

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
ESCOLA DE ENGENHARIA - CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA
TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

A ENERGIA SONORA COMO POSSÍVEL GERADORA DE ENERGIA ELÉTRICA

por

ADRIEL DE CASTRO SILVÉRIO

Monografia apresentada ao Departamento de Engenharia Mecânica da Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como parte dos requisitos para obtenção do diploma de Engenheiro Mecânico.

Porto Alegre, 19 de setembro de 2022

CIP - CATALOGAÇÃO NA PUBLICAÇÃO

DE CASTRO SILVÉRIO, ADRIEL

A ENERGIA SONORA COMO POSSÍVEL GERADORA DE ENERGIA ELÉTRICA / ADRIEL DE CASTRO SILVÉRIO. -- 2022.

26 f.

Orientadora: LETICIA FLECK FADEL MIGUEL.

Trabalho de conclusão de curso (Graduação) -- Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Escola de Engenharia, Curso de Engenharia Mecânica, Porto Alegre, BR-RS, 2022.

1. Ressonador de Helmholtz. 2. energia sonora. 3. lei de faraday.
4. conversor de energia acústica. I. FLECK FADEL MIGUEL,
LETICIA, orient. II. Título.

Elaborada pelo Sistema de Geração Automática de Ficha Catalográfica da UFRGS com os dados fornecidos pelo(a) autor(a).

ADRIEL DE CASTRO SILVÉRIO

A ENERGIA SONORA COMO POSSÍVEL GERADORA DE ENERGIA ELÉTRICA

ESTA MONOGRAFIA FOI JULGADA ADEQUADA COMO PARTE DOS
REQUISITOS PARA A OBTENÇÃO DO TÍTULO DE
ENGENHEIRO MECÂNICO
APROVADA EM SUA FORMA FINAL PELA BANCA EXAMINADORA DO
CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA

Prof. Cirilo Seppi Bresolin
Coordenador do Curso de Engenharia Mecânica

Área de Concentração: Mecânica dos Sólidos

Orientador: Professora Letícia Fleck Fadel Miguel

Comissão de Avaliação:

Professora Letícia Fleck Fadel Miguel

Professor: Walter Jesus Paucar Casas;

Professor: Edson Hikaro Aseka.

Porto Alegre, 19 de setembro de 2022

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho aos meus pais, André Ricardo Pereira Silvério e Dariane de Castro, que se dedicaram incansavelmente para me fornecer todas as condições para que eu chegasse a este ponto, obrigado por terem me orientado e terem feito de mim, a pessoa que sou hoje. À minha esposa e segundo sol, Caroline Gomes Amaral, por ser meu porto seguro, por ter um trabalho praticamente diário para me convencer das minhas capacidades e por ser meu presente e futuro. À minha mana, Ariadne de Castro Silvério, que é um pedaço de mim e eu um pedaço dela. À minha mana, Isabelle Silvério, um dos maiores presentes que a vida me deu, bem como sua mãe, esposa do meu pai, Fabiane Machado. Ao Luis Henrique Hefler, marido da minha mãe, que não mede esforços para me auxiliar. À minha avó, Maria Marlene de Castro, que me deu suporte e sempre acreditou na minha capacidade. À minha avó, Araci Pereira Silvério, *in memoriam*, que junto aos meus pais, guiou meus primeiros passos. Ao meu anjo da guarda em vida, Margarida Pereira Correa, minha dinda. À Leoni Teresinha Moreira da Silva, Joelma Teresinha Gomes, Robison Silveira dos Santos, Luísa Gomes Amaral, Marco Antonio dos Santos Amaral e Luciara Barbara Amaral, família adquirida através de meu amor, por terem me adotado, me acolhido e me dado todo o carinho possível. Ao meu grande amigo, Alessandro Miguel Bourscheidt Brasil, pelo apoio e confiança de sempre. Às minhas filhas de estimação, Lori, Capitu, Ágatha e Fred. Ao efetivo da Divisão de Recursos Humanos do Corpo de Bombeiros Militar, meus colegas de trabalho, por sua paciência, compreensão e apoio.

Silvério, Adriel de Castro. **A energia sonora como possível gerador de energia elétrica.** Monografia de Trabalho de Conclusão do Curso em Engenharia Mecânica – Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2022.

RESUMO

O valor monetário utilizado para uma família brasileira prover de energia elétrica ocupa uma considerável porcentagem do salário mensal. Logo, é de interesse público o estudo e a pesquisa por fontes alternativas de geração de energia, dentre elas, pode-se considerar o som como um princípio ativo para geração de energia elétrica. Se o som das músicas que escutamos, é gerado por uma fonte de energia elétrica, pode-se considerar que o inverso também é verdade? Para responder este questionamento, deve-se embasar o conhecimento através de artigos e trabalhos de pesquisadores interessados neste assunto, o que resulta-se predominantemente em duas hipóteses de conversão, uma com material piezoelétrico e outra com um sistema ímã-bobina (lei de Faraday), para converter som em eletricidade. Porém, o quantitativo de material relativo a este tema, ainda é reduzido, motivo pelo qual surge a necessidade de analisar, deduzir e embasar as teorias apresentadas.

PALAVRAS-CHAVE: Fontes alternativas, geração de energia elétrica, som, piezoelétrico, lei de Faraday.

Silvério, Adriel de Castro. **Sound energy as a possible generator of electrical energy.** Mechanical Engineering End of Course Monography – Mechanical Engineering degree, The Federal University of Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2022.

ABSTRACT

The monetary value used for a Brazilian family to provide electricity occupies a considerable percentage of the monthly salary. Therefore, it is of public interest to study and research alternative sources of energy generation, among them, sound can be considered as an active principle for the generation of electric energy. If the sound of the songs we listen to is generated by an electrical energy source, can it be considered that the opposite is also true? To answer this question, knowledge must be based on articles and works by researchers interested in this subject, which predominantly results in two conversion hypotheses, one with piezoelectric material and the other with a magnet-coil system (Faraday's law).), to convert sound into electricity. However, the amount of material related to this topic is still small, which is why there is a need to analyze, deduce and support the theories presented.

KEYWORDS: Alternative sources, electricity generation, sound, piezoelectric, Faraday's law.

SUMÁRIO

1.INTRODUÇÃO.....	1
2. OBJETIVO.....	2
3. METODOLOGIA.....	2
3.1. Ressonador de Helmholtz e as condições físicas do ar.....	2
3.1.1. Análise de forças.....	2
3.1.2. Análise energética.....	3
3.1.3. Constante elástica do ar.....	5
3.1.4. Análise da pressão sonora.....	6
3.2. Conversor Piezoelétrico.....	6
3.3. Conversor Eletromagnético.....	7
3.3.1. Lei de Faraday.....	7
3.3.2. Aplicação do método eletromagnético.....	9
4 PROJETO E EXECUÇÃO.....	10
4.1. Aplicação dos ressonadores no método piezoelétrico.....	10
4.2 Aplicação dos ressonadores no método eletromagnético.....	10
4.3 Projeto, Confeção e montagem do Ressonador de Helmholtz.....	11
4.4. Projeto, confecção e montagem da bobina.....	12
4.5. Projeto, confecção e montagem do sistema membrana-ímã.....	12
4.6. Montagem final.....	13
5. FASE DE TESTES.....	14
5.1 Teste 1.....	14
5.2 Teste 2.....	15
5.3 Teste 3.....	15
6 CONCLUSÃO.....	16

1. INTRODUÇÃO

Minu A Pillai, em *A Review of Acoustic Energy Harvestin*, verifica a possibilidade de conversão de energia sonora em elétrica e conclui que esta pode aumentar a eficiência de uma usina elétrica. Testes realizados e apresentados neste artigo, apresentam que um ressonador de Helmholtz, com placa piezoelétrica, pode gerar $30 \mu\text{W}$, quando submetido a uma pressão sonora de 161dB. Já Farid Ullah Khan, em *Acoustic-Based Electrodynamic Energy Harvester for Wireless Sensor Nodes Application*, utilizando um ressonador de Helmholtz e um sistema ímã-bobina, apresenta a geração de $1503,4\mu\text{W}$, quando submetido a pressão sonora de 125 dB e à frequência de 143Hz.

Diante do exposto, cabe à comunidade estudantil brasileira, a pesquisa de fontes alternativas de energia e este é o intuito do presente trabalho. Para tanto, a fonte alternativa em questão é o som e a possibilidade de convertê-lo em energia elétrica, sendo este, portanto, o ponto nevrálgico do tema. Tendo em vista o reduzido número de materiais relativos a este tema, e que, Minu A Pillai cita em seu próprio artigo o trabalho realizado por Farid Ullah Khan, cabe o seguinte questionamento: será mesmo possível converter energia sonora em energia elétrica? Destarte, é objetivo deste discente, avaliar, o projetar e a realizar análise teórica e prática para responder esta questão.

2. OBJETIVO

A propagação do som se dá pela pressão sonora emitida por um equipamento. Sendo esta uma pressão, temos a incidência de uma força em uma área, logo, podemos estudar esta pressão sonora para verificar como ela pode ser captada por certos equipamentos. O presente trabalho, relaciona esta força a um sistema de conversão de energia. No caso, usa-se um ressonador de Helmholtz para captar e absorver a energia que provém do som e dois métodos de conversão diferentes. O primeiro é o método piezoelétrico, que contempla uma pastilha piezoelétrica que quando tensionada, emite energia elétrica. O segundo, é o método eletromagnético, onde a força exercida pelo som deve ter a capacidade de movimentar uma membrana que contém um par de ímãs associado e uma bobina, utilizando como fundamento teórico a lei de Faraday. Faz-se uma análise do interior do ressonador, de como as forças se comportam e qual a possibilidade de cada um destes sistemas serem efetivos na conversão.

3. METODOLOGIA

Conforme citado, para a realização da conversão de energia sonora em energia elétrica, destacam-se dois procedimentos diferentes. Ambos utilizam um Ressonador de Helmholtz, responsável por captar e absorver a onda sonora - Figura 1. A fonte da conversão é a oscilação gerada pelas vibrações das ondas sonoras, em um dispositivo conversor. O conversor pode ser uma placa piezoelétrica ou um sistema ímã-bobina. Assim, apresentar-se-á cada um dos métodos, as diferenças e possibilidades.

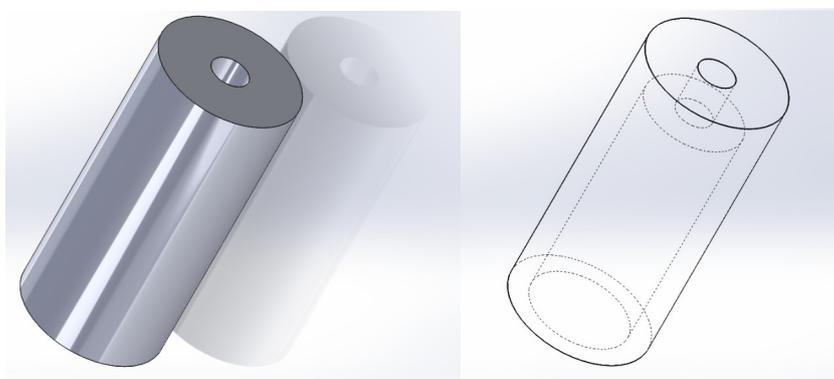


Figura 1 - Vista 3D preenchida e estrutural do ressonador.

3.1 Ressonador de Helmholtz e as condições físicas do ar

3.1.1. Análise de forças

Considerando que o ressonador de Helmholtz é o equipamento em comum em ambos casos, toma-se este como ponto de partida para o desenvolvimento deste trabalho. O ressonador compreende dois cilindros uniaxiais e sobrepostos. O cilindro superior é conhecido como pescoço, tem diâmetro menor e é responsável por captar e direcionar a onda sonora. O cilindro inferior é o corpo, que recebe a onda, propaga e armazena o ar.

O ressonador de Helmholtz é um sistema simples composto por um volume de ar confinado e um gargalo, como uma garrafa. O ar contido no gargalo oscila em primeira aproximação como um oscilador harmônico amortecido. Quando o comprimento de onda do som é muito maior que as dimensões $V^{1/3}$ (volume do pescoço), $A^{1/2}$ (área da seção transversal do pescoço) e L (altura do pescoço), o ar presente no pescoço pode ser considerado um bloco de massa m , logo, a oscilação citada pode ser observada pela entrada de ondas sonoras que, ao passar pelo pescoço do ressonador, alteram a condição do ar presente no interior deste, comprimindo o ar do interior do ressonador. Assim, conclui-se que há naturalmente uma resistência oferecida pelo ar, logo, consideramos a massa de ar no ressonador como uma mola. Outra consideração que deve ser admitida é a de que quando as ondas sonoras são percebidas pelo ressonador, há a admissão de uma pressão sonora no ressonador que, multiplicada pela área da seção transversal do pescoço, obtém-se uma força – força do som. Esta pressão é uma função da intensidade da onda, que varia entre 0 e 120 dB (limiar da dor), da velocidade do som e da densidade relativa do meio:

$$\begin{aligned} F_s &= Pa \cdot A \\ F_s &= A \cdot Pa = A \cdot \sqrt{2 \cdot \rho \cdot v \cdot I} \end{aligned} \quad (1)$$

Onde: ρ – densidade relativa do ar – 1,201 kg/m³; v – velocidade do som – 340,29 m/s; I – Intensidade do som – 1 W/m² – para 120 dB.

Conforme citado no segundo parágrafo deste subitem, o ar naturalmente oferece uma resistência à entrada desta massa, tomamos F_R . A equação de um sistema massa-mola de acordo com a lei de Hooke é:

$$F_R = k \cdot x \quad (2)$$

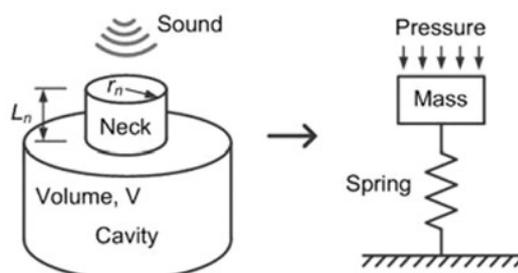


Figura 2 - Ressonador de Helmholtz e representação física.

3.1.2 Análise energética

Ainda relativo à parede inferior, deve-se considerar que ela não é fonte de dissipação de energia potencial elástica, visto que a parede reflete as ondas presentes, sendo assim, o sistema conservativo de energia identifica que, como o ressonador possui apenas uma abertura, a energia absorvida permanece dentro deste, até que consiga sair pela cavidade. A energia potencial da entrada do ar é proporcional ao coeficiente elástico do ar – k e ao quadrado do deslocamento x :

$$E_p = \frac{k \cdot x^2}{2} \quad (3)$$

O ressonador é preenchido por ar, desta forma, deve-se aprofundar o estudo relativo a energia cinética deste gás. A energia cinética dos gases é resultado das colisões entre as moléculas que, por fim, ao entrar em contato com uma superfície, no caso deste estudo, as paredes do ressonador, obtém-se uma energia potencial elástica. Boltzmann e Maxwell desenvolveram a teoria cinética dos gases relacionando a energia cinética média do total de moléculas, o número de mols de um gás e a temperatura.

$$E_c = \frac{N \cdot m \cdot v^2}{2} = \frac{3 \cdot N \cdot k_b \cdot T}{2} \quad (4)$$

Onde: N – número de moléculas; k_b – Constante de Boltzmann $1,38 \times 10^{-23}$ [m².kg/s².K]; T – Temperatura [Kelvin].

Importante ressaltar que a constante de Boltzmann é a razão entre a constante R dos gases (8,31 J/mol.K) e o Número de Avogrado ($6,02 \times 10^{23}$). O número de mols é a razão entre o número de moléculas e o Número de Avogrado. Assim, a energia cinética dos gases em função do número de mols, pode ser simplificada para:

$$E_c = \frac{3 \cdot N \cdot k_b \cdot T}{2} = \frac{3 \cdot n \cdot R \cdot T}{2} \quad (5)$$

Onde: n – Número de mols; R – Constante dos gases 8,31 [J/mol.K].

As Equações (4) e (5) levam em consideração o ar sem influência de excitação externa. Assim, a energia mecânica total do sistema é o somatório da Energia elástica acumulada pelo ar - Equação (3) e o movimento natural das moléculas – Equação (4) e (5).

$$E_m = \frac{3 \cdot n \cdot R \cdot T}{2} + \frac{(k \cdot x^2)}{2} \quad (6)$$

O número de mol de ar do ressonador, depende do volume do mesmo, e a energia potencial elástica, do deslocamento x e a constante elástica do ar quando este for comprimido. Finalmente, aplicando (3) em (7), temos:

$$E_m = \frac{3 \cdot n \cdot R \cdot T}{2} + \frac{(Pa \cdot A)^2}{2 \cdot k^2} \quad (7)$$

3.1.3. Constante elástica do ar

Recordando que a pressão será fornecida pela propagação do som, a área do pescoço é de acordo com o projeto do ressonador, o número de mol depende do volume do ressonador e a temperatura é a do ambiente – 20°C, o único termo ainda desconhecido é o coeficiente elástico do ar. Para tal, utilizamos o módulo de elasticidade volumétrica de Bulk que é determinado a partir da variação de pressão e volume de um material.

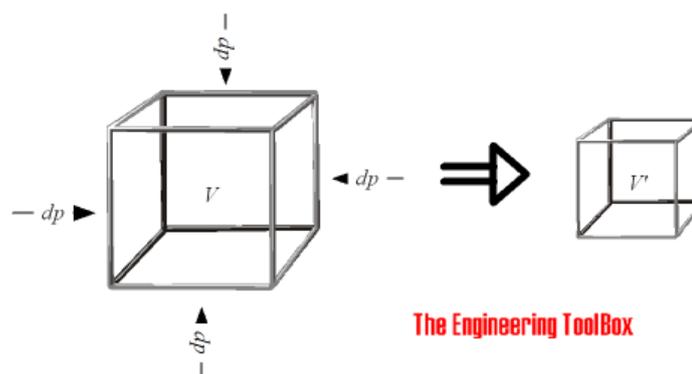


Figura 3 – Módulo de Bulk.

A análise da figura 4, apresenta um acréscimo de pressão nas três dimensões da unidade volumétrica, reduzindo esta de V para V' . Assim, Bulk descreve esta condição da seguinte forma:

$$K = \frac{-dp}{dV/V_i} \quad (8)$$

Onde, $dp = p_f - p_i$ e $dV = V_f - V_i$.

Como a fórmula é a razão entre a variação de pressão e a razão da variação de volume pelo volume inicial, a unidade deste módulo é N/m^2 , ou seja, força por unidade de área – conceito de pressão. A constante elástica, por sua vez, é força por unidade de comprimento. Assim, pode-se observar que a variação de pressão é igual a K vezes dV/V_i , e que, para que seja possível comprimir o volume, a variação de pressão deve ser aplicada. Como força é igual à pressão vezes a área, temos:

$$dp = \frac{-K \cdot dV}{V_i};$$

$$\text{Se Força do ar} = \text{Área do pescoço} \cdot dp, \text{ então } F = \frac{-K \cdot dV \cdot A}{V_i}$$

$$\text{Logo, } F = \frac{-(A^2) \cdot x \cdot K}{V_0}, \text{ portanto } k = \frac{-(A^2) \cdot K}{V_0} \quad (9)$$

Tendo o módulo de Bulk do ar como $1,01325 \times 10^5 \text{ N/m}^2$, k é igual a $-1,01325 \times 10^5 A^2/V_0$. Portanto, a constante é proporcional ao quadrado da área do pescoço e inversamente proporcional ao volume do corpo do ressonador, essa é a razão pelo qual o pescoço tem seção menor que a seção do corpo. Ainda, cabe ressaltar que, como foi levantada a hipótese de que a força chega na parede inferior, então o deslocamento do ar é igual à altura do corpo. Assim, levando em conta que o volume é a área do corpo multiplicado pela altura deste, a força de resistência do ar não é função de x :

$$F_R = -1,01325 \times 10^5 \frac{(A_p^2)}{A_C} \quad (10)$$

Onde A_p é a Área do pescoço e A_C a Área do corpo.

3.1.4. Análise da pressão sonora

A pressão sonora é medida em decibel (dB) e compreende uma relação logarítmica entre a pressão sonora no ambiente e uma pressão de referência.

$$NPS = 10 \log \left(\frac{p}{p_0} \right)^2 \quad (11)$$

Onde: NPS – Pressão sonora em dB; p - Pressão sonora em N/m²; p₀ - pressão de referência – 2x10⁻⁵ N/m².

O limiar da audição inicia em 0 dB e o limiar da dor é 120 dB. Desta forma, a relação entre dB e N/m² se comporta da seguinte forma:

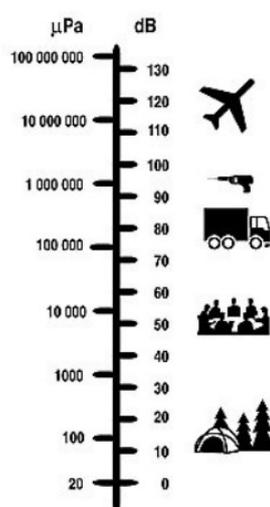


Figura 4 – Relação entre Pa e dB.

Tomando uma condição instantânea e com as demais hipóteses adotadas, temos o suficiente para estimar previsões referentes à possibilidade ou não de conversão de energia sonora em elétrica.

3.2 Conversor Piezoelétrico

Uma das características dos materiais piezoelétricos é a capacidade de gerar energia elétrica quando submetidos a um estresse mecânico. Aliado à energia absorvida pelo ressonador, a vibração das ondas de entrada na cavidade pode ser capaz de excitar a placa piezoelétrica e assim, converter a energia.

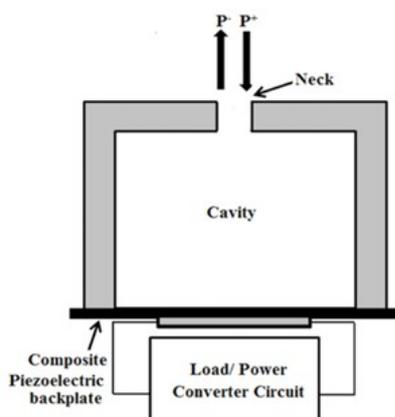


Figura 5 - Ressonador de Helmholtz com conversor piezoelétrico.

Para que este método seja possível, utiliza-se uma pastilha piezoelétrica, de formato circular e adquirida comercialmente. Luiz Fernando Suzarte Silva Ferreira, em Sistema de Geração de Energia Via Sensores Piezoelétricos, produziu, através de experimentos, a seguinte tabela, relacionando diâmetro com carga:

Tabela 1 – Tensão gerada por uma pastilha piezoelétrica, levando em consideração seu diâmetro e a carga aplicada.

	Pastilha 15 mm	Pastilha 20 mm	Pastilha 27 mm	Pastilha 35 mm
10 kg	1,44 Volts	1,73 Volts	3,21 Volts	4,44 Volts

Importante ressaltar que para obtenção desse resultado, foi utilizado 4 pacotes de 10 pastilhas para cada diâmetro, ou seja, deve-se dividir por 40 o valor encontrado para identificar a diferença de potencial fornecida por unidade de pastilha. Assim, a tabela em relação à unidade de pastilha, deve ser reescrita da seguinte forma:

Tabela 2 – Tensão gerada por unidade de pastilha piezoelétrica em relação à carga submetida.

	Pastilha 15 mm	Pastilha 20 mm	Pastilha 27 mm	Pastilha 35 mm
98,1 N	36 mV	43,2 mV	80 mV	111 mV

Logo, a pastilha piezoelétrica absorverá, em um primeiro momento, toda energia dada pela Equação 8 e, conseqüentemente, a força aplicada pela entrada de ondas sonoras no ressonador.

3.3. Conversor Eletromagnético

3.3.1. Lei de Faraday

O inglês Michael Faraday, em 1831, realizou um experimento aproximando dois circuitos elétricos e notou que, quando um destes estava ligado, o outro manifestava passagem de corrente em um instante de tempo. Identificando que este fenômeno era resultado de uma força magnética, Faraday aproxima um ímã ao circuito elétrico e nota que enquanto este está em movimento perpendicular ao circuito, a variação do fluxo magnético induz uma força eletromotriz, ou seja, uma tensão elétrica na espira. De acordo com o movimento do ímã, se este se aproxima ou se afasta da bobina, pode-se adotar o sentido da corrente induzida, desta forma, constata-se que esta é uma corrente alternada.

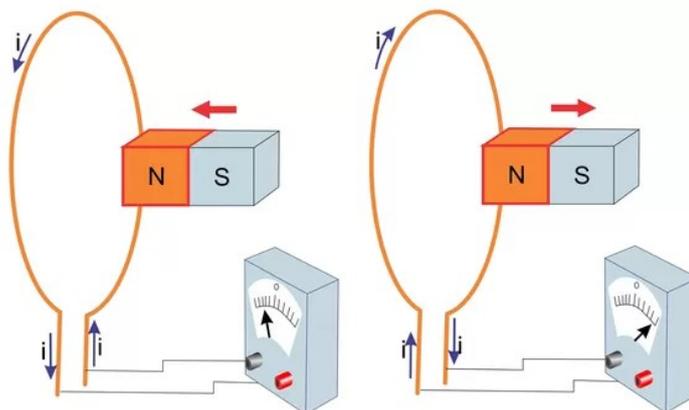


Figura 6 – Representação da indução eletromagnética.

A força eletromotriz, configura a variação de um campo magnético em função do tempo, assim, temos:

$$\Phi_B = \int \vec{B} \cdot d\vec{A} \quad (12)$$

Onde: Φ_B – Fluxo magnético; B – Campo magnético; dA – Área da superfície submetida ao campo magnético [m^2].

$$\varepsilon = \frac{-d\Phi_B}{dt} \quad (13)$$

Onde: ε - Força eletromotriz; $d\Phi_B$ - Variação do fluxo magnético; dt – Variação do tempo [s].

Cabe ressaltar que a força eletromotriz difere-se da diferença de potencial, uma vez que compreende o trabalho realizado por uma força de natureza não eletrostática. A diferença de potencial é, na realidade, a diferença entre a força eletromotriz e a corrente multiplicada por uma resistência interna natural da fonte de energia. Considerando que a fonte de energia é a variação do campo eletromagnético, pode-se considerar que o sistema possui uma resistência apenas, que é dada pelas configurações geométricas da bobina e as propriedades do material utilizado para a produção desta. Assim, consideramos:

$$\varepsilon = R \cdot i \quad (14)$$

3.3.2. Aplicação do método eletromagnético

Este é diferente do piezoelétrico em vários aspectos. O primeiro deles é a configuração da parede inferior que não é uma pastilha e sim uma membrana com dois ímãs acoplados, concêntricos à membrana. Esta membrana, assim como o ar, funciona como uma mola e absorverá a força F_p . O deslocamento do centro da membrana é o que provocará a variação do campo eletromagnético, visto que o par de ímãs encontra-se neste ponto. Outro aspecto que diferencia este método é a conversão que, conforme citado, está diretamente relacionado à capacidade da variação do fluxo magnético induzir força eletromotriz.

Conforme citado no item 2.3.1, o princípio basilar da Lei de Faraday adota um circuito elétrico e um ímã em movimento. Para tal, contamos com uma bobina, representando o circuito elétrico, um par de ímãs, com pólos opostos, separados por uma membrana de látex que vibra com ação da força eletromagnética que mantém os ímãs unidos e, por fim, o ressonador de Helmholtz que compreende esse sistema, capta e absorve as ondas sonoras. A figura 6 elucida como este mecanismo deve ser montado.



Figura 7 - Vista explodida do ressonador eletromagnético

A vibração gerada pelas ondas sonoras deve ser absorvida pela membrana, o que provoca um movimento oscilatório desta, e conseqüentemente, dos ímãs, o que gera uma corrente induzida na bobina (localizada abaixo da película), respeitando o disposto pela Lei de Faraday. Desta forma, a conversão de energia sonora em elétrica considera-se teoricamente possível.

Cabe ressaltar que devido à elasticidade da película, este equipamento deve considerar um sistema massa-mola com duas molas e a amplitude dada pelo deslocamento dx , corresponde à amplitude de movimento do ímã em relação à bobina, ou seja, a vibração da película – deslocamento - é o que provoca a geração de energia elétrica. Aqui, deve-se considerar a força da membrana e o coeficiente elástico desta, para que seja possível concluir se há ou não vibração.

$$F_m = k_m \cdot x_m \quad (15)$$

A F_s é a mesma da Equação 3, apenas deve ser igualada à Equação (15) para que seja possível encontrar o valor de x_m .

4 PROJETO E EXECUÇÃO

Apresentados os dois métodos e, sendo o cerne deste trabalho, responder se é possível ou não converter energia sonora em elétrica, realiza-se uma análise matemática relativa a esta possibilidade. Para tal, toma-se para o ressonador uma seleção de dimensões adotadas em diferentes artigos que apresentaram o mesmo objetivo que este trabalho. A referência citada, condiz à respectiva referência bibliográfica citada no fim do trabalho.

Tabela 3 - Relação geométrica dos ressonadores.

Ref	Pesçoço				Corpo			
	<i>Diâmetro</i> (m)	<i>Área</i> (m ²)	<i>Altura</i> (m)	<i>Volume</i> (m ³)	<i>Diâmetro</i> (m)	<i>Área</i> (m ²)	<i>Altura</i> (m)	<i>Volume</i> (m ³)
2	2,50E-03	4,91E-06	4,00E-03	1,96E-08	6,50E-03	3,32E-05	1,60E-02	5,31E-07
3	2,39E-03	4,49E-06	3,18E-03	1,43E-08	6,35E-03	3,17E-05	1,60E-02	5,07E-07
1	2,42E-03	4,60E-06	3,16E-03	1,45E-08	6,34E-03	3,16E-05	1,64E-02	5,18E-07

4.1. Aplicação dos ressonadores no método piezoelétrico

Conforme descrito, a força gerada pelo som deve ser suficiente para que excite a pastilha piezoelétrica. Assim, deve-se calcular a força gerada pelo som e a diferença de potencial teórica, relacionando a força do som com a tabela 2, tomando uma pastilha de 27 mm de diâmetro como parâmetro. Ainda, cabe ressaltar que esta força é a relação da pressão do som com a área de entrada, que no caso é a seção transversal do pesçoço.

Desta forma, para cada um dos experimentos, temos:

Tabela 4 – Relação entre as áreas a força e a diferença de potencial.

	<i>Área</i> (m ²)	<i>F_s</i> (N)	<i>Ddp</i> (μV)
2	4,91E-06	1,45E-04	1,18E-01
3	4,49E-06	1,33E-04	1,08E-01
1	4,60E-06	1,36E-04	1,10E-01

Conclui-se que é teoricamente possível converter energia sonora em elétrica utilizando o método piezoelétrico. Apesar de ser um valor baixo, otimizações geométricas podem ser adotadas para que este valor aumente, porém, como o objetivo do trabalho é provar que é possível realizar essa relação, tem-se resultados positivos quanto a este método.

4.2 Aplicação dos ressonadores no método eletromagnético

Bem como no método piezoelétrico, o sistema eletromagnético também deve ser excitado pela força do som. Porém, conforme descrito, neste método o deslocamento do centro da membrana tem que existir, visto que este é o que provoca a variação do fluxo magnético. Deve-se levar em conta que a membrana também funciona como uma mola. Ainda, cabe ressaltar que a força tem que ser maior que a força peso dos ímãs. As forças do som, em função da área, são as mesmas calculadas no item anterior e aplicando a equação

(10) – força de resistência do ar como uma mola, temos a Tabela 5 que apresenta entre a relação da Força do som e a Força elástica do ar:

Tabela 5 – Relação entre a força do som e força de resistência do ar

	<i>Força do som</i> (N)	<i>Força elástica do ar</i> (N)
1	1,45E-04	7,36E-02
2	1,33E-04	6,44E-02
3	1,36E-04	6,79E-02

Destarte, tem-se o suficiente para dizer que a força do som não é o suficiente para provocar vibração na membrana. Ainda assim, Khan (2013), realizou um experimento contendo um sistema eletromagnético e obteve resultados positivos. Lembrando que o objetivo deste trabalho é estudar a possibilidade da conversão, não é interessante descartar hipóteses, motivo pelo qual este discente entende que é necessário realizar um teste de bancada, a partir da confecção do ressonador e demais componentes necessários para testagem do método eletromagnético.

4.3 Projeto, Confecção e montagem do Ressonador de Helmholtz

Considerando o disposto no item 3.1 deste trabalho, para a produção do Ressonador de Helmholtz, deve-se projetar um corpo cilíndrico com duas seções de raios diferentes (Figura 1). Assim, para o primeiro teste, desenvolve-se a Peça 1, com 15 mm de diâmetro da seção maior e 1 mm de diâmetro do pescoço. A altura da seção maior do ressonador foi de 15 mm e a do pescoço 4 mm. Já para o segundo teste – Peça 2, utilizamos os mesmos diâmetros e altura do pescoço da Peça 1, porém, a altura adotada foi de 20 mm. Os desenhos das peças foram realizadas pelo Software Sketchup, extraídos em STL e produzidos por intermédio de uma impressora 3D, conforme Figura 8.

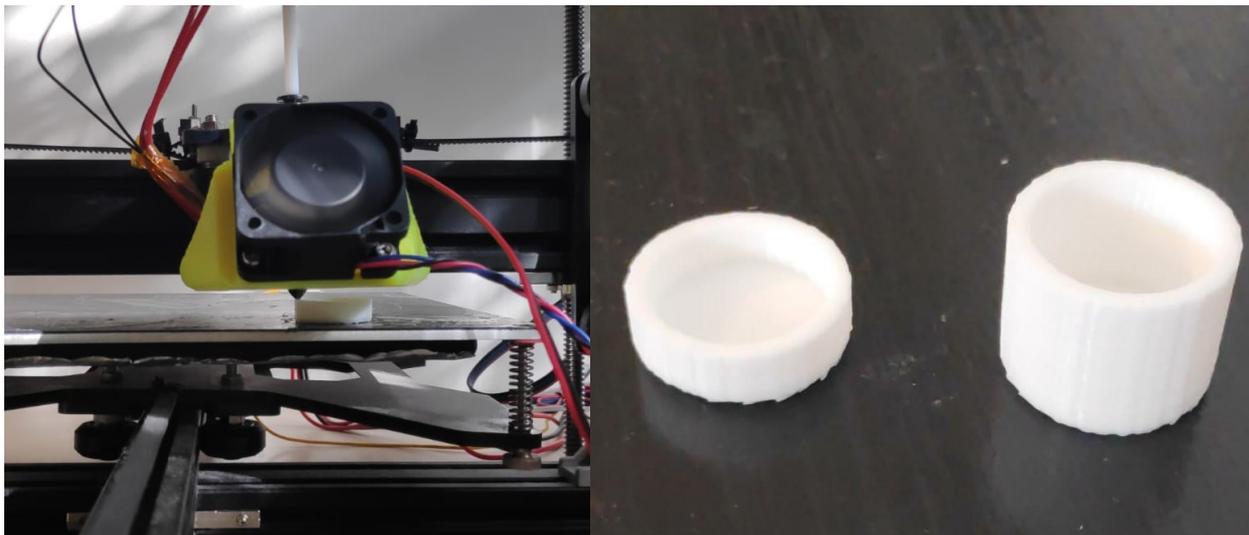


Figura 8 – Impressão do ressonador, através de uma Impressora 3D e conjunto base-corpo do ressonador.

Importante ressaltar que, como o diâmetro do pescoço é de 1 mm, a margem de erro de precisão da impressora pode afetar a configuração projetada. Desta forma, a opção admitida foi a de imprimir os cilindros com a seção contínua e a abertura do pescoço do ressonador e da base da bobina foram realizados com o auxílio de um alicate e um prego pré-aquecido.

4.4. Projeto, confecção e montagem da bobina

Para confecção da bobina, adquiriu-se 15 metros de fio comercial. Com o auxílio de uma faca de cozinha, realizou-se o desencapamento do fio para obtenção do fio de cobre puro (Figura 9). Já com o fio desencapado, enrola-se manualmente o fio de cobre no tubo de tinta de caneta esferográfica, que contém exatamente 3 mm, diâmetro ideal para o projeto. Para limitação da altura das bobinas, coloca-se fita com diâmetro externo maior que o da bobina. O diâmetro externo da bobina das peças é 15 mm.

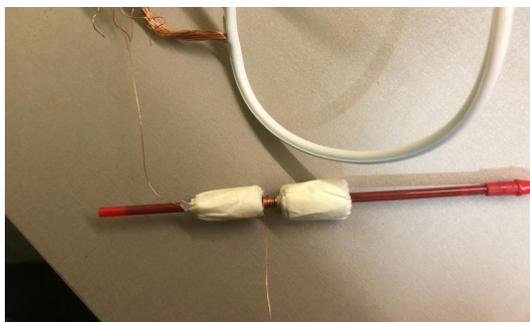


Figura 9 – Enrolamento da bobina.

O projeto da bobina baseia-se no fato de ser considerada uma multi-camadas e foi desenvolvida uma bobina para cada peça. Neste caso, o cálculo da resistência se dá pela equação (16):

$$R = \frac{\rho \cdot L}{A} \quad (16)$$

Considerando que o raio do fio é 0,2 mm e a resistividade do cobre 0,0172 $\Omega \cdot \text{mm}^2/\text{m}$:

Tabela 6 – Resistência das bobinas das peças.

	Resistência [Ω]	L – Comprimento do fio [m]	A – Área da seção transversal do fio [mm^2]
Peça 1	1,368	10	0,283
Peça 2	2,053	15	0,283

Onde: R – Resistência [Ω]; ρ – Resistividade elétrica do material [$\Omega \cdot \text{mm}^2/\text{m}$]; L – Comprimento do fio [m]; A – Área da seção transversal do fio [mm^2].

4.5. Projeto, confecção e montagem do sistema membrana-ímã

A membrana compreende uma camada de látex, obtida a partir de uma luva para procedimento cirúrgico de 0,45 mm de espessura. O ímã foi adquirido comercialmente, é de NdFeB – ímã de neodímio, com 6 mm de diâmetro e 2 mm de altura, 0,59 kg de capacidade de atração e campo magnético de 3300 Gauss – 0,33 Tesla. Conforme citado, a montagem destes elementos compreende dois ímãs, com polos opostos e separados pela membrana de látex.

Adotando a equação 12, o fluxo magnético é o campo magnético multiplicado pela área submetida a este campo, que é a área da seção transversal da bobina, que é igual para as duas peças. Logo, para este ímã, o fluxo magnético e a corrente teórica seria:

Tabela 7 – Relação entre a resistência, o campo magnético, a área da bobina, a força eletromotriz e a intensidade da corrente.

	Resistência (Ω)	B (T)	A (m^2)	ε (μV)	I (μA)
Peça 1	1,368	0,33	$0,113 \cdot 10^{-3}$	37,32	51,03
Peça 2	2,053	0,33	$0,113 \cdot 10^{-3}$	37,32	76,62

4.6. Montagem final



Figura 10 – Elementos do sistema, antes da montagem.

Nesta etapa, acopla-se a bobina na base da bobina, passando os fios de entrada e saída da bobina pelo furo da seção inferior desta base. A membrana, já com o par de ímãs, foi acoplada à seção inversa ao pescoço do ressonador, com o auxílio de fita. Posteriormente, encaixa-se a base da bobina com o ressonador.

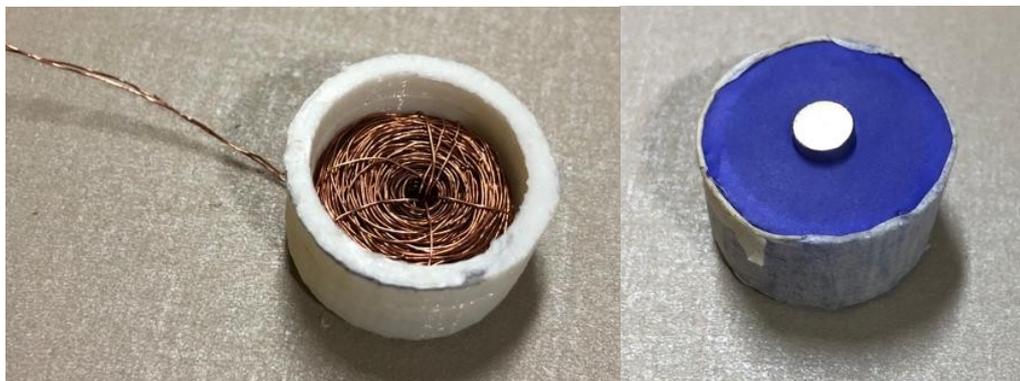


Figura 11 – Bobina montada e encaixada na base da bobina e conjunto íma-membrana, encaixada no ressonador.

5 FASE DE TESTES

Foram realizados 3 testes diferentes. Pode-se considerar que um teste foi consequência de outro.

5.1 Teste 1

O primeiro teste foi realizado com a peça 1, que apresentava 15 mm de diâmetro e 15 mm de altura. A bobina utilizada foi a da peça 1, que tinha resistência de $1,368 \Omega$. O método utilizado neste teste foi de verificar se havia variação de corrente, quando o ressonador fosse submetido a uma variação de 20 a 20.000 Hz no volume mais alto da TV, conforme Figura 12.

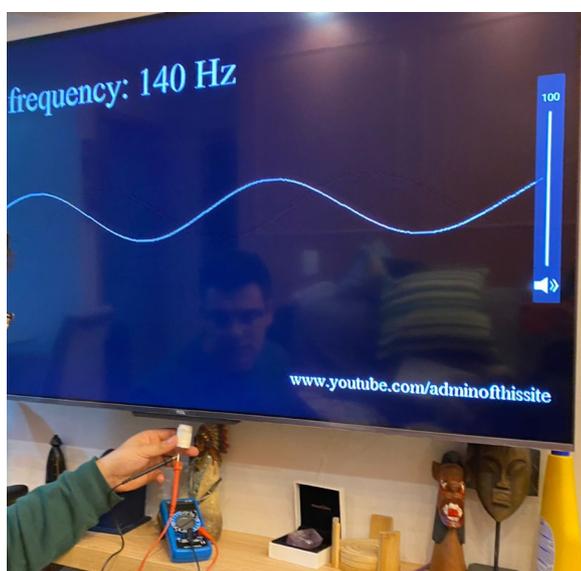


Figura 12 – Primeiro teste realizado, com multímetro e saída de som da TV.

Neste teste, tendo em vista a simplicidade do dispositivo utilizado, não foi observada variação de corrente, logo, o proposto não teve sucesso – Figura 13.



Figura 13 – Multímetro apontando que não houve alteração perceptível de corrente.

5.2 Teste 2

Tendo em vista que o primeiro teste não foi produtivo, acredita-se que uma alteração de projeto permita resultados mais satisfatórios. Desta forma, aumenta-se a altura do ressonador de 15 mm para 20 mm, altera-se o número de espiras de 265 para 460, o que aumenta em mais de 6x a indutância da bobina e praticamente dobra a resistência.

O mesmo teste foi realizado, nas mesmas condições, alterando apenas o citado. Novamente, o teste foi infrutífero.

5.3 Teste 3

Por fim, verifica-se a possibilidade de realizar o teste com o auxílio de um osciloscópio, o que pode trazer maior precisão ao teste, além de apresentar resultados ondulatórios. Para tal, foram utilizadas as duas peças, cada uma com a sua configuração, conforme Teste 1 e Teste 2.

Para realização deste, obteve-se apoio do GMAp que forneceu o osciloscópio para teste.



Figura 14 – Conexão do ressonador ao canal 1 do Osciloscópio.

Após a conexão dos fios do ressonador aos cabos do Osciloscópio, foi realizada a testagem com o mesmo vídeo de variação de frequência dos testes anteriores e também frequências fixas – entre 30 e 250 Hz. Diferente do teste 1 e do teste 2, neste caso a testagem realizada foi se houve ou não variação de diferença de potencial no ressonador, quando este foi submetido à ondas sonoras. O resultado, porém, foi o mesmo apresentado nos testes anteriores, mostrando que, com as configurações de peças utilizadas, não é possível gerar energia sonora em energia elétrica.



Figura 15- Osciloscópio sem variação de voltagem.

5. CONCLUSÃO

As análises realizadas neste trabalho identificam a possibilidade de conversão de energia sonora em elétrica, desde que o projeto seja bem estudado e analisado. Conclui-se a importância da seção transversal do pescoço, que é dado de entrada para a intensidade da força do som, bem como o método utilizado para conversão. Teoricamente, o método piezoelétrico tem maior possibilidade de obtenção de resultado, mesmo que este seja baixo. O método eletromagnético é teoricamente mais eficiente, porém, há a implicação de que a relação entre a área do pescoço e a pressão sonora tem que ser relativamente alta para que seja possível movimentar a membrana e o ímã. Ademais, este trabalho é o primeiro passo deste discente para os estudos relacionados a esta tecnologia e, apesar do teste ter confirmado a ineficácia do método eletromagnético, considera-se uma jornada promissora em busca desta fonte de energia alternartiva.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

KHAN, F. U, et al, **Acoustic-Based Electrodynamic Energy Harvester for Wireless Sensor Nodes Application**, Institute of Mechatronics Engineering, University of Engineering and Technology, Peshawar, Pakistan, 2013.

SHIGEKI S., et al, **Lead zirconate titanate acoustic energy harvester proposed for micro electromechanical system/IC integrated systems,**” Japanese Journal of Applied Physics, vol. 49, no. 4, 2010.

LIU F, **Acoustic energy harvesting using an electromechanical Helmholtz resonator**, Journal of the Acoustical Society of America, vol. 123, no. 4, pp. 1983-1990, April 2008.

PILLAI, M. A., Deenadayalan E. **A Review of Acoustic Energy Harvestin**, Department of Instrumentation and Control Engineering, National Institute of Technology, Tiruchirappalli, Tamil Nadu, India, 2014.

LIMA, N. F. **Experimentos com o ressonador de Helmholtz**, Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia – IFBahia, 2006.

Kim, S. H., Ji, et al., “**An Electromagnetic Energy Scavenger from Direct Airflow**, Journal of Micromechanics and Microengineering, Vol. 19, No. 9, Paper No. 094010, 2009.

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO. Instituto de Física de São Carlo, **SLC0638 - Laboratório de Eletricidade e Magnetismo II**.

SILVA, B. F. **Eletrodinâmica: Leis de Faraday e Lenz**, Secretaria de Educação Profissional e Tecnológica Instituto Federal de Santa Catarina.

BRASIL. Senado Federal, **Proposta de Emenda à Constituição nº 44, de 2017**. <<https://www25.senado.leg.br/web/atividade/materias/-/materia/131846>, último acesso em 10 de setembro de 2022 >.

BELANDI, C. **Em 2021, rendimento domiciliar per capita cai ao menor nível desde 2012**, Agência IBGE, <<https://agenciadenoticias.ibge.gov.br/agencia-noticias/2012-agencia-de-noticias/noticias/34052-em-2021-rendimento-domiciliar-per-capita-cai-ao-menor-nivel-desde-2012#:~:text=O%20rendimento%20m%C3%A9dio%20mensal%20real,PNAD%20Cont%C3%Adua%2C%20iniciada%20em%202012>, último acesso em 10 de setembro de 2022 >.

CASTRO, A. P. **Governo antecipa fim da bandeira escassez hídrica, e conta de luz fica mais barata a partir do dia 16**, G1 – Globo, <<https://g1.globo.com/economia/noticia/2022/04/06/governo-antecipa-data-e-bandeira-escassez-hidrica-nas-contas-de-luz-terminara-no-proximo-dia-15.ghtml>, último acesso em 10 de setembro de 2022 >.

O HISTÓRICO **das bandeiras tarifárias**,

<<https://www.solsticioenergia.com/saiba-mais/bandeiras-tarifarias/>, último acesso em 10 de setembro de 2022 >.

FEDRIGO, N. S, GONÇALVES, G, LUCAS, P. F., **Usos Finais de Energia Elétrica no Setor Residencial Brasileiro**, Laboratório de Eficiência Energética em Edificações, <<https://labeee.ufsc.br/node/480>, último acesso em 10 de setembro de 2022 >.

BASÍLIO, P., **Novo reajuste da bandeira vermelha deve aumentar conta de luz em 5,5% para família com consumo médio**, G1 – Globo,

<<https://g1.globo.com/economia/noticia/2021/06/29/conta-de-luz-entenda-o-peso-do-novo-reajuste-da-bandeira-vermelha-patamar-2-no-seu-bolso.ghtml>, último acesso em 10 de setembro de 2022 >.

BRASIL. Ministério de Minas e Energia do Brasil, **Valores das bandeiras tarifárias são atualizados para o período 2022-2023**,

<<https://www.gov.br/aneel/pt-br/assuntos/noticias/2022/valores-das-bandeiras-tarifarias-sao-atualizados-para-o-periodo-2022-2023>, último acesso em 10 de setembro de 2022>.

Eletrônica Pt, **Bobina – Indutor**, <<https://www.electronica-pt.com/bobina>, último acesso em 10 de setembro de 2022, último acesso em 10 de setembro de 2022>.

STROSLI, P. N., **Resistência, Capacitância, Indutância, Impedância e Reatância**, <<https://www.electricalibrary.com/2017/08/18/resistencia-capacitancia-indutancia-impedancia-e-reatancia/>, último acesso em 10 de setembro de 2022>.

THE ENGINEERING TOOLBOX, **Air - Thermophysical Properties**, <https://www.engineeringtoolbox.com/air-properties-d_156.html, último acesso em 17 de setembro de 2022>;

THE ENGINEERING TOOLBOX, **Bulk Modulus and Fluid Elasticity**, <https://www.engineeringtoolbox.com/bulk-modulus-elasticity-d_585.html, último acesso em 17 de setembro de 2022>;

RORIE, J, **Lab 9: “Spring constant” of Air**, University of Hawai’i.