de entrada e saída. Uma segunda categoria de dispositivos abrange equipamentos produtores de força incluindo solenóides, relés e eletroímãs. A terceira categoria inclui os equipamentos de conversão contínua de energia, como motores e geradores. (Fitzgerald, 2006, p.119).

### 2.8.1 Sensores e Transdutores

Um sensor pode ser definido como “um dispositivo que recebe e responde a um sinal ou estímulo”, o que consiste em uma definição muito ampla. Por isso a partir dessa definição pode-se classificar estes dispositivos como naturais, como os órgãos sensoriais humanos ou de outros seres vivos, e ainda como sensores artificiais, que são usados em sistemas artificiais para controle e supervisão de processos relacionados às atividades humanas, como por exemplo, sensores de nível ou pressão em sistemas de abastecimento de água. Esses tipos de equipamentos devem ter a capacidade de enviar e receber “estímulos” de outros equipamentos, com os quais se comunicam, em uma mesma “linguagem”. E esta linguagem é a eletricidade. Assim sendo, um sensor feito pelo homem deve ter a capacidade de resposta a sinais que carregam informações por deslocamento de elétrons.

Em resumo, o propósito de um sensor é responder a algum tipo de entrada de estímulo oriundo de uma propriedade física e converter essa “entrada” em um sinal elétrico, que na maioria das vezes deve possuir parâmetros elétricos compatíveis com a sensibilidade do circuito eletrônico que recebe esse sinal, devido ao fato que o sinal elétrico pode ser tratado, amplificado e modificado através da eletrônica. Pode-se ainda dizer que qualquer sensor é um equipamento de conversão de energia, pois não importa qual grandeza física se deseja medir sempre deve existir transferência de energia do objeto que se deseja mensurar para o sensor. O processo de sensoriamento é um caso particular de transferência de informação que requer transmissão de energia. Deve-se atentar para o fato de que não se pode confundir transmissão de energia com transmissão de informação pelo simples fato de que a energia pode fluir em dois sentidos, ou seja, pode ser transmitida tanto do objeto para o sensor quanto do sensor para o objeto. Já a transmissão de informação flui somente do objeto para o sensor.

O termo sensor deve ser diferenciado de transdutor, pois este é um conversor de qualquer forma de energia em outra, ao passo que o sensor transforma qualquer tipo de energia para energia elétrica. O alto-falante é um exemplo de transdutor que converte um sinal elétrico em um campo magnético variável e em seguida em ondas sonoras. É interessante que um alto-falante quando ligado na entrada de um

amplificador pode funcionar como um microfone, tornando-se assim um sensor acústico. (Fraden, 2010, p. 1).

## 2.8.2 Transdutores e Sensores Acústicos

Denominam-se transdutores acústicos os equipamentos que fornecem uma variável de saída de natureza elétrica a partir de uma variável de entrada mecânica, de natureza acústica e vice-versa. No primeiro caso estão os microfones, tanto do tipo de acoplamento por campo magnético como do tipo de acoplamento por campo elétrico e no segundo caso os alto-falantes que também existem do tipo de campo elétrico ou magnético (Falcone, 1979). Já os sensores acústicos, que respondem a faixa de frequência audível, são geralmente chamados de microfones. Este, basicamente, é um sensor de pressão adaptado para a transdução de ondas sonoras em uma ampla faixa espectral. (Fraden, 2010, p. 431).

### 2.8.2.1. Microfones

Os microfones diferem-se através de características como, sensibilidade, características direcionais, largura de banda de frequência, faixa dinâmica e seus tipos. Além disso, o seu design pode mudar de acordo com o meio em que as ondas sonoras estão sendo captadas. Por exemplo, para a transdução de ondas aéreas ou vibrações em sólidos chamam-se estes equipamentos de microfones, enquanto que para a sua operação em líquidos é comum utilizar-se o termo hidrofone.

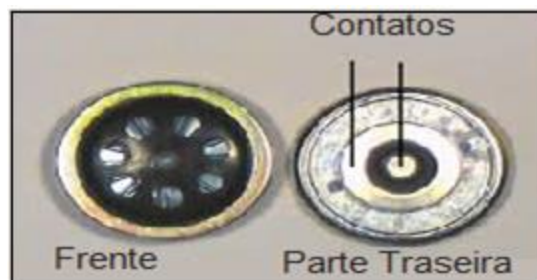
Como as ondas sonoras são ondas mecânicas de pressão, seu funcionamento se dá através de um diafragma e um transdutor de deslocamento, que converte as deflexões do diafragma em sinais elétricos. (Fraden, 2010, p. 431).

### 2.8.2.1.1. Tipos de microfone

#### a. Microfones Resistivos:

No passado, conversores de pressão resistivos eram muito usados em microfones. O conversor consistia de um pó semicondutor (usualmente o grafite), cuja resistividade de massa era sensível à pressão. Atualmente diz-se que este pó semicondutor possui propriedades piezoresistivas. Esses dispositivos possuem algumas desvantagens como: faixa dinâmica limitada, uma resposta à frequência ruim e um alto nível de ruído.

Este tipo de microfone é, em termos gerais, uma cápsula contendo grânulos de carbono prensados entre duas chapas metálicas. A tensão aplicada através das chapas gera uma pequena corrente que flui através do carbono. Uma das placas metálicas, que é o diafragma, vibra na presença de ondas sonoras incidentes, aplicando uma pressão variante no carbono. Essa pressão, por sua vez, deforma os pequenos grãos de grafite, o que faz com que a área de contato entre um par de grânulos adjacentes mude, e isto implica em uma mudança na resistência de massa do carbono. As alterações na resistência causam uma correspondente mudança na tensão entre as duas placas e também na corrente que flui pelo microfone, produzindo, assim, um sinal elétrico. Esses microfones de carbono, representados na figura 10, eram utilizados em telefones antigos. (Fraden, 2010, p. 432).



**Figura 10 - Microfone de carbono.**  
**Fonte: George R. School of Engineering (2015).**

#### b. Microfones Condensadores:

Se um capacitor de placas paralelas é carregado com uma carga “q”, a tensão em seus terminais será dada pela equação 29, já a capacitância, conforme a

equação 30, depende da distância entre as placas. Então substituindo 29 em 30, tem-se:

$$Q = C.V \quad (29)$$

Onde:

- **$Q$  é a carga elétrica (em  $C$ );**
- **$C$  é a capacitância (em  $F$ );**
- **$V$  é a tensão elétrica (em  $V$ ).**

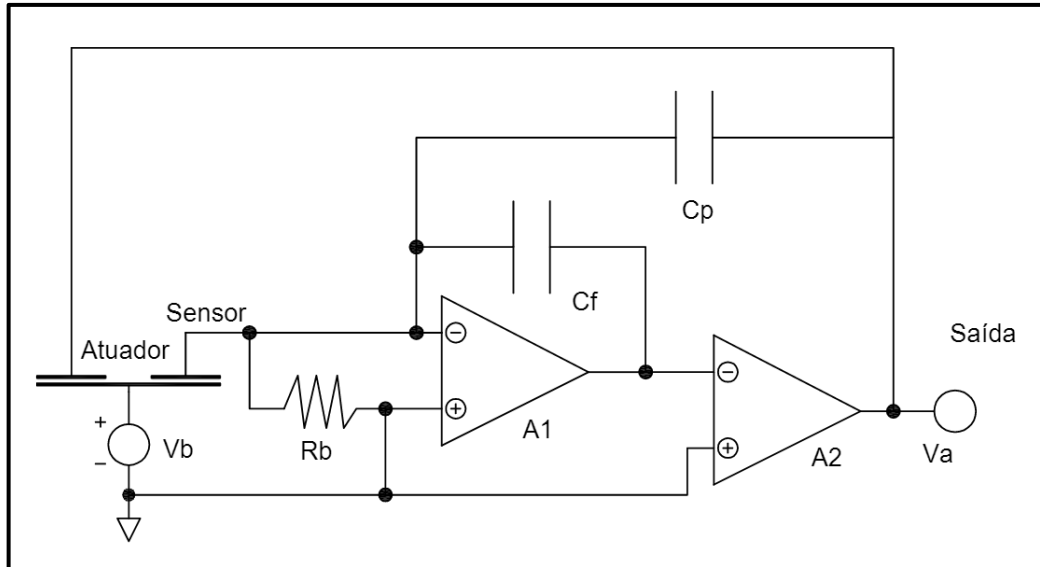
$$C = \frac{A.\epsilon_0}{d} \quad (30)$$

Onde:

- **$A$  é a área da placa (em  $m^2$ );**
- **$\epsilon_0$  é a permissividade elétrica do vácuo (em  $F/m$ );**
- **$d$  é a distância entre as placas paralelas (em  $m$ ).**

$$V = q.\frac{d}{A.\epsilon_0} \quad (31)$$

Onde  $\epsilon_0 = 8,8542 \times 10^{-12} [F/m]$ , que é a constante de permissividade elétrica do vácuo. A equação 31 é a base da operação de um microfone condensador, que podem ser chamados de microfones capacitivos. Esses equipamentos convertem linearmente a distância entre as placas em tensão elétrica, que pode ser ainda amplificada. Este dispositivo necessita essencialmente de uma fonte de carga elétrica “q”, a magnitude desta fonte está relacionada diretamente com a sensibilidade do microfone. Esta carga pode ser fornecida tanto por uma fonte externa, a qual deve possuir uma tensão no intervalo de 20 a 200 V, ou por uma fonte interna capaz de produzir tal carga. Isto pode ser feito através de uma camada embutida de eletreto que é um cristal dielétrico polarizado. Na figura 11 encontra-se um exemplo de circuito equivalente para um microfone condensador.



**Figura 11 - Diagrama de microfone condensador com circuito de realimentação mecânica.**

Fonte: Fraden (2010, p.433)

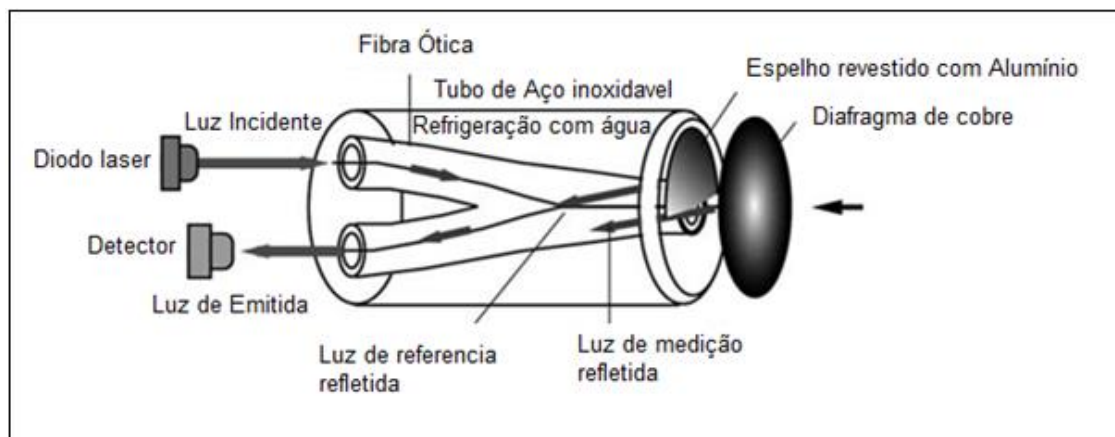
Atualmente muitos dos microfones condensadores são fabricados com diafragma de silicone, que serve para dois propósitos: converter pressão acústica em deslocamento e atuar como a placa móvel de um capacitor. Para obter uma alta sensibilidade nesses microfones, a tensão de polarização no capacitor deve ser tão grande quanto for possível, resultando em uma grande deflexão estática do diafragma, que por sua vez pode acarretar numa redução da resistividade de choque e da faixa dinâmica inferior. Além disso, se a camada de ar entre o diafragma e a chapa traseira for muito pequena, a resistência acústica da camada de ar reduzirá a sensibilidade mecânica do microfone em altas frequências. Por exemplo, para uma camada de ar de 2  $\mu\text{m}$ , ocorre que a sensibilidade diminui em uma frequência de corte de aproximadamente 2 kHz.

Esse tipo de equipamento abrange desde transmissores telefônicos até microfones baratos de karaokê e microfones de gravação de alta fidelidade, apresenta-se um exemplo deste microfone na figura 12. Eles geralmente produzem um sinal de áudio de alta qualidade e são a opção mais popular em laboratórios e estúdios de gravação musical. (Fraden, 2010, p. 432).



**Figura 12 - Microfone Condensador.**  
**Fonte: Art Som Studio (2015).**

c. Microfones de fibra ótica:



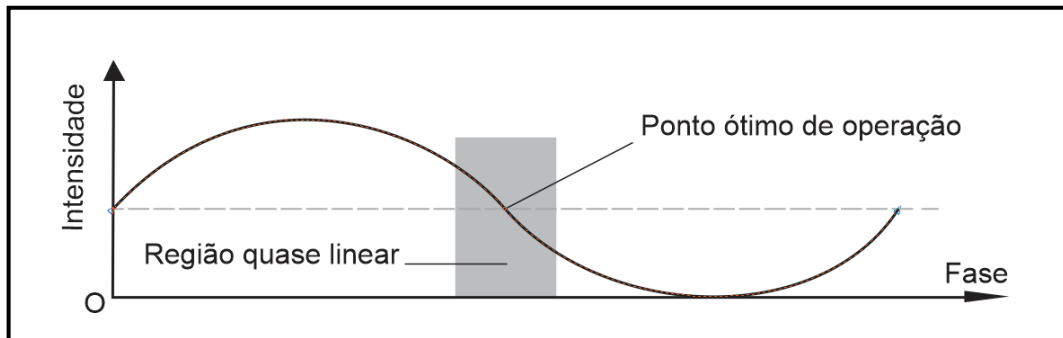
**Figura 13 - Microfone de fibra ótica.**  
**Fonte: Fraden (2010, p.434).**

Para medições acústicas diretas em ambientes hostis, como por exemplo, motores de foguete, utilizam-se sensores com resistência a altas temperaturas, altas pressões e fortes vibrações. Para estas aplicações os microfones de fibra ótica são adequados. (Fraden, 2010, p. 434).

Conforme a figura 13, esses sensores possuem um diodo emissor de radiação luminosa laser com comprimento de onda próximo a 1,3 micrometros. O raio de luz entra em um dos núcleos de fibra ótica e se propaga pela fibra até a parte final, que é fundida e acoplada a outra fibra. Quando o raio de luz laser incidente alcança o final do núcleo da primeira fibra ela é refletida, por um anteparo de alumínio, para a entrada e a saída do sensor ao mesmo tempo. A porção de luz que reincide sobre a entrada do sensor não afetará as medições e é desprezada, já a



parte da radiação que se direciona para a saída do dispositivo incide sobre um detector. Tem-se que, dependendo da posição do diafragma, varia-se a fase da luz refletida, ou de medição, tornando-se diferente da fase da luz refletida.



**Figura 14 - Intensidade representada como função da fase da luz refletida.**  
**Fonte: Fraden (2010, p.435).**

Enquanto se propagam juntas até a saída do dispositivo, a luz de referência e a luz de medição interagem uma com a outra resultando em uma modulação de intensidade luminosa, conforme a figura 14. Portanto, este microfone converte o deslocamento do diafragma em intensidade luminosa.

O diafragma deste equipamento é fabricado a partir de uma película de 0,05 mm de espessura com 1,25 mm de diâmetro. O material de composição do diafragma é o cobre, pelo fato de ser um bom condutor de energia térmica e um módulo de elasticidade relativamente baixo, característica que permite a utilização de um diafragma mais grosso que possibilita uma melhor dissipação do calor enquanto mantêm a frequência e deflecções a níveis aceitáveis. (Fraden, 2010, p. 435).

#### d. Microfones Piezoelétricos:

De acordo com Tichý et al. (2010), “Piezoelectricidade é uma interação linear entre sistemas mecânicos e elétricos em cristais sem centro de simetria”.

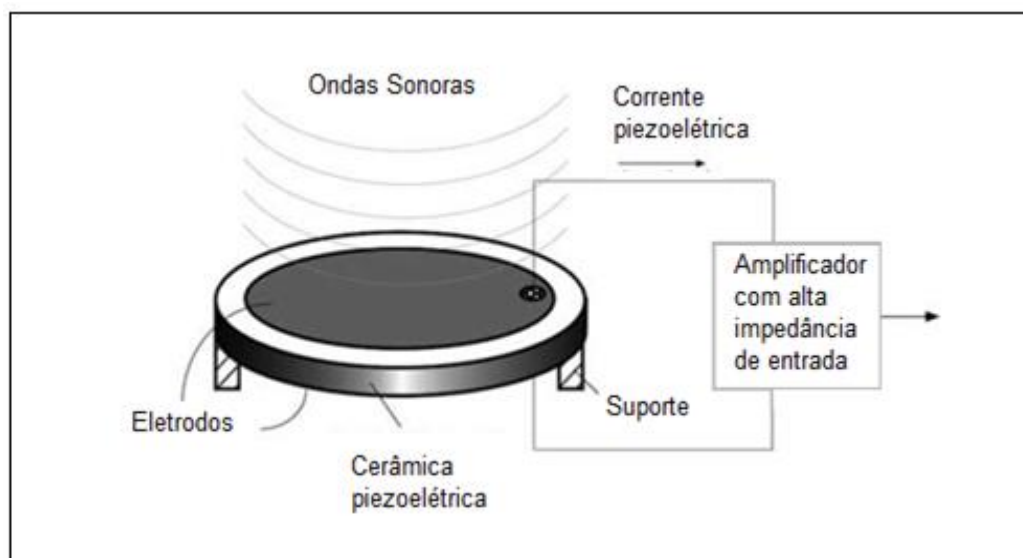
Segundo Vives, (2004) “A palavra piezoelectricidade vem do grego e significa “Eletricidade por pressão” (Piezo significa pressão). Este nome foi proposto por Hankel em 1881 um ano após sua descoberta. ”

Existem cristais cuja superfície adquire cargas elétricas sobre deformações. Esses cristais são chamados de piezoelétricos. Uma vez que a deformação em si não pode alterar a carga total do cristal, as cargas induzidas resultantes da

deformação possuem sinais opostos em diferentes partes da superfície. Dentre estes cristais pode-se citar o Quartzo, Turmalina, Sal de Rochelle.

Apenas cristais iônicos podem possuir propriedades piezoelétricas. Esse fenômeno ocorre quando uma subrede de íons positivos do cristal é pressionada por uma força externa com intensidade diferente da força aplicada sobre a subrede de íons negativos. Como resultado os íons positivos e negativos são deslocados uns em relação aos outros, o que leva à polarização do cristal e o aparecimento de cargas superficiais. Para uma primeira aproximação, considera-se a deformação diretamente proporcional a polarização e conseqüentemente a polarização diretamente proporcional a força externamente aplicada. Assim pode-se medir a diferença de potencial entre as faces opostamente carregadas e esta informação pode ser utilizada para se estimar a deformação e a força aplicada. Como exemplos de aplicação desse material citam-se os transdutores piezoelétricos utilizados para medir pressões de variação rápida. São utilizados, também, na área da automação e telemetria, além de microfones. (MATVEEV, 1975, p. 187).

O efeito piezoelétrico pode ser usado para a fabricação de microfones simples, pois é um conversor direto de vibração mecânica em carga elétrica. Sendo que o material mais utilizado neste tipo de sensor é a cerâmica piezoelétrica, que pode trabalhar com uma alta frequência como limite operacional. Esta é a razão de os sensores piezoelétricos serem utilizados para transdução de ondas ultrassônicas.



**Figura 15 - Microfone piezoelétrico.**  
Fonte: Fraden (2010, p.436).

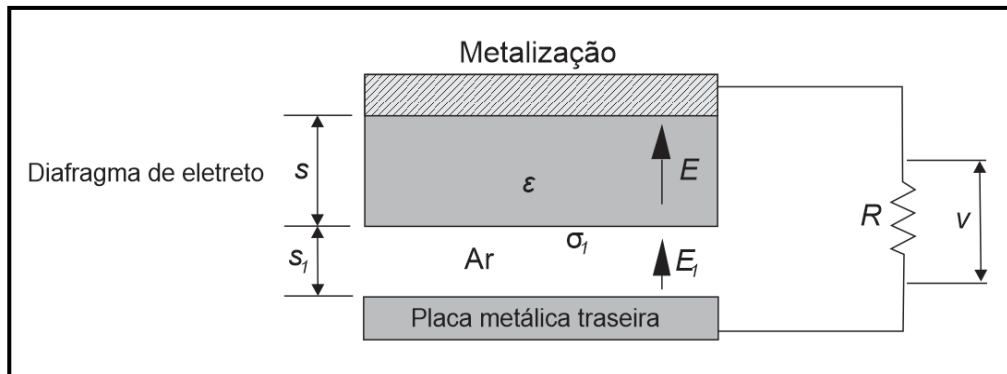
O sensor Piezoelétrico consiste de um disco de cerâmica piezoelétrica com dois eletrodos inseridos em seus lados opostos. Os eletrodos são conectados por fios ou ainda por solda. E, uma vez que a impedância elétrica de saída desses microfones é muito alta, se faz necessário um amplificador com alta impedância de entrada, como é ressaltado na Figura 15. (Fraden, 2010, p. 436).

e. Microfones de Eletreto:

Quando uma subrede de íons positivos, em um material piezoelétrico, é deslocado em relação à subrede de íons negativos, no estado de equilíbrio termodinâmico. Como resultado, esses cristais são polarizados na ausência de um campo elétrico externo. Portanto esses cristais possuem uma polarização elétrica espontânea.

É comum a presença desta polarização espontânea ser disfarçada por cargas superficiais livres, induzidas nas áreas circundantes da superfície do cristal pelo campo elétrico resultante da polarização citada. Este processo ocorre enquanto o campo elétrico é completamente neutralizado, isto é até que a presença de polarização espontânea seja totalmente mascarada. No entanto, a medida que a temperatura do material muda, por exemplo como resultado de aquecimento, as subredes iônicas começam a se deslocar uma em relação a outra, o que causa uma mudança espontânea na polarização, e as cargas elétricas aparecem na superfície do cristal. O fenômeno de aparecimento dessas cargas chama-se efeito piroelétrico, e os cristais em que se apresentam são chamados de cristais piroelétricos. É importante lembrar que todo o cristal piroelétrico é também material piezoelétrico, mas a recíproca não é verdadeira. (MATVEEV, 1975, p. 189).

Segundo Fraden (2010, p. 437), o eletreto é um material de características muito parecidas com os materiais piroelétricos e piezoelétricos, citados no parágrafo anterior e no item “d”, respectivamente. Na realidade estes materiais são todos eletretos com propriedades piroelétricas ou piezoelétricas aprimoradas. Um eletreto é um material dielétrico cristalino permanentemente polarizado. A primeira aplicação de eletretos em microfones e fones de ouvido ocorreu em 1928. Um microfone de eletreto é um transdutor eletrostático que consiste de um diafragma de eletreto metalizado e uma placa traseira separada do diafragma por um entreferro. Conforme se apresenta na figura 16:



**Figura 16 - Estrutura geral de um microfone de eletreto.**  
**Fonte: Fraden (2010, p.437).**

O diafragma e placa traseira são conectados através de um resistor “R” sobre o qual há uma tensão “V” que pode ser amplificada e utilizada como sinal de saída. Sabe-se que o eletreto é um dielétrico permanentemente polarizado, logo a densidade de carga “ $\sigma_1$ ” em sua superfície é constante e aplica no entreferro um campo elétrico “ $E_1$ ”. Quando a onda sonora incide sobre o diafragma, este deflete para baixo reduzindo a espessura do entreferro “ $s_1$ ” de um valor “ $\Delta s$ ”.

O microfone de eletreto difere de outros detectores similares pelo fato de não necessitar de uma tensão contínua (DC) para polarização. Para comparação, cita-se que um microfone condensador, para as mesmas características de dimensões e sensibilidade, necessitaria de uma tensão de polarização da ordem de 100 V. De modo geral o microfone de eletreto apresenta muitas características boas como uma grande faixa de frequência de operação que vai de  $10^{-3}$  Hz até aproximadamente 100 MHz. Apresentam também uma resposta a frequência plana (com  $\pm 1$ dB), baixa distorção harmônica, baixa sensibilidade às vibrações, bom impulso de resposta, e insensibilidade a campos magnéticos. (Fraden,2010, p. 438).

#### f. Microfones Dinâmicos:

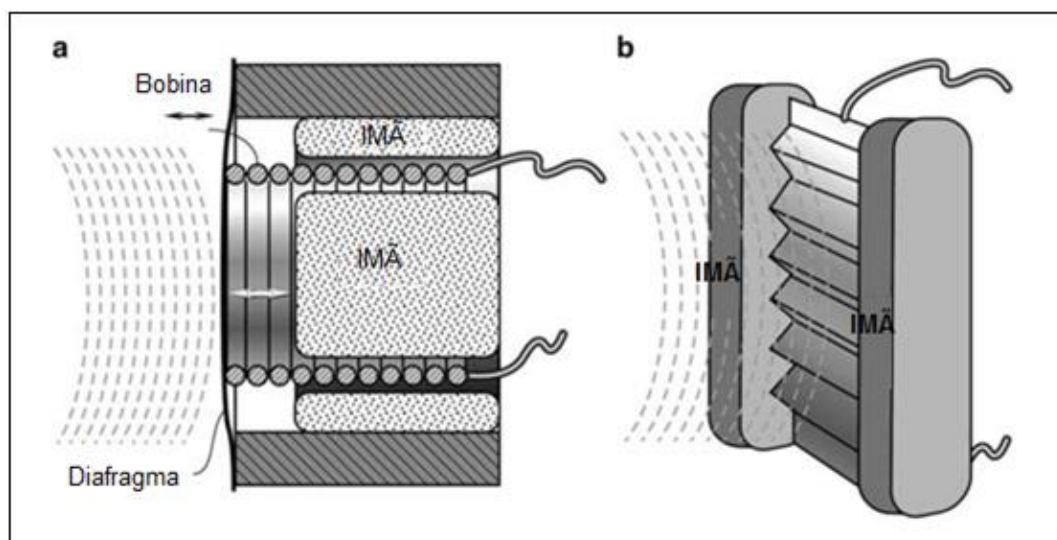
Os microfones dinâmicos, apresentados na figura 17a, funcionam através da indução eletromagnética, sendo robustos, resistentes à umidade e acessíveis em termos de preço comercial. Esses fatores associados ao seu potencial de alto ganho de sinal sonoro (depois do *feedback* ser aplicado) tornam estes equipamentos ideais para o uso em palcos.

Os microfones de bobina móvel possuem o mesmo princípio de funcionamento de um alto-falante, porém estes fazem o processo inverso. Uma

pequena bobina móvel, posicionada em um campo magnético de um imã permanente, é acoplada ao diafragma do microfone. Quando o som entra pelas ranhuras do microfone as ondas sonoras movem o diafragma, e quando o diafragma vibra, a bobina se move no campo magnético, produzindo uma tensão variável nos terminais da bobina. Assim o movimento da bobina dentro do imã permanente gera uma tensão induzida e subsequentemente uma corrente relacionada diretamente com a taxa de variação do campo magnético.

Uma única membrana dinâmica não responde linearmente a todas as frequências sonoras. Alguns microfones, por esta razão, utilizam múltiplas membranas para diferentes partes do espectro de áudio, combinando então o resultado dos sinais. Entretanto, combinar múltiplos sinais corretamente é um processo difícil e acaba se tornando um investimento financeiro mais alto.

Nessa classe de microfones existem ainda os microfones de faixa, conforme a figura 17b. Estes equipamentos utilizam faixas metálicas corrugadas finas que ficam suspensas no campo magnético. A faixa é eletricamente conectada à saída do microfone, e a vibração desta, na presença de um campo magnético, gera um sinal elétrico. Seu princípio de funcionamento é o mesmo do que os microfones magnéticos de membrana, entretanto os do tipo faixa podem detectar o som em um padrão bidirecional, pois a faixa fica exposta à incidência sonora tanto pela frente como por trás. (Fraden, 2010, p. 439).



**Figura 17 - Microfone Dinâmico: a) de Bobina móvel; b) de faixa móvel.  
Fonte: Fraden (2010, p.439)**

g. Detectores acústicos de Estado Sólido:

Atualmente, o uso de sensores acústicos tem uso mais amplo do que apenas a detecção de ondas sonoras se propagando no ar. Particularmente estes se tornam populares para a detecção de vibrações mecânicas na fabricação de sensores como equipamentos para detecção de microbalanços. As aplicações podem se estender desde medição de pequenos deslocamentos, tensões mecânicas, força, temperatura, etc. Sendo que todos os sensores para estas aplicações se basearão em movimentos elásticos nas partes sólidas dos sensores. Geralmente os sensores acústicos nestas aplicações fazem parte de um conjunto de estruturas que constituem em conjunto um sensor complexo (Fraden, 2010, p.440).

### 2.8.3 Alto-falantes

Segundo o Edison Tech Center, 2015, o alto-falante tipo dinâmico padrão, amplamente utilizado na atualidade, foi construído pela primeira vez em 1920 e utiliza um campo magnético para movimentar uma bobina ou um ímã, que por sua vez são conectados a um diafragma.

O primeiro alto-falante eletrônico foi desenvolvido por Johann Philipp Reis, um professor em Friedrichsdorf, em 1861 na Alemanha. O aparelho era capaz de produzir ruídos e consistia apenas de um experimento. Em 1876, Alexander Graham Bell tentou construir um alto-falante baseado no princípio de Reis. Entretanto, nesta época, a base de conhecimento na física e engenharia não era suficiente para que este cientista ou qualquer outro contemporâneo desenvolvesse um alto-falante eletrodinâmico. A necessidade de telegrafar sinais por longas distâncias e amplificar o sinal posteriormente ajudou no desenvolvimento dos amplificadores, que mais tarde tornam-se componentes importantes dos sistemas de áudio. A ideia de um alto-falante movido a uma bobina eletromagnética foi formulada por Werner Von Siemens em 1877. Entretanto ele não encontrou, devido à tecnologia disponível na época, maneiras de amplificar o som para criar um alto-falante funcional. Finalmente em 1921 C. W. Rice de General Electric (GE) e, E. W. Kellogg da AT&T trabalharam juntos em Schenectady, Nova York, para desenvolver o alto-falante moderno e o primeiro sistema elétrico de amplificação, ilustrado na figura 18.



**Figura 18 - O primeiro protótipo de um alto-falante dinâmico.**  
**Fonte: EdisonTech Center (2015).**

Segundo Øyen (2007, p.10), os alto-falantes convertem sinais elétricos em pressões sonoras audíveis. E esta conversão não é perfeita, por mais que este tipo de equipamento já venha sendo estudado por aproximadamente um século.

#### 2.8.3.1. Cornetas

Segundo Edison Tech Center (2015), as cornetas foram os primeiros dispositivos de amplificação sonora a serem estudados e desenvolvidos. E isto ocorreu principalmente de 1880 até 1920. As cornetas, como a na figura 19, não utilizam eletricidade e sua desvantagem é que estas não podem amplificar muito o som. Dentre alguns dispositivos que utilizavam este equipamento pode-se citar os Fonógrafos e Gramofones. Na figura 20, apresenta-se uma corneta utilizada atualmente para a amplificação do som de *drivers* e alto-falantes contemporâneos.

O desenvolvimento do fonógrafo e do gramofone no final do século XIX trouxe a necessidade do desenvolvimento das cornetas, já que estes equipamentos puramente mecânico-acústicos, a energia sob a forma de pressão disponibilizada em sua saída tinha de ser transferida eficientemente para o ar, e inclusive já se sabia que com a utilização de uma corneta possibilita-se um maior nível sonoro ao

som produzido. Talvez o estudo mais significativo sobre a tecnologia das cornetas desenvolveu-se por Arthur Gordon Webster em 1919, abordando conceitos de impedância acústica e analisando várias formas e estruturas de cornetas. (Kolbrek, 2014).

Segundo Kolbrek (p.1, 2008), existem dois aspectos principais para a utilização de cornetas em elementos eletroacústicos. E são eles o fato de que se aumentando o carregamento do driver sobre o ar livre, aumenta-se a eficiência do transporte da pressão gerada na saída do equipamento conversor para o ar. Juntamente com a característica de que se concentrando o som, em um certo ângulo sólido, aumente-se também a intensidade de nível sonoro na saída do dispositivo.

A teoria das cornetas é base para muitos estudos e simplificações que podem ser utilizadas para se obter informações sobre o ambiente onde a onda sonora está se propagando. Entretanto o problema da propagação do som em cornetas é complicado e a sua equação geral não possui solução matemática analítica. A expressão abaixo descreve a equação de onda geral da propagação do som, de amplitudes muito baixas, em três dimensões:

$$\frac{\partial^2 \phi}{\partial t^2} - c^2 \left( \frac{\partial^2 \phi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \phi}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \phi}{\partial z^2} \right) = 0 \quad (32)$$

Onde:

- $\phi$  é a **velocidade potencial** ( $em \frac{V}{m}$ );
- $S$  é a **área de seção transversal da corneta em "x"** ( $em V$ );
- $k$  é o **número de onda ou frequência esparsa** ( $em \frac{Wb}{s}$ );
- $x$  é a **direção "x"** ( $em m$ );
- $y$  é a **direção "y"** ( $em m$ );
- $z$  é a **direção "z"** ( $em m$ );

Em 1919, A. G. Webster apresentou uma solução para o problema aplicado a propagação do som em cornetas. Isto é possível simplificando-se a equação 32 de um problema de três dimensões para um de uma dimensão. Tudo isto baseado em algumas hipóteses simplificadoras. Assume-se que a energia do som está uniformemente distribuída sobre o plano da frente de onda perpendicular ao eixo da



corneta e considerou-se movimento apenas na direção axial. Como resultado tem-se “A equação da corneta de Webster”.

$$\frac{d^2\phi}{dx^2} + \frac{d \ln(S)}{dx} \cdot \frac{d\phi}{dx} - k^2 \cdot \phi = 0 \quad (33)$$



**Figura 19 - Corneta usada em fonógrafos e gramofones.**  
Fonte: Edson tech center (2015).



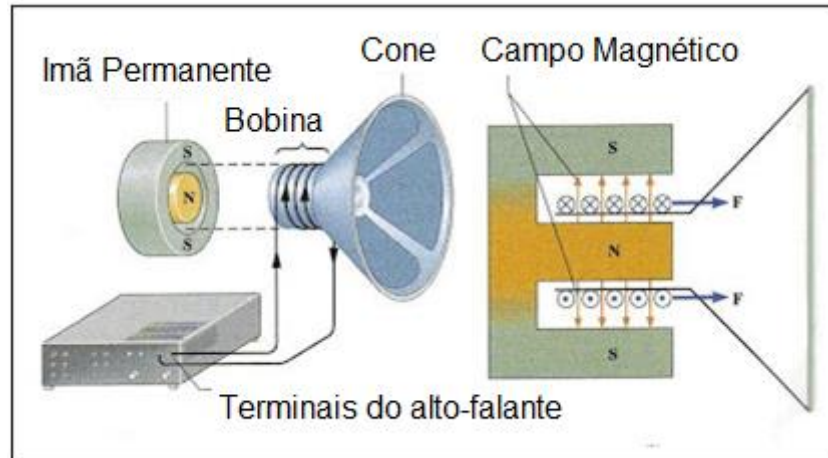
**Figura 20 - Cornetas atualmente comercializadas.**  
Fonte: Infinity som (2015).

### 2.8.3.2. Alto-falantes Eletrodinâmicos

Segundo Falcone (1979, p.136), o dispositivo eletromecânico mostrado na figura 21 é do tipo dinâmico, tendo o seu funcionamento através do movimento da bobina móvel.

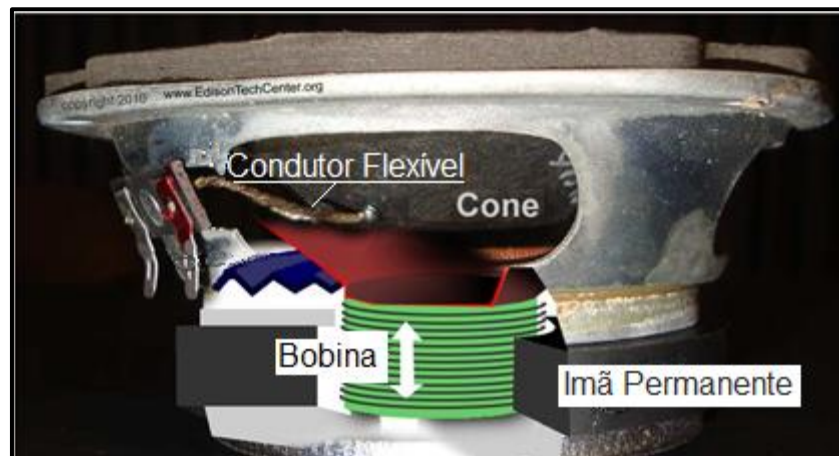
Se injetarmos uma corrente, por meio de uma tensão alternada aplicada em seus terminais, ele vibrará e cone imprimirá ao ar uma pressão oscilatória acústica, a

qual se constitui numa emissão de energia radiante sonora. Assim funcionando ele constitui o alto-falante magnético, representado na figura 21.



**Figura 21 - Interação do conjunto magnético, bobina móvel percorrida por corrente, magnetização do ímã permanente e força resultante em um alto-falante.**

Fonte: Lima; Marques; Vargas (2007).



**Figura 22 - Alto-falante eletrodinâmico.**

Fonte: Edson Tech Center (2015).

Inversamente se o cone é submetido a uma pressão acústica que imponha uma vibração à bobina móvel no campo magnético, o dispositivo fornecerá uma tensão de saída e uma corrente elétrica a uma carga aplicada aos seus terminais, transformando-se em um microfone do tipo magnético. Entretanto, o microfone mais utilizado em aplicações industriais e populares é o condensador ou de capacitância que possui acoplamento por campo elétrico, conforme descrito na seção 1.2.1.1 b deste capítulo.

Na figura 22 está representado o alto-falante em corte longitudinal. O campo magnético, radial no entreferro, tanto pode ser produzido por uma bobina enrolada sobre o pino central da estrutura, excitada por uma fonte de corrente contínua, como por um material específico para ímãs permanentes. Como por exemplo, ligas de alumínio, níquel e cobalto.

A bobina móvel apresenta uma resistência elétrica  $R$ , uma indutância  $L$  e possui uma força eletromotriz induzida por sua movimentação no campo magnético. A capacitância para as frequências usuais de áudio pode ser desprezada para uma primeira análise. O diagrama da figura 23 mostra o sistema eletromecânico de parâmetros concentrados, tanto do lado elétrico como do lado mecânico, onde  $m, r$  e  $k$  são, respectivamente, a massa, o coeficiente de atrito viscoso e o inverso da complância do cone mais a bobina móvel. A equação do lado elétrico (lei das tensões de Kirchhoff) e sua transformada “ $s$ ” para condições iniciais nulas são respectivamente:

$$V(t) = R \cdot i(t) + L \cdot \frac{di(t)}{dt} + e(t) \quad (34)$$

Onde:

- $V$  é a tensão de saída do alto – falante no tempo (*em V*);
- $R$  é a resistência elétrica da bobina móvel (*em  $\Omega$* );
- $L$  é a indutância da bobina móvel (*em H*);
- $i$  é a corrente induzida na bobina móvel (*em A*);
- $e$  é a tensão interna gerada no alto – falante (*em V*).

E

$$V(s) = R \cdot I(s) + s \cdot L \cdot I(s) + E(s) \quad (35)$$

Sendo  $f(t)$  a força mecânica de excitação do cone, aplica-se no lado mecânico a segunda lei de Newton, em função da velocidade  $u(t)$  da bobina móvel.

$$f(t) = m \cdot \frac{du(t)}{dt} + r \cdot u(t) + k \cdot \int u(t) \cdot dt \quad (36)$$

Onde:

- $f$  é a força mecânica de excitação do cone (em  $N$ );
- $m$  é a massa do cone (em  $Kg$ );
- $u$  é a velocidade da bobina móvel (em  $\frac{m}{s}$ );
- $r$  é o coeficiente de atrito viscoso (em  $\frac{N.s}{m}$ );
- $k$  é o inverso da compilância do conjunto cone e bobina (em  $\frac{N}{m}$ );

Assim o termo " $r \cdot u(t)$ ", presente na equação 36, pode ser interpretado como a força que engloba a resistência do atrito viscoso mais a força útil do cone. Logo o coeficiente " $r$ " representa o coeficiente de dissipação total do conjunto bobina e cone.

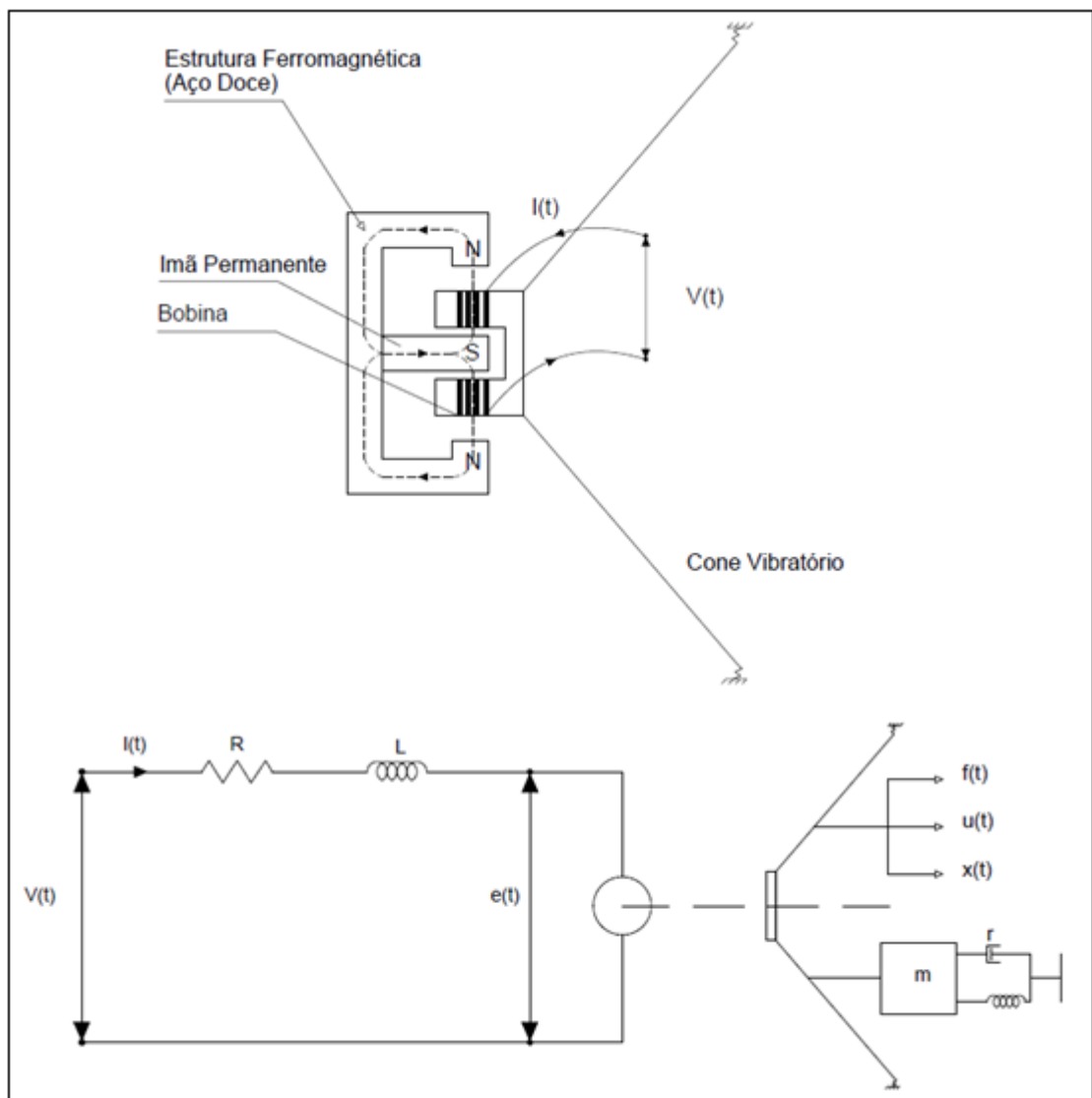


Figura 23 - Corte esquemático do alto-falante dinâmico, magnético.  
Fonte: Falcone (2010, p.137)

E no domínio da frequência:

$$F(s) = sm.U(s) + r.U(s) + \frac{1}{s.c}.U(s) \quad (37)$$

Onde:

- $c$  é a *compilância do conjunto cone – bobina* (em  $\frac{N}{m}$ ).

Notas:

Alguns autores desprezam o termo correspondente ao elemento elástico. Isto é válido para pequenas excursões da bobina móvel. Nos casos de deslocamentos mais amplos, deve ser considerada a força elástica de restauração do cone. Que é proporcional ao deslocamento ( $\int u(t).dt$ ). (Falcone, 1979, p. 137).

A equação diferencial do movimento apresentada anteriormente foi desenvolvida em função da velocidade e não em função do deslocamento, já que a função de transferência mais significativa é a da velocidade relacionada com a tensão aplicada. A potência radiante sonora, no caso de uma vibração senoidal, é, na prática, aproximadamente proporcional ao quadrado da velocidade imposta ao cone, e, sendo a potência o produto da força pela velocidade, assim conclui-se que a força imposta ao cone é do tipo viscoso, ou seja, proporcional a velocidade.

$$e(t) = B.l.u(t) \quad (38)$$

Onde:

- **$B$  é a densidade de fluxo magnético – falante (em  $T$ );**
- **$u$  é a velocidade da bobina móvel (em  $m/s$ );**
- **$l$  é o comprimento de condutor bobinado (em  $m$ );**
- **$e$  é a tensão interna gerada no alto – falante (em  $V$ ).**

E no domínio da frequência

$$E(s) = B.l.U(s) \quad (39)$$

E a expressão da força mecânica no cone é:

$$f(t) = B.l.i(t) \quad (40)$$

Onde:

- $f$  é a força mecânica de excitação do cone (em N).

E no domínio da frequência:

$$F(s) = B.l.I(s) \quad (41)$$

Onde “ $l$ ” é o produto do número de espiras pelo seu perímetro médio e “ $B$ ” é a densidade de fluxo magnético na região da bobina. A solução simultânea dessas quatro equações fornece a função de transferência  $U(s)/V(s)$  substituindo-se as equações 30, 31, 32, 33, nas equações acima. Tem-se:

$$V(s) = R.I(s) + s.L.I(s) + B.l.U(s) \quad (42)$$

E

$$B.l.I(s) = s.m.U(s) + r.U(s) + \frac{1}{s.c}.U(s) \quad (43)$$

Eliminando-se a corrente entre essas duas expressões, resulta:

$$V(s) = \frac{(R + sL) \cdot \left( sm + r + \frac{1}{sc} \right)}{B \cdot l} \cdot U(s) + B \cdot l \cdot U(s) \quad (44)$$

$$G(s) = \frac{U(s)}{V(s)} = \frac{B \cdot l}{(R + sL) \cdot \left( sm + r + \frac{1}{sc} \right) + (B \cdot l)^2} \quad (45)$$

A equação acima descreve a função de transferência velocidade/tensão aplicada ao alto-falante, que pode ser transformada na resposta em frequência apresentada pela equação 46:

$$G(j\omega) = \frac{\dot{U}}{\dot{V}} = \frac{B \cdot l}{(R + j\omega l) \left( r + j\omega m + \frac{1}{j\omega c} \right) + (B \cdot l)^2} \quad (46)$$

Onde:

- $\omega$  é a frequência angular (*em rad/s*);

Utilizando-se o conceito de impedâncias mecânicas e elétricas, tem-se:

$$\frac{\dot{U}}{\dot{V}} = \frac{B \cdot l}{Z_e \cdot Z_m + (B \cdot l)^2} \quad (47)$$

Onde:

- $Z_e$  é a impedância elétrica (*em  $\Omega$* );
- $Z_m$  é a impedância mecânica (*em  $\Omega_m$* ).

Se o deslocamento for considerado muito pequeno, pode-se desprezar o termo elástico da equação 46, apresenta-se um sistema composto apenas por dois elementos reativos, ou de armazenagem de energia:  $l$  e  $m$ . (Falcone, 1979).

$$\frac{\dot{U}}{\dot{V}} = \frac{B.l}{(R + j\omega L).(R + j\omega m) + (B.l)^2} \quad (48)$$

Elaborando a expressão, tem-se:

$$\frac{\dot{U}}{\dot{V}} = \frac{B.l}{L.m} \cdot \frac{1}{\frac{Rr+(B.l)^2}{Lm} + j\omega \cdot \frac{Rm+Lr}{Lm} \cdot \omega^2} \quad (49)$$

Na sequência, objetiva-se encontrar a impedância de entrada " $Z_{ent}(j\omega)$ " oferecida pelo transdutor à fonte de tensão. Elimina-se a velocidade  $U(s)$  nas equações 48 e 49. Logo:

$$\dot{V} = R.\dot{I} + j.\omega.L.\dot{I} + B.l \cdot \frac{B.l.\dot{I}}{r + j\omega.m + \frac{1}{j\omega.c}} \quad (50)$$

Pode-se observar que o termo  $\frac{(B.l)^2.\dot{I}}{r + j\omega.m + \frac{1}{j\omega.c}}$  nada mais é que a forma fasorial

da f.e.m. representada por " $E_a$ ", que somada a  $(R + j\omega L).\dot{I}$  iguala-se a tensão de entrada  $\dot{V}$ . Esse é o termo eletromecânico da tensão " $V$ " de entrada, e é nele que se desenvolve o processo de conversão eletromecânica. O termo  $(R + j\omega L).\dot{I}$  é correspondente aos parâmetros elétricos do transdutor, e é responsável apenas por quedas de tensão, não tomando parte na conversão eletromecânica de energia. Representa a parte passiva do circuito elétrico. Na sequência, volta-se a expressão de  $\dot{V}$  e divide-se esta por  $\dot{I}$ , Tem-se:

$$Z_{ent} = (R + j.\omega.L) + \frac{(B.l)^2}{r + j\omega.m + \frac{1}{j\omega.c}} \quad (51)$$

Onde:

- $Z_{ent}$  é a impedância de entrada do alto – falante.



$$Z_{ent} = Z_e + \frac{(B \cdot l)^2}{Z_m} = Z_e + Z_{e \cdot an} \quad (52)$$

Onde:

- $Z_m$  é a impedância mecânica (em  $\Omega_m$ );
- $Z_e$  é a impedância elétrica (em  $\Omega$ ).

É interessante notar a contribuição da impedância mecânica na formação da impedância elétrica desse conversor. Enquanto a impedância elétrica influencia diretamente em " $Z_{ent}$ ", enquanto a impedância mecânica influi inversamente nesta impedância. O termo " $Z_{e \cdot an}$ " é um termo que tem relação com a f.e.m. de movimento, conforme a equação 51. Se o conjunto bobina mais cone fosse infinitamente amortecido ( $r \rightarrow \infty$ ) ou infinitamente reativo, por ser infinitamente pesado ( $m \rightarrow \infty$ ) ou infinitamente rígido ( $k \rightarrow \infty$  ou  $c \rightarrow 0$ ), não haveria deslocamento nem f.e.m. e a impedância oferecida na entrada seria apenas a elétrica. (Falcone, 1979, p. 139).

A expressão da impedância " $Z_{ent}$ " sugere a representação por um circuito elétrico do comportamento desse transdutor do ponto de vista elétrico. Da figura 24 vem:

$$Z_{ent} = Z_e + \frac{1}{Z_m / (B \cdot l)^2} \quad (53)$$

Segundo Falcone, analisando-se o segundo termo do segundo membro, sendo dimensionalmente uma impedância, o denominador deve ser uma admitância. Logo:

$$\dot{Y} = G' + j\omega C' + 1/j\omega L' \quad (54)$$

Onde:

- $Y$  é a admitância elétrica (*em S*);
- $G'$  é a condutância elétrica (*em S*);
- $j\omega C'$  é a susceptância capacitiva (*em S*);
- $1/j\omega L'$  é a susceptância indutiva (*em S*).

Assim:

$$Z_{e\ an} = \frac{1}{\dot{Y}} = \frac{1}{\frac{r}{(B.l)^2} + \frac{j\omega m}{(B.l)^2} + \frac{1}{j.\omega.C(B.l)^2}} \quad (55)$$

Logo o circuito elétrico equivalente de um alto-falante dinâmico pode ser representado pela figura 24:

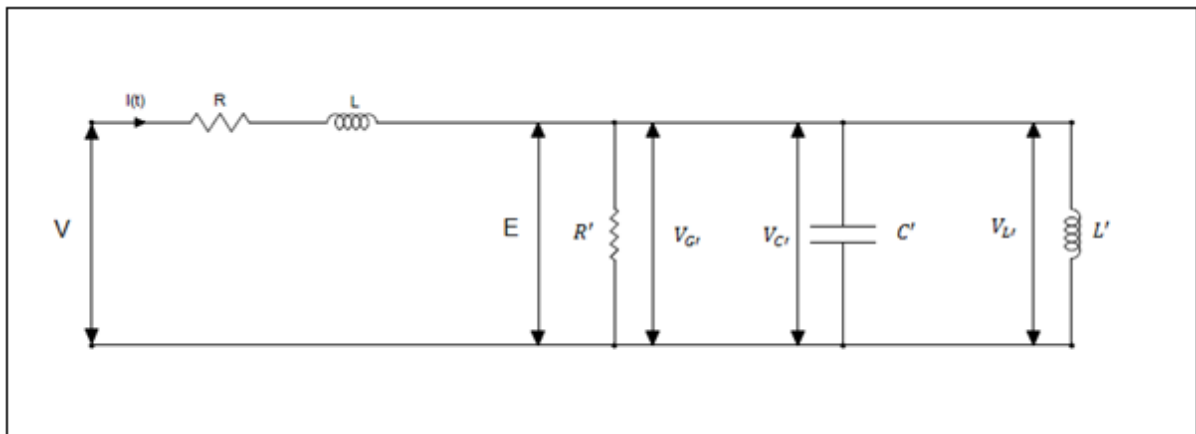


Figura 24 - Circuito elétrico equivalente de um alto-falante dinâmico, magnético.  
Fonte: Falcone (2010, p.139)

Quanto aos tipos de alto-falantes eletrodinâmicos Haical (2003, p.14) afirma que existem os *woofers* e *subwoofers* que são propícios para sons graves. Sua faixa de resposta a frequência situa-se entre 40 Hz e 1 kHz e suas dimensões são as maiores dentre estes equipamentos. Os *mid-range* possuem faixa de trabalho entre 200 Hz e 7 kHz, possuem uma forma construtiva similar aos anteriores, porém são mais leves, o que possibilita a extensão da sua faixa de resposta. Existem, também, os *full-range*, que cobrem entre 100 Hz e 10 kHz. E finalmente os *tweeters*, que são

ideais para respostas aos agudos e possuem frequência operacional entre 5 kHz e quase 20 kHz, que é o final da faixa audível.

## 2.9 TÉCNICAS DE MEDIÇÃO

### 2.9.1 Nível Sonoro

Segundo Halliday, Resnick e Walker (2002, p.159), intensidade de uma onda sonora em uma superfície é a taxa média por unidade de área com a qual a energia contida na onda atravessa a superfície ou é absorvida pela superfície. Para a obtenção do valor da intensidade sonora, será preciso a utilização de um equipamento que realize a medição dos níveis de pressão sonora, ou seja, a utilização de um decibelímetro de precisão.

O nível sonoro  $\beta$  pode ser definido de acordo com a equação 56: (Halliday, 2002, p. 159)

$$\beta = (10) \log \frac{I}{I_0} \quad (56)$$

A abreviação de decibel é dB, unidade de nível sonoro.  $I_0$  é uma intensidade de referência cujo valor é  $10^{-12} \text{ W/m}^2$ . Esse valor foi escolhido porque está próximo do limite inferior da faixa de audição humana. O valor de  $I$  é a intensidade de uma onda sonora. O valor de  $\beta$  aumenta 10 dB toda vez que a intensidade sonora aumenta de uma ordem de grandeza (um fator de 10). (Halliday, 2002, p. 159).

### 2.9.2 Pressão Sonora

O número de oscilações completas de uma fonte em um segundo é caracterizado por sua frequência, sendo sua medida o Hertz. A frequência sonora

corresponde aos conceitos de sons graves, que possuem baixa frequência e agudos, com alta frequência. Ondas de pressão que correspondem a esses conceitos são percebidas pelo ouvido humano como sons, sendo chamadas de ondas de pressão sonora. (NOGUEIRA; RAMOS; PEIXOTO, 2011, p.518).

A pressão sonora é uma medida da força que as moléculas do meio aplicam umas sobre as outras, como consequência da vibração da fonte. A pressão sonora é medida em Pascal (Pa) pelo Sistema Internacional de Unidades. (NEPOMUCENO, 1997, p.190).

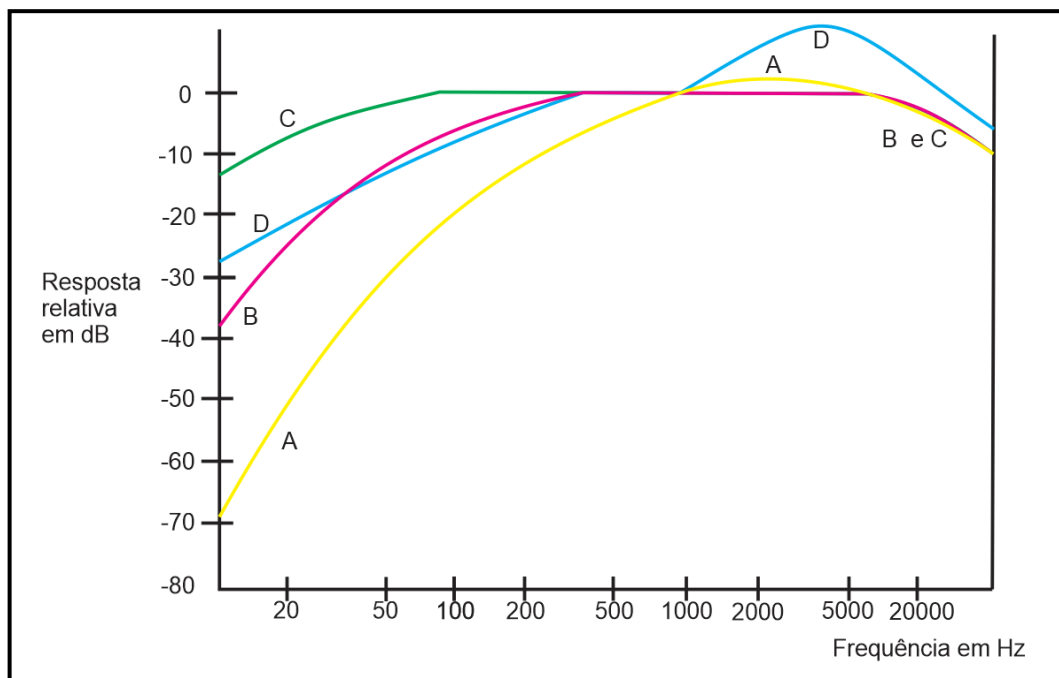
O ouvido humano é sensível a uma faixa de pressão sonora que varia  $10^6$  de vezes e uma faixa de intensidade que varia  $10^{12}$  de vezes. Por se tratar de faixas de valores altas, o uso da escala em decibel (dB) para representar essa faixa de percepção aos níveis sonoros mostra-se apropriada, já que a escala é logarítmica e adimensional, conseguindo assim, comprimir todas as faixas de frequências em pouco mais de uma centena de decibéis. As medidas em dB estão sempre relacionadas a um valor referência e para a pressão sonora o valor de referência é  $2 \times 10^{-5} \text{ Pa}$ , valor que corresponde ao limiar de audibilidade humana. As medidas de som em **dB** que utilizam essa referência são chamadas de nível de pressão sonora (NPS) (NOGUEIRA; RAMOS; PEIXOTO, 2011, p.518).

### 2.9.3 Medidores de Nível de Pressão Sonora

Os medidores de Nível de Pressão Sonora (NPS) capturam a pressão absoluta através de um microfone, convertendo em um número relativo disposto em decibéis de nível de pressão sonora (dBNPS). Para tornar as medidas de NPS próximas da sensação do ouvido humano, foi criada as curvas de compensação. Na figura 25 é mostrado as curvas de compensação A,B,C e D.

- Curva A: é a curva que melhor se aproxima da resposta ao ouvido humano para baixas frequências. Para frequências abaixo de 1 kHz a curva tem uma atenuação significativa. O nível relativo é 0 na frequência de 1000 Hz. De 1000 Hz até 5000 Hz a curva volta a ter uma pequena atenuação, amplifica o nível relativo e cai a partir de 5000 Hz.

- Curva B: representa atenuações dos níveis médios e têm pouca variação nas baixas frequências, não tendo nenhuma amplificação. Na faixa de 300 Hz a 3000 Hz a resposta relativa é 0, não tendo nenhuma atenuação na curva.
- Curva C: é a curva que apresenta menor atenuação nas baixas frequências. Na faixa de 100 Hz a 3000 Hz apresenta incidência sobre o ruído emitido nulo. É recomendado a utilização para altos níveis de pressão sonora. Usado em monitoramento de impactos.
- Curva D: Possui baixa atenuação para baixas frequências e atenuação mais acentuada para altas frequências. Na faixa de 300 Hz a 1000 Hz possui resposta relativa 0. Na faixa de 3000 Hz a 5000 Hz volta a ter uma atenuação mais significativa. É recomendado para altos níveis de pressão sonora, acima de 120 dB, como por exemplo em turbinas de avião. (FUDOLI, 2012, p.11).



**Figura 25 - Curvas de Compensação para Medidas do Nível de Pressão Sonora.**  
**Fonte: Magrab(1975).**

### 2.9.3.1. Decibelímetro

Decibelímetro é um equipamento para a medição de intensidade da pressão sonora. Um medidor típico é composto por um microfone para captar o som e

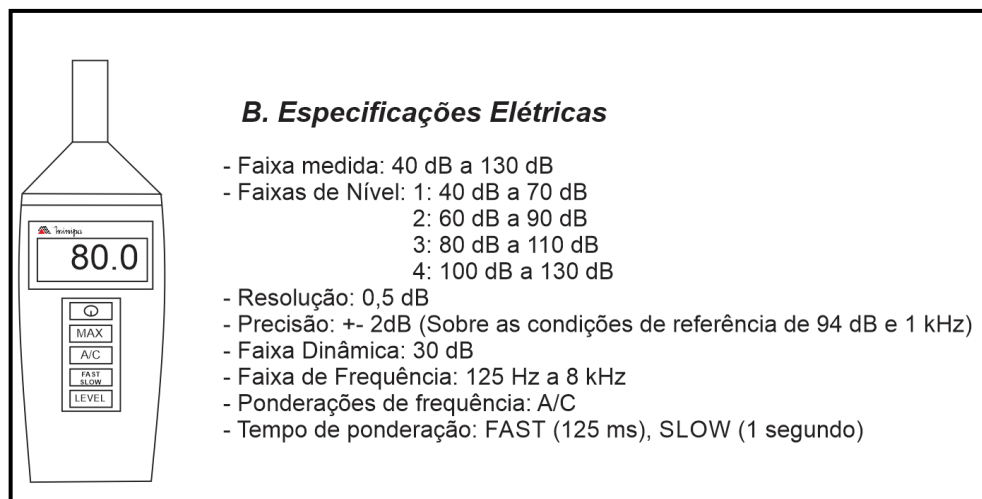
convertê-lo em um sinal elétrico, seguido por um circuito eletrônico para funcionamento com esse sinal de modo que as características desejadas possam ser medidas. O circuito eletrônico pode ser ajustado para a leitura do nível da maior parte das frequências em que o som seja medido ou a intensidade das bandas de frequência selecionadas. A corrente alternada do sinal recebido pelo microfone deve ser convertida para uma corrente contínua e uma constante de tempo deve ser incorporada para calcular a média do sinal. A constante selecionada depende da finalidade para a qual o instrumento é utilizado. (ENCYCLOPEDIA BRITANNICA).

Os decibelímetros podem ser digitais ou analógicos. A grande maioria dos aparelhos encontrados no mercado hoje em dia são digitais.

As padronizações desses equipamentos são regidas pelas seguintes normas:

- IEC 61672 – Padronização para decibelímetros.
- IEC 60942 – Padronização para calibradores de decibelímetros.

Na figura 26 é mostrado um decibelímetro digital da marca Minipa, modelo MSL-1325, onde são apresentados especificações técnicas do equipamento.



**Figura 26- Decibelímetro Digital e suas Especificações Elétricas.**  
**Fonte: Minipa (2015).**

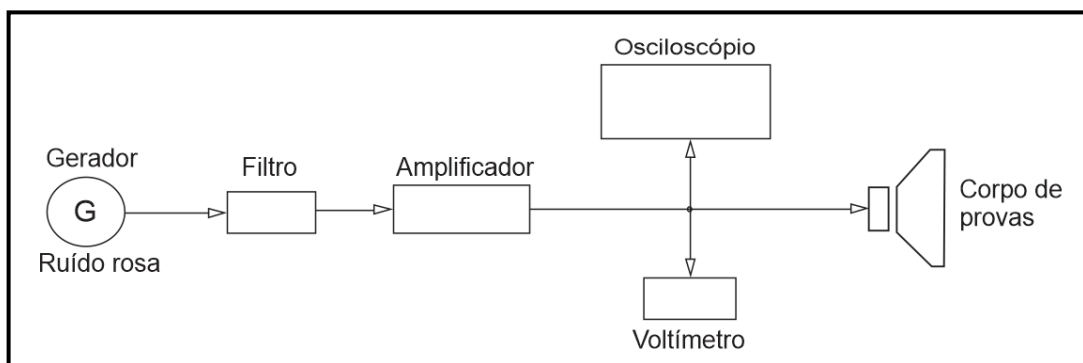
## 2.10 MEDIÇÃO DE TENSÃO E CORRENTE EM ALTO-FALANTE

### 2.10.1 Medição de tensão em alto-falante

A medição de valores de tensão será de vital importância para definir as características de melhor funcionamento dos alto-falantes para conseguir os melhores resultados obtidos possíveis. Com a medição de tensão, pode-se analisar a tensão gerada para diversas faixas de frequências, e assim, desenvolver um estudo das melhores faixas de frequências que obtenham as maiores e menores tensões geradas.

Para isso, será definido uma metodologia baseado na norma NBR 10303. Essa norma tem como objetivo descrever o método de ensaio para determinação de potência RMS admissível e tensão RMS em alto-falantes.

Segundo a norma NBR 10303 deve-se gerar um sinal de ruído, filtrado, conforme o diagrama de blocos mostrado na figura 27.



**Figura 27 - Diagrama de blocos do set-up de medição.**  
**Fonte: NBR 10303 (1988).**

A aparelhagem mostrada no diagrama da figura 27 deve estar montada em uma bancada de ensaio, sendo que as ligações elétricas do osciloscópio e do voltímetro *TRUE RMS* devem estar localizados o mais próximo possível do corpo de prova, a fim de que a resistência ôhmica dos condutores não mascare os resultados do ensaio. (NBR 10303, 1988).

O voltímetro *TRUE RMS* Impac IP-4128B possui uma faixa de medição de frequência de 0,01 Hz a 200 kHz. (Impac, 2015).

Para a medição de tensão, os equipamentos devem estar ligados à trinta minutos, para aquecimento e estabilização do sistema.

O nível de tensão deve ser medido através de um voltímetro *TRUE RMS* com o sinal de ruído-rosa.

Atribui-se o valor de impedância nominal, o valor mínimo de impedância encontrado logo após a frequência de ressonância do alto-falante medido ao ar livre (NBR 10303, 1988).

## 2.11 RESISTORES DE ALTA PRECISÃO

### 2.11.1 Resistência

Segundo Halliday (1996, p.118), quando se aplica a mesma diferença de potencial entre os extremos de duas barras geometricamente iguais, vê-se que as correntes resultantes são muito diferentes. A característica do condutor, relevante na situação, é a sua resistência. A resistência  $R$  é dada por:

$$R = \frac{V}{i} \quad (57)$$

A unidade SI para a resistência que segue da equação 57 é volt por ampère, ou então, ohm( $\Omega$ ).

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).



### 2.11.2 Resistores

Segundo Halliday (1996, p.118), um condutor cuja função num circuito é fornecer uma resistência específica é chamado de resistor. Dada uma diferença de potencial, quanto maior a resistência ao fluxo de carga, menor será a corrente.

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 os 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).

No caso em que será estudado, serão utilizados resistores de alta precisão e baixa potência devido às baixas potências, correntes e tensões, podendo assim, calcular a potência gerada e sua corrente e tensão em seus terminais. No mercado existem resistores disponíveis com precisão de  $\pm 1\%$  e  $\pm 2\%$ .

## 2.12 RUÍDO E TÉCNICAS DE MINIMIZAÇÃO

Os ruídos gerados durante as medições podem vir a ser um grande problema na análise dos dados gerados através da instrumentação de medidas, limitando assim o desempenho de medição. Como será trabalhado em uma faixa de valores muito baixos, qualquer ruído será de grande interferência negativamente durante os experimentos. Para que isso não aconteça, será preciso utilizar técnicas que minimizam esses ruídos gerados.

Segundo Domingos; Weiss; Wolf (2013), o rendimento da conversão sonora para elétrica é de 7,21 % utilizando piezoelétrico, resultando em baixos valores de corrente e potência. O quadro 1 apresenta os valores de tensão RMS, corrente e potência RMS gerados.

|                      | Tensão<br>RMS (V) | Corrente RMS<br>( $\mu$ A) | Potência<br>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                   |

**Quadro 1 - Resumo dos resultados das associações.**  
**Fonte: Domingos, B.C; Weiss, C e Wolf S.C (2013).**

### 2.12.1 Definição de ruído

Ruído é todo sinal indesejado que interfere em uma medição, limitando assim a exatidão do sistema de instrumentação. Podem ser de forma de ruído transmitido, no qual, é recebido com o sinal de origem e não há como distinguir um do outro, ou então, ruído intrínseco ou inerente que pode ser originado dentro dos dispositivos que constituem o circuito. (BALBINOT, 2011, p. 166).

Em qualquer sistema de instrumentação existem dois fatores dominantes que limitam o desempenho: (BALBINOT, 2011, p. 166).

- Ruído aditivo: gerado pelos dispositivos eletrônicos que são utilizados para filtrar e amplificar os sinais.
- Atenuação do sinal: é a redução da amplitude do sinal em função das perdas geradas no meio de transmissão-recepção.

### 2.12.2 Procedimentos para redução de ruído em cabeamento

Os cabos utilizados nos sistemas eletrônicos são essenciais e devem ser bem escolhidos, pois eles atuam como eficientes antenas irradiando ou captando ruído. O acoplamento entre circuitos pode ser representado pelas capacitâncias e indutâncias

entre condutores. Existem três tipos básicos de acoplamento: (BALBINOT, 2011, p. 172).

- Acoplamento capacitivo: resulta da interação dos campos elétricos entre os circuitos.
- Acoplamento indutivo: resulta da interação entre campos magnéticos de dois circuitos.
- Acoplamento eletromagnético: combinação dos campos elétricos e magnéticos.

Em acoplamento capacitivo, a tensão ruído  $V_n$ , pode ser representada por:

$$V_n = j * \omega * R * C * V_1 \quad (58)$$

Onde:

- $V_n$  é a tensão ruído (em V);
- $C$  é a capacitância parasita (em F);
- $R$  é a resistência do circuito em relação a referência (em  $\Omega$ );
- $\omega$  é a frequência angular (em Hz);
- $V_1$  é a tensão na fonte (em V).

A tensão e a frequência da fonte de ruído não podem ser alteradas, portanto, somente dois parâmetros para redução do acoplamento capacitivo podem ser considerados: o circuito receptor operar com baixa resistência  $R$  ou a capacitância  $C$  deve ser reduzida através do posicionamento adequado dos condutores. (BALBINOT, 2011, p.172).

Em acoplamento indutivo é relacionado a campo magnético. Pode-se expressar a equação da tensão ruído como:

$$V_n = j * \omega * B * A * \cos\theta = M * \frac{di}{dt} \quad (5957)$$

Onde:

- $V_n$  é a tensão ruído (em V);
- $M$  é a indutância mútua (em H);
- $I$  é a corrente no circuito da fonte de ruído (em A);
- $\omega$  é a frequência angular (em Hz);

- $B$  é a densidade de fluxo magnético (em T);
- $A$  é a área (em  $m^2$ ).

Para reduzir a tensão ruído,  $B$ ,  $A$  ou  $\cos\theta$  precisam ser reduzidos. A densidade de fluxo pode ser reduzida pela separação física dos circuitos ou trançando os fios da fonte. O  $\cos\theta$  pode ser reduzido através da orientação apropriada da fonte e circuitos receptores. A área do circuito receptor pode ser reduzida pelo uso de condutores trançados entre si. (BALBINOT, 2011, p.173).

O procedimento da tensão ruído tanto em acoplamento capacitivo, como em acoplamento indutivo, pode ser feito através de mudança de parâmetros construtivos do circuito receptor. Portanto, para experimentos em que a tensão ruído seja muito elevada de modo que interfira na medição de tensão e potência, é preciso fazer um estudo de qual o melhor parâmetro do circuito receptor pode ser alterado para que a medição dos experimentos seja satisfatória.

### 3 DESCRIÇÃO DOS EXPERIMENTOS

Nessa etapa do trabalho serão descritos os experimentos realizados com os seguintes transdutores acústicos: *subwoofer*, *woofer* e *tweeter* utilizando cornetas para concentrar as ondas de pressão sonora no receptor. Através dos dados obtidos, será observado o comportamento da conversão de energia sonora para energia elétrica utilizando alto-falantes em diversas faixas de frequência.

#### 3.1 Setup Padrão

Definiu-se como setup padrão de todos os experimentos realizados a disposição e organização dos equipamentos conforme apresentado na figura 28, com o computador conectado na fonte sonora e o transdutor posicionado em frente do emissor, de modo que a fonte e o receptor ficassem com seus cones frente a frente, sem nenhum ângulo de desvio.

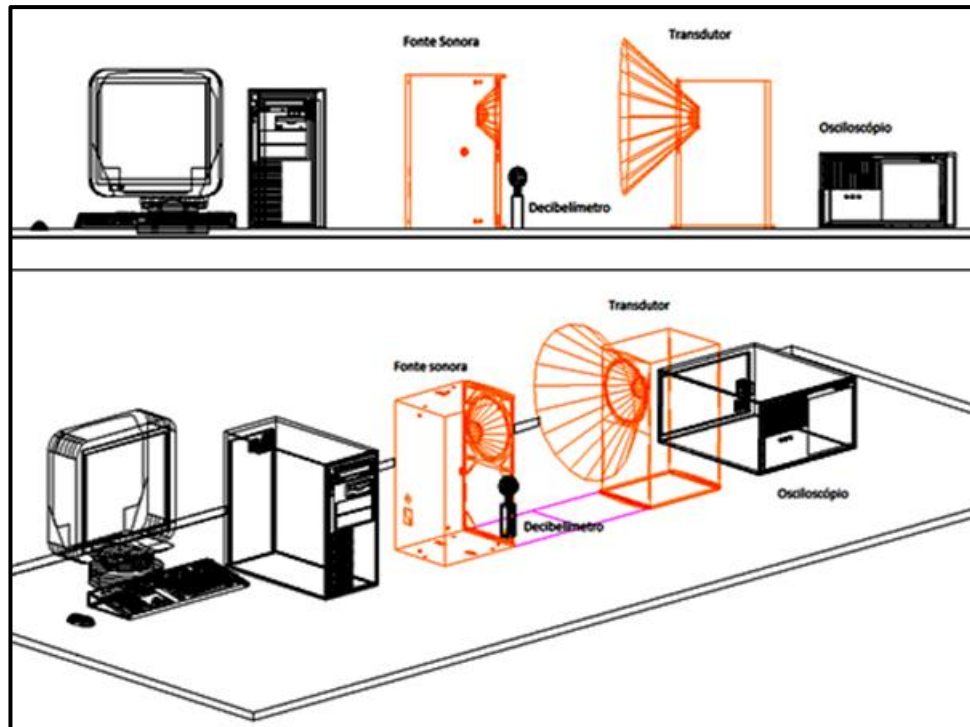


Figura 28 - Setup padrão definido para todos os experimentos.

Acoplou-se uma corneta no dispositivo receptor para a concentração e direcionamento das ondas de pressão, no acoplamento desta ao equipamento deve-se vedar a junção entre a corneta e o alto-falante. Em seguida, foi conectado o osciloscópio nos terminais do alto-falante transdutor, sendo que para a medição de tensão realizou-se uma conexão em circuito aberto, já para corrente, utilizou-se um resistor shunt conectado diretamente nos terminais do dispositivo receptor. O decibelímetro foi posicionado logo na saída da fonte para a medição de intensidade sonora.

Para a simulação do som em diversas faixas de frequência empregou-se um computador munido do *Software Online Tone Generator* representado na figura 29, uma caixa de som de 35W que simula a fonte sonora e um decibelímetro.



**Figura 29 - Software Online Tone Generator.**

**Fonte: Software Online Tone Generator.**

Através da caixa amplificadora conectada ao computador munido do *software* de simulação da onda de pressão, reproduziu-se o som nas faixas de frequências escolhidas. Para cada alto-falante adotaram-se as faixas de frequências de acordo com as especificações do fabricante (*datasheet*) de resposta em frequência. No quadro 2 estão representadas as faixas de frequências de cada transdutor. A variação da intensidade de nível sonoro do som foi controlada através da interface da caixa de som, com auxílio de um decibelímetro posicionado na saída da fonte sonora. Como dispositivo de conversão eletromecânica de energia, foram utilizados os seguintes alto-falantes: *subwoofer* de 25 W, *subwoofer* de 50 W, *woofer* 50 W e *tweeter* 100 W, munidos de uma corneta feita de papel paraná cuja função é direcionar as ondas de pressão.

A distância entre a fonte sonora e o transdutor está representada no quadro 2. Para cada experimento, foi mantido um espaçamento constante para todas as faixas de frequências. Essa distância foi adotada a partir da fonte sonora até a entrada do alto-falante transdutor levando-se em consideração as dimensões das cornetas utilizadas em cada um dos alto-falantes. Para o *subwoofer* 50 W, foi realizado o experimento com duas distâncias de 4,5 cm e 14,5 cm. Nos experimentos realizados

com o *subwoofer* 50 W e *tweeter* 100 W, adotou-se uma intensidade sonora de 95 dB. Variou-se a intensidade sonora nos casos do *subwoofer* 25 W e *woofer* 50 W, como descritos no quadro 2. Estas metodologias foram adotadas para verificar primeiro o comportamento da tensão *RMS* na saída do transdutor com a variação da distância, já no segundo caso para verificação deste comportamento com a variação da intensidade sonora da onda sonora.

| Alto-Falante          | Frequência       | Distância (cm) | Nível sonoro (dB) |
|-----------------------|------------------|----------------|-------------------|
| <i>Subwoofer</i> 25 W | 10 Hz a 1 kHz    | 8              | 95,100,110 e 115  |
| <i>Subwoofer</i> 50 W | 80 Hz a 20 kHz   | 4,5 e 14,5     | 95                |
| <i>Woofers</i> 50 W   | 80 Hz a 6 kHz    | 20             | 95 e 115          |
| <i>Tweeter</i> 100 W  | 3,5 kHz a 20 kHz | 15             | 95                |

**Quadro 2 - Frequência, distância e nível sonoro dos experimentos realizados.**

A captação da forma de onda e dos valores de intensidade de tensão *RMS* produzidos pelo alto-falante foi efetuada através de um osciloscópio digital conectado nos terminais do transdutor em circuito aberto. Já para a aquisição da forma de onda de corrente, empregou-se um resistor *shunt* de 1  $\Omega$  e precisão de +/- 1% conectado nos terminais do alto-falante em circuito fechado com a medição da corrente em cima do resistor. Os valores de corrente foram extraídos apenas para as frequências e as intensidades de nível sonoro que apresentaram os melhores resultados de tensão *RMS*.

Foram realizados experimentos com a utilização de cornetas, com a utilização de uma estrutura semi-esférica e sem a utilização de estruturas de concentração das ondas de pressão para a verificação da influência nos resultados de tensão e potência *RMS* obtidos nos terminais do alto-falante receptor.

## 3.2 Transdução de Energia Sonora em Energia Elétrica utilizando *Subwoofer*

### 3.2.1 Objetivo

Analisar a conversão da energia sonora para energia elétrica utilizando alto-falante *subwoofer* em diversas faixas de frequências e variando a intensidade de nível sonoro.

### 3.2.2 Materiais Utilizados

Os seguintes materiais foram utilizados:

- 1 Alto Falante *Subwoofer* 8 pol, 4  $\Omega$ , 25 W;
- 1 Osciloscópio ICEL OS-2025C 25 MHz;
- 1 Computador com *Software Online Tone Generator*;
- 3 Protetores Auriculares;
- 1 Decibelímetro Hikari HDB882;
- 1 Caixa Amplificadora LL-140;
- 1 Resistor *Shunt* +/- 1%;
- 1 Corneta de papel Paraná 9,5x7x13,5 cm (diâmetro menor x comprimento x diâmetro maior).

### 3.2.3 Metodologia Adotada

Foram realizados dois tipos de experimentos. O primeiro representado na figura 30 com a corneta e o segundo, representado na figura 31, sem a corneta. Para o último, realizou-se apenas a aquisição dos parâmetros elétricos e da forma



de onda de tensão para a frequência que resultou no melhor resultado do experimento utilizando a corneta.



Figura 30 - Setup da conversão de energia sonora para energia elétrica utilizando *subwoofer* com corneta.



Figura 31 - Setup da conversão de energia sonora para energia elétrica utilizando *subwoofer* sem corneta.

### 3.2.4 Resultados

No quadro 3 estão representados os valores de tensão *RMS* e corrente produzidos na transdução da energia sonora emitida através da caixa amplificadora em diversas frequências e intensidades sonoras para sinais elétricos nos terminais do *subwoofer*. Devido a instabilidade do sistema, ocorreu uma variação de tensão *RMS* nas medições. Através da onda de pressão sonora emitida pelo caixa acústica utilizada como fonte, ocorre um deslocamento do cone dentro do *subwoofer* e conseqüente, um deslocamento do *subwoofer*. Devido a esse deslocamento, ocorre uma pequena variação na tensão *RMS* produzida. No quadro 3 são mostrados os valores médios obtidos nas medições de tensão *RMS*.

| COM CORNETA     |                         |                        |               |
|-----------------|-------------------------|------------------------|---------------|
| FREQÜÊNCIA (Hz) | INTENSIDADE SONORA (dB) | TENSÃO <i>RMS</i> (mV) | CORRENTE (mA) |
| 10              | 95                      | 12,52                  | -             |
| 10              | 100                     | 27,58                  | -             |
| 20              | 95                      | 18,58                  | -             |
| 20              | 100                     | 26,57                  | -             |
| 20              | 110                     | 35,77                  | -             |
| 30              | 95                      | 19,02                  | -             |
| 30              | 100                     | 27,19                  | -             |
| 30              | 110                     | 36,02                  | -             |
| 45              | 95                      | 17,82                  | 2,48          |
| 45              | 100                     | 31,38                  | 3,44          |
| 45              | 110                     | 43,19                  | 4,40          |
| 45              | 115                     | 68,13                  | 7,85          |
| 60              | 95                      | 17,78                  | -             |
| 60              | 100                     | 20,04                  | -             |
| 60              | 110                     | 24,65                  | -             |
| 75              | 95                      | 22,56                  | -             |
| 75              | 100                     | 30,81                  | -             |
| 75              | 110                     | 30,97                  | -             |

|     |     |        |       |
|-----|-----|--------|-------|
| 100 | 95  | 13,54  | -     |
| 100 | 100 | 23,75  | -     |
| 100 | 110 | 29,47  | -     |
| 120 | 95  | 28,12  | 1,56  |
| 120 | 100 | 41,48  | 4,23  |
| 120 | 110 | 84,86  | 5,96  |
| 120 | 115 | 144,33 | 15,45 |
| 140 | 95  | 35,05  | 3,17  |
| 140 | 100 | 47,26  | 5,15  |
| 140 | 110 | 52,46  | 6,95  |
| 140 | 115 | 136,2  | 18,20 |
| 160 | 95  | 30,09  | 2,99  |
| 160 | 100 | 46,12  | 6,55  |
| 160 | 110 | 61,20  | 9,89  |
| 160 | 115 | 99,24  | 16,87 |
| 180 | 95  | 10,64  | -     |
| 180 | 100 | 17,26  | -     |
| 180 | 110 | 31,34  | -     |
| 180 | 115 | 41,94  | -     |
| 200 | 95  | 10,86  | -     |
| 200 | 100 | 15,22  | -     |
| 200 | 110 | 28,44  | -     |
| 200 | 115 | 44,34  | -     |
| 300 | 95  | 3,8    | -     |
| 300 | 100 | 6,75   | -     |
| 300 | 110 | 11,10  | -     |
| 300 | 115 | 19,99  | -     |
| 400 | 95  | 1,89   | -     |
| 400 | 100 | 3,79   | -     |
| 400 | 110 | 7,10   | -     |
| 400 | 115 | 18,46  | -     |
| 500 | 95  | 1,32   | -     |
| 500 | 100 | 3,11   | -     |

|      |     |       |   |
|------|-----|-------|---|
| 500  | 110 | 5,51  | - |
| 500  | 125 | 23,22 | - |
| 600  | 95  | 2,28  | - |
| 600  | 100 | 3,94  | - |
| 600  | 110 | 7,14  | - |
| 600  | 120 | 18,68 | - |
| 700  | 95  | 2,02  | - |
| 700  | 100 | 3,69  | - |
| 700  | 110 | 7,81  | - |
| 700  | 122 | 27,58 | - |
| 800  | 95  | 2,28  | - |
| 800  | 100 | 3,70  | - |
| 800  | 110 | 7,29  | - |
| 800  | 115 | 17,53 | - |
| 900  | 95  | 2,22  | - |
| 900  | 100 | 3,10  | - |
| 900  | 110 | 5,59  | - |
| 900  | 115 | 11,30 | - |
| 1000 | 95  | 3,81  | - |
| 1000 | 100 | 6,57  | - |
| 1000 | 110 | 13,28 | - |
| 1000 | 119 | 15,10 | - |

**Quadro 3 - Valores de tensão e corrente produzidas na transdução de energia sonora para energia elétrica com corneta de reverberação.**

No quadro 4 está representado o valor de tensão *RMS* e corrente produzidos na transdução de energia sonora para sinais elétricos sem a utilização de corneta. Tomou-se como base o melhor resultado do experimento utilizando a corneta, mostrado no quadro 2, portanto, foram coletados o valor de tensão e corrente, em 120 Hz e com uma intensidade sonora de 115 dB.

| SEM CORNETA     |                         |                        |              |
|-----------------|-------------------------|------------------------|--------------|
| FREQUÊNCIA (Hz) | INTENSIDADE SONORA (dB) | TENSÃO <i>RMS</i> (mV) | CORRENTE(mA) |
| 120             | 115                     | 68,73                  | 8,08         |

**Quadro 4- Valores de tensão e corrente produzidas na transdução de energia sonora para energia elétrica sem corneta de reverberação.**

Os valores de potências produzidos na conversão de energia sonora para sinais elétricos estão representados no quadro 5. Essas potências foram calculadas a partir dos maiores valores *RMS* de tensão e corrente adquiridos com e sem a utilização de corneta na captação da onda sonora.

| INTENSIDADE SONORA DE 115 dB |                        |               |               |                 |                        |               |               |
|------------------------------|------------------------|---------------|---------------|-----------------|------------------------|---------------|---------------|
| SEM CORNETA                  |                        |               |               | COM CORNETA     |                        |               |               |
| FREQUÊNCIA (Hz)              | TENSÃO <i>RMS</i> (mV) | CORRENTE (mA) | POTÊNCIA (mW) | FREQUÊNCIA (Hz) | TENSÃO <i>RMS</i> (mV) | CORRENTE (mA) | POTÊNCIA (mW) |
| 120                          | 68,73                  | 8,08          | 0,555         | 120             | 144,33                 | 15,45         | 2,22          |

**Quadro 5 - Valores de potência *RMS* produzidas.**

Com os dados coletados a partir do quadro 2, foram geradas curvas de frequência por tensão utilizando corneta. Na figura 31 está representada a curva com intensidade sonora de 95 dB. Nas figuras 32, 33 e 34 têm-se as curvas com intensidades sonoras de respectivamente 100 dB, 110 dB e 115 dB. Já na figura 35, representou-se as curvas de frequência por tensão com intensidades sonoras de 95 dB, 100 dB, 110 dB e 115 dB sobrepostas.

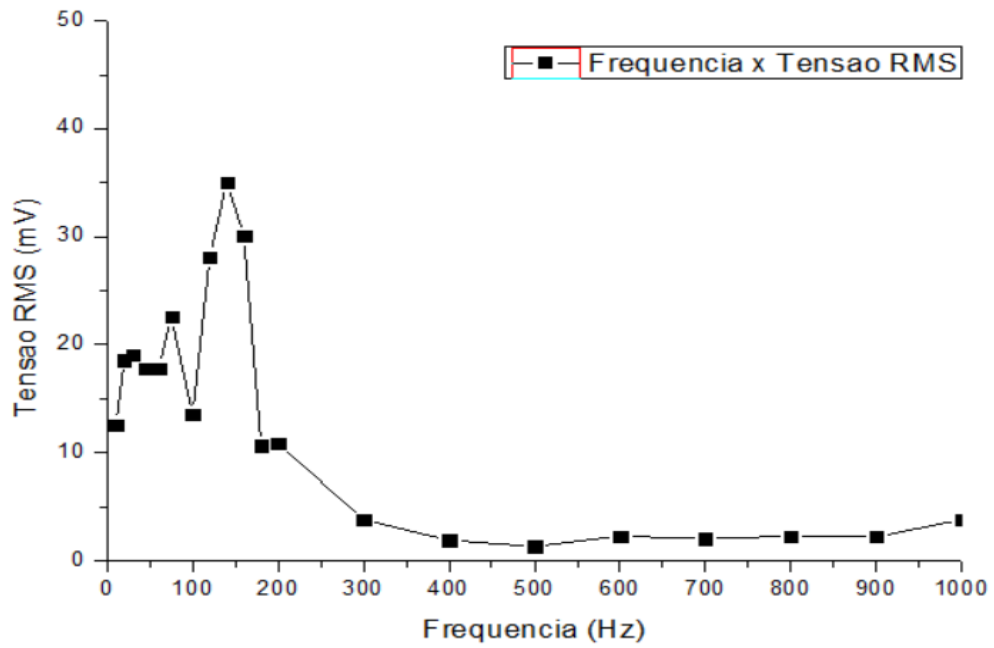


Figura 32 - Curva de Frequência x Tensão com intensidade sonora de 95 dB utilizando corneta.

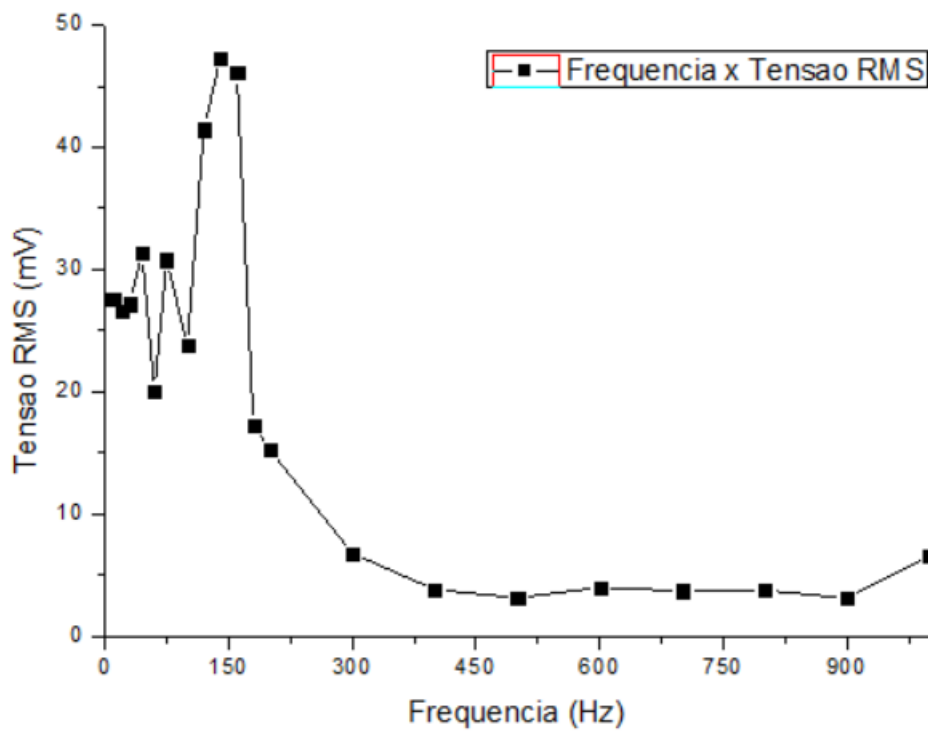


Figura 33 - Curva de Frequência x Tensão com intensidade sonora de 100 dB utilizando corneta.

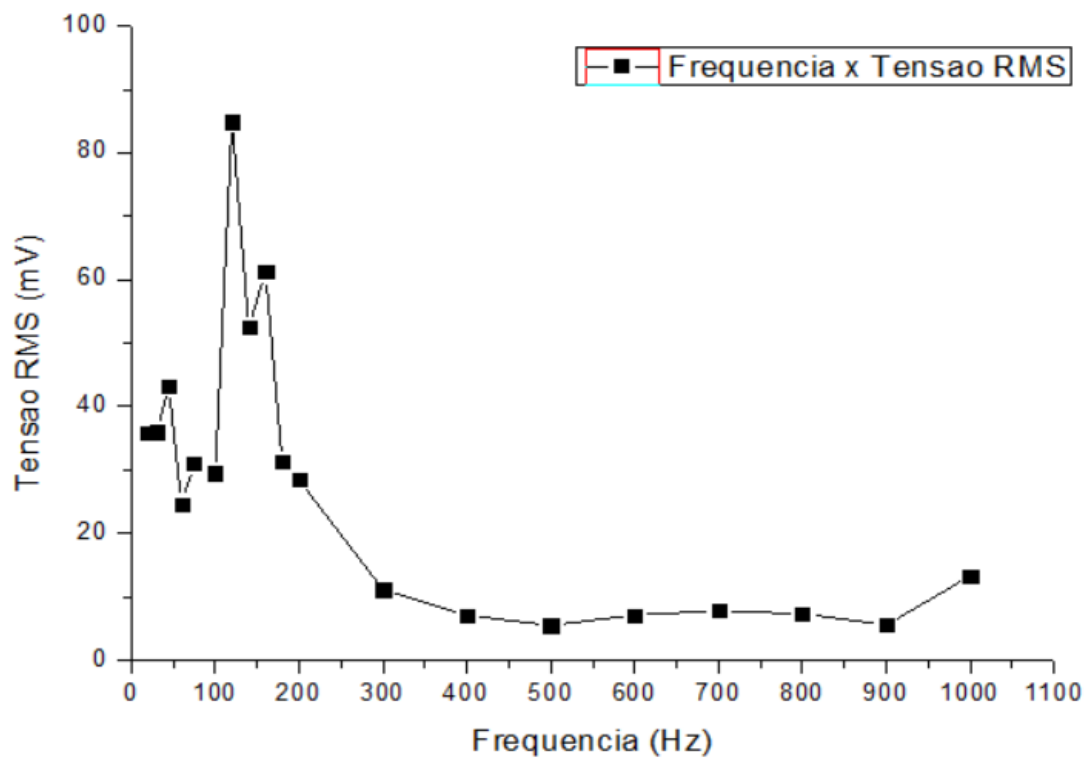


Figura 34 - Curva de Frequência x Tensão com intensidade sonora de 110 dB utilizando corneta

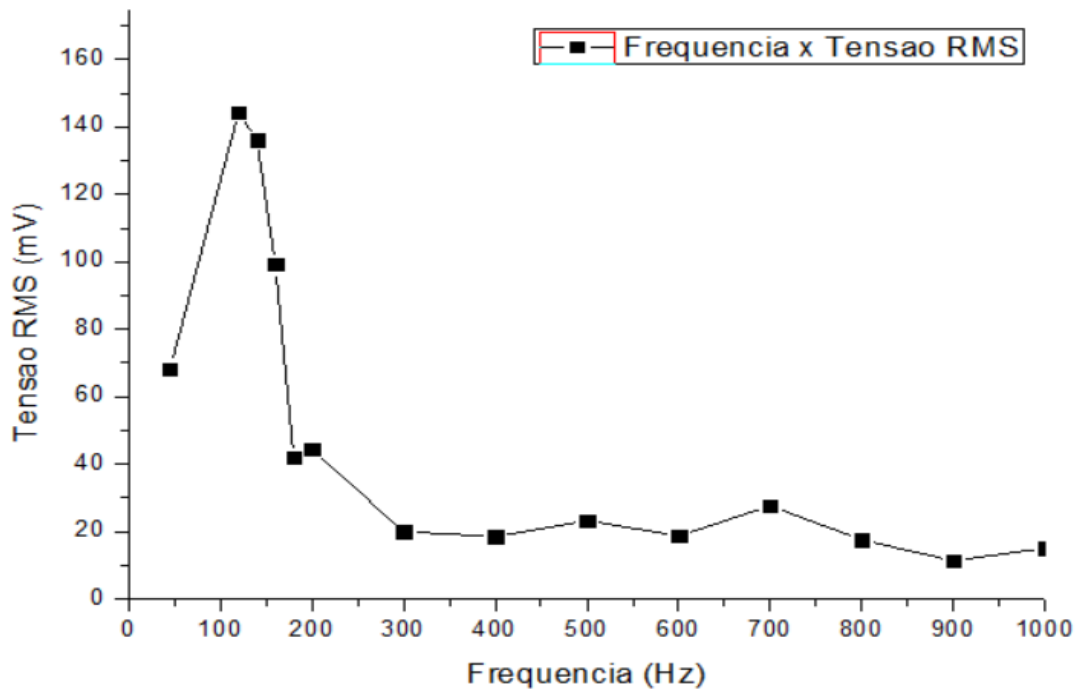


Figura 35 - Curva de Frequência x Tensão com intensidade sonora de 115 dB utilizando corneta.

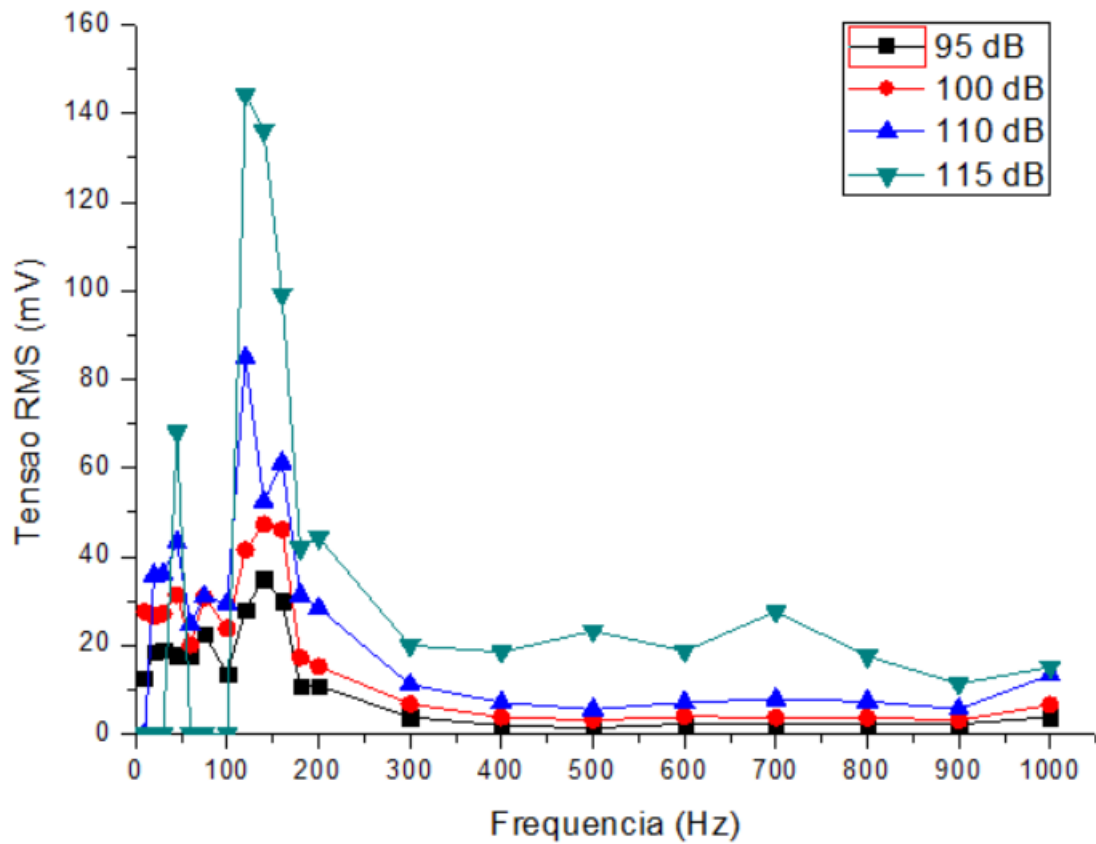


Figura 36 - Curvas de Tensão x Frequência com todas as intensidades sonoras sobrepostas.

Na figura 36 está representada a forma de onda da tensão *RMS* produzida nos terminais do *subwoofer* a uma intensidade sonora de 115 dB, frequência 120 Hz, gerando uma tensão *RMS* de 147,30 mV. Já a figura 37 contém a forma de onda de tensão *RMS* produzida nos terminais do resistor *shunt* 1  $\Omega$  +/- 1%, com intensidade sonora de 115 dB, 120 Hz, resultando em 15,45 mV.



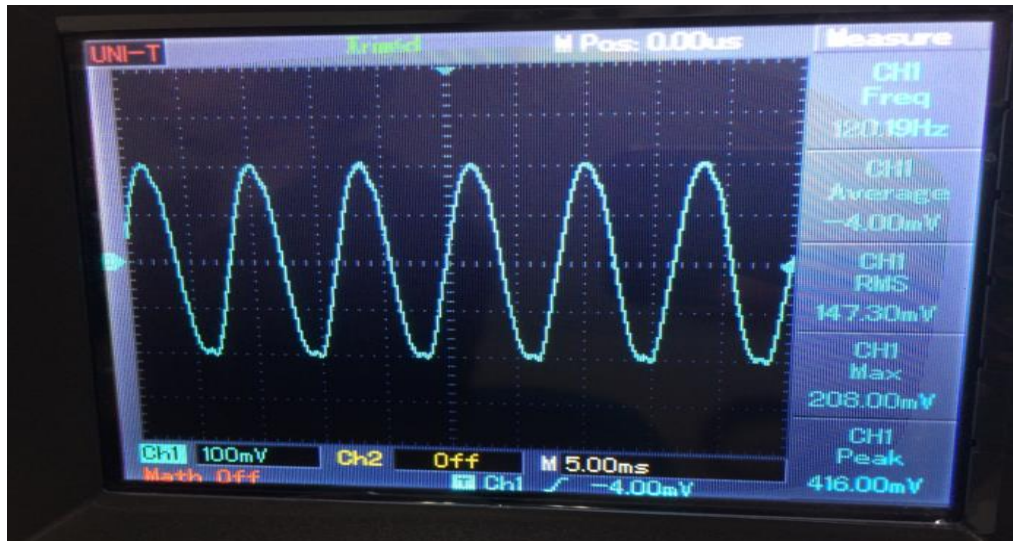


Figura 37 - Forma de onda de tensão *RMS* com intensidade sonora de 115 dB e frequência 120 Hz.

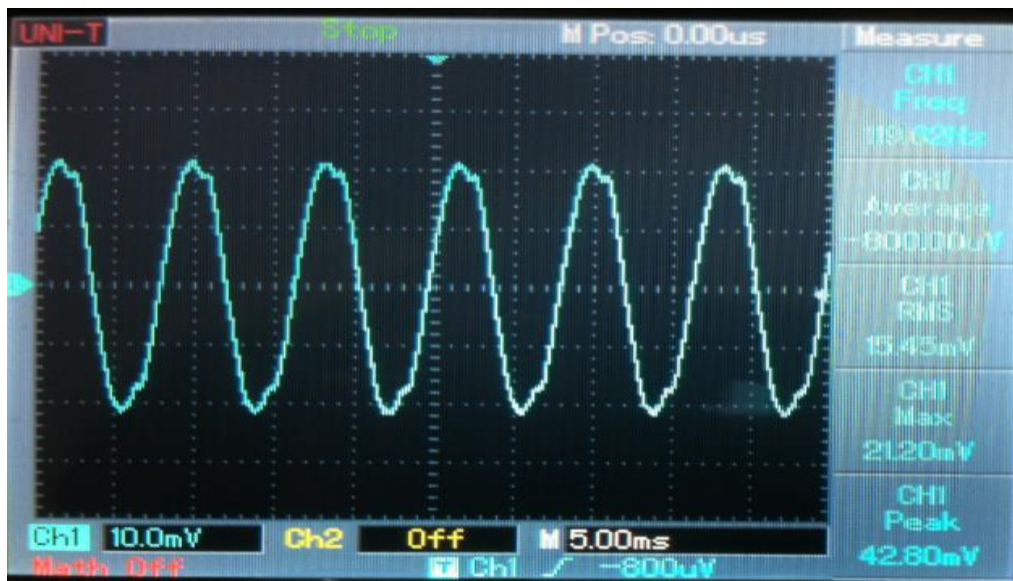


Figura 38 - Forma de onda de tensão *RMS* nos terminais do resistor shunt com intensidade sonora de 115 dB e frequência 120 Hz.

### 3.2.5 Comentários

Os melhores resultados obtidos da conversão de energia sonora para sinais elétricos utilizando *subwoofer* estão em baixas frequências. Observa-se que a

intensidade sonora é um fator determinante para o nível de tensão *RMS* gerada. Para uma frequência de 120 Hz, têm-se que para uma intensidade sonora de 95 dB, gera-se uma tensão *RMS* máxima de 28,42 mV. Com uma intensidade sonora de 100 dB, gerou-se 43,2 mV, para 110 dB, produziu-se uma tensão *RMS* de 85,67 mV e já para 115 dB, produziu-se uma tensão de 147,30 mV. Portanto, quanto maior for a intensidade sonora, maior será o valor de tensão *RMS* produzido. Isso se deve ao fato de que quanto maior a intensidade sonora, mais energia terá a onda de pressão sonora para movimentar o cone do *subwoofer*, impondo assim, uma maior vibração na bobina móvel.

Outro fator determinante para os resultados foi a utilização da corneta. No quadro 1 é mostrado que a tensão *RMS* produzida em 120 Hz com uma intensidade sonora de 115 dB foi de 147,30 mV. Sem a utilização de corneta o valor da tensão *RMS* foi de 68,73 mV como mostra o quadro 2.

### 3.3 Transdução de Energia Sonora em Energia Elétrica utilizando *Subwoofer* 6x9

#### 3.3.1 Objetivo

Analisar a conversão da energia sonora para energia elétrica utilizando alto-falante *subwoofer* 6x9 em diversas faixas de frequências e mantendo a intensidade sonora em 95 dB.

#### 3.3.2 Materiais Utilizados

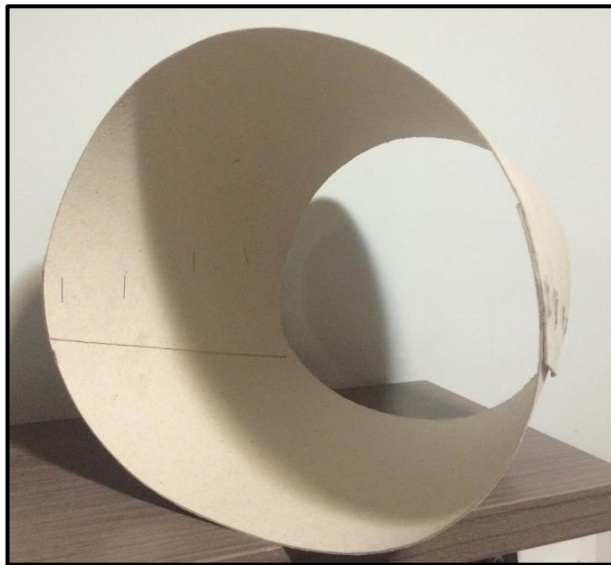
Os seguintes materiais foram utilizados:

- 1 Alto Falante *Subwoofer* 6x9, 4  $\Omega$ , 50 W;
- 1 Osciloscópio ICEL OS-2025C 25 MHz;
- 1 Computador com *Software Online Tone Generator*;
- 3 Protetores Auriculares;

- 1 Decibelímetro Hikari HDB882;
- 1 Caixa Amplificadora LL-140;
- 1 Resistor *Shunt* +/- 1%;
- 1 Corneta de papel Paraná 21,5x18x26,5 cm (diâmetro menor x comprimento x diâmetro maior).

### 3.3.3 Metodologia Adotada

Como transdutor eletromecânico, escolheu-se o *subwoofer* 6x9 de 50 W e 4  $\Omega$  munido de uma corneta cuja função é direcionar as ondas de pressão, conforme figura 39.



**Figura 39 - Corneta de papel paraná para subwoofer 6x9.**

Foram realizados dois tipos de experimentos: primeiramente utilizando corneta e posteriormente sem a corneta. Para o segundo experimento, considerou-se apenas o melhor resultado do experimento utilizando a corneta.

### 3.3.4 Resultados

No quadro 6 está representado os valores de tensão *RMS*, corrente e potência *RMS* produzidas na transdução da energia sonora emitida através da caixa amplificadora em diversas frequências e intensidade sonora de 95 dB para sinais elétricos nos terminais do *subwoofer*, utilizando corneta. Já no quadro 6 estão representados os valores de tensão, corrente e potência sem a utilização de corneta.

| <b>COM CORNETA</b>  |                                     |                                     |                            |                            |
|---------------------|-------------------------------------|-------------------------------------|----------------------------|----------------------------|
| Frequência<br>( Hz) | Tensão <i>RMS</i><br>(mV)<br>14,5cm | Tensão <i>RMS</i><br>(mV)<br>4,5 cm | Corrente<br>(mA)<br>4,5 cm | Potência<br>(mW)<br>4,5 cm |
| 80                  | 91,65                               | -                                   | 14,51                      | 1,330                      |
| 120                 | 94,62                               | 213,32                              | 15,97                      | 3,406                      |
| 160                 | 116,36                              | 196,81                              | 20,36                      | 4,007                      |
| 200                 | 26,46                               | 38,57                               | 5,41                       | 0,208                      |
| 300                 | 11,42                               | 12,21                               | -                          | -                          |
| 400                 | 6,88                                | 8,03                                | -                          | -                          |
| 500                 | 10,37                               | 12,48                               | -                          | -                          |
| 600                 | 15,72                               | 16,31                               | -                          | -                          |
| 700                 | 13,81                               | 12,98                               | -                          | -                          |
| 800                 | 15,80                               | 20,16                               | -                          | -                          |
| 900                 | 7,29                                | 8,89                                | -                          | -                          |
| 1000                | 5,37                                | 5,41                                | -                          | -                          |
| 2000                | 1,45                                | 8,01                                | -                          | -                          |
| 3000                | 5,28                                | 6,74                                | -                          | -                          |
| 4000                | 6,42                                | 15,47                               | -                          | -                          |
| 5000                | 20,80                               | 4,63                                | -                          | -                          |
| 10000               | -                                   | -                                   | -                          | -                          |
| 15000               | -                                   | -                                   | -                          | -                          |

|       |   |   |   |   |
|-------|---|---|---|---|
| 20000 | - | - | - | - |
|-------|---|---|---|---|

**Quadro 6 - Valores de tensão e corrente produzidos utilizando subwoofer 6x9 com corneta.**

| SEM CORNETA     |                               |                               |               |               |
|-----------------|-------------------------------|-------------------------------|---------------|---------------|
| Frequência (Hz) | Tensão <i>RMS</i> (mV) 14,5cm | Tensão <i>RMS</i> (mV) 4,5 cm | Corrente (mA) | Potência (mW) |
| 80              | 44,54                         | -                             | 10,76         | 0,479         |
| 120             | 40,53                         | 95,58                         | 9,85          | 0,941         |
| 160             | 86,76                         | 174,40                        | 10,99         | 1,916         |
| 200             | 26,00                         | 44,90                         | 4,23          | 0,18927       |
| 300             | 10,18                         | 9,00                          | -             | -             |
| 400             | 5,12                          | 3,95                          | -             | -             |
| 500             | 4,92                          | 5,18                          | -             | -             |
| 600             | 4,76                          | 5,97                          | -             | -             |
| 700             | 5,50                          | 7,01                          | -             | -             |
| 800             | 9,82                          | 10,22                         | -             | -             |
| 900             | 13,12                         | 6,38                          | -             | -             |
| 1000            | 12,34                         | 4,90                          | -             | -             |
| 2000            | 2,37                          | 2,32                          | -             | -             |
| 3000            | 2,15                          | 1,5                           | -             | -             |
| 4000            | 7,58                          | 3,73                          | -             | -             |
| 5000            | 19,06                         | 12,07                         | -             | -             |
| 10000           | 2,88                          | -                             | -             | -             |
| 15000           | -                             | -                             | -             | -             |
| 20000           | 1,69                          | -                             | -             | -             |

**Quadro 7 - Valores de tensão e corrente produzidos utilizando subwoofer 6x9 sem corneta.**

Através dos dados coletados a partir dos quadro 6 e 7, foram geradas curvas de frequência por tensão dos resultados obtidos a 4,5 cm da fonte sonora. Na figura 40 está representada a curva do *subwoofer* 6x9 com intensidade sonora de 95 dB,

utilizando-se corneta a uma distância de 4,5 cm. Na figura 41 representa-se a curva obtida sem a utilização de corneta a uma distância de 4,5 cm. A figura 42 é uma sobreposição das curvas dos dois gráficos anteriores.

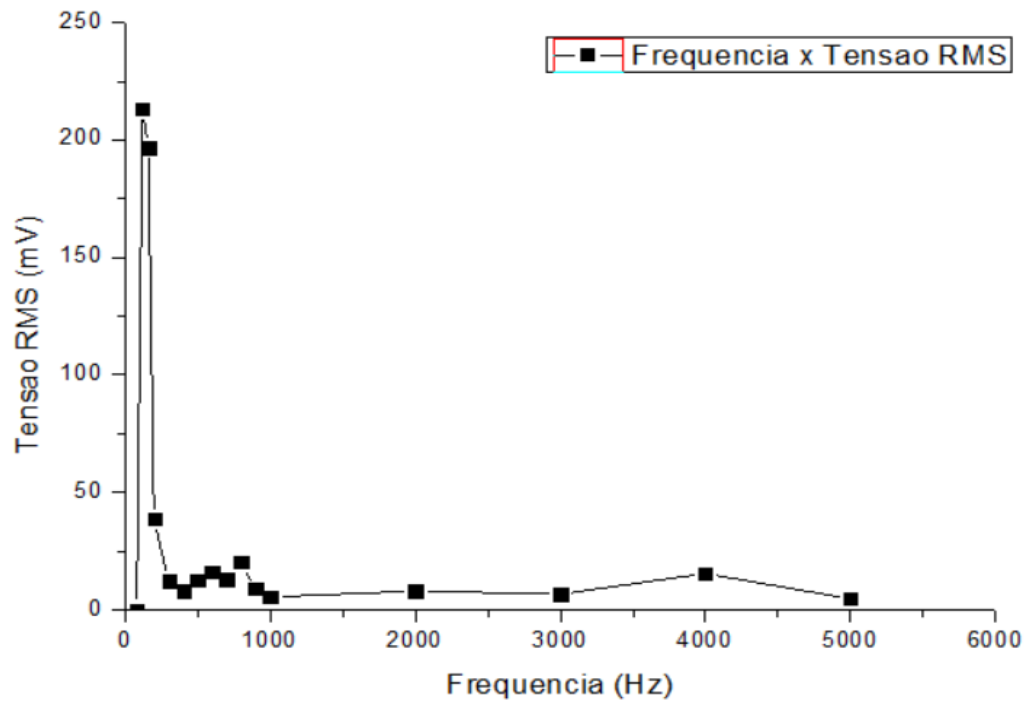


Figura 40- Curva de frequência x tensão *RMS* utilizando *subwoofer* 6x9 com corneta a uma distância de 4,5 cm.

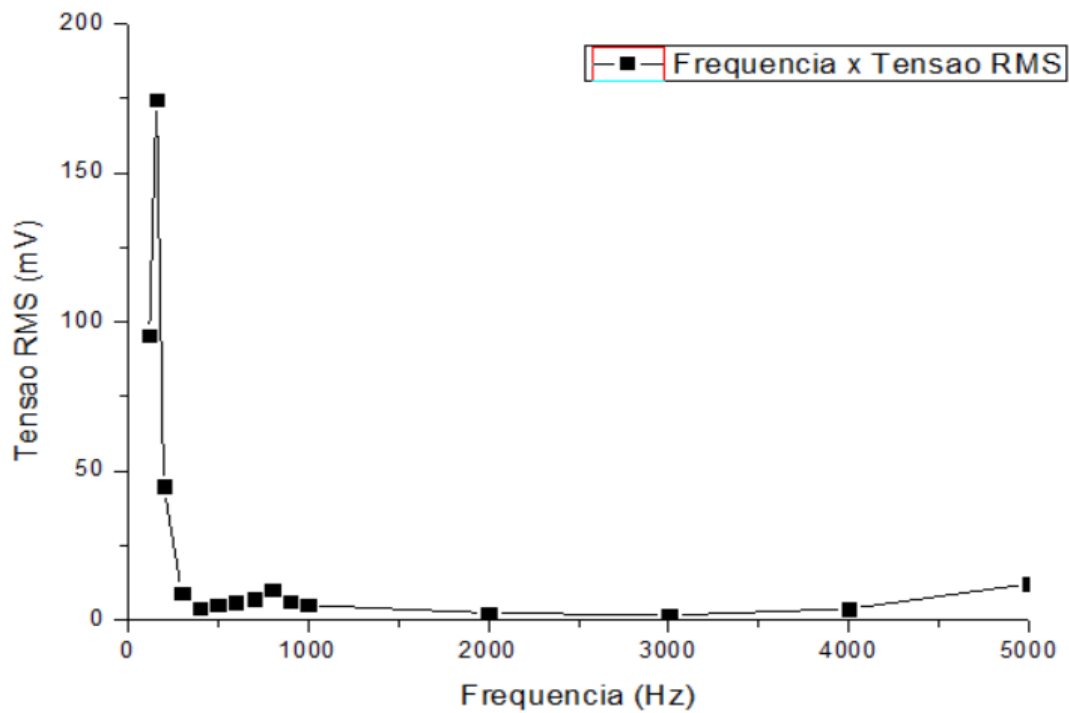


Figura 41 - Curva de frequência x tensão *RMS* utilizando *subwoofer* 6x9 sem corneta a uma distância de 4,5 cm.

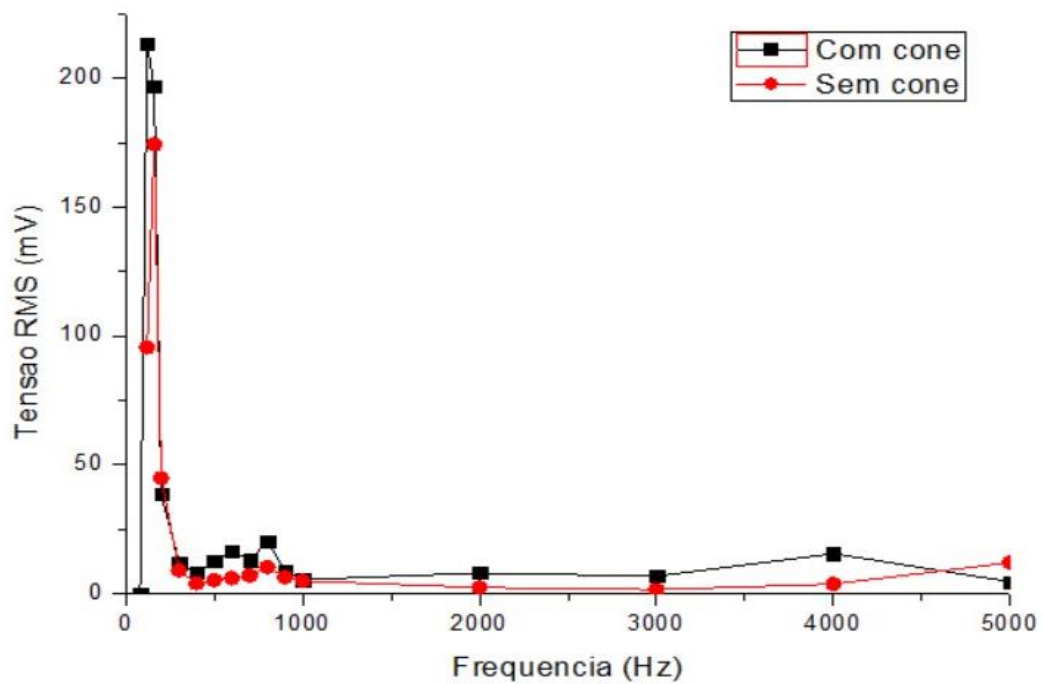


Figura 42 - Curva de frequência x tensão *RMS* utilizando *subwoofer* 6x9 com e sem corneta a uma distância de 4,5 cm.

Na figura 43 é demonstrada a forma de onda obtida da tensão *RMS* nos terminais do *subwoofer* a uma intensidade de nível sonoro de 95 dB e frequência de 120 Hz.

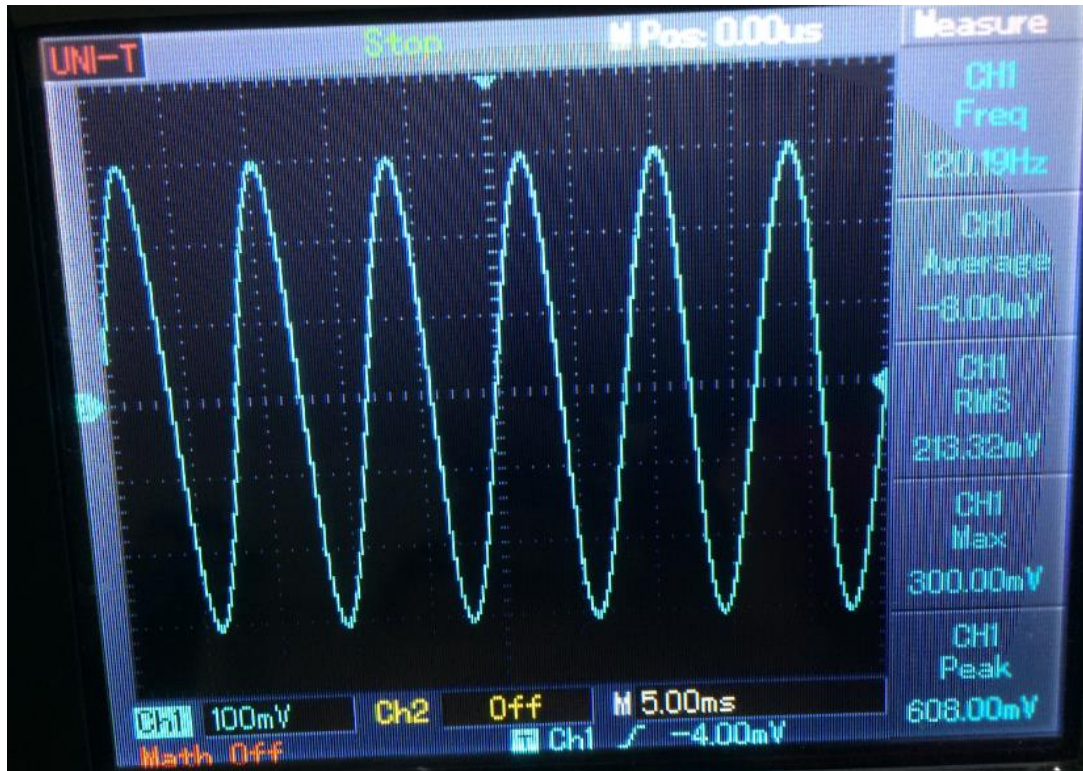


Figura 43 - Forma de onda da tensão *RMS* com intensidade sonora de 95 dB e frequência 120 Hz.

### 3.3.5 Comentários

Observa-se, através dos dados obtidos, que os maiores níveis de tensão *RMS* ocorreram com a utilização da corneta no alto-falante. Outro fator importante para a obtenção de valores significativos de tensão é a distância entre a fonte sonora e o receptor (transdutor). Utilizando uma distância de 14,5 cm entre a fonte de som e o receptor, os valores de tensão *RMS* obtidos foram menores quando comparados ao experimento feito a uma distância de 4,5 cm. Essa diferença de valores pode ser notada principalmente em baixas frequências, como 120 Hz, em que com a maior



distância gerou-se 94,62 mV e utilizando menor distância, registrou-se tensão *RMS* de 213,32 mV.

### 3.4 Transdução de Energia Sonora em Energia Elétrica utilizando *Woofers*

#### 3.4.1 Objetivo

Analisar a conversão da energia sonora para energia elétrica utilizando um *woofer*, variando a frequência dentro do intervalo em que o alto-falante opera segundo dados do fabricante, em intensidades de nível sonoro de 95dB e 115dB.

#### 3.4.2 Materiais Utilizados

Os seguintes materiais foram utilizados:

- 1 Alto Falante *Woofers* 12 pol, 8  $\Omega$ , 50 W;
- 1 Osciloscópio ICEL OS-2025C 25 MHz;
- 1 Computador com *Software Online Tone Generator*;
- 3 Protetores Auriculares;
- 1 Decibelímetro *Hikari* HDB882;
- 1 Caixa Amplificadora LL-140;
- 1 Resistor *Shunt* 1  $\Omega$  +/- 1%;
- 1 Corneta de papel paraná 26x40x36 cm (diâmetro menor x comprimento x diâmetro maior).

### 3.4.3 Metodologia Adotada

Três tipos de experimentos foram realizados. O primeiro representado na figura 44, com a utilização de corneta e o segundo sem a corneta, ambos com intensidade de nível sonoro de 95 dB. Por fim o terceiro experimento foi realizado com objetivo de refinar as medições realizadas no primeiro experimento, porém agora utilizando uma intensidade de nível sonoro de 115 dB.



Figura 44 - Setup da conversão de energia sonora para energia elétrica utilizando *woofer* com corneta.

### 3.4.4 Resultados

No quadro 7 estão representados os valores de tensão *RMS* e corrente resultantes da transdução da energia sonora em uma intensidade de nível sonora de 95 dB, emitida através da caixa de som em diversas frequências para sinais elétricos nos terminais do *woofer*.

| COM CORNETA     |                        |               |               |
|-----------------|------------------------|---------------|---------------|
| FREQUÊNCIA (Hz) | TENSÃO <i>RMS</i> (mV) | CORRENTE (mA) | POTÊNCIA (mW) |
|                 |                        |               |               |

|     |        |       |      |
|-----|--------|-------|------|
| 10  | 110    | 10,47 | 1,15 |
| 20  | 139    | 17,60 | 2,44 |
| 40  | 140    | 18,40 | 2,57 |
| 60  | 292    | 24,27 | 7,08 |
| 80  | 381,83 | 24,75 | 9,45 |
| 120 | 81,58  | 7,67  | 0,62 |
| 160 | 70,20  | 7,16  | 0,50 |
| 200 | 28,06  | 2,99  | 0,83 |
| 300 | 21,70  | -     |      |
| 400 | 6,97   | -     |      |
| 500 | 8,12   | -     |      |
| 600 | 7,92   | -     |      |
| 700 | 11,29  | -     |      |
| 800 | 9,19   | -     |      |
| 900 | 7,42   | -     |      |

**Quadro 8 - Valores de tensão e corrente produzidos utilizando woofer com corneta.**

No quadro 8 estão representados os valores de tensão *RMS* e corrente, produzidos na transdução de energia sonora com nível de intensidade sonora de 95 dB, para sinais elétricos sem a utilização de corneta.

| <b>SEM CORNETA</b>     |                               |                     |                      |
|------------------------|-------------------------------|---------------------|----------------------|
| <b>FREQUÊNCIA (Hz)</b> | <b>TENSÃO <i>RMS</i> (mV)</b> | <b>CORRENTE(mA)</b> | <b>POTÊNCIA (mW)</b> |
| 10                     | 34,70                         | 3,22                | 0,11                 |
| 20                     | 48,08                         | 5,95                | 0,29                 |
| 40                     | 55,33                         | 5,86                | 0,33                 |
| 60                     | 20,30                         | 1,54                | 0,03                 |
| 80                     | 204,04                        | 15,17               | 3,09                 |
| 120                    | 53,67                         | 5,00                | 0,26                 |
| 160                    | 33,94                         | 5,54                | 0,18                 |
| 200                    | 26,00                         | 2,92                | 0,07                 |

**Quadro 9 - Valores de tensão e corrente produzidas na transdução de energia sonora para energia elétrica sem corneta a 95 dB.**

No quadro 9 estão representados os valores de tensão *RMS* produzidos na transdução de energia sonora com nível de intensidade sonora de 115 dB para sinais elétricos com a utilização de corneta. Também está presente a corrente *RMS*, medida através de um resistor *shunt*, referente ao maior valor de tensão *RMS* obtido no experimento em questão.

| COM CORNETA     |                         |                        |               |               |
|-----------------|-------------------------|------------------------|---------------|---------------|
| FREQUÊNCIA (Hz) | INTENSIDADE SONORA (dB) | TENSÃO <i>RMS</i> (mV) | CORRENTE (mA) | Potência (mW) |
| 10              | 115                     | 178,75                 | 24,53         | 4,38          |
| 20              | 115                     | 390                    | 57,55         | 22,44         |
| 30              | 115                     | 260                    | 37,04         | 9,63          |
| 40              | 115                     | 290                    | 33,80         | 9,80          |
| 45              | 115                     | 214,48                 | 47,96         | 10,29         |
| 50              | 115                     | 160                    | 31,36         | 5,02          |
| 60              | 115                     | 229,78                 | 31,06         | 7,14          |
| 70              | 115                     | 440                    | 52,46         | 23,08         |
| 80              | 115                     | 430                    | 53,03         | 22,80         |
| 90              | 115                     | 380                    | 57,03         | 21,67         |
| 100             | 115                     | 460                    | 62,64         | 28,81         |
| 110             | 115                     | 669,18                 | 70,29         | 47,04         |
| 120             | 115                     | 693,11                 | 80,25         | 55,62         |
| 140             | 115                     | 553,53                 | 81,66         | 45,20         |
| 160             | 115                     | 379,22                 | 40,27         | 15,27         |
| 180             | 115                     | 279,31                 | 25,37         | 7,09          |
| 200             | 115                     | 336,57                 | 30,25         | 10,18         |
| 300             | 115                     | 90,51                  | 13,34         | 1,21          |
| 400             | 115                     | 67,88                  | 11,71         | 0,79          |
| 500             | 115                     | 44,50                  | 8,94          | 0,40          |
| 600             | 115                     | 98,91                  | 10,57         | 1,05          |
| 700             | 115                     | 146,21                 | 16,47         | 2,41          |
| 800             | 115                     | 38,16                  | 5,74          | 0,22          |
| 900             | 115                     | 48,87                  | 4,61          | 0,23          |

|      |     |        |       |      |
|------|-----|--------|-------|------|
| 1000 | 115 | 127,83 | 12,15 | 1,55 |
|------|-----|--------|-------|------|

**Quadro 10 - Valores de tensão e corrente produzidas na transdução de energia sonora a 115 dB para energia elétrica com corneta.**

Os valores de potências, produzidas na conversão de energia sonora para energia elétrica através do *woofer* com corneta a 95 dB e 115 dB, encontram-se representados no quadro 10. Esses valores foram calculados a partir do melhor resultado de tensão e corrente adquiridos com a utilização da corneta e sem a utilização da corneta.

| INTENSIDADE SONORA DE 95 dB |                           |                  |                  | INTENSIDADE SONORA DE 115 dB |                              |                  |                  |
|-----------------------------|---------------------------|------------------|------------------|------------------------------|------------------------------|------------------|------------------|
| COM CORNETA                 |                           |                  |                  | COM CORNETA                  |                              |                  |                  |
| FREQUÊNCIA<br>(Hz)          | TENSÃO<br><i>RMS</i> (mV) | CORRENTE<br>(mA) | POTÊNCIA<br>(mW) | FREQUÊNCIA<br>(Hz)           | TENSÃO<br><i>RMS</i><br>(mV) | CORRENTE<br>(mA) | POTÊNCIA<br>(mW) |
| 80                          | 381,83                    | 24,75            | 9,45             | 120                          | 693,11                       | 80,25            | 56,62            |

**Quadro 11 - Valores de potência *RMS* produzidas pelo woofer com corneta e fonte sonora a 95 dB e 115 dB.**

As curvas de potência por frequência utilizando corneta a um nível sonoro de 95 dB e 115 dB, estão representadas respectivamente nas figuras 45 e 46. Pode-se observar que o pico de energia está em 80 Hz, quando utilizado uma intensidade sonora de 95 dB. Após essa frequência, a potência obtida decai para valores não significativos de energia. O mesmo ocorre quando o nível sonoro é de 115 dB, porém, invés de atingir o seu pico em 80 Hz, nesse caso o máximo de potência é atingida a 120 Hz e após esse valor, começa a decair como ocorre no caso anterior. Nota-se também, com o aumento da intensidade sonora, a potência obtida é consideravelmente superior quando utilizado uma intensidade sonora menor.

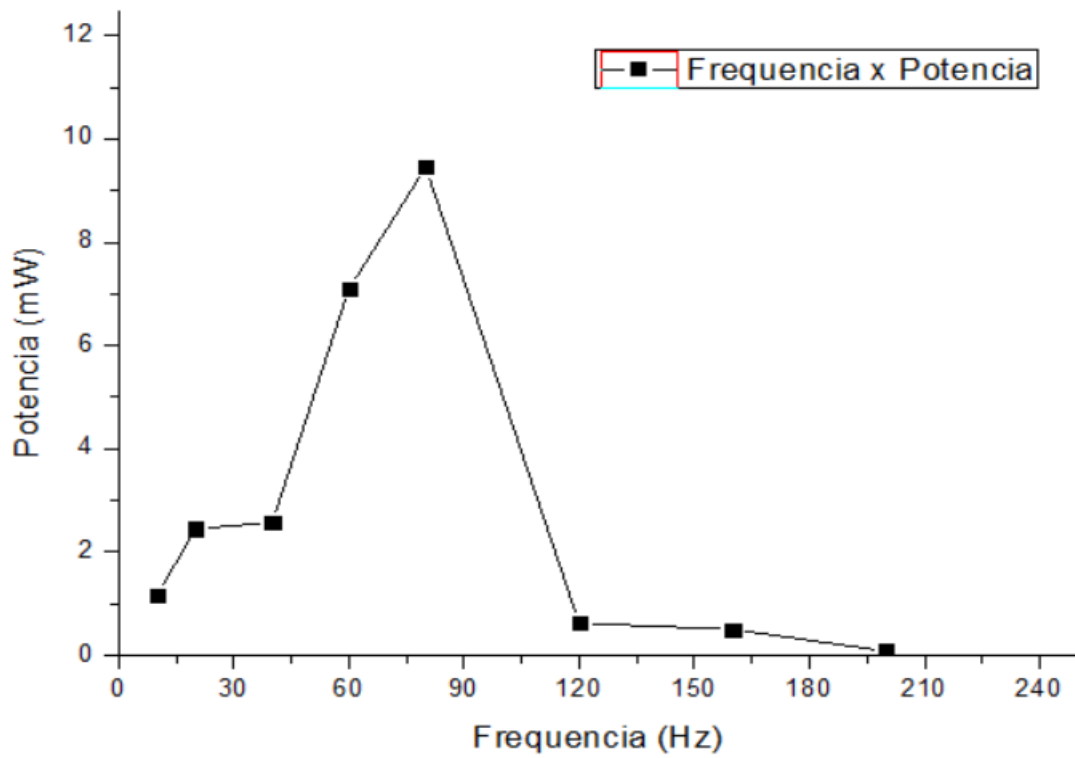


Figura 45 - Gráfico de potência por frequência utilizando corneta a 95 dB.

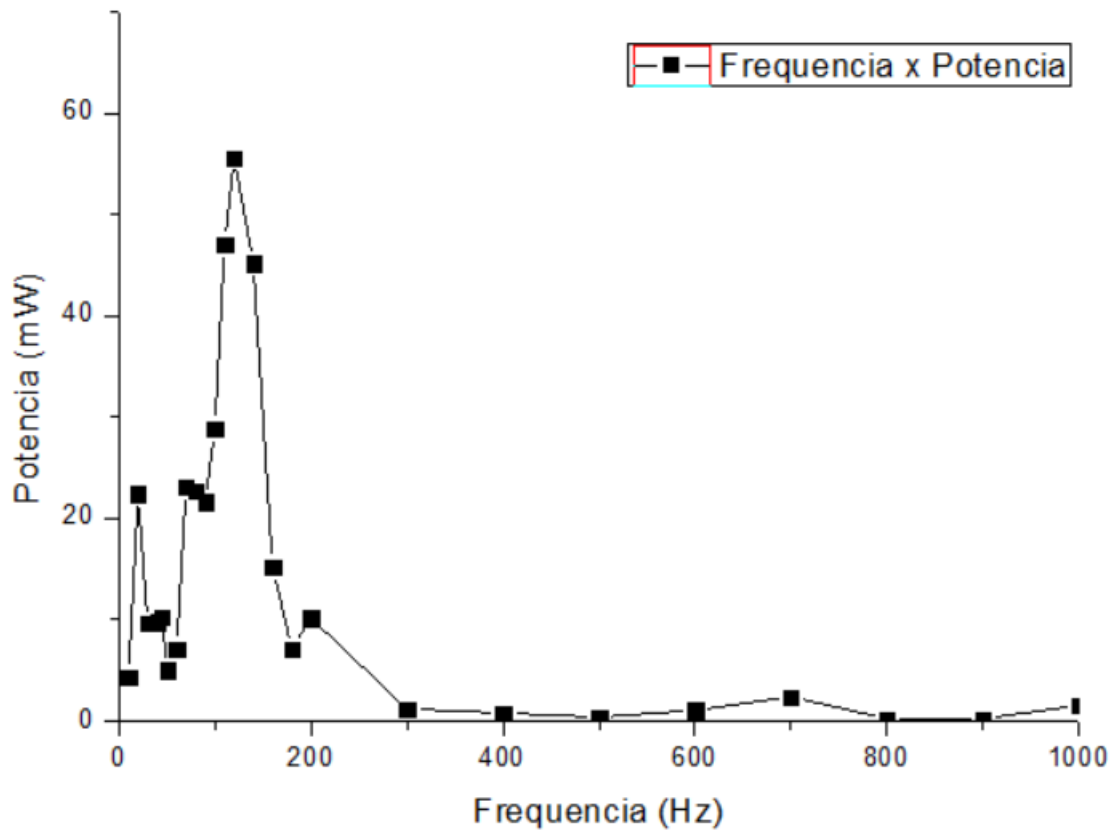
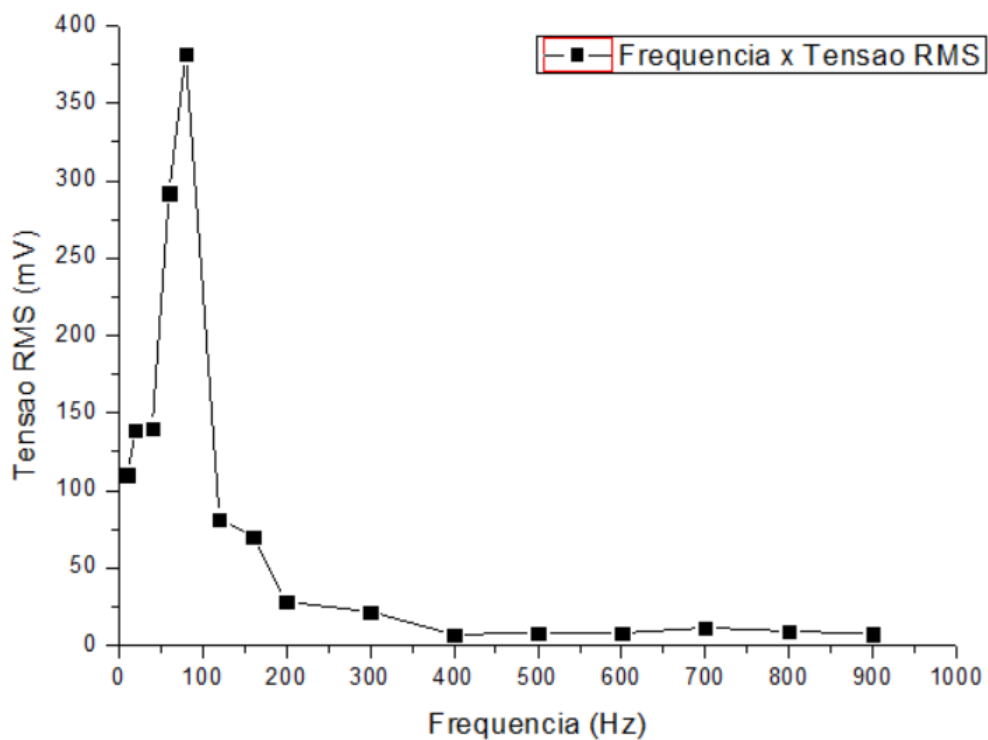


Figura 46 - Gráfico de potência por frequência utilizando corneta a 115 dB.

Com os dados coletados, foram geradas as curvas de frequência por tensão. Na figura 47 está representada a curva com a utilização de corneta e intensidade sonora de 95 dB. Na figura 48 tem-se a curva sem a utilização de corneta e com intensidade sonora de 95 dB. Já a figura 49 é constituída pelos dois gráficos anteriores sobrepostos. Por fim, na figura 49 está apresentada a curva de frequência por tensão produzida pelo mesmo transdutor a uma intensidade de nível sonoro de 115 dB.



**Figura 47 - Curva de Frequência x Tensão com a utilização de corneta e intensidade sonora de 95 dB.**

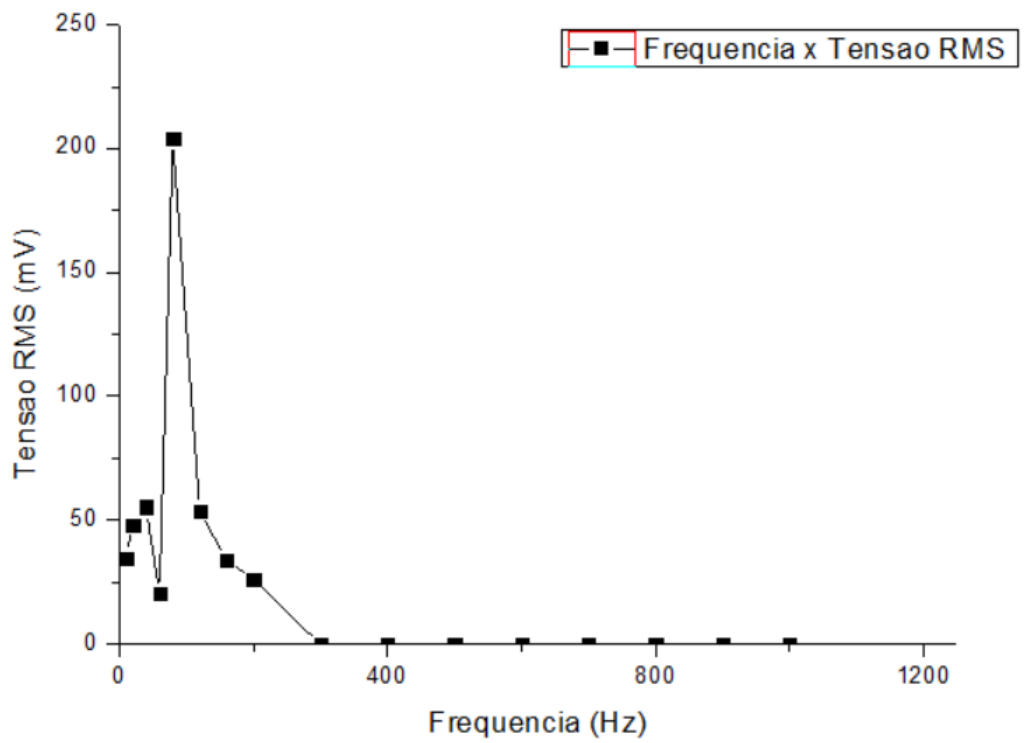


Figura 48 - Curva de Frequência x Tensão sem a utilização de corneta e intensidade sonora de 95 dB.

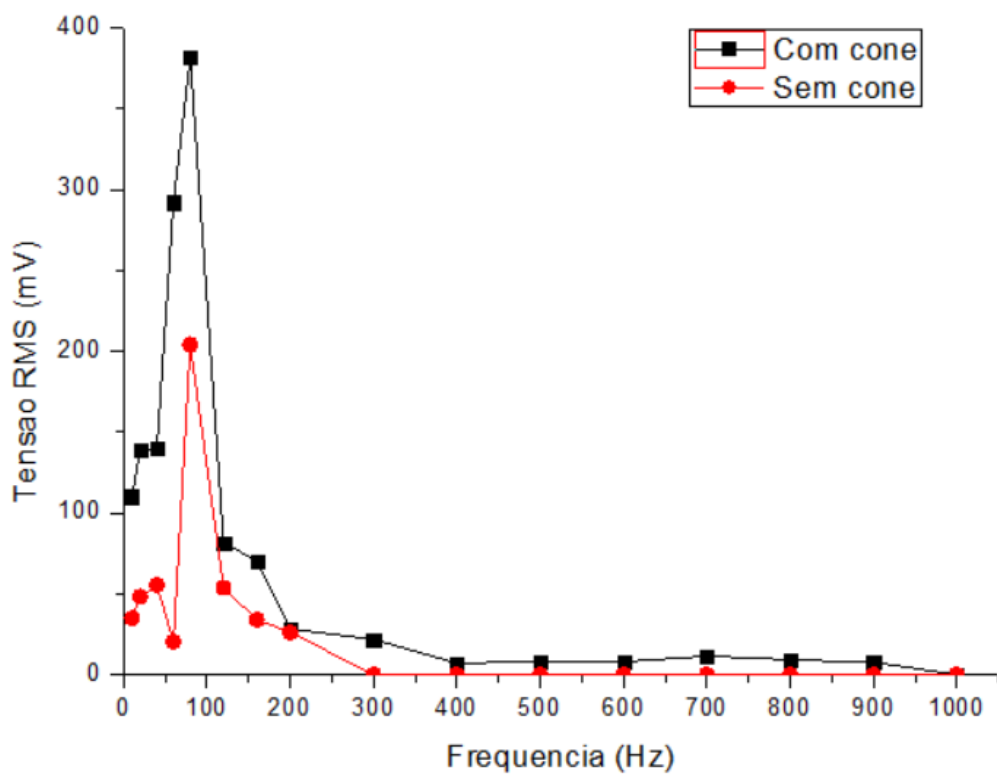
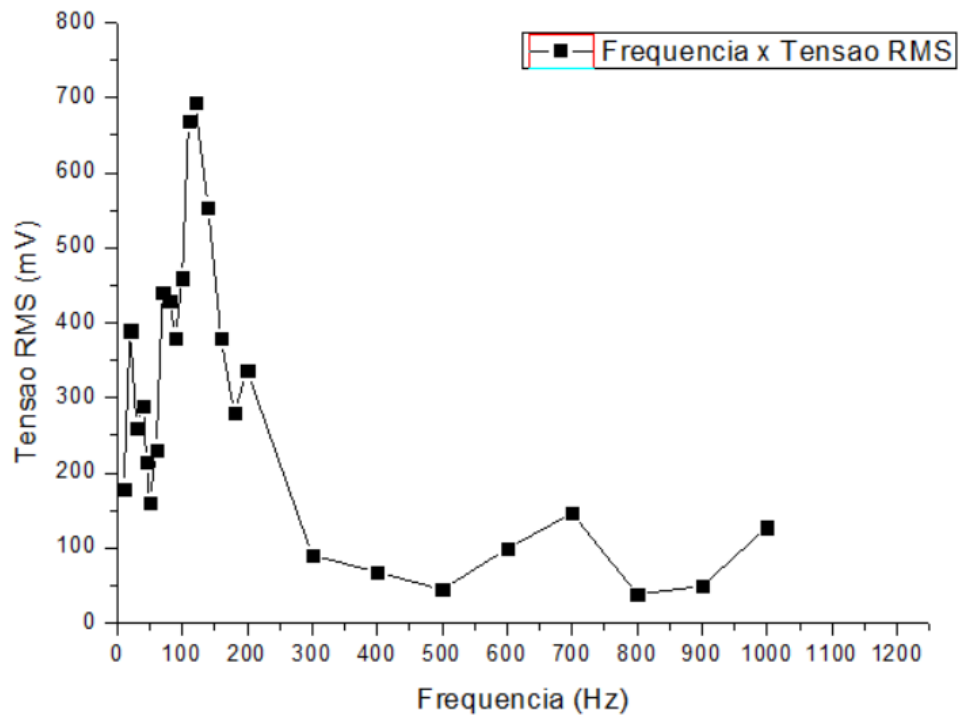


Figura 49 - Curva de Frequência x Tensão, com intensidade sonora de 95 dB, com corneta e sem corneta sobrepostas.





**Figura 50 - Curva de Frequência x Tensão com intensidade sonora de 115 dB.**

Na figura 51 está representada a forma de onda da tensão *RMS* produzida nos terminais do *woofer* a uma intensidade sonora de 115 dB, frequência de 120 Hz, apresentando uma tensão *RMS* de 693,11 mV. Já na figura 52 é demonstrada a forma de onda de tensão *RMS* produzida nos terminais do resistor *shunt* 1  $\Omega$  +/- 1%, com intensidade sonora de 115 dB, 120 Hz, resultando em 80,25 mV.

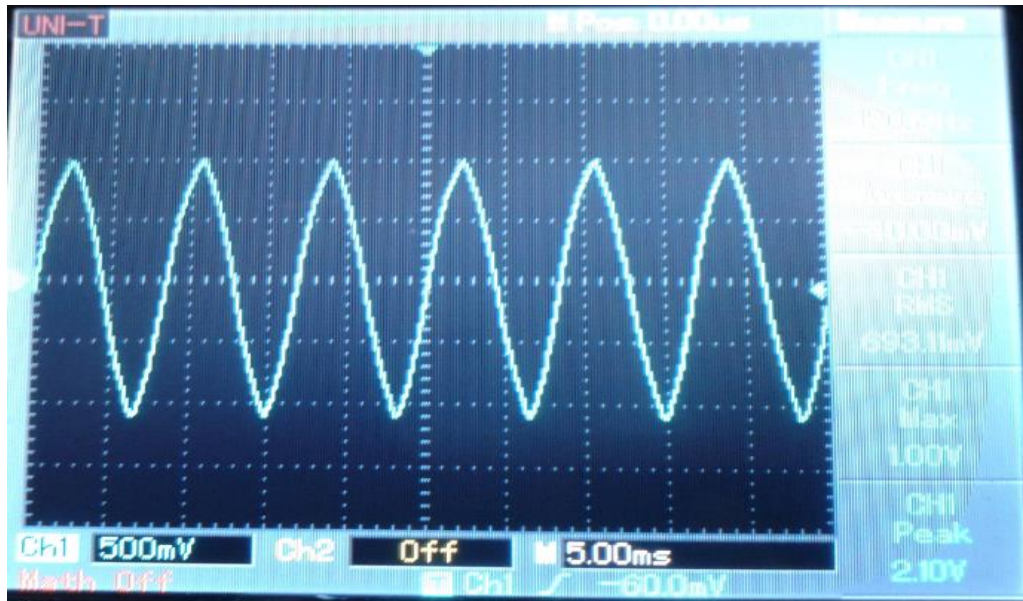


Figura 51 - Forma de onda de tensão *RMS* com intensidade sonora de 115 dB e frequência 120 Hz.

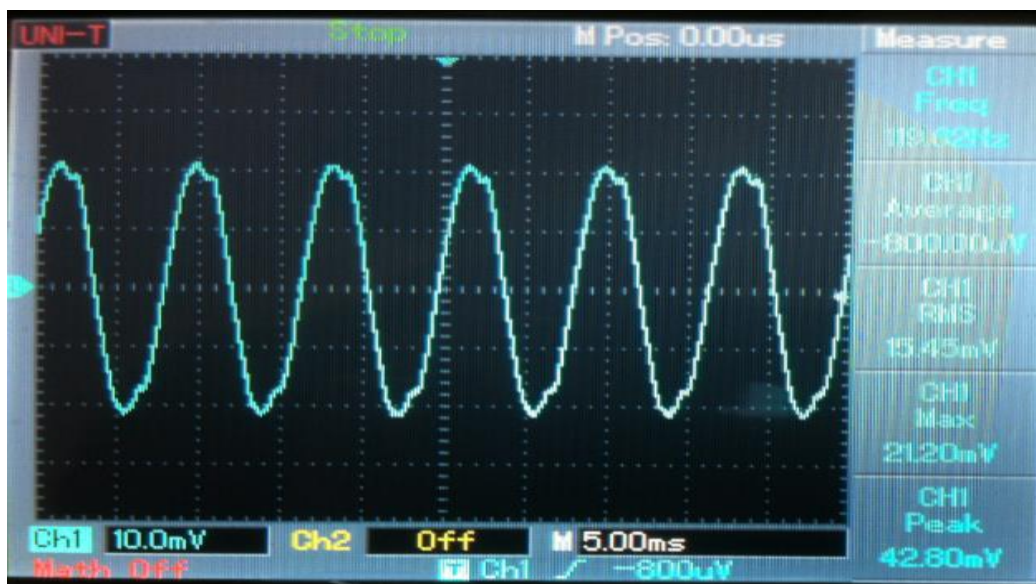


Figura 52 - Forma de onda de tensão *RMS* nos terminais do resistor *shunt* com intensidade sonora de 115 dB e frequência 120 Hz.

### 3.4.5 Comentários

Os melhores resultados obtidos da conversão de energia sonora para sinais elétricos utilizando *woofer* estão em baixas frequências. Observa-se que a intensidade sonora é um fator determinante para o nível de tensão *RMS* gerado.

Para uma frequência de 120 Hz, em uma intensidade sonora de 95 dB, obtém-se como resultado uma tensão *RMS* máxima de 381,83 mV e uma corrente de 24,75 mA. Já para 115 dB, produz-se uma tensão de 693,11 mV e uma corrente de 80,25 mA. Portanto, quanto maior for a intensidade sonora, maior será o valor de tensão *RMS* produzido. Isso se deve ao fato de que quanto maior a intensidade sonora, mais energia terá a onda de pressão sonora para movimentar o cone do *woofer*, impondo assim, uma maior vibração a bobina móvel. Outros fatores importantes são a distância entre a fonte sonora e o transdutor, a presença de corneta na região de incidência de som do transdutor, assim como a sua geometria e tamanho.

### 3.5 Transdução de Energia Sonora em Energia Elétrica utilizando *Tweeter*

#### 3.5.1 Objetivo

Analisar a conversão da energia sonora para energia elétrica utilizando um alto-falante *tweeter* em diversas faixas de frequências e variando a intensidade sonora.

#### 3.5.2 Materiais Utilizados

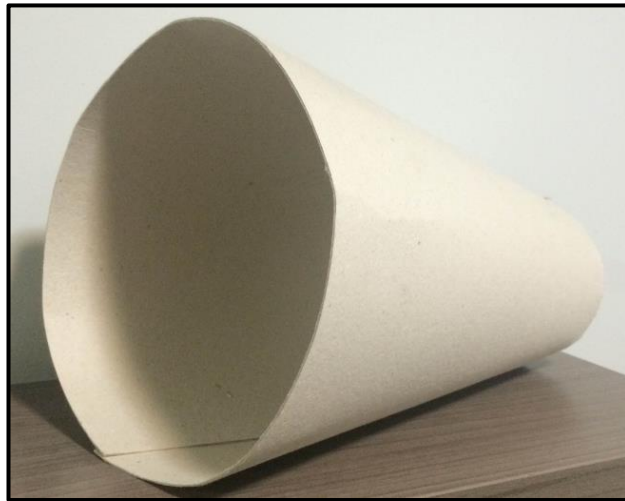
Os seguintes materiais foram utilizados:

- 1 Alto Falante *Tweeter* Hiyor 5HI 300, 8  $\Omega$ , 100 W;
- 1 Osciloscópio ICEL OS-2025C 25 MHz;
- 1 Computador com *Software Online Tone Generator*;
- 3 Protetores Auriculares;
- 1 Decibelímetro Hikari HDB882;
- 1 Caixa Amplificadora LL-140;
- 1 Resistor *Shunt* 1  $\Omega$  +/- 1%;

- 1 Corneta de papel paraná 10x26x17 cm (diâmetro menor x comprimento x diâmetro maior).

### 3.5.3 Metodologia Adotada

Como transdutor eletromecânico, escolheu-se o *tweeter* de 100 W e 8  $\Omega$  munido de uma corneta cuja função é direcionar as ondas de pressão, conforme a figura 53.



**Figura 53 - Corneta de papel paraná para tweeter**

. A distância entre caixa amplificadora (fonte) e o *tweeter* (receptor) foi de 15 cm. Os valores de corrente *RMS* coletados foram apenas para as frequências que apresentaram os melhores resultados de tensão *RMS*.

Ambos os experimentos, com e sem a utilização de corneta, foram realizados com intensidade de nível sonoro de 95 dB.

### 3.5.4 Resultados

No quadro 12 está representado os valores de tensão *RMS* e corrente produzidas na transdução da energia sonora, de intensidade de nível sonora de 95 dB, emitida através da caixa amplificadora em diversas frequências para sinais elétricos nos terminais do *tweeter*.

| <b>COM CORNETA</b> |                        |               |
|--------------------|------------------------|---------------|
| FREQUÊNCIA (Hz)    | TENSÃO <i>RMS</i> (mV) | CORRENTE (mA) |
| 3,5k               | 5,59                   | 0,919         |
| 5k                 | 40,96                  | 3,48          |
| 7,5k               | 2,52                   | -             |
| 10k                | -                      | -             |
| 12,5k              | 0,499                  | -             |
| 15k                | -                      | -             |
| 17,5k              | -                      | -             |
| 20k                | -                      | -             |

**Quadro 12 - Valores de tensão e corrente produzidas na transdução de energia sonora para energia elétrica com corneta a 95 dB.**

No quadro 13 está representado o valor de tensão *RMS* e corrente produzidos na transdução de energia sonora com nível de intensidade sonora de 95 dB para sinais elétricos sem a utilização de corneta.

| <b>SEM CORNETA</b> |                        |               |
|--------------------|------------------------|---------------|
| FREQUÊNCIA (Hz)    | TENSAO <i>RMS</i> (mV) | CORRENTE (mA) |
| 3,5k               | 13,54                  | 1,7           |
| 5k                 | 52,35                  | 5,44          |
| 7.5k               | 3,91                   | -             |
| 10k                | 0,674                  | -             |
| 12,5k              | 0,678                  | -             |
| 15k                | -                      | -             |
| 17,5k              | -                      | -             |

|     |   |   |
|-----|---|---|
| 20k | - | - |
|-----|---|---|

**Quadro 13- Valores de tensão e corrente produzidas na transdução de energia sonora para energia elétrica sem corneta a 95 dB.**

Os valores de potências, produzidas na conversão de energia sonora para energia elétrica, através do *tweeter* com corneta a 95 dB, encontram-se representados no quadro 14. Esses valores foram calculados a partir do melhor resultado de tensão e corrente adquiridos, com e sem a utilização da corneta, nos testes das duas intensidades de nível utilizadas na simulação da fonte sonora.

| INTENSIDADE SONORA DE 95 dB |                           |                  |                  |                    |                              |                  |                  |
|-----------------------------|---------------------------|------------------|------------------|--------------------|------------------------------|------------------|------------------|
| COM CORNETA                 |                           |                  |                  | SEM CORNETA        |                              |                  |                  |
| FREQUÊNCIA<br>(Hz)          | TENSÃO<br><i>RMS</i> (mV) | CORRENTE<br>(mA) | POTÊNCIA<br>(mW) | FREQUÊNCIA<br>(Hz) | TENSÃO<br><i>RMS</i><br>(mV) | CORRENTE<br>(mA) | POTÊNCIA<br>(mW) |
| 3,5k                        | 5,59                      | 0,919            | 0,0051           | 3.5k               | 13,54                        | 1,7              | 56,62            |
| 5k                          | 40,96                     | 3,48             | 0,14             | 5k                 | 52,35                        | 5,44             | 0,28             |
| 7,5k                        | 2,52                      | -                | -                | 7.5k               | 3,91                         | -                | -                |

**Quadro 14 – Valores de potência *RMS* produzidas pelo *tweeter* com corneta e fonte sonora a 95 dB e 115 dB.**

Com os dados coletados, geraram-se as curvas de frequência por tensão. Na figura 54 está representada a curva com a utilização de corneta e intensidade sonora de 95 dB. Na figura 55 tem-se a curva sem a utilização de corneta e com intensidade sonora de 95 dB. Já na figura 56, foram representadas as curvas de frequência por tensão sobrepostas.

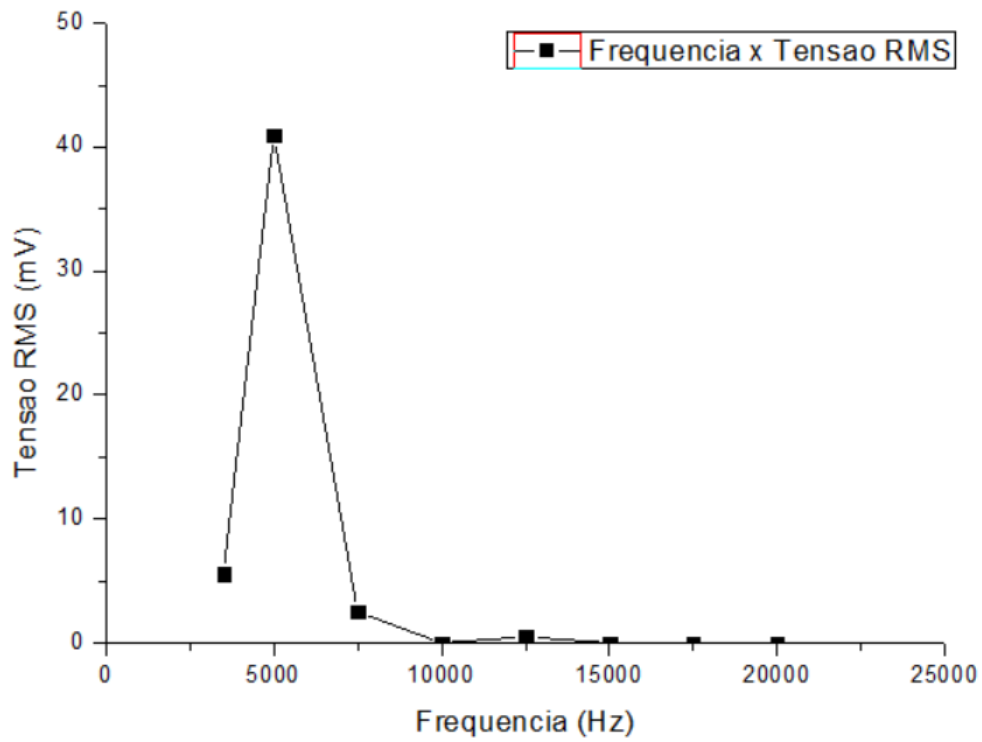


Figura 54 – Curva de Frequência x Tensão com a utilização de corneta e intensidade sonora de 95 dB.

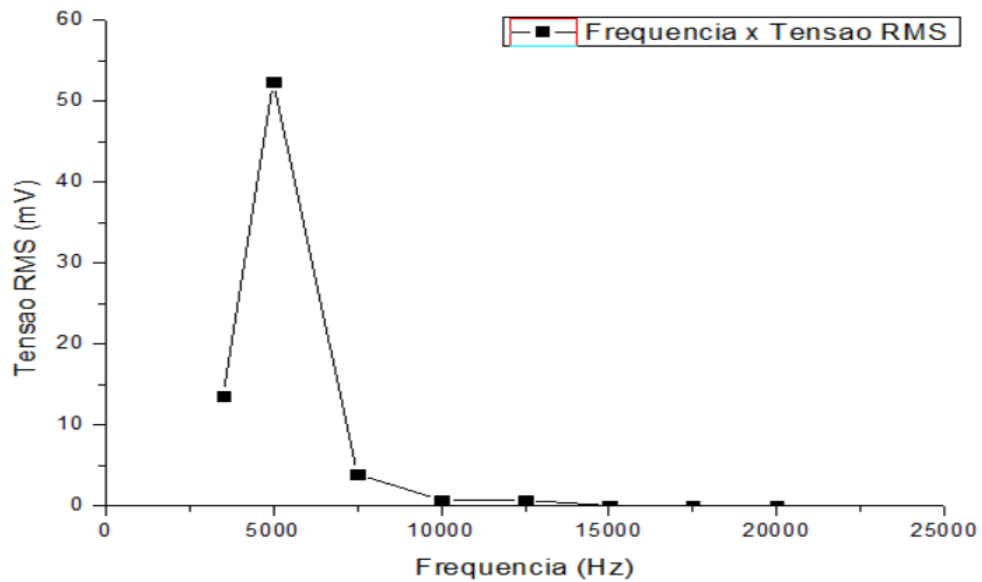
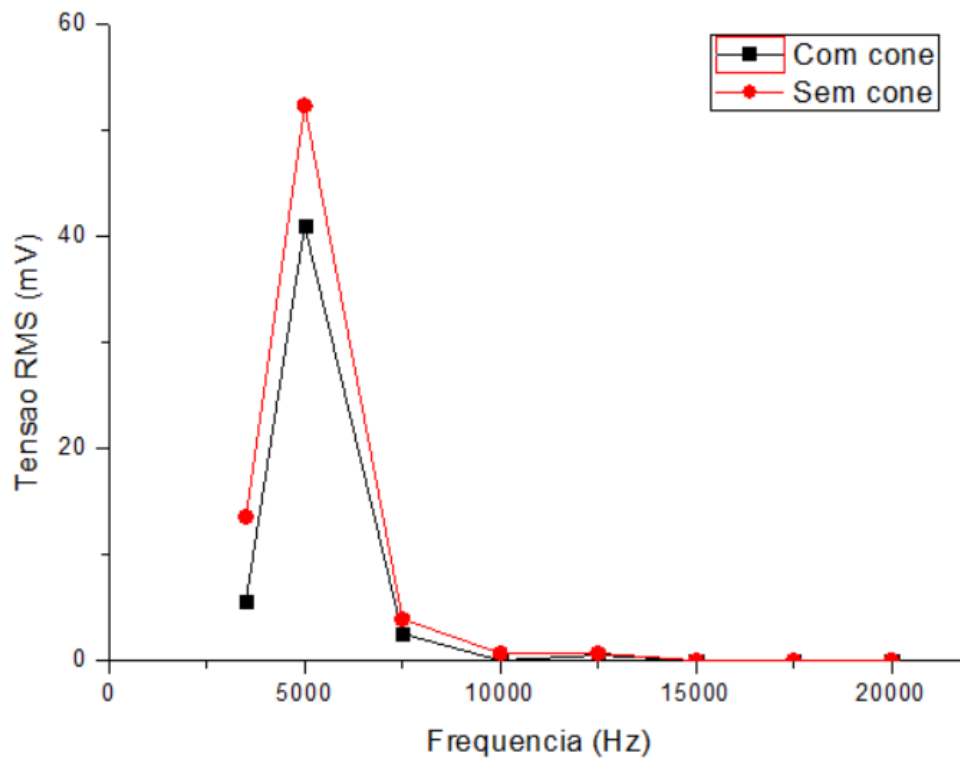


Figura 55 – Curva de Frequência x Tensão sem a utilização de corneta e intensidade sonora de 95 dB.



**Figura 56 – Curva de Frequência x Tensão, com intensidade sonora de 95 dB, com corneta e sem corneta sobrepostas.**

Na figura 57 é demonstrada a forma de onda de tensão *RMS* nos terminais dos *tweeter* com intensidade sonora de 95 dB com a utilização da corneta e frequência 5 kHz. Já a figura 58 contém a forma de tensão *RMS* sem a utilização da corneta. Na figura 59 mostra-se a forma de onda da tensão *RMS* nos terminais do resistor *shunt* com intensidade sonora de 95 dB e frequência de 5 kHz.



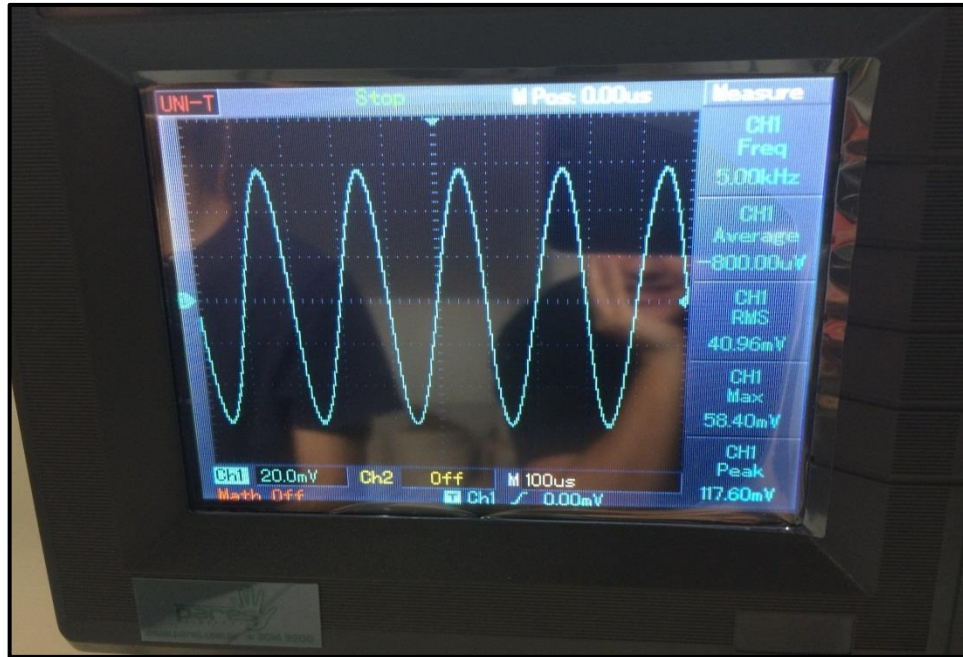


Figura 57 – Forma de onda de tensão *RMS* com intensidade sonora de 95 dB e frequência 5 kHz com a utilização de corneta.

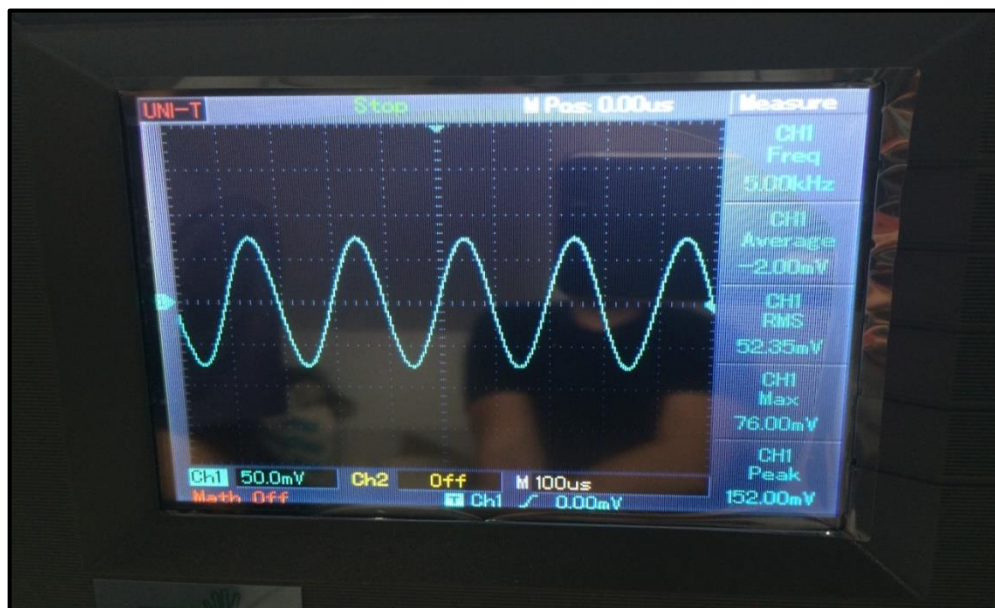


Figura 58 – Forma de onda de tensão *RMS* com intensidade sonora de 95 dB e frequência 5 kHz sem a utilização de corneta.

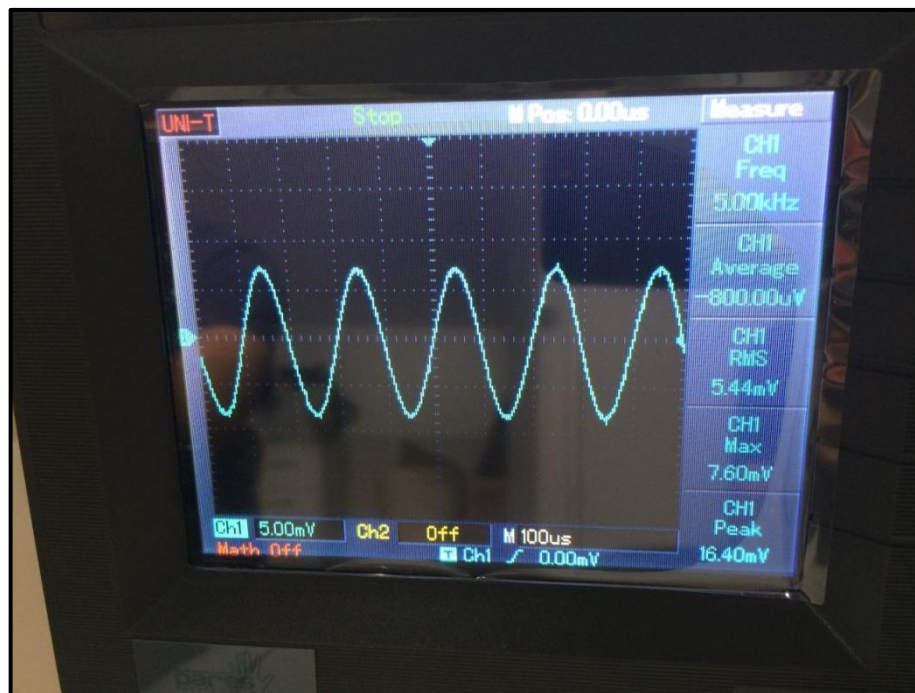


Figura 59 – Forma de onda de tensão RMS nos terminais do resistor shunt com intensidade sonora de 95 dB e frequência 5 kHz sem a utilização de corneta.

### 3.5.5 Comentários

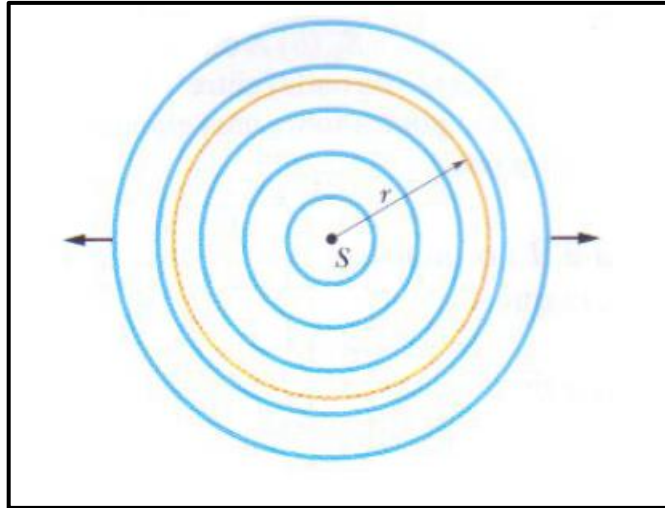
Os melhores resultados obtidos da conversão de energia sonora para sinais elétricos utilizando *tweeter* estão em frequências altas, na faixa de 2,5 kHz a 7,5 kHz. Entretanto, o melhor resultado obtido, para uma intensidade de nível sonora de 95 dB, ocorreu em uma frequência de 5 kHz e sem a utilização de corneta. Este fato diverge dos experimentos realizados em baixas frequências, onde a presença da corneta no transdutor melhorou significativamente os resultados obtidos. Além disso nota-se que em altas frequências o nível de tensão e corrente resultante do processo de conversão também diminui.

#### 4 ANÁLISE DOS RESULTADOS E DISCUSSÕES

Através dos testes realizados com os alto-falantes dos tipos *woofer*, *subwoofer* e *tweeter*, pode-se perceber uma variação significativa do nível de tensão e correntes eficazes obtidos na conversão, devido a:

- Distância entre os transdutores e a fonte sonora;
- A intensidade de nível sonoro da onda de pressão emitida;
- A utilização de cornetas para a captação do som;
- A frequência de trabalho de cada um dos alto-falantes;
- A frequência do som emitido pela fonte sonora;
- Potência nominal de cada alto-falante.

Com relação ao efeito da distância, entre a fonte emissora de som e o transdutor, na conversão de energia sonora para energia elétrica, pode-se dizer que a intensidade do som varia com a distância. Em geral, esta variação ocorre de uma forma bem complexa. Algumas fontes reais como os alto-falantes, podem emitir o som apenas em certas direções e o ambiente normalmente produz eco, resultante do fenômeno de reflexão, que se superpõem as ondas sonoras originais. Entretanto, para determinadas situações, pode-se simplificar a fonte sonora para uma fonte pontual e isotrópica, ou seja, que emite o som com uma mesma intensidade em todas as direções. As frentes de onda desta fonte podem ser representadas conforme a figura 57. (HALLIDAY; RESNICK; WALKER, 2002, p. 158).



**Figura 60 - Frentes de onda de uma fonte pontual e isotrópica.**  
**Fonte: Halliday; Resnick; Walker (2002, p. 158).**

Admitindo-se que a energia mecânica das ondas sonoras é conservada enquanto elas se espalham a partir da fonte pontual acima citada. Imagina-se então uma esfera imaginária de raio “ $r$ ” centrada no dispositivo simplificado emissor das ondas, conforme a figura 60. Toda a energia emitida pela fonte passa pela superfície da esfera. Portanto a taxa com que a energia das ondas atravessa a superfície é igual a taxa com a qual a energia é emitida pela fonte “ $P_s$ ”. De acordo com a equação 60 a intensidade “ $I_{esf}$ ” da onda sonora na superfície da esfera é dada pela equação 61.

$$I = \frac{P}{A} \quad (6058)$$

Onde:

- $I$  é a intensidade da onda sonora em uma superfície (em  $W/m^2$ );
- $P$  é a potência da onda sonora (em  $W$ );
- $A$  é a área da superfície que intercepta o som (em  $m^2$ );

$$I_{esf} = \frac{P_s}{4\pi r^2} \quad (6159)$$

Onde:

- $I_{esf}$  é a intensidade da onda sonora na superfície da esfera (em  $W/m^2$ );

- $P_s$  é a potência da fonte sonora (*em W*);
- $r$  é o raio da esfera (*em m*);

Pode-se assumir que o termo “ $4\pi r^2$ ” da equação acima exprime que a intensidade do som emitido por uma fonte pontual isotrópica diminui com o quadrado da distância “ $r$ ” da fonte. (HALLIDAY; RESNICK; WALKER, 2002, p. 158). Entretanto a potência da onda emitida pela caixa acústica não pode ser calculada pela equação 61, pois esta é uma característica construtiva constante que depende da fonte utilizada. Percebe-se que o nível de intensidade sonora “ $I$ ” depende da potência “ $P_s$ ”, mas a última não depende da intensidade sonora da onda emitida.

O rendimento de qualquer dispositivo de conversão de energia é dada pela seguinte equação: (FITZGERALD; KINGSLEY; KUSKO, 2006, p. 676)

$$\eta = \frac{\textit{saída}}{\textit{entrada}} \quad (6260)$$

Onde:

- $\eta$  é o rendimento da conversão de energia;
- *saída* é a potência gerada na conversão de energia (*em W*);
- *entrada* é a potência de entrada da máquina (*em W*).

Calculou-se a potência do som emitido a partir da potência nominal da caixa acústica, considerando-se um rendimento médio de 2 % para os alto-falantes deste equipamento (SILVA, 2004, p.6). E por fim estimou-se, através das dimensões da caixa acústica, a potência emitida por metro quadrado. Conforme o equacionamento a seguir.

$$P_e = P_n * \eta_m \quad (6361)$$

Onde:

- $P_e$  é a potência da onda de pressão sonora emitida pela caixa amplificadora (*em W*);

- $P_n$  é a potência nominal da caixa amplificadora (em  $W$ );
- $\eta_m$  é o rendimento médio da conversão nos alto – falantes.

A potência nominal da caixa acústica é de 35  $W$  e considerando o rendimento médio de 2%, tem-se que a potência de entrada da onda de pressão sonora que incide sobre a corneta é de (SILVA, 2004, p.6):

$$P_e = 35 * 0,02$$

$$P_e = 0,7 W$$

Considerando-se a área de propagação da onda igual à área da região da saída de som da caixa acústica utilizada como fonte, tem-se:

$$A_p = A_c = l * h \quad (6462)$$

Onde:

- $A_p$  é a área de seção transversal da região de propagação do som; (em  $m^2$ );
- $A_c$  é a área da saída de som da caixa amplificadora (em  $W$ );
- $l$  é a largura da região de saída de som da caixa amplificadora (em  $W$ );
- $h$  é a altura da região de saída de som da caixa amplificadora (em  $W$ ).

Assim:

$$A_p = 0,1667 m^2$$

Como:

$$P_i = \frac{P_e}{A_p} \quad (6563)$$

Onde:

- $P_i$  é a potência que incide sobre a corneta; (em  $\frac{W}{m^2}$ );
- $A_p$  é a área de seção transversal da região de propagação do som (em  $m^2$ );
- $P_e$  é a potência da onda de pressão sonora emitida pela caixa amplificadora (em  $W$ ).

Tem-se que:

$$P_i = 4,1973 \frac{W}{m^2}$$

Segundo Halliday, Resnick e Walker (2002, p.160), a área de uma superfície cilíndrica é dada por:

$$A_s = 2 * \pi * r_c * l_c \quad (6664)$$

Onde:

- $A_s$  é a área da superfície do cilindro (em  $m^2$ );
- $r_c$  é o raio da corneta (em  $m$ );
- $l_c$  é o comprimento da corneta (em  $m$ ).

Finalmente para obter a potência incidente na entrada do transdutor efetua-se a seguinte relação:

$$P_s = P_i * 2 * \pi * r_c * l_c \quad (6765)$$

Onde:

- $P_s$  é a potência incidente na entrada do transdutor (em  $W$ );
- $P_i$  é a potência que incide sobre a corneta; (em  $\frac{W}{m^2}$ );
- $r_c$  é o raio da corneta (em  $m$ );
- $l_c$  é o comprimento da corneta (em  $m$ ).

De acordo com equação 63, pode-se calcular os rendimentos dos alto-falantes receptores da seguinte forma:

$$\eta = \frac{P_r}{P_s} * 100 \quad (6668)$$

Onde:

- $\eta$  é o rendimento da conversão de energia;
- $P_r$  é a potência resultante nos terminais do transdutor (em  $W$ );
- $P_s$  é a potência incidente na entrada do transdutor (em  $W$ ).

Mantendo-se fixa a relação acima para todos os alto-falantes testados e aproximando-se a corneta por uma estrutura cilíndrica, obtiveram-se os seguintes resultados representados no quadro 15. Para se obter a potência de entrada em *Watts*, multiplicou-se a mesma pela área da estrutura cilíndrica da corneta. Os valores de potência resultante foram os resultados obtidos nos testes com corneta do capítulo 3.

| Alto-falante                | Raio da corneta (m) | Comprimento da corneta (m) | Área (m <sup>2</sup> ) | Ps (W) | Pr (W)  | $\eta$ (%) |
|-----------------------------|---------------------|----------------------------|------------------------|--------|---------|------------|
| <b>Subwoofer (25 W)</b>     | 0,085               | 0,05                       | 0,027                  | 0,112  | 0,0022  | 2,03       |
| <b>Woofers (50 W)</b>       | 0,18                | 0,25                       | 0,283                  | 1,186  | 0,055   | 4,67       |
| <b>Subwoofer 6x9 (50 W)</b> | 0,065               | 0,05                       | 0,020                  | 0,209  | 0,034   | 1,62       |
| <b>Tweeter (100 W)</b>      | 0,085               | 0,13                       | 0,069                  | 0,291  | 0,00014 | 0,048      |

Quadro 15 – Resultados dos rendimentos dos alto-falantes testados com corneta.



No quadro 16, estão representados os rendimentos da conversão de energia sonora para energia elétrica sem a utilização de corneta, considerando assim a própria área circular da frente do alto-falante no lugar da área da superfície cilíndrica  $2\pi r_c l_c$  da equação 67. Conforme apresentado na equação 68.

$$P_s = P_i * \pi * r_a^2 \quad (6967)$$

Onde:

- $P_s$  é a potência incidente na entrada do transdutor (em  $W$ );
- $P_i$  é a potência que incide sobre a corneta; (em  $\frac{W}{m^2}$ );
- $r_c$  é o raio do alto – falante (em  $m$ ).

| Alto-falante                    | Raio (m) | Área (m <sup>2</sup> ) | Ps (W) | Pr (W)  | $\eta$ (%) |
|---------------------------------|----------|------------------------|--------|---------|------------|
| <b>Subwoofer (25 W)</b>         | 0,047    | 0,0069                 | 0,029  | 0,00055 | 1,86       |
| <b>Woofers (50 W)</b>           | 0,140    | 0,061                  | 0,258  | 0,0030  | 1,2        |
| <b>Subwoofer 6x9<br/>(50 W)</b> | 0,107    | 0,035                  | 0,152  | 0,0019  | 1,25       |
| <b>Tweeter (100 W)</b>          | 0,04     | 0,005                  | 0,021  | 0,00028 | 1,34       |

Quadro 16 - Resultados dos rendimentos dos alto-falantes testados sem corneta.

Através dos resultados apresentados nos quadros acima, pode-se comprovar a afirmação de Silva (2004, p.6), em que o autor afirma que o rendimento médio dos alto-falantes é de aproximadamente 2%. Com exceção do *tweeter*, o rendimento da conversão de energia sonora para energia elétrica é maior quando se utiliza a corneta, pois consegue-se direcionar de uma forma mais eficiente a onda de pressão sonora na entrada dos alto-falantes. O *tweeter* por se tratar de um transdutor que opera em altas frequências, não consegue-se obter um rendimento maior utilizando corneta. A corneta utilizada nos alto-falantes tem como objetivo direcionar de uma forma mais eficiente a onda de pressão sonora na entrada do alto-falante em baixas frequências. Para altas frequências, a corneta acaba se

tornando um obstáculo, fazendo assim, que se tenha uma menor potência de energia sonora na entrada do alto-falante do que quando não se utiliza a corneta.

Os resultados obtidos nos experimentos realizados com os alto-falantes, em geral, obedeceram a teoria descrita acima, pois embora a intensidade sonora real, presente nos experimentos realizados, não seja igual a intensidade teorizada para uma fonte puntiforme e isotrópica, o nível de intensidade sonora incidente no equipamento transdutor diminuiu com o aumento da distância entre o transdutor e a fonte de som. Em consequência da diminuição do nível de intensidade sonora, a tensão obtida nos terminais do alto-falante, utilizado como receptor da onda de pressão, também diminuiu. Pode-se verificar este fato analisando-se os dados obtidos para baixas frequências no experimento realizado com o alto-falante 6x9, item 3.2.

A intensidade de nível sonoro conforme o item 2.4.2 é qualidade fisiológica do som através da qual se diferenciam os sons fortes dos fracos. Tem-se, ainda, que a intensidade sonora é diretamente proporcional à energia transportada pela onda. Logo quanto maior o nível sonoro, mais energia está se transferindo da fonte sonora para o transdutor.

O aumento do nível de tensão obtido nos terminais do alto-falante, utilizado como receptor e conversor de energia sonora, com a utilização de cornetas pode ser explicado pelo fenômeno da ressonância. Segundo *Young* (2009, p.158), colocando-se um tubo aberto de órgão nas proximidades de um alto-falante, conforme a figura 62, alimentado por um amplificador, emitindo ondas senoidais puras com frequência " $f$ " que pode variar ajustando-se o amplificador. O ar no interior do tubo aberto é forçado a oscilar com a mesma frequência " $f$ " da força propulsora produzida pelo alto-falante. Geralmente, a amplitude desse movimento é relativamente pequena, e o ar no interior do tubo não se move em nenhum dos modos normais apresentados na figura 61. Porém, quando a frequência " $f$ " da força propulsora possuir um valor próximo ao de uma das frequências dos modos normais, o ar no interior do tubo oscilará com a mesma frequência do modo normal em questão, e a amplitude aumentará consideravelmente. A figura 63 representa a amplitude das oscilações do ar no tubo em função da frequência " $f$ " da força propulsora. A forma do gráfico apresentado na figura citada é chamada de curva de ressonância do tubo. Ela forma picos quando o valor da frequência " $f$ " é igual a uma das frequências dos modos

normais do tubo. Além disso, a forma detalhada da curva de ressonância depende da geometria do tubo.

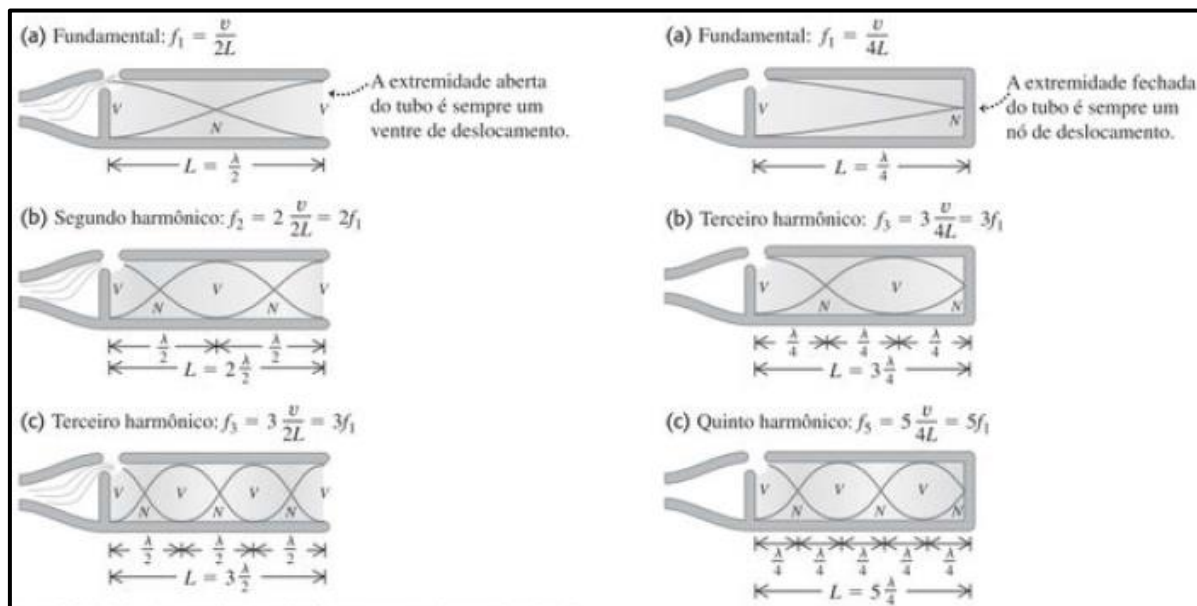


Figura 61 - Os três primeiros modos normais ou harmônicos em um tubo aberto e em um tubo fechado.

Fonte: Young; Freedman (2009, p. 156).

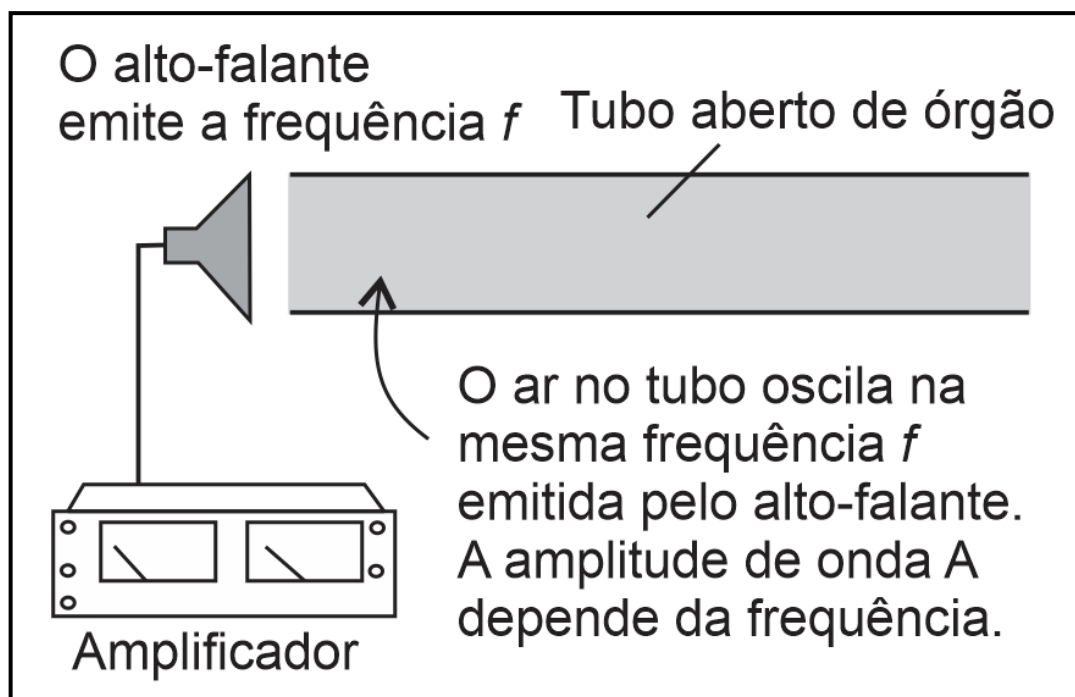
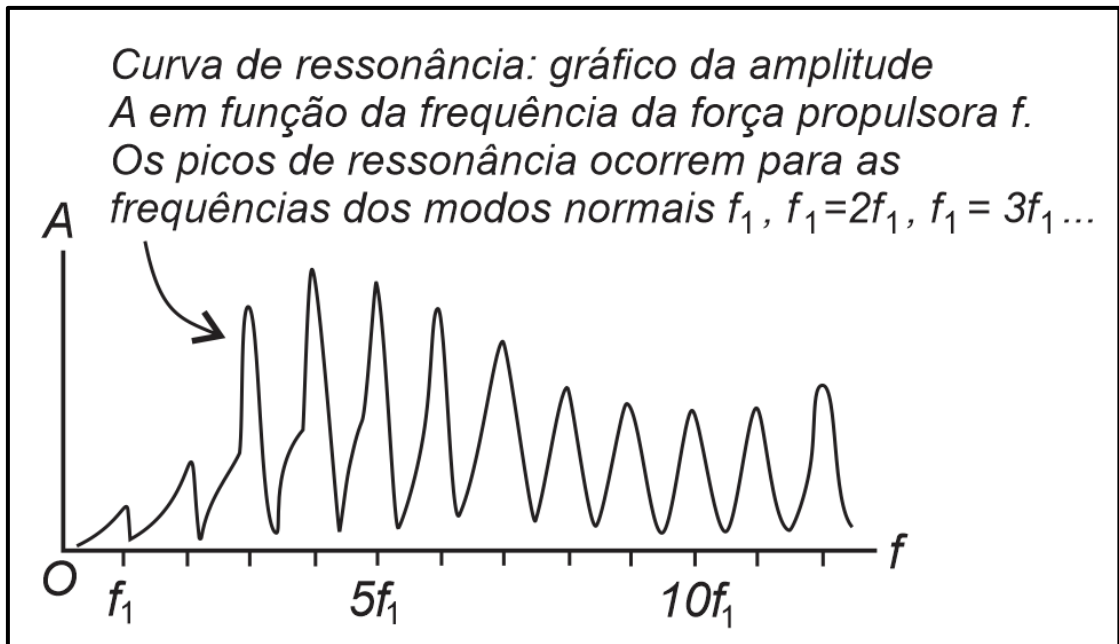


Figura 62 - O ar em tubo aberto é forçado a oscilar com a mesma frequência que as ondas senoidais oriundas de um alto-falante.

Fonte: Young; Freedman (2009, p. 157).



**Figura 63 - Curva de ressonância do tubo aberto.**  
 Fonte: Young; Freedman (2009, p. 157).

Se a frequência propulsora for exatamente igual a uma das frequências dos modos normais, a amplitude da oscilação forçada, que é um tipo de movimento onde se aplica uma força variando periodicamente sobre um sistema que pode oscilar, atingirá seu máximo. Caso não houvesse atrito nem qualquer outro mecanismo de dissipação de energia, uma força propulsora com a frequência de um modo normal continuaria a adicionar energia no sistema e a amplitude cresceria indefinidamente. Nesta condição ideal, os picos de ressonância seriam infinitamente grandes. Mas em sistemas reais existem mecanismos de dissipação de energia e amortecimento o que faz com que a amplitude da oscilação na ressonância pode ser muito grande, mas não infinita. A seguir, realizaram-se os cálculos das frequências de ressonância do primeiro e segundo harmônicos de cada uma das cornetas construídas.

$$f_1 = \frac{v}{2L} \quad (7068)$$

Onde:

- $f_1$  é a frequência de ressonância do primeiro harmônico dos modos normais (em Hz);
- $v$  é a velocidade de propagação do som ar (em  $\frac{m}{s}$ );
- $L$  é o comprimento útil da corneta (em m).

$$f_2 = \frac{2v}{2L} \quad (7169)$$

Onde:

- $f_2$  é a frequência de ressonância do segundo harmônico dos modos normais (em  $Hz$ );
- $v$  é a velocidade de propagação do som ar (em  $\frac{m}{s}$ );
- $L$  é o comprimento útil da corneta (em  $m$ ).

| Corneta                     | Comprimento (m) | Velocidade (m/s) | $f_1$ (Hz) | $f_2$ (Hz) |
|-----------------------------|-----------------|------------------|------------|------------|
| <b>Subwoofer (25 W)</b>     | 0,05            | 340              | 3400       | 6800       |
| <b>Woofer (50 W)</b>        | 0,25            | 340              | 680        | 1360       |
| <b>Subwoofer 6x9 (50 W)</b> | 0,06            | 340              | 2800       | 5600       |
| <b>Tweeter (100 W)</b>      | 0,13            | 340              | 1300       | 2615       |

Quadro 17 - Valores de frequência de ressonância para primeiro e segundo harmônico de corneta.

Segundo o quadro 17 observa-se que as frequências de ressonância não influenciaram nos testes realizados, pois tratam-se de altas frequências que não foram testadas nos experimentos.

O formato geométrico da corneta influenciou diretamente nos experimentos realizados. Os resultados de tensão e corrente *RMS* apresentados com a utilização de cornetas cônicas, conforme figura 64, se mostraram melhores do que no experimento realizado com estrutura “não-cônica” ou semi-esférica, conforme representado na figura 65. No caso de não se utilizar corneta nem qualquer tipo estrutura no receptor da onda de pressão, conforme a Figura 66, os resultados obtidos foram piores que os resultados do experimento realizado com corneta e melhores que o experimento com a utilização da estrutura esférica. Estes resultados convergem com o fato de que as cornetas contribuem para o aumento na concentração das ondas de pressão, conforme citado no item 2.8.3.1.

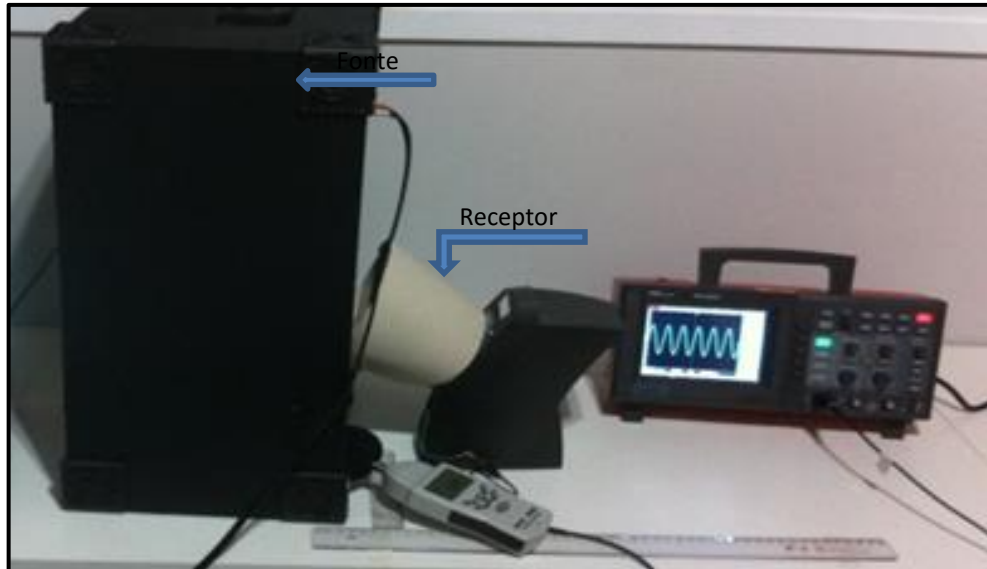


Figura 64 - Transdução da energia sonora em *subwoofer* utilizando corneta cônica.



Figura 65 - Transdução da energia sonora em *subwoofer* utilizando estrutura semi-esférica na recepção da onda de pressão.



Figura 66 - Transdução da energia sonora em *subwoofer* sem a utilização de corneta.

A seguir nos quadros 18, 19 e 20 estão representados os resumos dos melhores resultados de corrente, tensão e potência *RMS*, obtidos na conversão da energia sonora com a utilização dos alto-falantes *subwoofer* de 25 W, *subwoofer* de 50 W, *woofer* de 50W e *tweeter* de 100 W, respectivamente.

|                             | Frequência (Hz) | Nível Sonoro (dB) | Tensão (mV) | Corrente (mA) | Potência (mW) |
|-----------------------------|-----------------|-------------------|-------------|---------------|---------------|
| <b>Subwoofer (25 W)</b>     | 120             | 115               | 144,44      | 15,45         | 2,22          |
| <b>Subwoofer 6x9 (50 W)</b> | 120             | 95                | 213,32      | 15,97         | 3,406         |
| <b>Woofers (50 W)</b>       | 120             | 115               | 693,11      | 80,25         | 55,62         |
| <b>Tweeter (100 W)</b>      | 5000            | 95                | 40,96       | 3,48          | 0,142         |

Quadro 18 - Quadro comparativo dos melhores resultados dos transdutores acústicos utilizando corneta.

|                                | Frequência<br>(Hz) | Nível Sonoro<br>(dB) | Tensão (mV) | Corrente (mA) | Potência<br>(mW) |
|--------------------------------|--------------------|----------------------|-------------|---------------|------------------|
| <i>Subwoofer</i><br>(25 W)     | 120                | 95                   | 35,22       | 3,17          | 0,111            |
| <i>Subwoofer</i><br>6x9 (50 W) | 120                | 95                   | 213,32      | 15,97         | 3,406            |
| <i>Woofers</i> (50<br>W)       | 80                 | 95                   | 381,83      | 24,75         | 9,44             |
| <i>Tweeter</i> (100<br>W)      | 5000               | 95                   | 40,96       | 3,48          | 0,142            |

Quadro 19 - Quadro comparativo dos transdutores acústicos com mesma intensidade sonora utilizando corneta.

|                                | Frequência<br>(Hz) | Nível Sonoro<br>(dB) | Tensão (mV) | Corrente (mA) | Potência<br>(mW) |
|--------------------------------|--------------------|----------------------|-------------|---------------|------------------|
| <i>Subwoofer</i><br>(25 W)     | 120                | 115                  | 68,73       | 8,08          | 0,555            |
| <i>Subwoofer</i><br>6x9 (50 W) | 120                | 95                   | 174,40      | 10,99         | 1,916            |
| <i>Woofers</i> (50<br>W)       | 80                 | 95                   | 204,04      | 15,17         | 3,095            |
| <i>Tweeter</i> (100<br>W)      | 5000               | 95                   | 52,35       | 5,44          | 0,284            |

Quadro 20 - Quadro comparativo dos melhores resultados utilizando transdutores acústicos sem corneta.



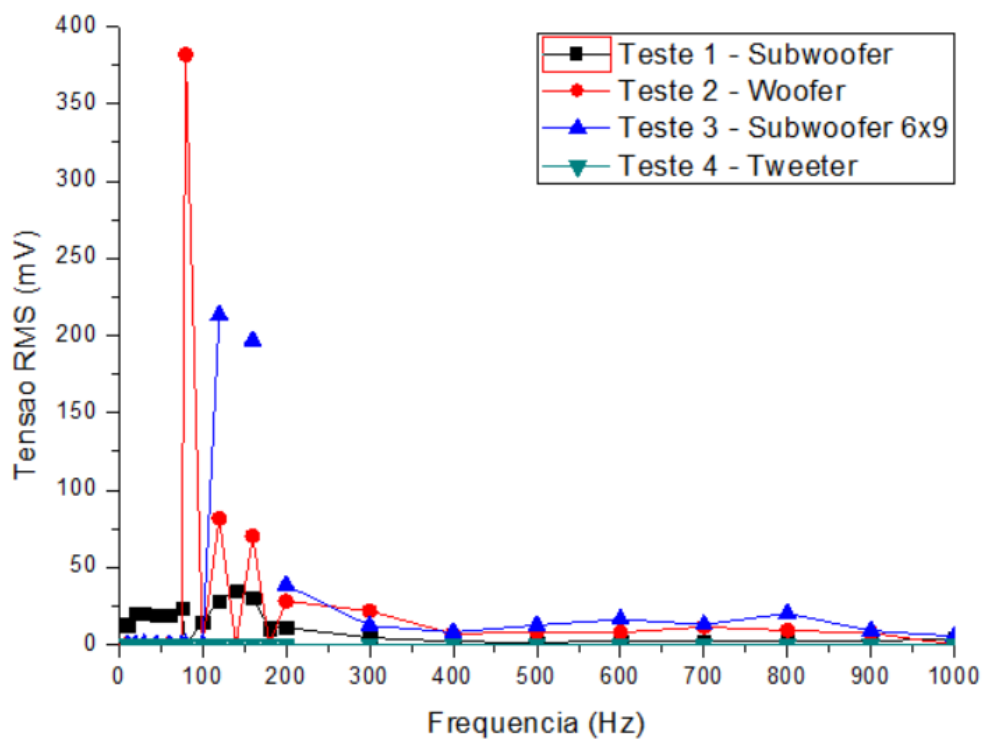


Figura 67- Gráfico de tensão x frequência com os seguintes transdutores: *Woofer*, *Subwoofer*, *Subwoofer 6x9* e *Tweeter*.

## 5 DESENVOLVIMENTO DO PROTÓTIPO

Neste capítulo apresenta-se a composição, montagem e funcionamento de um protótipo conversor de energia sonora para energia elétrica, composto por um alto-falante, uma corneta e um circuito retificador na saída do alto-falante.

### 5.1. Materiais Utilizados

Os seguintes materiais foram utilizados:

- 1 Alto Falante *Woofers* 12 pol, 8  $\Omega$ , 50 W;
- 1 Corneta plástico 25x42x40 cm (diâmetro menor x comprimento x diâmetro maior);
- 1 protoboard minipa 830A;
- 1 capacitor 1000  $\mu$ F, 35V;
- 4 diodos de germânio 1n60;

### 5.2. Montagem do protótipo

Inicialmente acoplou-se o alto-falante *woofers* 50 W a uma corneta de plástico de 25x42x40 cm (diâmetro menor x comprimento x diâmetro maior), conforme a figura 67. Posteriormente montou-se um circuito retificador em ponte de onda completa representado na figura 68, com quatro diodos de germânio 1n60 ( $V_T = 0,3 V$ ) e um capacitor eletrolítico de 1000  $\mu$ F, 35 V. Finalmente conectou-se o circuito retificador na saída do alto-falante, como apresentado na figura 69.



Figura 68 - Corneta de plástico acoplada ao alto-falante woofer.

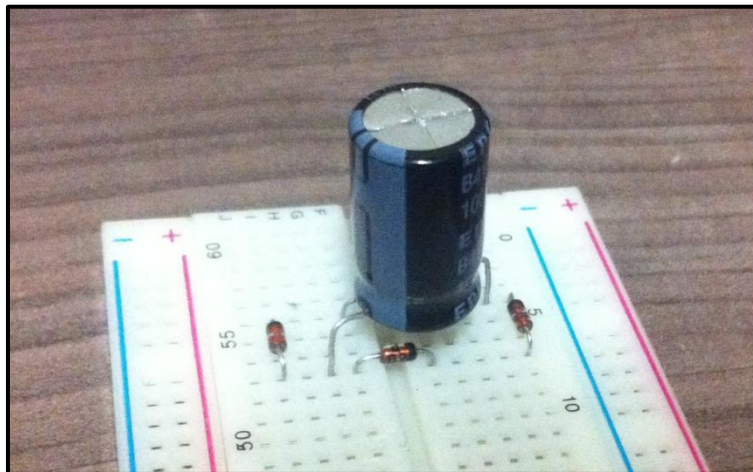


Figura 69 - Circuito retificador onda completa com diodos de germânio.



**Figura 70 - Conexão dos terminais do alto-falante com o circuito retificador em ponte de onda completa.**



**Figura 71 - Protótipo conversor de energia sonora para energia elétrica em corrente contínua.**

### 5.3. Funcionamento do protótipo

Pode-se dividir o funcionamento do protótipo em três etapas. A primeira etapa é a transdução da energia sonora em energia elétrica com uma forma de onda senoidal, conforme a figura 71, que é adquirida conectando-se o osciloscópio diretamente nos terminais do alto-falante. Na segunda etapa, como apresentado na figura 72, retifica-se a onda senoidal obtida nos terminais do transdutor através de

uma ponte retificadora de onda completa a diodo. E então na terceira etapa conecta-se um capacitor na saída da ponte retificadora para eliminar o perfil pulsado da forma de onda resultante, ou seja, para eliminar o efeito de *ripple*, assim obtem-se uma tensão contínua estável nos terminais de saída do protótipo, apresentada na figura 73.

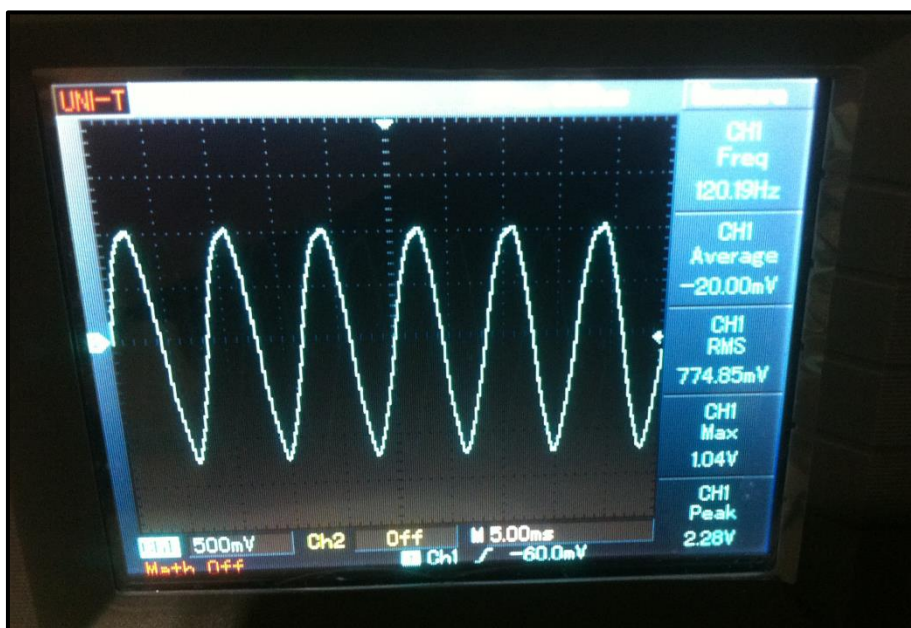


Figura 72 - Forma de onda nas terminais adquirida diretamente nos terminais do alto-falante.

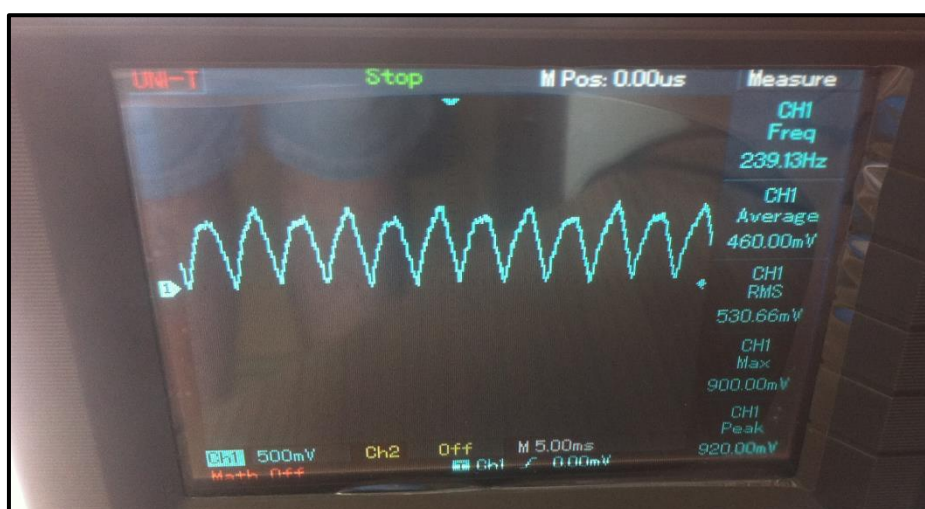


Figura 73 - Forma de onda adquirida após a retificação com ponte retificadora de onda completa.

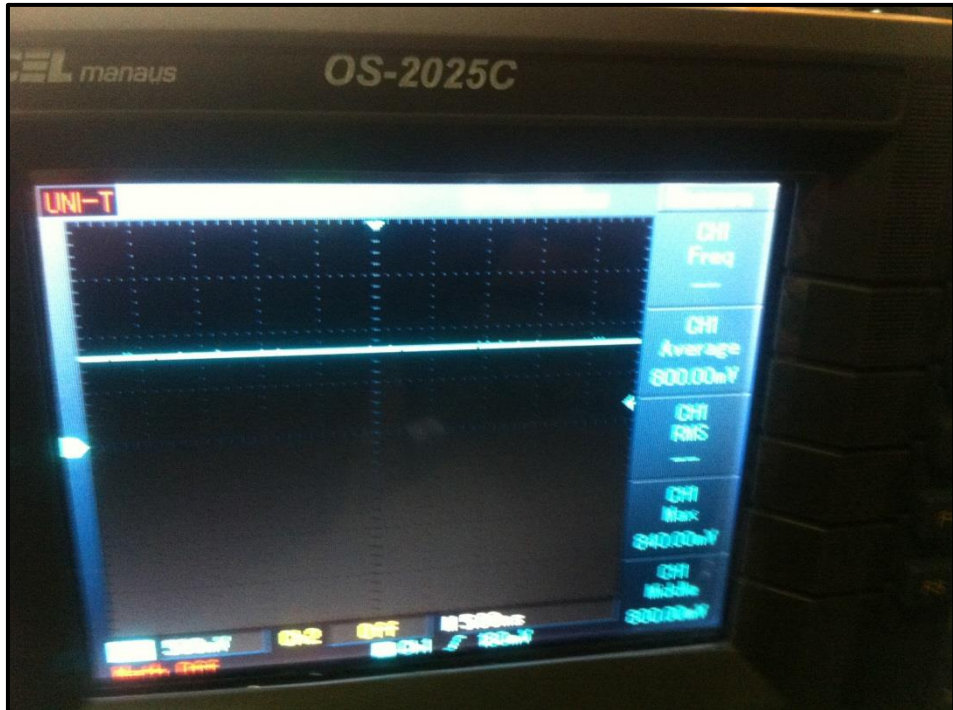


Figura 74 - Forma de onda adquirida após a inserção de um capacitor na saída da ponte retificadora.

#### 5.4. Transdução de Energia Sonora em Energia Elétrica utilizando o protótipo

##### 5.4.1. Objetivo

Analisar a conversão da energia sonora para energia elétrica utilizando o protótipo apresentado na figura 68. As frequências da fonte sonora escolhidas para a realização deste experimento são as mesmas dos resultados mais significativos no teste do alto-falante *woofer*, item 3.3, pois este é o equipamento transdutor presente no protótipo. Manteve-se a intensidade sonora constante em 115 dB.

##### 5.4.2. Materiais utilizados

- 1 Alto Falante *Woofer* 12 pol, 8  $\Omega$ , 50 W;

- 1 Osciloscópio ICEL OS-2025C 25 MHz;
- 1 Computador com *Software Online Tone Generator*;
- 3 Protetores Auriculares;
- 1 Decibelímetro *Hikari* HDB882;
- 1 Caixa Amplificadora LL-140;
- 1 Resistor *Shunt* 1  $\Omega$  +/- 1%;
- 1 Corneta de plástico 25x42x40 cm (diâmetro menor x comprimento x diâmetro maior).
- 1 protoboard Minipa 830A;
- 1 capacitor 1000  $\mu$ F, 35V;
- 4 diodos de germânio 1n60;

#### 5.4.3. Metodologia adotada

Para a geração do som, em diversas faixas de frequência, utilizou-se um computador munido do *Software Online Tone Generator*, representado na figura 28, uma caixa de som que representa a fonte sonora e um decibelímetro. Através da caixa amplificadora, conectada ao computador, munido do *software* de simulação da onda de pressão, reproduziu-se o som nas faixas de frequências escolhidas, que neste experimento abrangem a faixa de 10 Hz a 200 Hz. Foi definida, também, a forma da onda de pressão como senoidal. Utilizou-se como equipamento transdutor o protótipo descrito acima.



**Figura 75 - Corneta de plástico utilizada no protótipo.**

A captação da forma de onda e dos valores de intensidade de tensão *RMS*, produzida pelo protótipo, foram realizadas através de um osciloscópio digital conectado nos terminais do equipamento. A distância entre caixa amplificadora (fonte) e o receptor foi de 22 cm.

#### 5.4.4. Resultados

No quadro 11 está representado os valores de tensão produzidos na transdução da energia sonora, de intensidade de nível sonora de 95 dB, emitida através da caixa amplificadora em diversas frequências para sinais elétricos nos terminais do protótipo.

| FREQUÊNCIA (Hz) | INTENSIDADE SONORA (dB) | TENSÃO CC (mV) |
|-----------------|-------------------------|----------------|
| 10              | 115                     | 240            |
| 20              | 115                     | 696            |
| 30              | 115                     | 432            |



|     |     |     |
|-----|-----|-----|
| 45  | 115 | 440 |
| 60  | 115 | 392 |
| 80  | 115 | 416 |
| 120 | 115 | 800 |
| 160 | 115 | 240 |
| 200 | 115 | 188 |

**Quadro 21 - Valores de tensão em corrente contínua produzidos na transdução de energia sonora para energia elétrica através do protótipo a 115 dB.**

#### 5.4.5. Comentários

Os melhores resultados obtidos da conversão de energia sonora para sinais elétricos utilizando o protótipo estão em baixas frequências e observou-se que após 200 Hz os resultados de tensão contínua tornam-se cada vez menos expressivos. Para a frequência de 120 Hz, em uma intensidade sonora de 115 dB, conseguiu-se o melhor resultado em termos de rendimento, apresentando uma tensão contínua de 800 mV.

## 6 CONCLUSÃO

O principal objetivo desse trabalho foi a realização de um estudo sobre a transdução de energia sonora para energia elétrica através de testes experimentais com três tipos de transdutores acústicos: *woofer*, *subwoofer* e *tweeter*. Para isso, foi necessário um estudo mais detalhado sobre ondas sonoras, campo magnético e conversão de energia eletromecânica, apresentados no capítulo 2.

A primeira dificuldade encontrada foi na obtenção de informação sobre conversão de energia sonora para energia elétrica. Por ser um tema pouco estudado no meio científico, e também, pouco difundido nas disciplinas da Engenharia Elétrica, a quantidade de informações são bastantes restritas. No Brasil praticamente não existe pesquisa sobre o tema, portanto, buscou-se apresentar de forma objetiva um estudo sobre as características dos sensores e transdutores.

Após o estudo mais detalhado sobre ondas sonoras, sensores, transdutores e campo magnético, iniciou-se os experimentos com os transdutores acústicos para observar o comportamento da conversão da energia sonora para energia elétrica. Através dos dados apresentados no capítulo 3 e das análises do capítulo 4, nota-se que existem diversos fatores que influenciam na transdução da energia sonora para energia elétrica. Para que o sistema se torne viável, é necessário que todos esses fatores sejam considerados para o melhor aproveitamento na conversão. Por serem fatores muito sensíveis, como por exemplo, a intensidade sonora e a frequência, deve-se realizar um estudo aprofundado da localidade em que o dispositivo de conversão sonoro-elétrico será alocado.

Outra dificuldade encontrada foi na realização dos experimentos com os alto-falantes. Devido ao alto nível de intensidade sonora e diversas faixas de frequências analisadas, foi de grande incômodo a permanência no local sob o alto nível de intensidade sonora por diversas horas. Para tentar amenizar o incômodo, foram utilizados protetores auriculares e abafadores.

Apesar das dificuldades encontradas, o objetivo final foi alcançado. O estudo detalhado dos alto-falantes, varrendo diversas faixas de frequência e alterando fatores como intensidade sonora, potência nominal e distância, foi finalizado. Pode-se considerar um estudo inédito dos alto-falantes, já que no Brasil não existe nenhum estudo publicado que se assemelha ao estudado.

Uma particularidade desse trabalho, foi a elaboração das curvas de tensão por frequência dos dispositivos eletroacústicos. Através das curvas, é possível verificar em quais faixas de frequências os transdutores possuem melhor rendimento na geração de tensão *RMS*, e também, o fornecimento de dados sobre qual dispositivo possui o melhor rendimento na conversão de energia sonora para energia elétrica. Assim, foi possível notar que o transdutor que possui o melhor aproveitamento na conversão de energia foi o *woofer* utilizando corneta. Por outro lado, foi possível notar através do quadro 14 que o *tweeter* foi pouco efetivo na conversão da energia dissipada.

Para que o projeto de conversão de energia do som para energia elétrica se torne viável em termos comerciais, ainda são necessários estudos mais elaborados. Através dos resultados apresentados neste trabalho, é possível que sejam realizados estudos mais aprofundados sobre o assunto para a otimização e desenvolvimento do sistema. Cita-se algumas propostas como:

- Formas de associações de alto-falantes;
- Desenvolvimento de filtros para a captação da frequência que obtenha o melhor rendimento para o transdutor;
- Estudo da viabilidade da conversão de energia sonora para energia elétrica utilizando alto-falante como transdutor;
- Estudo da conversão de energia sonora para energia elétrica em ambientes diversificados;
- Aplicação em sistemas de baixa potência como: sensores remotos, microcontroladores e carregadores de baterias.

## REFERÊNCIAS

APINEX. **Módulos Laser Verde**. Disponível em: < <http://www.apinex.com/pt/Modulos-laser-verde.html>>. Acesso em: 17 de set. de 2015.

ART STUDIO. **Produção Musical**. Disponível em: < <http://www.Artsomstudio.com.br/>>. Acesso em: 26 de maio de 2015.

BALBINOT, Alexandre. **Instrumentação e Fundamentos de Medidas**. Vol 1. 2 ed. Rio de Janeiro: LTC, 2011.

BASTOS, J. P. A. **Eletromagnetismo para engenharia, Estática e quase estática**. 3ª edição revista. Florianópolis: Editora da UFSC, 2012.

BOCTOR, S. A. **Análise de circuitos elétricos**. 2 ed. Englewood Cliffs: Prentice-Hall, 1992.

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

DOMINGOS, B.C; WEISS, C; WOLF S.C. **Transdução da Energia Sonora para Sinais Elétricos Utilizando Material Piezoelétrico**. Curitiba:UTFPR, 2013.

EDISON TECH CENTER. **História e Tipos de Alto-Falantes**. Disponível em: <<http://www.edisontechcenter.org/speakers.html>>. Acesso em: 26 de maio de 2015.

ELETROBRÁS, PROCEL & CEPEL, “**Guia Técnico Motor de Alto Rendimento**”, agosto de 1998.

ENCICLOPÉDIA BRITANNICA. **Sound-Level Meter**. Disponível em: <<http://www.britannica.com/technology/sound-level-meter>>. Acesso em: 14 de maio de 2015.

FALCONE, A. Gilberto. **Eletromecânica: transformadores e transdutores, conversão eletromecânica de energia, máquinas elétricas**. Vol 1. 1 ed. São Paulo: E. Blücher, 1979.

FELER, L. A.; RIGONI, M.; STAUDT, T.; SANTOS H. F.; ELIAS R. A.; SADOWSKI N.; KUO-PENG P.; BATISTELA N. J. **Desenvolvimento de um sistema para captar energia a partir de campos magnéticos dispersos**. Universidade Federal de Santa Catarina, UFSC Florianópolis, Brasil, 2014.

FITZGERALD, A. E.; KINGSLEY, Charles; KUSKO, Alexander. **Máquinas elétricas: conversão eletromecânica da energia, processos, dispositivos e sistemas**. São Paulo: McGraw-Hill, 2006.

FRADEN, Jacob. **Handbook of Modern Sensors**. 4ª ed. Nova Iorque: Editora Springer Science and Business Media, 2010.

FUDOLI, U.J. **Exposição Ocupacional ao Ruído**. Belo Horizonte: Pitágoras, 2012.

George R. School of Engineering. **Resistive Voltage Dividers**. Rice University Disponível em: <<http://www.ece.rice.edu/~jdw/241/exp3.1.html>>. Acesso em: 26 de maio de 2015.

HAICAL, R. da Cruz. **Estudos sobre a avaliação de sistemas de amplificação e reprodução de som através de técnicas adaptativas**. Universidade Católica de Pelotas, 2003.

HALLIDAY, David; RESNICK, Robert; Walker, Jearl. **Fundamentos de Física: Eletromagnetismo**. Vol 3. 6 ed. Rio de Janeiro: LTC, 1996.

HALLIDAY, David; RESNICK, Robert; Walker, Jearl. **Fundamentos de Física: Eletromagnetismo**. Vol 3. 6 ed. Rio de Janeiro: LTC, 2002.

HALLIDAY, David; RESNICK, Robert; Walker, Jearl. **Fundamentos de Física: Gravitação, Ondas e Termodinâmica**. Vol 2. 4 ed. Rio de Janeiro: LTC, 1996.

HALLIDAY, David; RESNICK, Robert; Walker, Jearl. **Fundamentos de Física: Gravitação, Ondas e Termodinâmica**. Vol 2. 6 ed. Rio de Janeiro: LTC, 2002.

HAYT JUNIOR, H. William. **Eletromagnetismo**. 2 ed. São Paulo: Mcgraw Hill – LTC, 1983.

HAYT JUNIOR, H. William; BUCK, A. John. **Eletromagnetismo**. 7 ed. São Paulo: Mcgraw Hill – Artmed, 2003.

HIRCHBERG, A; RIENSTRA, S. W. **An Introduction to Acoustics**. IWDE 96-02 ed. Eindhoven University of Technology, 2006.

IMPAC. **Multímetro de Bancada Digital True RMS 4 ½ Dígitos IP-4128B**. Disponível em: <<http://www.multimetrodigital.com/bancada/truerms/multimetrobancada.html>>. Acesso em 4 de junho de 2015.

INFINITY SOM. **Som Tuning e Equipamentos Eletrônicos**. Disponível em: <[www.infinitysom.com.br](http://www.infinitysom.com.br)>. Acesso em: 26 de maio de 2015.

KNIGHT, D. RANDALL. **Física uma abordagem estratégica**. Vol 3. 2º ed. São Paulo: Bookman, 2009.

KOLBREK, Bjorn. **Development of Horn Loudspeakers Before 1940**, Orsted-University of Science and Technology, Trondheim, Noruega: Forum Acusticum, Krakow, 2014.

KOLBREK, Bjorn. **Horn Theory: An Introduction, Part 1**. AudioXpress Article, 2008.

LIMA, S. Raone; MARQUES, V.T. Henrique; VARGAS, E.A. Victor. **Projeto final da disciplina de Eletromagnetismo 1**. Disponível em: <<http://altofalanteufes2007.blogspot.com.br/>>. Acesso em: 26 de maio de 2015.

MATVEEV, A. N. **Eletricity and Magnetism**. Russia, Moscou, 1975.

MORECHI, C. João. **Propriedades da Madeira**. 4° ed. Curitiba: Setor de Ciências Agrárias da UFPR, 2012. Disponível em: <<http://www.madeira.ufpr.br/disciplinasmoreschi/PROPRIEDADES%20DA%20MADEIRA.pdf>>. Acesso em: 11 de maio de 2015.

NBR 10303. **Alto-Falantes: Comprovação de Potência Elétrica Admissível**. ABNT, 1988.

NEPOMUCENO L.X. **Acústica**. São Paulo: Edgar Blücher; 1997.

NOGUEIRA, F.H, Maria; RAMOS, G. Eleone; PEIXOTO, V.M, Maria. **Identificação de Fontes de Ruído e de Pressão Sonora em Unidade Neonatal**. Rio de Janeiro: UERJ, 2011.

NUSSENZVEIG, H Moysés. **Curso de Física Básica 2 – Fluidos, Oscilações e Ondas, Calor**. Vol 2. 4° ed. São Paulo: Edgard Blücher Ltda, 2002.

NUSSENZVEIG, H Moysés. **Curso de Física Básica 3 – Eletromagnetismo**. Vol 3. 1° ed. São Paulo: Edgard Blücher Ltda, 1997.

NOSOLINE, N.V. Mário. **Estudo Comparativo Entre Dois Métodos de Medição de Impedância**. Rio de Janeiro: Universidade Federal do Rio de Janeiro. 2007.



ØYEN, Karsten. **Compensation of loudspeakers nonlinearities**. Orsted-DTU – Acoustic Technology Technical University of Denmark, 2007.

RAMALHO JUNIOR, Francisco; TOLEDO, S. Paulo; FERRARO, G. Nicolau. **Os Fundamentos da Física 2 – Termologia, óptica e ondas**. Vol 2. 9° ed. São Paulo: Moderna Ltda, 2007.

SILVA, Carlos C.; SILVA, Homero S. **Alto-Falantes e Caixas Acústicas, Características e Utilização**. Eletrônica Selenium S.A. Nova Santa Rita - RS, 2004.

SØRENSEN, B. **Renewable Energy Conversion, Transmission and storage**. Roskilde University, Denmark: Academic Press, 2007.

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

TIPLER, Paul A.; MOSCA, Gene; **Física para Cientistas e Engenheiros Mecânica, Oscilações e Ondas, Termodinâmica**. Vol 1. 6 ed. Rio de Janeiro: LTC, 2002.

UFSC. **Moodle UFSC – Apoio aos Cursos Presenciais**. Disponível em <<https://moodle.ufsc.br/mod/book/tool/print/index.php?id=504285>>. Acesso em: 19 de junho de 2015.

YOUNG, Hugh D.; FREEDMAN, Roger A. **Física III: Eletromagnetismo**. 10 ed. São Paulo: Pearson Addison Wesley, 2005.

YOUNG, Hugh D.; FREEDMAN, Roger A. **Física II: Termodinâmica e Ondas**. 12 ed. São Paulo: Pearson Addison Wesley, 2009.

VIVES, A. Arnau. **Piezoelectric Transducers and Applications**. Springer, 2004.

## **APÊNDICE A**

**ESTUDO DE CASO – Transdução de Som em Sinais Elétricos, com Variação de Frequência e a um Mesmo Nível de Intensidade Sonora.**

## APRESENTAÇÃO

### TEMA

Transdução de onda sonora para sinal elétrico através de um alto-falante eletrodinâmico *mid-range* com variação de frequência, a uma mesma intensidade de nível sonoro (97dB).

### OBJETIVO

Verificar o comportamento da forma de onda da tensão elétrica e suas maiores intensidades na forma de onda adquirida, variando a frequência do som emitido pela fonte com uma intensidade de nível sonoro de 97 dB.

### PERÍODO DE APLICAÇÃO

06 de maio de 2015

### MATERIAS UTILIZADOS

- Alto-falante 4 ohms 12 W.
- Multímetro Fluke 15B.
- Fonte Sonora: Caixa de Som com alto-falantes *Sattelite*.
- 2 cabos banana jacaré.
- 1 computador com *software* para a reprodução do som em frequências distintas.
- 1 protetor auricular;
- 1 Osciloscópio Tectronix TDS220.

### METODOLOGIA ADOTADA

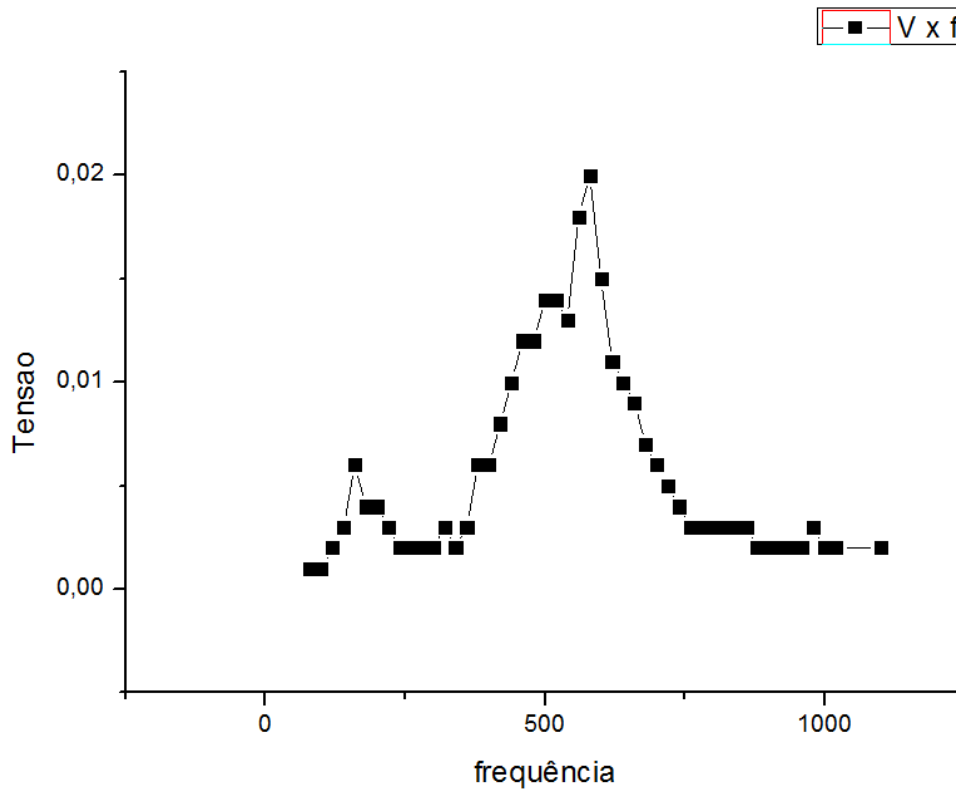
Para a geração da onda sonora utilizou-se um computador, munido de um *software* para reprodução de som em várias frequências diferentes, conectado a

uma caixa de som, constituída por um alto-falante *mid-range*. Como transdutor eletromecânico da onda de pressão para sinais elétricos adaptou-se outro alto-falante *mid-range*, com 12W de potência ativa e impedância de 4 ohms.

Posteriormente conectaram-se os terminais do alto-falante transdutor a um osciloscópio e verificaram-se as intensidades de valores de tensão *RMS* produzidas pelo sistema para cada valor frequência entre 0 e 2 kHz.

## RESULTADOS

GRÁFICO DE FREQUÊNCIA POR TENSÃO GERADA.



## COMENTÁRIOS

Verificou-se que os maiores valores de tensão *RMS* adquiridos no experimento realizado encontram-se, aproximadamente, entre as frequências de 360 e 760 Hz, conforma o gráfico acima. Resultado que era esperado para a resposta em frequência dos tipos de alto-falantes envolvidos. Notou-se também que o maior valor de tensão *RMS* de saída do transdutor ocorreu na frequência de aproximadamente 580 Hz.

## **APÊNDICE B**

**ESTUDO DE CASO – Transdução de Som em sinais elétricos, com frequência de 580 Hz e a um Mesmo nível de Intensidade Sonora.**

## APRESENTAÇÃO

### TEMA

Transdução de onda sonora, com frequência de 580 Hz, para sinal elétrico através de um alto-falante eletrodinâmico *mid-range*, a uma mesma intensidade de nível sonoro (97dB).

### OBJETIVO

Verificar o comportamento da forma de onda da tensão elétrica convertida de uma frequência de som de 580 Hz emitido pela fonte, com uma intensidade de nível sonoro de 97 dB.

### PERÍODO DE APLICAÇÃO

06 de maio de 2015

### MATERIAS UTILIZADOS

- Alto-falante 4 ohms 12 W.
- Multímetro Fluke 15B.
- Fonte Sonora: Caixa de Som com alto-falantes *Sattelite*.
- 2 cabos banana jacaré.
- 1 computador com *software* para a reprodução do som em frequências distintas.
- 1 protetor auricular;
- 1 Osciloscópio Tectronix TDS220.



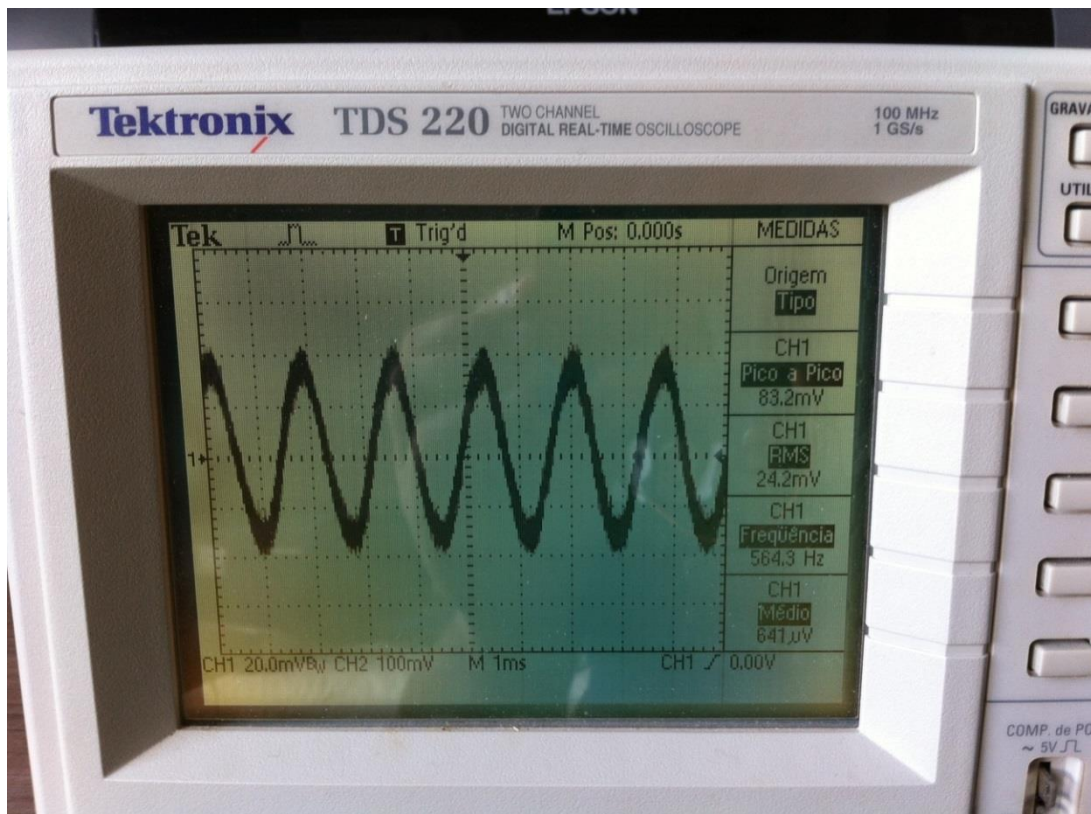
## METODOLOGIA ADOTADA

Para a geração da onda sonora utilizou-se um computador, munido de um software para reprodução de som em várias frequências diferentes, conectado a uma caixa de som, constituída por um alto-falante *mid-range*. Como transdutor eletromecânico da onda de pressão para sinais elétricos adaptou-se outro alto-falante *mid-range*, com 12 W de potência ativa e impedância de 4 ohms.

Posteriormente conectaram-se os terminais do alto-falante transdutor a um osciloscópio e verificou-se a forma de onda de tensão produzida pelo sistema para um valor de frequência de 580 Hz.

## RESULTADOS

FORMA DE ONDA DE TENSÃO GERADA PARA UMA ONDA SONORA SENDO EMITIDA A 580 Hz.



## COMENTÁRIOS

Verificou-se um valor de tensão *RMS* na saída do alto-falante transdutor de 24,2 mV. Conforme apresentado na figura acima.