

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

**Projeto de circuito eletrônico para a atenuação  
de tremores humanos a partir do uso de  
sensores piezoelétricos**

Autor: Fernando Souza Braga  
Orientador: Prof<sup>ª</sup> Dra. Claudia Patricia Ochoa Diaz

Brasília, DF  
2023



Fernando Souza Braga

**Projeto de circuito eletrônico para a atenuação de  
tremores humanos a partir do uso de sensores  
piezoelétricos**

Monografia submetida ao curso de graduação em (Engenharia Eletrônica) da Universidade de Brasília, como requisito parcial para obtenção do Título de Bacharel em (Engenharia Eletrônica).

Universidade de Brasília - UnB

Faculdade UnB Gama - FGA

Orientador: Prof<sup>fa</sup> Dra. Claudia Patricia Ochoa Diaz

Brasília, DF

2023

---

Fernando Souza Braga

Projeto de circuito eletrônico para a atenuação de tremores humanos a partir do uso de sensores piezoelétricos/ Fernando Souza Braga. – Brasília, DF, 2023-60 p. : il. (algumas color.) ; 30 cm.

Orientador: Prof<sup>ª</sup> Dra. Claudia Patricia Ochoa Diaz

Trabalho de Conclusão de Curso – Universidade de Brasília - UnB  
Faculdade UnB Gama - FGA , 2023.

1. Supressão. 2. Tremores. I. Prof<sup>ª</sup> Dra. Claudia Patricia Ochoa Diaz. II. Universidade de Brasília. III. Faculdade UnB Gama. IV. Projeto de circuito eletrônico para a atenuação de tremores humanos a partir do uso de sensores piezoelétricos

CDU 02:141:005.6

---

Fernando Souza Braga

## **Projeto de circuito eletrônico para a atenuação de tremores humanos a partir do uso de sensores piezoelétricos**

Monografia submetida ao curso de graduação em (Engenharia Eletrônica) da Universidade de Brasília, como requisito parcial para obtenção do Título de Bacharel em (Engenharia Eletrônica).

Trabalho aprovado. Brasília, DF, 24 de julho de 2023:

---

**Prof<sup>ª</sup> Dra. Claudia Patricia Ochoa  
Diaz**  
Orientadora

---

**Prof. Dr. Gerardo Antonio Idrobo  
Pizo**  
Convidado 1

---

**Prof. Dr. Euler de Vilhena Garcia**  
Convidado 2

Brasília, DF  
2023

# Agradecimentos

Agradeço à minha família, em especial aos meus pais, que sempre me apoiaram ao longo da realização do meu curso de Bacharel em Engenharia Eletrônica. Agradeço também a todas pessoas próximas a mim que auxiliaram de alguma forma na jornada acadêmica.

Agradeço à minha orientadora Prof. Dra. Claudia Patricia Ochoa Diaz por ter compartilhado o conhecimento necessário para execução desse trabalho, e também pela orientação e disponibilidade durante a execução deste.

Agradeço à Prof. Dra. Marcela Rodrigues Machado pelo suporte e apoio ao longo do desenvolvimento do trabalho e ao Pesquisador Doutorando Braion Barbosa de Moura, por ajudar sempre que possível com orientações para execução de experimentos relacionados ao presente trabalho.

Ademais, agradeço à Univerdade de Brasília, em especial à Faculdade do Gama, por ter me apresentado a engenharia eletrônica em diversas faces, me proporcionando um grande crescimento acadêmico/intelectual ao longo do desenvolvimento da minha graduação.

Por fim, agradeço a Fundação de Apoio à Pesquisa do Distrito Federal por viabilizar e financiar a execução do projeto de pesquisa ao qual o presente trabalho pertence.

# Resumo

Este trabalho é parte da pesquisa "Análise dinâmica e controle vibracional de sistemas mecânicos, metamateriais e smart metaestruturas", que é vinculada a Faculdade de Tecnologia da Universidade de Brasília (FT/UnB). Esta pesquisa como um todo, visa implementar estruturas que possam auxiliar no controle de vibrações.

A partir de dados obtidos em trabalhos anteriores, este trabalho visa realizar a análise de circuitos eletrônicos ressonantes (a ênfase será para as topologias conhecidas como "Circuito de Antoniou", "Circuito de Gyrator" e "Circuito de Riordan") que possam atuar acoplados a sensores piezoelétricos para atenuar vibrações. Esses estudos sobre os circuitos visam estabelecer as limitações destes, vantagens e desvantagens para a aplicação em que se encontram empregados. Foram realizados testes e simulações para a indicação de valores que fossem pertinentes ao circuito, estes foram realizados por via do Software Proteus.

Em adição, são realizados experimentos em bancada de laboratório, que visam em um primeiro momento validar as simulações executadas, e posteriormente é feito um experimento em que há o acoplamento do sensor piezoelétrico ao circuito, de modo que se torna possível demonstrar o funcionamento de todos os componentes do projeto de maneira interligada.

O desenvolvimento deste trabalho foi pautado pela aplicação de cálculos teóricos, além da consideração dos valores comerciais disponíveis para componentes eletrônicos para dessa forma, tornar a possibilidade de implementação mais próxima da realidade.

Este trabalho visa ser aplicado na atenuação de tremores fisiológicos, como por exemplo a Doença de Parkinson.

**Palavras-chaves:** shunts, atenuação, vibração, circuitos eletrônicos ressonantes.

# Abstract

This work is part of the research project "Dynamic Analysis and Vibrational Control of Mechanical Systems, Metamaterials, and Smart Metastructures," which is affiliated with the Faculty of Technology at the University of Brasília (FT/UnB). The overall goal of this research is to implement structures that can assist in vibration control.

Based on data obtained from previous works, this project aims to perform the analysis of resonant electronic circuits (with emphasis on topologies known as the "Antoniou Circuit," "Gyrator Circuit," and "Riordan Circuit") that can be coupled with piezoelectric sensors to attenuate vibrations. These studies on the circuits aim to establish their limitations, advantages, and disadvantages for the specific application they are employed in. Tests and simulations were performed to determine appropriate values for the circuit, using the Proteus Software.

Additionally, laboratory bench experiments are conducted to initially validate the simulations performed. Subsequently, an experiment is conducted where the piezoelectric sensor is coupled with the circuit, allowing for the demonstration of the integrated functionality of all project components.

The development of this work is guided by theoretical calculations and considerations of commercially available values for electronic components, in order to make the implementation as realistic as possible.

The objective of this work is to be applied in the attenuation of physiological tremors, such as Parkinson's disease, for example.

**Key-words:** Shunts, attenuation, physiological tremors, resonant electronic circuits.

# Lista de ilustrações

Figura 1 – Exemplo de circuito ressonante de topologia paralela (DORF,2016) . . .	19
Figura 2 – Exemplo de circuito ressonante de topologia série (DORF, 2016) . . . . .	20
Figura 3 – Exemplo de resposta amortecida representada graficamente. Fonte: Autoria Própria . . . . .	21
Figura 4 – Exemplo de resposta não amortecida representada graficamente. Fonte: Autoria Própria . . . . .	22
Figura 5 – Exemplo de resposta super amortecida representada graficamente. Fonte: Autoria Própria . . . . .	22
Figura 6 – Cristal de quartzo. Fonte: <a href="https://pt.wikipedia.org/wiki/Quartzo">https://pt.wikipedia.org/wiki/Quartzo</a> Acesso em 27/01/2023 às 13:39 . . . . .	24
Figura 7 – Ilustração do funcionamento do material piezoelétrico. Fonte: Autoria Própria . . . . .	24
Figura 8 – Ilustração de um modelo de material piezoelétrico.. Fonte: Autoria Própria . . . . .	25
Figura 9 – Circuitos Shunts: a) puro resistivo; b) puro indutivo; c) puro capacitivo; d) chaveado; e) LC série; f) LC paralelo; g) RL série; h) RL paralelo; i) RLC série; j) RLC paralelo. (MOURA B.B., 2021) . . . . .	26
Figura 10 – Topologia dos circuitos de emuladores de indutância (ZAMBOLINI, LIMA, MENDES, 2017) . . . . .	31
Figura 11 – Imagem do experimento montado em bancada para caracterização do sensor piezoelétrico . . . . .	34
Figura 12 – Gráfico representando a resposta dos sensores piezoelétricos mediante perturbação na viga [ Tensão (Volts) x Tempo (Segundos) ] . . . . .	35
Figura 13 – Circuito de Antoniou acoplado ao modelo de piezoelétrico sendo simulado no tempo e na frequência respectivamente. É considerada uma configuração de baixa frequência. . . . .	37
Figura 14 – Circuito de Antoniou acoplado ao modelo de piezoelétrico sendo simulado no tempo e na frequência respectivamente. É considerada uma configuração de média frequência. . . . .	37
Figura 15 – Circuito de Antoniou acoplado ao modelo de piezoelétrico sendo simulado no tempo e na frequência respectivamente. É considerada uma configuração de alta frequência. . . . .	38
Figura 16 – Circuito de Gyrator acoplado ao modelo de piezoelétrico sendo simulado no tempo e na frequência respectivamente. É considerada uma configuração de baixa frequência. . . . .	38



Figura 17 – Circuito de Gyrator acoplado ao modelo de piezoelétrico sendo simulado no tempo e na frequência respectivamente. É considerada uma configuração de média frequência. . . . .	39
Figura 18 – Circuito de Gyrator acoplado ao modelo de piezoelétrico sendo simulado no tempo e na frequência respectivamente. É considerada uma configuração de alta frequência. . . . .	39
Figura 19 – Circuito de Riordan acoplado ao modelo de piezoelétrico sendo simulado no tempo e na frequência respectivamente. É considerada uma configuração de baixa frequência. . . . .	40
Figura 20 – Circuito de Riordan acoplado ao modelo de piezoelétrico sendo simulado no tempo e na frequência respectivamente. É considerada uma configuração de média frequência. . . . .	40
Figura 21 – Circuito de Riordan acoplado ao modelo de piezoelétrico sendo simulado no tempo e na frequência respectivamente. É considerada uma configuração de média frequência. . . . .	41
Figura 22 – Imagem do experimento montado em bancada para caracterização do sensor piezoelétrico . . . . .	43
Figura 23 – Gerador de sinal do experimento (Destaque 01 ampliado) . . . . .	45
Figura 24 – Osciloscópio de bancada (Destaque 02 ampliado) . . . . .	45
Figura 25 – Protoboard com o Circuito de Antoniou montado para uma frequência de "tuning" de 10 Hertz (Destaque 03 ampliado) . . . . .	46
Figura 26 – Fonte de bancada, configurada como simétrica, para alimentar os amplificadores do Circuito de Antoniou (Destaque 04 ampliado) . . . . .	46
Figura 27 – Bancada de laboratório em que houve a integração do sensor piezoelétrico sofrendo vibrações ao circuito atenuador (Circuito de Antoniou). Fonte: Autoria Própria . . . . .	47
Figura 28 – Fonte de bancada, configurada como simétrica, para alimentar os amplificadores do Circuito de Antoniou (Destaque 01 ampliado) . . . . .	49
Figura 29 – Viga com vibração mecânica gerada pelo shake acoplado (Destaque 02 ampliado) . . . . .	49
Figura 30 – Circuito de Antoniou sobre a mesa do experimento (Destaque 03 ampliado) . . . . .	50
Figura 31 – Osciloscópio do experimento plotando a entrada do circuito (saída do piezoelétrico na cor amarela, enquanto que a saída atenuada é plotada na linha azul (Destaque 04 ampliado) . . . . .	50
Figura 32 – Osciloscópio do experimento plotando a entrada do circuito (saída do piezoelétrico na cor amarela, enquanto que a saída atenuada é plotada na linha azul (Destaque 05 ampliado) . . . . .	51

# Lista de tabelas

Tabela 1 – Exemplos de aplicações práticas de circuitos RLC de acordo com suas respostas em frequência . . . . .	23
--	----

# Lista de abreviaturas e siglas

DP	Doença de Parkinson
Ampops	Amplificadores operacionais
Hz	Hertz
KHz	Kilohertz
V	Volts
mV	Milivolts
A	Amperes
mA	Miliamperes
G	Constante gravitacional universal = $6.67408 \times 10^{11} \text{ N m}^2/\text{kg}^2$
s	Segundos
ms	Milisegundos
F	Farad
nF	Nanofarad
RLC	Resistivo/Indutivo/Capacitivo
RL	Resistivo/Indutivo
RC	Resistivo/Capacitivo
freq.	Abreviação para "frequência"
W	Variável designada para frequência

# Lista de símbolos

$^{\circ}C$	Representação de graus Celsius
$\Omega$	Letra grega minúscula ômega (indica valores de resistência)
$\omega$	Letra grega maiúscula ômega (indica valores de frequência)

# Sumário

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b>	<b>15</b>
1.1	Considerações iniciais	15
1.2	Definição do problema	16
1.3	Objetivos	17
1.3.1	Objetivo geral	17
1.3.2	Objetivos específicos	17
1.4	Metodologia	17
<b>2</b>	<b>FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA</b>	<b>19</b>
2.1	Circuitos ressonantes	19
2.2	Componentes Piezoelétricos	23
2.2.1	O efeito piezoelétrico	23
2.2.2	Modelos equivalentes para materiais piezoelétricos	25
2.3	Sensores piezoelétricos e suas aplicações na área de controle vibracional	25
2.4	Circuitos shunts	26
2.5	Tremores fisiológicos	29
<b>3</b>	<b>DESENVOLVIMENTO</b>	<b>31</b>
3.1	Projeto do circuito ressonante	31
3.1.1	Circuito de Gyrator	31
3.1.2	Circuito de Antoniou	32
3.1.3	Circuito de Riordan	33
3.1.4	Definição de valores dos componentes da topologia e caracterização do sensor piezoelétrico	33
3.1.5	Simulações no Software Proteus	36
3.1.6	Execução do experimento de validação da simulação do Circuito de Antoniou em bancada	43
3.1.7	Execução do experimento de integração do circuito já validado ao sensor piezoelétrico sofrendo perturbação controlada em tempo real	47
3.1.8	Materiais piezoelétricos aplicados a circuitos ressonantes de vibrações	51
<b>4</b>	<b>DISCUSSÃO</b>	<b>55</b>
<b>5</b>	<b>CONCLUSÃO</b>	<b>57</b>
<b>6</b>	<b>REFERÊNCIAS</b>	<b>59</b>

# 1 Introdução

## 1.1 Considerações iniciais

A execução do presente trabalho é motivada pela quantidade crescente quantidade de portadores de doenças que provocam tremores fisiológicos involuntários, tal como a Doença de Parkinson, que de acordo com o IBGE é uma doença que acomete a mais de 200 mil brasileiros, tirando destes a oportunidade de possuir uma qualidade de vida adequada (G1, 2023).

Partindo dessa idéia, é interessante mencionar que escopo do presente trabalho permite fazer uma alusão à frase do Dr. Stanley Fahn, um dos maiores pesquisadores na área da Doença de Parkinson, que diz o seguinte: "A Doença de Parkinson é uma doença progressiva e degenerativa, mas isso não significa que não haja esperança"(FAHN, 2003). O desenvolvimento de circuitos que possam atuar em pacientes que perderam suas capacidades motoras, claramente representa um sinal de esperança para que estes possam vislumbrar a possibilidade de ter uma vida mais próxima do que seria considerado saudável, conferindo a este grupo de pessoas uma maior autonomia, liberdade, e um conforto necessário para a manutenção de uma mínima qualidade de vida.

Este trabalho parte de resultados descritos em (MOURA B.B., 2021), em que são apresentadas topologias de circuitos ressonantes, isto é, circuitos em que entradas de frequências específicas são amplificadas devido sua relação com a frequência natural do circuito, enquanto que para outras frequências, ocorre a supressão destas. Esta frequência natural do circuito é ajustada com base nos parâmetros dos componentes passivos do circuito.

Como mencionado em (Zambolini-Vicente, 2017), existem três topologias de circuitos eletrônicos que são eficientes para uma aplicação em atenuação de perturbações mecânicas, sendo elas: topologia de Antoniou, topologia de Gyration e topologia de Rioridan

Além disso, são considerados estudos prévios acerca do uso de metamateriais (materiais artificiais que possuem características não existentes em materiais disponíveis na natureza), em que são conhecidas aplicações em diversas áreas, tais como na engenharia mecânica, na engenharia aeroespacial, entre outras, para que assim seja demonstrada a viabilidade técnica da execução do que está sendo proposto pelo trabalho de referência (MOURA B.B., 2021). Através da análise de estudos acerca dos piezoelétricos (metamaterial pertinente ao escopo do trabalho) foi possível ter ciência das respostas que estes iriam fornecer, e a partir disso, se tornou possível realizar cálculos e testes para demonstrar

quais circuitos eletrônicos seriam eficientes para a finalidade de atenuar vibrações.

Para a visualização das respostas dos circuitos empregados, será utilizado o software Proteus, afinal, essa demonstração se mostra necessária, tendo em vista que as alterações na frequência de entrada e nos valores relacionados aos componentes passivos possuem grande influência na saída do circuito, seja esta no tempo ou na frequência (o Software Proteus fornece ambas).

Por fim, é necessário ressaltar que os resultados desse trabalho compõe a etapa inicial de um projeto que tem por objetivo realizar a montagem dos circuitos mencionados acoplados a sensores piezoelétricos ao corpo de um paciente que sofra de tremores fisiológicos, para que dessa forma, haja uma atenuação, promovendo um tratamento paliativo.

## 1.2 Definição do problema

Os tratamentos para doenças que provocam tremores, como a Doença de Parkinson (DP) por exemplo, ainda não satisfazem completamente as pessoas acometidas por tal patologia, pois pacientes que realizam os tratamentos médicos de maneira adequada não apresentam melhoras significativas em relação ao controle de tremores e recuperação da coordenação dos membros acometidos pela doença de maneira geral (CHRISTOFOLETTI, 2010).

Portanto, enquanto não existe uma cura definitiva devidamente comprovada cientificamente, o uso de tecnologias que permitam o alívio de sintomas mais graves, como os tremores, são de suma importância para a medicina, pois elas podem conferir alguma qualidade de vida a aqueles que sofrem de enfermidades desse tipo.

Uma possível solução para a amenização da dor do grupo de pessoas acometido por doenças relacionadas a vibrações involuntárias, é o uso de metamateriais acoplados a circuitos ressonantes.

Metamateriais, como dito anteriormente em 1.1, são materiais artificiais que possuem propriedades que não são encontradas em materiais existentes na natureza. De maneira geral, eles possuem diferentes características ópticas ou elétricas relativamente incomuns. Estes são criados por meio de manipulações dos materiais, através de intervenções laboratoriais, que criam geometrias em suas respectivas estruturas cristalinas únicas e com propriedades específicas (MUDRY, 2023). No presente trabalho, os metamateriais envolvidos possuem características elétricas específicas de produzir potencial elétrico mediante perturbação mecânica (os piezoelétricos).

Já os circuitos ressonantes são configurações eletrônicas que possuem propriedades relacionadas a amplificação ou supressão de frequências. A frequência que um determinado circuito é capaz de amplificar é conhecida como frequência de ressonância, enquanto que

as demais são conhecidas como frequências anti-ressonantes. Neste tipo de circuito, a frequência de entrada é conhecida como frequência de excitação, e esta determinará a forma que o circuito irá responder. Além da aplicação no contexto do presente trabalho (atenuação de vibrações), estes circuitos são vistos atuando na filtragem de sinais sonoros ou de rádio (DORF, 2016).

## 1.3 Objetivos

### 1.3.1 Objetivo geral

O presente trabalho visa a implementação de um circuito eletrônico do tipo *shunt* (isto é, um circuito em série com uma fonte de alimentação com dispositivos de carga) juntamente a um sensor piezoelétrico, para assim realizar a verificação da resposta de atenuação de possíveis vibrações que estejam relacionadas a tremores fisiológicos.

### 1.3.2 Objetivos específicos

- Realizar a análise dos circuitos propostos
- Realizar a simulação do circuito para frequências previamente determinadas
- Realizar a análise dos resultados obtidos
- Realizar a caracterização dos sensores piezoelétricos que podem ser empregados no trabalho.
- Realizar testes em bancada para validar as simulações realizadas por via computacional.
- Realizar testes em bancada interligando os sensores piezoelétricos que sofrem perturbação ao circuito shunt com componentes devidamente dimensionados para realizar a atenuação da vibração.

## 1.4 Metodologia

O presente trabalho consiste em uma pesquisa aplicada, afinal, serão usados conhecimentos bem consolidados na academia, tais como circuitos ressonantes e uso de materiais piezoelétricos para gerar uma solução para a qualidade de vida de portadores de doenças associadas a tremores fisiológicos. Para isto, será utilizada de uma abordagem descritiva sobre os assuntos técnicos que o projeto envolve. Os resultados serão analisados de maneira qualitativa, ou seja, em relação ao quanto de atenuação de vibração que podem realizar.



## 2 Fundamentação teórica

### 2.1 Circuitos ressonantes

Circuitos ressonantes são topologias em que são notados um ou mais componentes indutivos, capacitivos e resistivos e possuem por finalidade fazer com que a tensão e a corrente elétrica se alternem em fase. O efeito prático de tal circuito é realizar a amplificação da tensão elétrica e da corrente elétrica quando o circuito se encontra em determinada frequência, enquanto que para outras, as duas grandezas elétricas são suprimidas.

As topologias mais conhecidas para esses circuitos são as seguintes: série (utiliza fonte de tensão) e paralelo (utiliza fonte de corrente). Estas estão expressas nas figuras 1 e 2

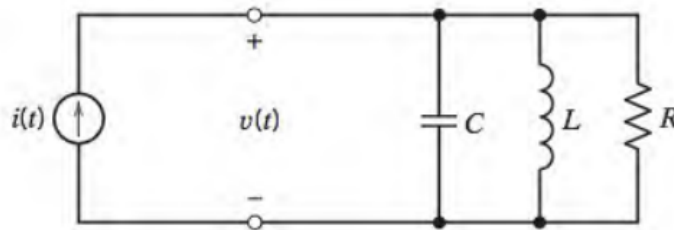


Figura 1 – Exemplo de circuito ressonante de topologia paralela (DORF,2016)

O circuito apresentado na figura 1 deve ser analisado conforme alguns parâmetros, tais como: a análise de impedância, as características de transferência de corrente, a análise de resposta em frequência e a análise de tensão e corrente no circuito.

Quanto a análise de impedância, deve se destacar o seguinte: impedância para um circuito RLC paralelo envolve a determinação da impedância total do circuito.

A impedância total do circuito é dada pela equação 2.1 (SEBRA,2014):

$$Z = R + \left(\frac{1}{j\omega C}\right) + \left(\frac{1}{j\omega L}\right) \quad (2.1)$$

Onde  $Z$  representa impedância. O  $\omega$  representa a frequência angular. o  $R$  representa o valor de resistência, o valor de  $C$  representa o valor de capacitância e o  $L$  o respectivo valor de indutância.

Quanto as características de transferência de corrente, é possível destacar que elas são analisadas de forma similar em relação a análise de impedância feita anteriormente. Esta análise se diferencia da anterior ao passo que esta, se deve calcular a transferência de corrente de cada elemento, e posteriormente, estas devem ser somadas.

A transferência de corrente é dada conforme a equação 2.2 (SEDRA,2014):

$$\frac{I}{I_0} = \frac{1}{Z} * (1 - jwRC - jwLC) \quad (2.2)$$

Onde o I representa a corrente de saída do circuito, o I0 representa a corrente de entrada, O Z representa impedância. O w representa a frequência angular. o R representa o valor de resistência, o valor de C representa o valor de capacitância e o L o respectivo valor de indutância.

Quanto a análise da resposta em frequência, a transferência de corrente em cada elemento deve ser calculada e em seguida, somadas para obter esta análise.

A análise de resposta em frequência é expressa conforme a equação 2.3 (SEDRA,2014)

$$|H(w)| = \left| \frac{I}{I_0} \right| = \left| \left( \frac{1}{Z} \right) * (1 - jwRC - jwLC) \right| \quad (2.3)$$

Onde  $|H(w)|$  representa o módulo do valor da resposta em frequência, o I representa a corrente de saída do circuito, o I0 representa a corrente de entrada, O Z representa impedância. O w representa a frequência angular. o R representa o valor de resistência, o valor de C representa o valor de capacitância e o L o respectivo valor de indutância.

Quanto a análise de tensão e corrente do circuito, é possível destacar que ela é feita conforme a equação do divisor resistivo de tensão, apresentado na equação 2.4 (SEDRA,2014).

$$I = \frac{V_x}{Z_x} \quad (2.4)$$

Onde o índice x indica o componente que está sendo analisado. I indica corrente, V indica tensão, e Z indica impedância.

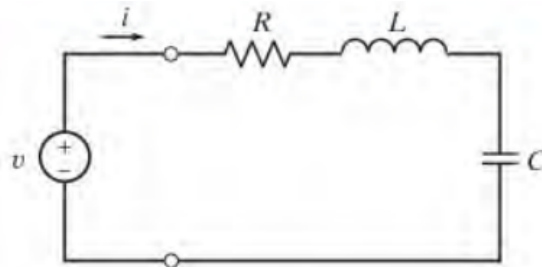


Figura 2 – Exemplo de circuito ressonante de topologia série (DORF, 2016)

Para o circuito série, existe uma mudança de análise quanto a transferência de corrente, que é dada pela equação 2.5 (SEDRA, 2014):

$$\frac{I}{I_0} = \left( \frac{1}{Z} \right) * (1 + jwRC + jwLC) \quad (2.5)$$

A análise dos parâmetros citados anteriormente, são de suma importância, afinal, estes influenciam o desempenho do circuito RLC. A análise da impedância permite determinar a resistência, a capacitância e a indutância do circuito, o que pode ajudar a determinar o comportamento do circuito. A análise da transferência de corrente permite determinar a magnitude e a fase da corrente no circuito. A análise da tensão e da corrente permite determinar o comportamento do circuito com relação à corrente e à tensão.

Também é necessário mencionar as classificações dos circuitos RLC conforme a sua resposta em frequência. Seguem as classificações:

- Resposta amortecida

É a resposta do circuito em que a corrente e a tensão atingem o seus respectivos ápices de maneira imediata, e começam a decair lentamente ao longo do tempo. Para obter esse tipo de resposta, é preciso que o valor da resistência seja maior que o valor da capacitância, e o valor da indutância seja maior que o valor da resistência.

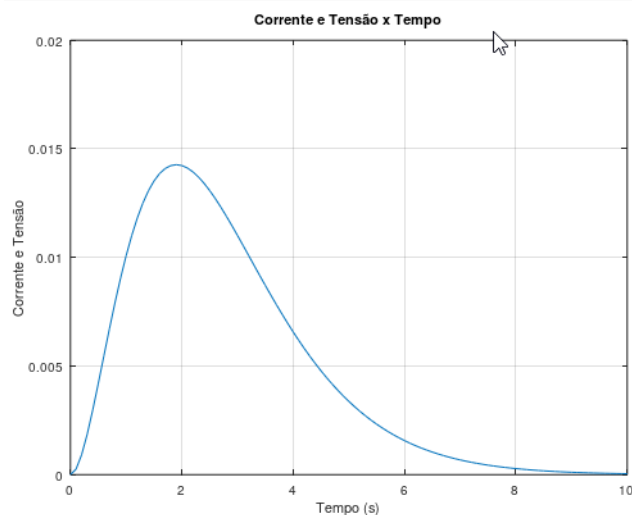


Figura 3 – Exemplo de resposta amortecida representada graficamente. Fonte: Autoria Própria

- Resposta não amortecida

É a resposta do circuito em que a corrente e a tensão não decaem com o tempo, como ocorre no caso da resposta amortecida. Nesse caso, a resposta se mantém como uma senoide periódica ao longo do tempo. Para atingir essa resposta, o valor da resistência deve ser menor que o valor da capacitância e o valor da indutância deve ser menor que o valor da resistência.

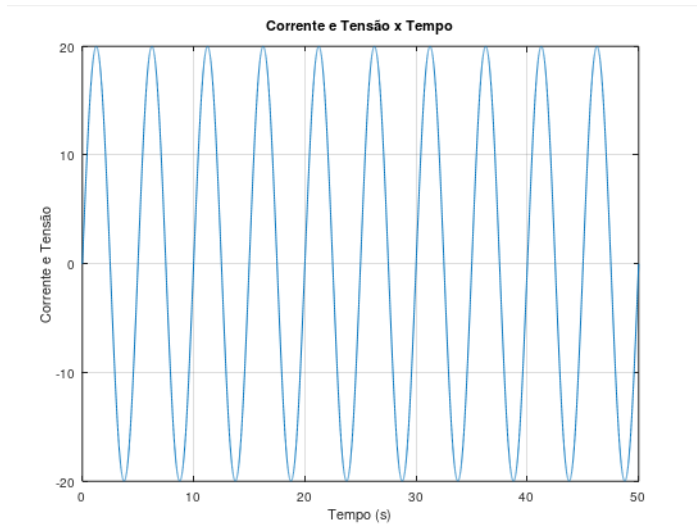


Figura 4 – Exemplo de resposta não amortecida representada graficamente. Fonte: Autoria Própria

- Resposta super amortecida

É a resposta em que a corrente e a tensão de saída do circuito RLC atingem o seus respectivos ápices de maneira imediata, porém se diferencia da resposta amortecida ao notar que no caso super amortecido o decaimento das grandezas elétricas é substancialmente mais rápido. Para atingir essa resposta o valor da resistência deve ser muito maior que o valor da capacitância e o valor da indutância deve ser muito maior que o valor da resistência.

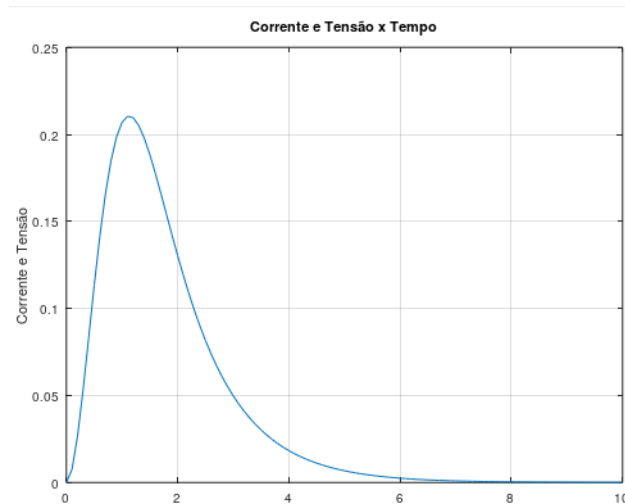


Figura 5 – Exemplo de resposta super amortecida representada graficamente. Fonte: Autoria Própria

Para ilustrar melhor a aplicação destes circuitos, na tabela 1, é possível visualizar aplicações práticas para cada tipo de resposta possível para um circuito rlc:

Tipo de resposta	Exemplo de aplicação prática
<b>Resposta amortecida</b>	Controle de temperatura de um sistema de refrigeração.
<b>Resposta não amortecida</b>	Controle de velocidade de um motor.
<b>Resposta super amortecida</b>	Controle de freq. de saída de geradores de sinais de alta tensão.

Tabela 1 – Exemplos de aplicações práticas de circuitos RLC de acordo com suas respostas em frequência

Como foi explicitado na tabela 1, pode-se justificar o uso de um circuito RLC de resposta amortecida no sistema de refrigeração ao passo que essa aplicação se torna otimizada quando são utilizados sinais de controle que possuem uma amplitude, frequência e fase controladas. Já para o segundo caso, em que se trata da resposta não amortecida do circuito RLC, o seu uso se justifica com base no fato de que ele é capaz de produzir respostas rápidas e precisas, assim possibilitando um bom controle da velocidade do motor. Já no terceiro caso explicitado na tabela 1, que se refere a resposta super amortecida aplicada no controle da frequência de saída de um gerador de sinais, se justifica porque possui uma resposta mais rápida em relação ao decaimento de sua resposta, possibilitando maior controle da saída do gerador de sinais, tendo em vista que é o tipo de resposta mais adequado para lidar com tensões mais altas, afinal, são eficientes em dissipar energia, pois minimizam tal perda.

Para a aplicação no escopo do presente trabalho, é mais interessante o uso de um circuito dotado de resposta amortecida, afinal, é com esse tipo de resposta que se obtém uma melhor estabilização da vibração após a ocorrência do mesmo, fato que é percebido ao analisar as características de cada tipo de resposta possível.

## 2.2 Componentes Piezoelétricos

### 2.2.1 O efeito piezoelétrico

O efeito piezoelétrico é um fenômeno físico que ocorre em alguns materiais, tais como o quartzo por exemplo. Ele consiste na geração de uma tensão elétrica a partir de um material cristalino que tenha sofrido a absorção de energia mecânica.(CURIE, 1880).

Esse fenômeno ocorre da seguinte forma: nos materiais dotados desta propriedade, ao se receber uma determinada pressão mecânica, o material é eletricamente polarizado, ou seja, a carga da substância se desloca para sua respectiva extremidade, acontecimento que provoca uma diferença de potencial elétrico. É importante lembrar que este processo pode ser revertido.(CURIE, 1880).

Materiais piezoelétricos são usuais no cotidiano, e um exemplo que pode ser utilizado é o quartzo (exibido na figura 6), muito presente na construção de relógios de ponteiros.



Figura 6 – Cristal de quartzo. Fonte: <https://pt.wikipedia.org/wiki/Quartzo> Acesso em 27/01/2023 às 13:39

O efeito piezoelétrico pode ser melhor ilustrado ao visualizar a figura 7, em que o titanato zirconato de chumbo, um material piezoelétrico (ilustrado em amarelo), é "cercado" por duas placas de material metálico. Sobre as placas são exercidas forças compressivas e após a realização de tal procedimento, é gerado uma diferença de potencial entre as duas placas que circundam o titanato zirconato de chumbo.

É importante citar que para fins de simulação em circuito, pode ser utilizada um fonte de tensão senoidal, afinal, quando existe uma força mecânica cíclica atuando, este tipo de fonte é a que gera um sinal mais próximo de um piezoelétrico. Também é necessário destacar que os piezoelétricos possuem uma capacitância interna própria, sendo assim, é necessário conectar um capacitor para obter uma emulação de sensor piezoelétrico mais próxima da realidade.

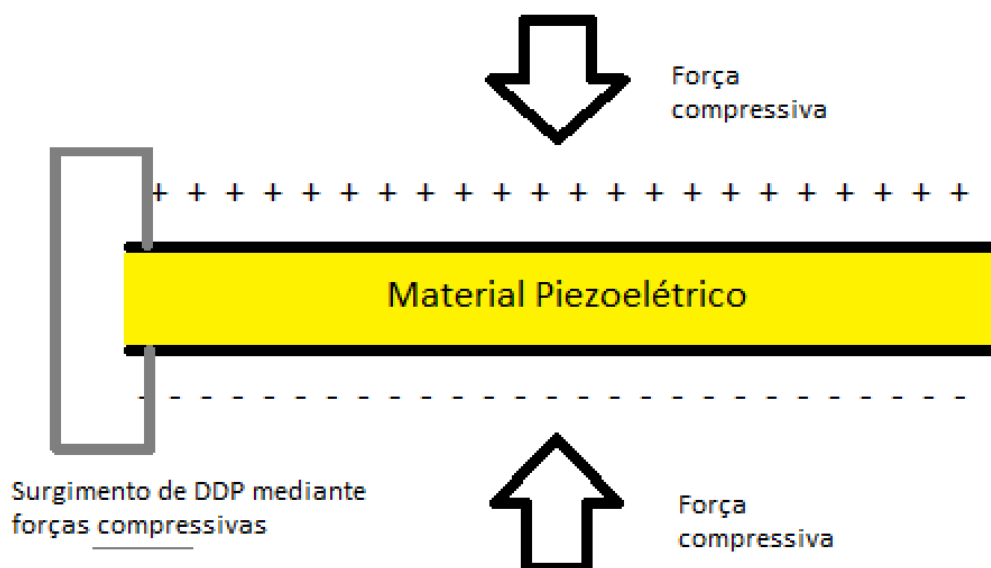


Figura 7 – Ilustração do funcionamento do material piezoelétrico. Fonte: Autoria Própria

## 2.2.2 Modelos equivalentes para materiais piezoelétricos

O uso de topologias de circuitos para emular o comportamento de determinados componentes eletrônicos é fundamental para a realização de simulações em softwares, onde não há exatamente o componente desejado. No caso deste trabalho, isso ocorre com os sensores piezoelétricos, por isso, estes serão modelados conforme (AGUIRRE, 2013), em que é considerada uma fonte AC conectada a uma carga resistiva e uma capacitiva, para assim caracterizar as características reais de capacitância e resistência interna dos sensores piezoelétricos.

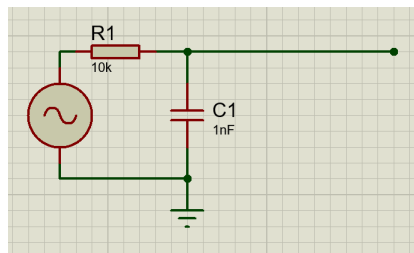


Figura 8 – Ilustração de um modelo de material piezoelétrico.. Fonte: Autoria Própria

## 2.3 Sensores piezoelétricos e suas aplicações na área de controle vibracional

É possível afirmar com base em (MOURA B.B., 2021), que a atenuação de vibrações partindo da idéia do uso de materiais piezoelétricos já é estudada a muito tempo, sendo essa idéia já aplicada em produtos de engenharia (aviões com vibrações nas asas suprimidas) usados na segunda guerra mundial (1939-1945).

Essa atenuação ocorre por meio da dissipação da energia contida no tremor que é "absorvida" por via dos circuitos eletrônicos empregados para a atenuação. A energia que inicialmente é cinética passa a ser térmica, assim compensando a perturbação mecânica indesejada.

Esta forma de controle vibracional apresenta uma série de vantagens relevantes para a aplicação, incluindo maior eficiência energética, menos manutenção e maior durabilidade, além de permitir um melhor controle, tendo em vista que a resposta para a vibração pode ocorrer de maneira muito rápida.

Além disso, é possível afirmar que este meio de realização de atenuação de vibrações continua sendo considerado vantajoso ao se realizar comparações com outros mecanismos que atuam neste propósito, por exemplo, soluções que englobam o uso de giroscópios e utilizam do princípio da inércia para o controle vibracional (TECNOBLOG, 2023), porém o uso de sensores piezoelétricos se destaca quando comparado a essa outra forma

de controle, afinal, a sensibilidade dos sensores piezoelétricos é notavelmente superior, eles são mais precisos, e também são mais leves e compactos, o que facilita a aplicação final em projetos.

## 2.4 Circuitos shunts

O circuito ressonante que será explorado majoritariamente, será o circuito *shunt*, que consiste em um circuito que é composto por duas partes, sendo elas ligadas em paralelo. Esse circuito, deve ter os seus valores de resistências ajustados conforme a corrente que será empregada no circuito. De acordo com (KUMAR E RAJPUT, 2019), o uso de circuitos shunts na atenuação de tensões, é completamente viável, ao passo que podemos considerar o seu relativo baixo custo, sua alta confiabilidade, a possibilidade de trabalhar em tensões bastante pequenas e também pela simplicidade de sua instalação. É possível visualizar na figura 9.

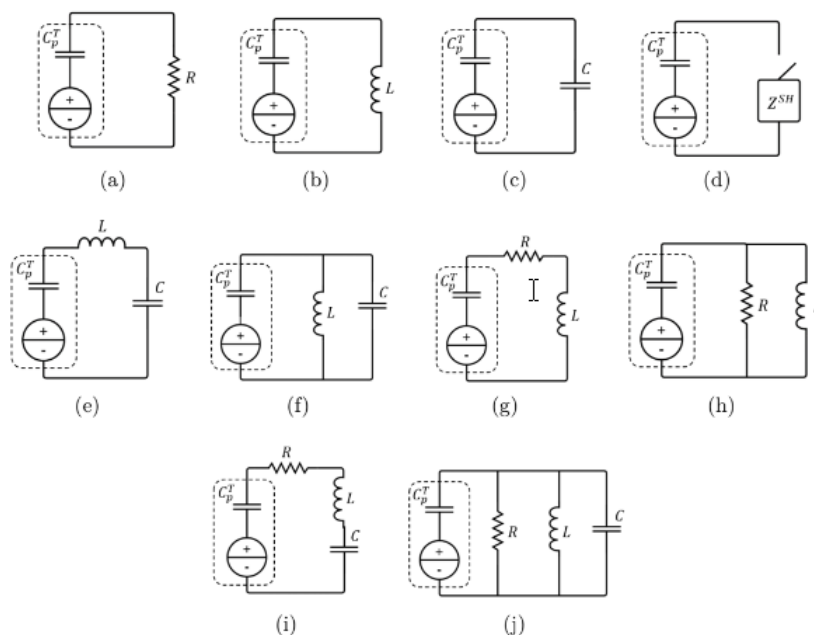


Figura 9 – Circuitos Shunts: a) puro resistivo; b) puro indutivo; c) puro capacitivo; d) chaveado; e) LC série; f) LC paralelo; g) RL série; h) RL paralelo; i) RLC série; j) RLC paralelo. (MOURA B.B., 2021)

Os circuitos *shunts* apresentados na figura 9 possuem algumas características específicas, que estão descritas a seguir:

- Circuito A (puro resistivo) É usado para limitar correntes elevadas, dividir tensões, dissipar energia e controlar a potência.

Possui a capacidade de limitar a corrente de um circuito, mesmo quando esta for elevada



Pode ser aplicado para dividir a tensão de um circuito, ou controlar a potência.

É usado para realizar a dissipação de energia

As vantagens do uso deste tipo de circuito é o seu baixo custo de implementação em relação a outros circuitos limitadores de corrente, é eficiente, confiável e simples de implementar

Suas desvantagens são: é um circuito que aquece muito, reduzindo a vida útil de seus componentes e o seu funcionamento pode ser afetado quando submetido a altas temperaturas.

- Circuito B (puro indutivo)

Possui aplicações e características similares a um circuito *shunt* puro resistivo, porém se diferencia no fato de que um circuito *shunt* indutivo tem a capacidade de usar a corrente residual para gerar um campo magnético, enquanto um circuito *shunt* resistivo não. Além disso, a sensibilidade desse circuito em relação a variações de corrente, é maior em relação a um circuito *shunt* puramente resistivo.

- Circuito C (puro capacitivo)

Possui muitas similaridades em relação aos circuitos *shunts* descritos previamente, porém se diferencia nos seguintes aspectos: um circuito *shunt* capacitivo pode causar oscilações de tensão quando a corrente varia, enquanto os circuitos *shunt* resistivo e indutivo não, e um circuito *shunt* capacitivo não pode usar a corrente residual para gerar um campo magnético, enquanto o circuito *shunt* indutivo pode.

- Circuito D (chaveado)

Também possui semelhanças notáveis com os circuitos *shunts* descritos anteriormente, porém se diferencia nos seguintes aspectos: um circuito *shunt* chaveado tem a capacidade de ajustar o comportamento do circuito, enquanto os circuitos *shunt* resistivo, indutivo e capacitivo não, um circuito *shunt* chaveado pode causar oscilações de tensão quando a corrente varia, enquanto os circuitos *shunt* resistivo e indutivo não, e um circuito *shunt* chaveado não pode usar a corrente residual para gerar um campo magnético, enquanto o circuito *shunt* indutivo pode.

- Circuito E (LC série)

Possui características semelhantes aos circuitos anteriores, mas se diferencia nesses aspectos: um circuito *shunt* LC série tem a capacidade de usar a corrente residual para gerar um campo magnético, enquanto os circuitos *shunt* resistivo, indutivo, capacitivo e chaveado não. Além disso, este tipo de circuito provoca oscilações de corrente, o que compromete a vida útil dos componentes.

- Circuito F (LC paralelo)

Possui semelhanças aos anteriores, se diferenciando no fato de que um circuito shunt LC paralelo não pode usar a corrente residual para gerar um campo magnético, enquanto os circuitos shunt indutivo e série podem e também que um circuito shunt LC paralelo não pode causar oscilações de tensão quando a corrente varia, enquanto os circuitos shunt capacitivo, chaveado e série podem.

- Circuito G (RL série)

É similar em muitos aspectos em relação aos circuitos anteriores, porém se diferencia ao passo que o circuito shunt RL série tem a capacidade de usar a corrente residual para gerar um campo magnético, enquanto os circuitos shunt resistivo, capacitivo, chaveado, série e paralelo não e também o circuito shunt RL série pode causar oscilações de tensão quando a corrente varia, enquanto os circuitos shunt resistivo, capacitivo, chaveado e paralelo não.

- Circuito H (RL paralelo)

Possui características em comum em relação aos circuitos descritos anteriormente, porém existem dois aspectos que o diferencia dos demais circuitos citados. Estes aspectos são: o circuito shunt RL paralelo tem a capacidade de usar a corrente residual para gerar um campo magnético, enquanto os circuitos shunt resistivo, capacitivo, chaveado, série e paralelo não e também que o circuito shunt RL paralelo pode causar oscilações de tensão quando a corrente varia, enquanto os circuitos shunt resistivo, capacitivo, chaveado e série não,

- Circuito I (RLC série)

Assim como os demais, este circuito compartilha de várias similaridades em relação a outros circuitos *shunts*, porém se diferencia ao passo que um circuito shunt RLC série tem a capacidade de usar a corrente residual para gerar um campo magnético, enquanto os circuitos shunt resistivo, capacitivo, chaveado, série, paralelo e RL paralelo não e também no fato de que um circuito shunt RLC série pode causar oscilações de tensão quando a corrente varia, enquanto os circuitos shunt resistivo, capacitivo, chaveado, série, paralelo e RL paralelo não.

- Circuito J (RLC paralelo)

Este circuito também se assemelha em muitos aspectos aos outros circuitos citados, porém os aspectos que o diferencia são: o circuito shunt RLC paralelo tem a capacidade de usar a corrente residual para gerar um campo magnético, enquanto os circuitos shunt resistivo, capacitivo, chaveado, série, paralelo, RL série e RL paralelo não. Também há o fato de que um circuito shunt RLC paralelo pode causar oscilações de tensão quando a corrente varia, enquanto os circuitos shunt resistivo, capacitivo, chaveado, série, paralelo, RL série e RL paralelo não.

A descrição de características dos circuitos *shunts* apresentados na figura 9 foi feita com base em (SEDRA, 2014).

## 2.5 Tremores fisiológicos

Os tremores fisiológicos consistem em movimentos involuntários que ocorrem de maneira rítmica nos mais diversos músculos do corpo, e de forma geral, possuem seu surgimento relacionados a doenças que afetam a região cerebral e/ou o sistema extrapiramidal.

Existem diversas causas para o manifestação de tremores fisiológicos, algumas delas são: Doença de Parkinson (DP), Distonia, Doença de Alzheimer, Epilepsia, Esclerose Múltipla, entre outras. A mais comum na causa dos tremores, é a DP, que é uma enfermidade neurodegenerativa que possui um elevado crescimento em número de casos, e se mostra como um problema de saúde em variados locais ao redor do mundo (KALIA, 2019). Por meio de danos ao sistema extrapiramidal, e ao cérebro em diversas regiões, tais como o córtex cerebral, a base do cérebro, o tálamo, os núcleos de base, o núcleo caudado, o núcleo subtalâmico, o núcleo globo pallidus, e o núcleo olivar superior e inferior essa doença causa o transtorno dos tremores, que dependendo de sua intensidade, podem ser capazes de impedir o paciente de realizar atividades simples do cotidiano.

Tendo em vista que as doenças citadas podem apresentar sintomas de maneira severa, chegando algumas vezes em situações que o paciente se torna incapaz de ter sua vida normal, formas de tratamento são amplamente estudadas e testadas, porém, atualmente a Doença de Parkinson, assim como a Doença de Alzheimer, entre outras, não possuem cura, portanto outras ferramentas para tornar a vida dos enfermos mais confortável são exploradas, tais como o uso de dispositivos *wearables* para realizar a atenuação de tais tremores para possibilitar a execução de tarefas cotidianas por parte de pacientes.

Atualmente, já existem tecnologias que podem auxiliar pessoas com tremores a executar atividades cotidianas que envolvem as mãos, um exemplo para isso, é a luva conhecida como "GyroGlove" em que existe um giroscópio mecânico acoplado a uma luva, e este tenta realizar a conservação do momento angular, o que acaba por realizar uma redução drástica do tremor. Porém, considerando que a GyroGlove ainda possui um custo alto (aproximadamente 900 dólares americanos), além do fato de que não é comprovada uma eficácia de 100%, e também o fato de existirem poucos produtos no mercado com esta proposta, ainda é extremamente válido realizar trabalhos que possam gerar retornos e avanços científicos que possam auxiliar a qualidade de vida de pessoas que sofrem de tremores fisiológicos involuntários (TECNOBLOG, 2023).

## 3 Desenvolvimento

### 3.1 Projeto do circuito ressonante

No presente desenvolvimento, serão empregados circuitos "shunt" em que suas respectivas cargas serão compostas por elementos passivos, tais como resistores e capacitores e também por elementos ativos, no caso, amplificadores operacionais.

Os circuitos que serão explorados no presente trabalho, são circuitos capazes de emular o efeito de indutância desejado (que é capaz de atenuar sinais de entrada com características similares ao sinal de sensores piezoelétricos submetidos a vibrações). Estes circuitos são utilizados para se evitar características indesejadas de indutores propriamente ditos, tais como a histerese

De acordo com (NILSSON E RIEDEL, 2014), os principais circuitos que possuem esse comportamento são: o Circuito de Antoniou, o Circuito de Gyrator e o Circuito de Riordan, que se encontram explicitados na figura 10.

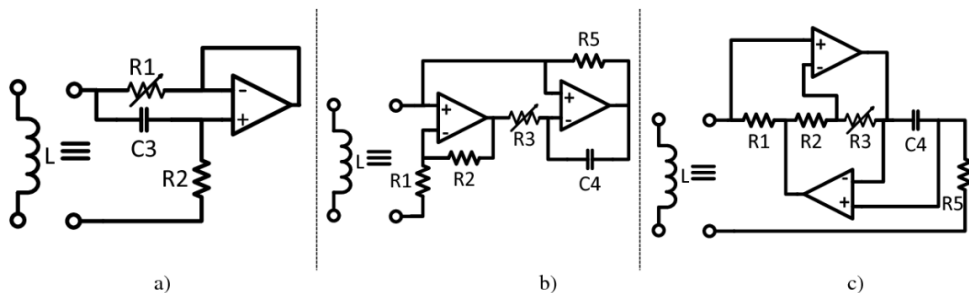


Figura 10 – Topologia dos circuitos de emuladores de indutância (ZAMBOLINI, LIMA, MENDES, 2017)

Para se obter uma compreensão completa acerca das aplicações de cada um destes circuitos, estes foram replicados por via do ferramenta de simulação do Proteus, software este, capaz de realizar todas atividades demandadas, com um elevado grau de confiança.

Para a realização das simulações, foi necessário efetuar cálculos para deixar o circuito com a frequência desejada, e estes foram feitos por meio das seguintes equações:

#### 3.1.1 Circuito de Gyrator

A frequência deste circuito é determinada conforme a equação 3.1

$$f = \frac{1}{(2 * \Pi * \sqrt{(L_{eq} * C)})} \quad (3.1)$$

Já a sua indutância sintética é dada pela equação 3.2

$$L_{eq} = R_1 * R_2 * C \quad (3.2)$$

Sendo que nessa topologia, cada elemento é adicionado visando realizar uma determinada função no circuito, essas descritas a seguir:

- Resistores 1 e 2

Estes visam formar um divisor de tensão, de modo que cada saída do divisor se conecte a uma entrada do amplificador operacional, possibilitando controlar a entrada positiva e a negativa, assim influenciando diretamente no valor de indutância sintética formada.

- Capacitor 4

Este visa provocar o efeito de reatância capacitiva, que é necessária para a formação de uma indutância sintética.

### 3.1.2 Circuito de Antoniou

A frequência deste circuito é determinada conforme a equação 3.3

$$f = \frac{1}{\sqrt{\left(\frac{C_1 * R_3 * R_4}{R_2}\right)}} \quad (3.3)$$

Já a sua indutância sintética é dada pela equação 3.4

$$L_{eq} = C_4 * R_3 * R_5 / R_2 \quad (3.4)$$

- Resistores 3 e 4

São responsáveis por determinar a resistência de saída do circuito e são capazes de influenciar o circuito de modo a minimizar oscilações e possíveis instabilidades inerentes ao circuito.

- Resistor 2

Este componente atua diretamente na corrente de realimentação do circuito, tendo em vista sua posição na topologia do mesmo. O seu valor é inversamente proporcional em relação a indutância sintética do circuito.

- Capacitor

Assim como no Circuito de Gyrator, o capacitor atua produzindo a reatância capacitiva necessária para emulação de um indutor

### 3.1.3 Circuito de Riordan

A frequência deste circuito é determinada conforme a equação 3.5

$$f = \frac{1}{2 * \pi * \sqrt{R_1 * R_2 * (R_3 + R_5) * C_4}} \quad (3.5)$$

Já a sua indutância sintética é dada pela equação 3.6

$$L_{eq} = (R_1 * R_2 * R_3 * C_4) / R_5 \quad (3.6)$$

- Resistor 1

Considerando que um ampop se encontra recebendo um sinal em sua entrada não-inversora, a sua entrada inversora deve ficar ligada ao terra, e se essa ligação for dotada de um resistor para mitigar o fluxo de corrente para o terra, é notável a melhora na funcionalidade do circuito, portanto para isso o circuito é dotado deste resistor.

- Resistor 2

É responsável por limitar a corrente que flui pelo primeiro ampop do circuito.

- Resistor 3

É o responsável por evitar uma possível sobrecarga no segundo ampop do circuito. Além disso, também atua de modo a estabilizar o ganho do primeiro ampop do circuito.

- Resistor 5

Este componente é responsável pela estabilização do ganho do segundo ampop, e este efeito é realizado em um local importante, tendo em vista que se encontra também no ramo responsável pelo mecanismo de "feedback" do circuito.

- Capacitor

Assim como no Circuito de Gyator, o capacitor atua produzindo a reatância capacitiva necessária para emulação de um indutor

### 3.1.4 Definição de valores dos componentes da topologia e caracterização do sensor piezoelétrico

Em conformidade com as fórmulas explicitadas anteriormente, os componentes tiveram valores atribuídos para que fossem respeitadas as relações definidas pelas

equações para cada frequência em que foram submetidos, sendo elas: baixa frequência (10 Hz), média frequência (500 Hz) e alta frequência (1000 Hz).

Para a simulação, a amplitude da onda senoidal do sinal de tensão foi setada no valor de 1 volt. Esse valor foi definido conforme experimento realizado na Laboratório de Ciências Mecânicas/UnB, visando obter a caracterização do sensor piezoelétrico. A bancada do experimento montado para a caracterização do sensor piezoelétrico se encontra explicitada na figura 11.



Figura 11 – Imagem do experimento montado em bancada para caracterização do sensor piezoelétrico

### Descrição do experimento

No destaque 1, temos o computador conectado ao experimento, responsável por exibir em tempo real as respostas produzidas pelos sensores piezoelétricos.

No destaque 2, encontra-se o shake, instrumento responsável por provocar as perturbações na viga em que os sensores piezoelétricos estão acoplados.

No destaque 3, é possível visualizar o dispositivo DEWESoft, responsável por efetuar a leitura das respostas dos sensores piezoelétricos após a perturbação e enviar os dados para o computador exibir os resultados gráficos.

No destaque 4, é possível visualizar a própria viga, onde as perturbações ocorrem, e os sensores piezoelétricos acoplados a ela, responsáveis por emitir os sinais.

No destaque 5, temos o gerador de sinal que controla o funcionamento do shake para provocar perturbações na viga. Ele é configurado na função "AC SWEEP", capaz de gerar uma vibração em todo o espectro de frequência considerado no experimento.

Através do experimento laboratorial exposto, foi possível obter o gráfico que descreve as respostas dos piezoelétricos em situações adversas. Este está explicitado na figura 12.

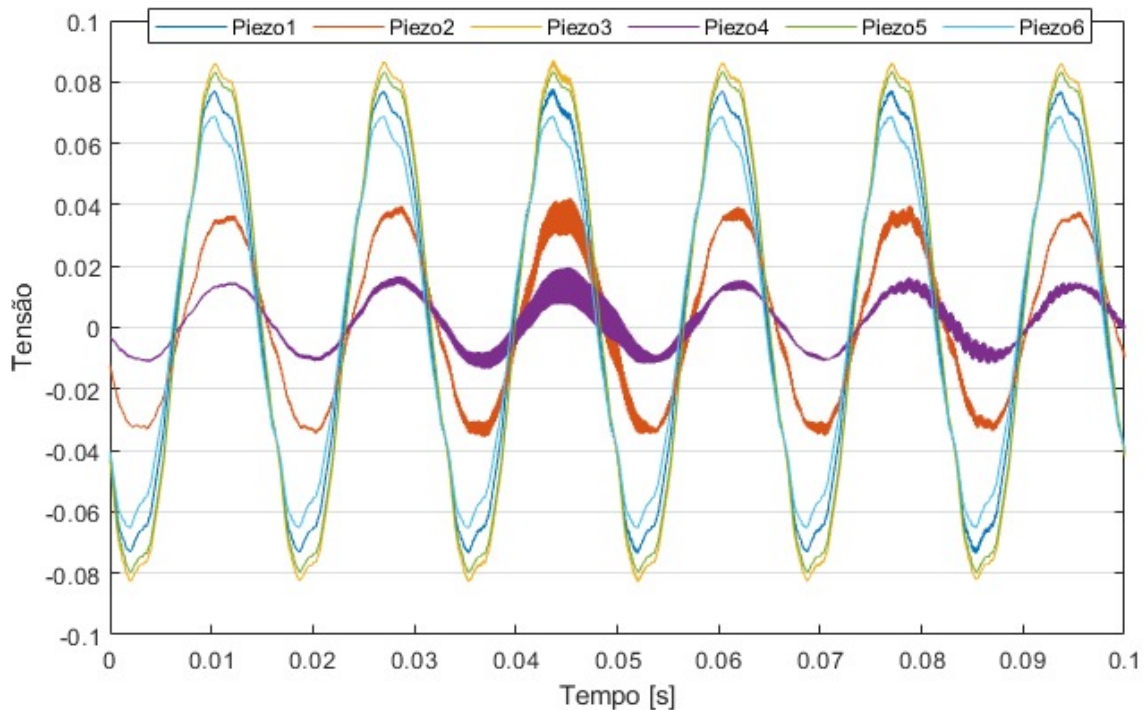


Figura 12 – Gráfico representando a resposta dos sensores piezoelétricos mediante perturbação na viga [ Tensão (Volts) x Tempo (Segundos) ]

Através das informações explicitadas em 12, é possível iniciar as simulações com um sinal adequado para a realidade em que o circuito deverá atuar na realidade.

Para dar início as simulações, foi utilizado o Software Proteus. Neste, as topologias foram montadas como é possível ver a seguir nas imagens 13, 14, 15 (topologia de Antoniou, em baixa, média e alta frequência respectivamente), e 16, 17, 18 (topologia de Gyrtator, em baixa, média e alta frequência respectivamente, e 19, 20, 22 (topologia de Riordan, em baixa, média e alta frequência respectivamente)). Os valores dos componentes das topologias foram setados da seguinte forma: Seguindo as equações 3.3, 3.1 e 3.5 para Antoniou, Gyrtator e Riordan respectivamente e os valores de frequência desejados para cada caso.

– Topologia de Antoniou:

- Baixa frequência (10 Hz):  
Resistores com valores iguais, de  $0,01 \Omega$  e capacitor de 1 F.
- Média frequência (500 Hz):  
Resistores com valores iguais, de  $20.000 \Omega$  e capacitor de 100 nF.



- Alta frequência (1000 Hz):  
Resistores com valores iguais, de 10.000  $\Omega$  e capacitor de 100 nF.
- Topologia de Gyrator:
  - Baixa frequência:  
Resistores com valores iguais, de 0,0159  $\Omega$   
e capacitor de 1 F.
  - Média frequência:  
Resistores com valores iguais, de 0,31 m $\Omega$  e capacitor de 1 F.
  - Alta frequência:  
Resistores com valores iguais, de 0,16 m $\Omega$  e capacitor de 1 F.
- Topologia de Riordan:
  - Baixa frequência: Resistores com valores iguais, de 10  $\Omega$  e capacitor de 100 nF.
  - Média frequência: Resistores iguais de 1  $\Omega$  e capacitor de 100 nF.
  - Alta frequência: Resistores iguais de 1  $\Omega$  e capacitor de 100  $\mu$ F.

### 3.1.5 Simulações no Software Proteus

Nas figuras a seguir, estão apresentadas as simulações realizadas via Software Proteus, em que foram realizadas as análises iniciais acerca do desempenho de cada topologia de circuito em baixa, média e alta frequência respectivamente. Nas imagens apresentadas, é possível se visualizar 2 gráficos, sendo um intitulado como “ANALOGUE ANALYSIS” que contém uma senoide na cor verde, que representa a entrada de sinal, e além desta, existe a representação de uma linha vermelha, que é responsável por representar a saída do circuito. Além do gráfico citado, há o intitulado como “FREQUENCY RESPONSE” que possui uma única linha verde, que é responsável por indicar a resposta à frequência do circuito em questão.

Foi considerado como baixa frequência o valor de 10 Hz, o valor de média como 500 Hz e de alta frequência como 1000 Hz.

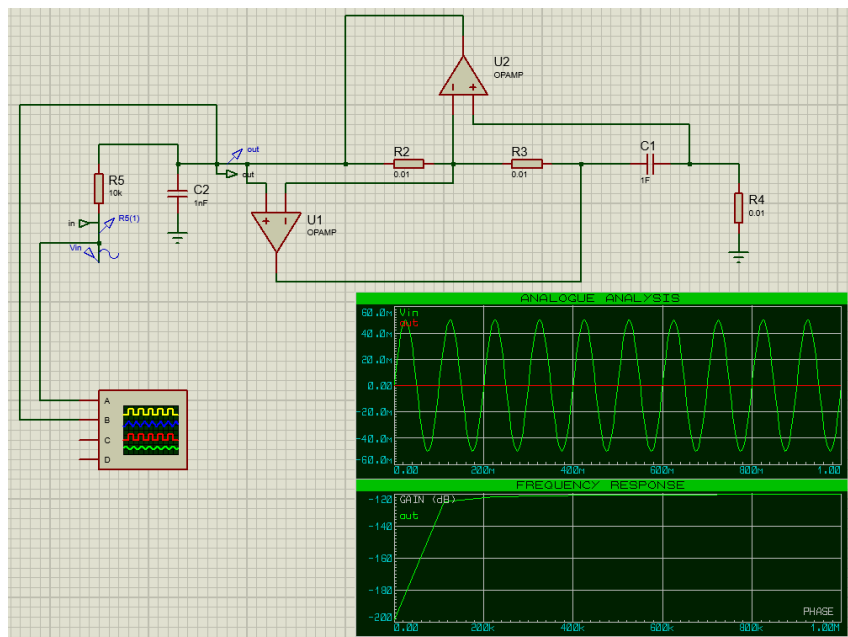


Figura 13 – Circuito de Antoniou acoplado ao modelo de piezoelétrico sendo simulado no tempo e na frequência respectivamente. É considerada uma configuração de baixa frequência.

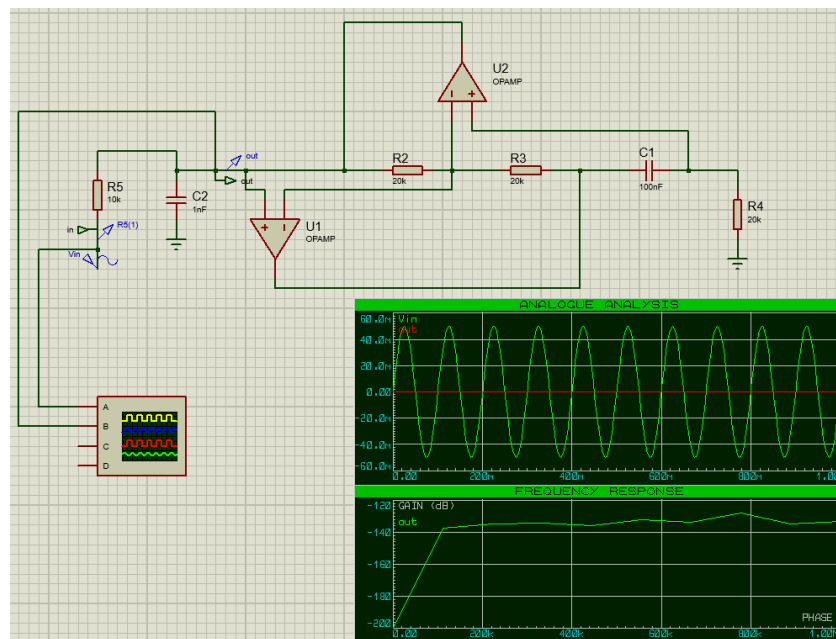


Figura 14 – Circuito de Antoniou acoplado ao modelo de piezoelétrico sendo simulado no tempo e na frequência respectivamente. É considerada uma configuração de média frequência.

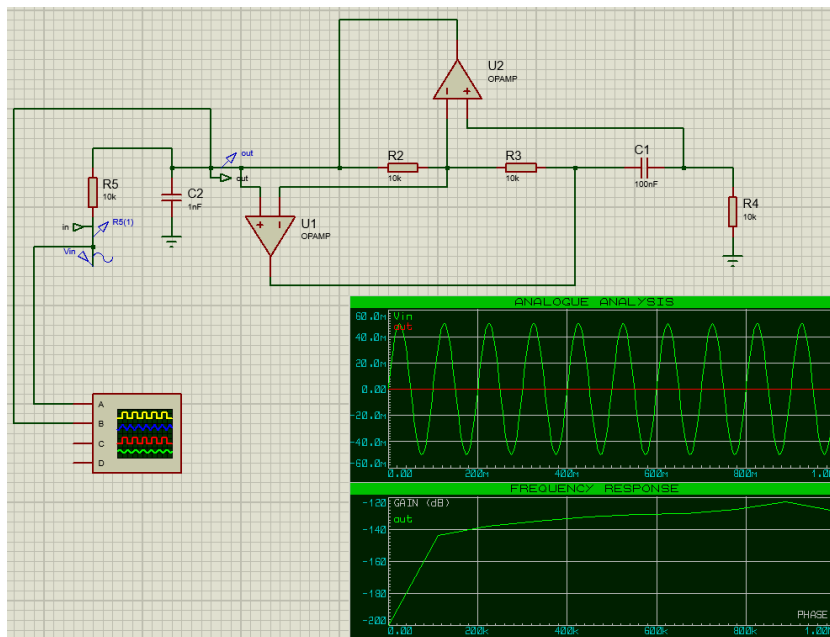


Figura 15 – Circuito de Antoniou acoplado ao modelo de piezoelétrico sendo simulado no tempo e na frequência respectivamente. É considerada uma configuração de alta frequência.

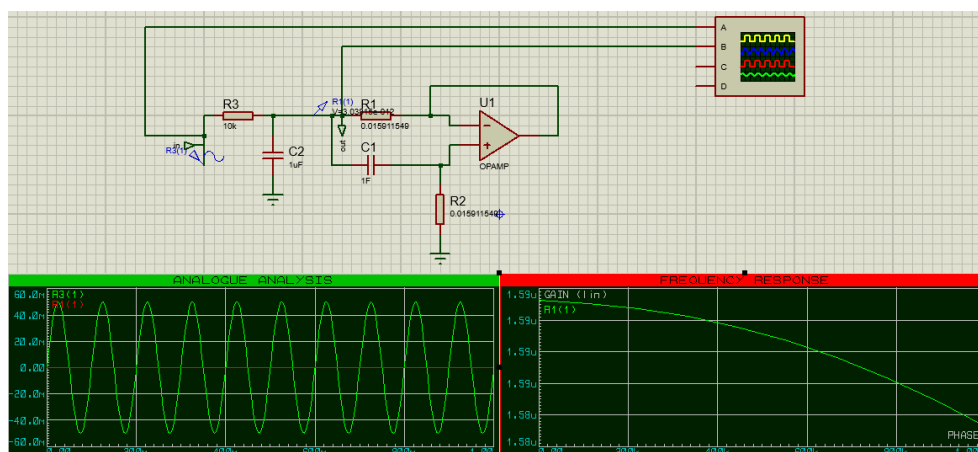


Figura 16 – Circuito de Gyrator acoplado ao modelo de piezoelétrico sendo simulado no tempo e na frequência respectivamente. É considerada uma configuração de baixa frequência.

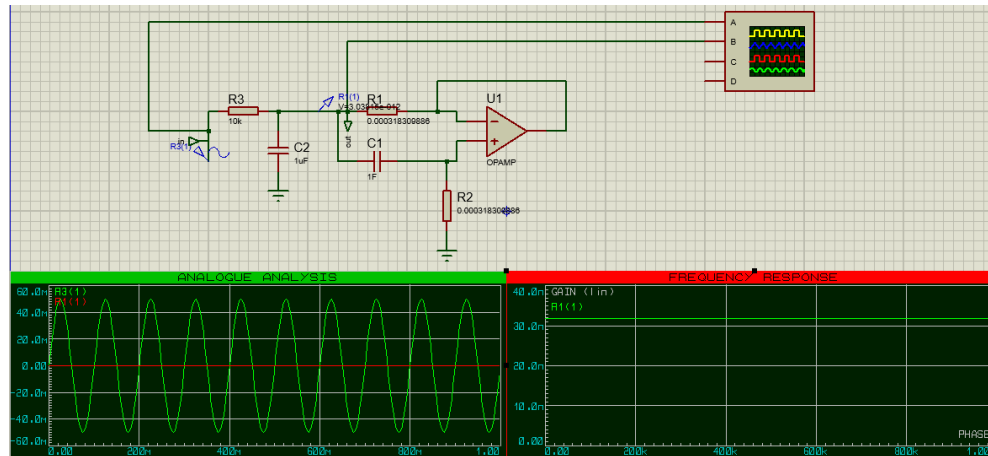


Figura 17 – Circuito de Gyrator acoplado ao modelo de piezoelétrico sendo simulado no tempo e na frequência respectivamente. É considerada uma configuração de média frequência.

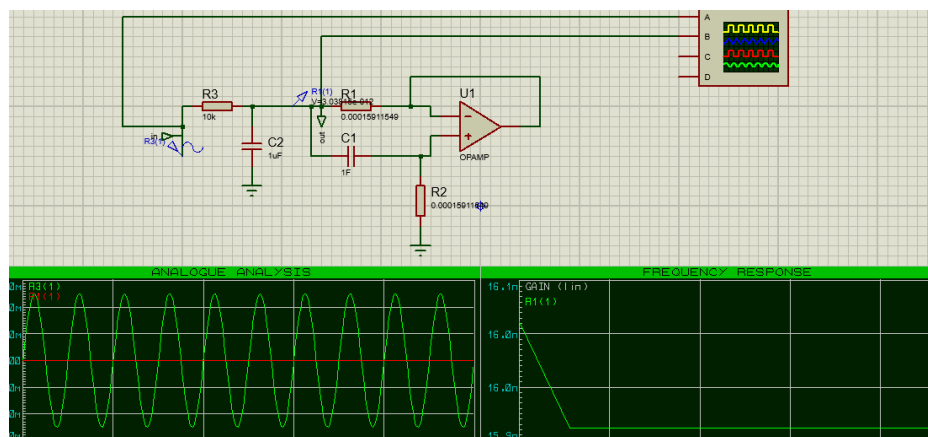


Figura 18 – Circuito de Gyrator acoplado ao modelo de piezoelétrico sendo simulado no tempo e na frequência respectivamente. É considerada uma configuração de alta frequência.

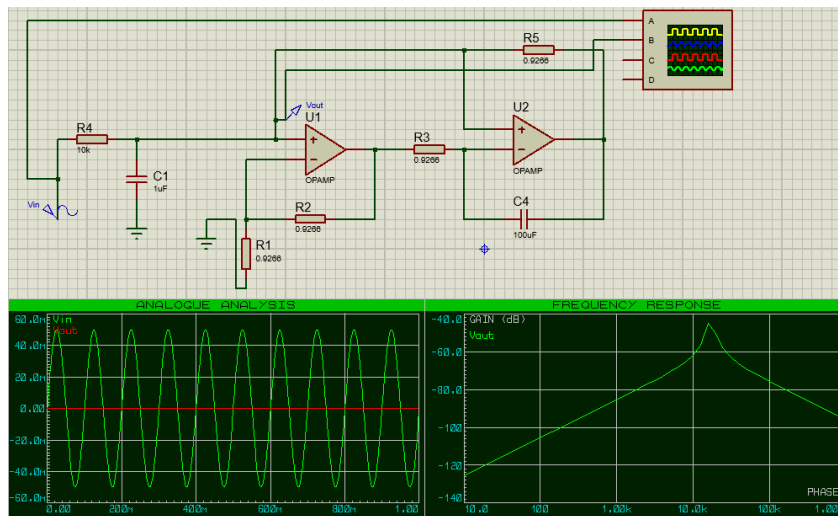


Figura 19 – Circuito de Riordan acoplado ao modelo de piezoelétrico sendo simulado no tempo e na frequência respectivamente. É considerada uma configuração de baixa frequência.

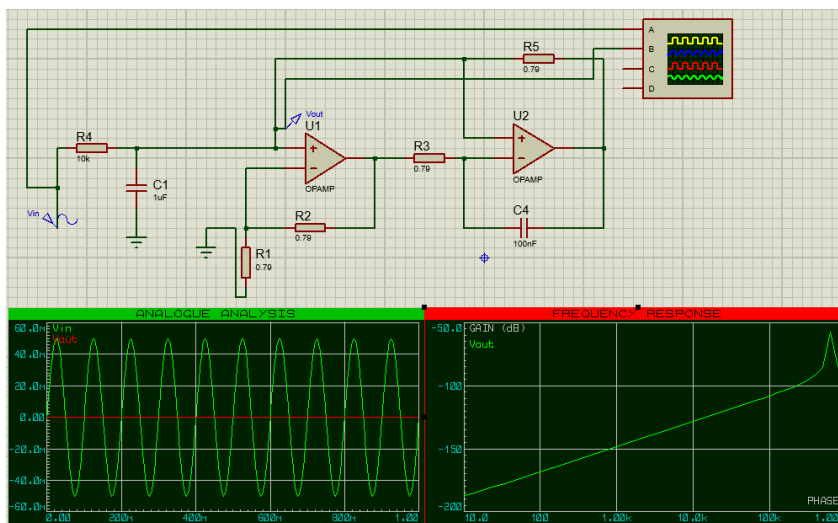


Figura 20 – Circuito de Riordan acoplado ao modelo de piezoelétrico sendo simulado no tempo e na frequência respectivamente. É considerada uma configuração de média frequência.

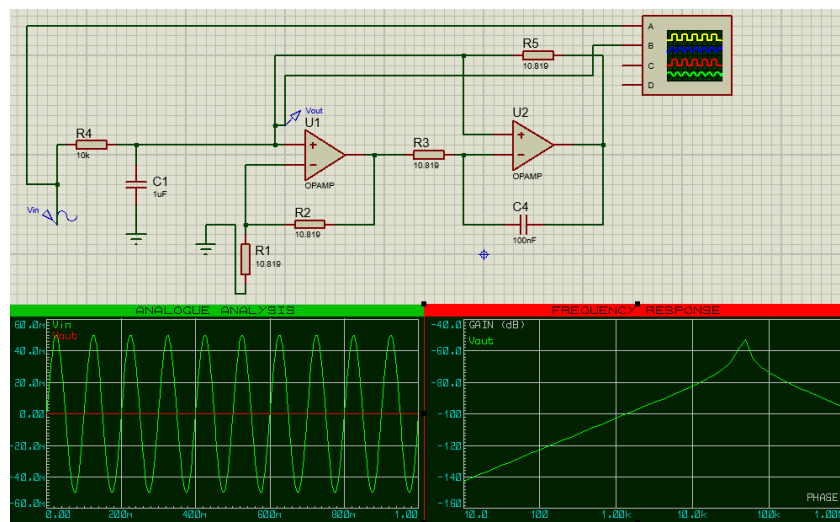


Figura 21 – Circuito de Riordan acoplado ao modelo de piezoelétrico sendo simulado no tempo e na frequência respectivamente. É considerada uma configuração de média frequência.

Partindo da análise das simulações realizadas, é possível tirar conclusões iniciais sobre o comportamento de cada circuito simulado. Foi possível constatar que a Topologia de Antoniou é a mais robusta, ao analisarmos o aspecto de uma possível mudança de comportamento mediante uma alteração na frequência (a Topologia de Antoniou possui uma resposta em frequência similar a uma reta, portanto mostra um comportamento constante, sendo invariante a algumas variações de frequência, portanto robusta). Dessa forma, apesar de características vantajosas das outras duas topologias, tal como a possibilidade de uma montagem mais compacta na protoboard, principalmente no caso da Topologia de Gyrator, as Topologias de Riordan e de Gyrator não foram selecionadas para uma implementação em bancada.

### 3.1.6 Execução do experimento de validação da simulação do Circuito de Antoniou em bancada

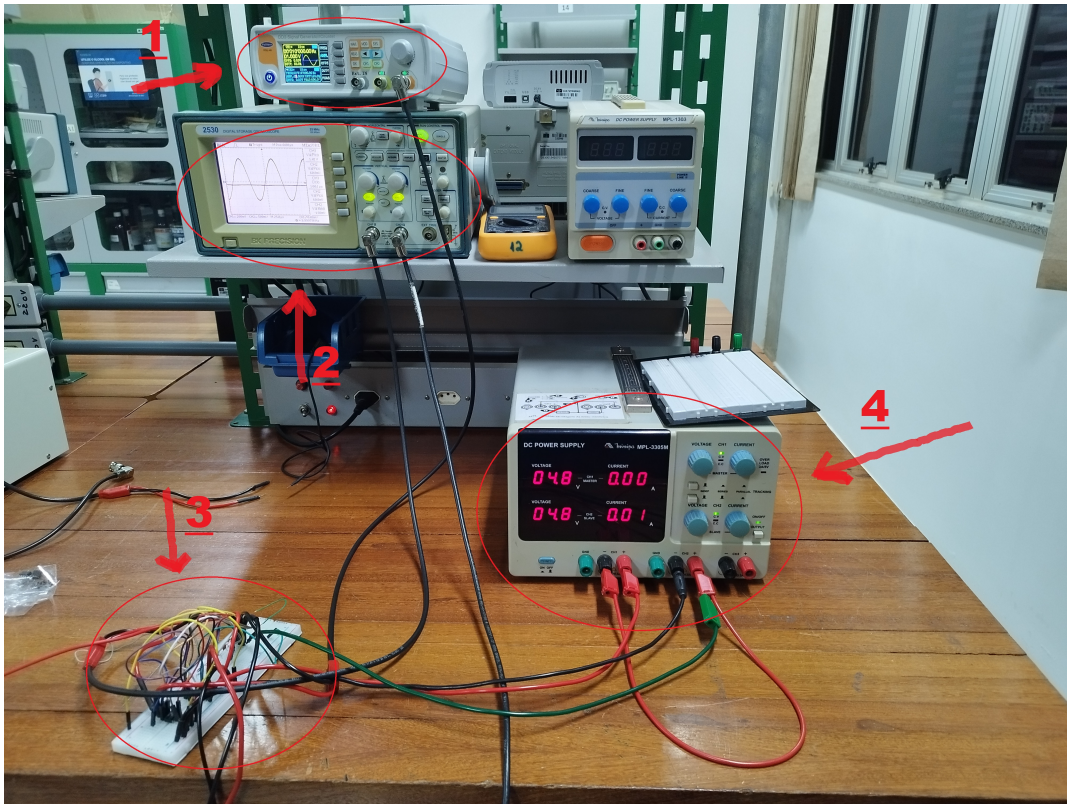


Figura 22 – Imagem do experimento montado em bancada para caracterização do sensor piezoelétrico

Para a execução do experimento em bancada, inicialmente foi escolhida a topologia do Circuito de Antoniou, que após as simulações via software, foi possível notar que este é o que possui uma resposta em frequência mais estável, ou seja, a que menos se altera quando submetida a mudanças de frequência. Portanto, pode-se concluir que é uma topologia que entrega um resultado mais robusto e confiável.

Além disso, é possível destacar que foi realizada a simulação com a frequência de *tuning* do circuito em 10 hertz, ou seja, em baixa frequência, pois é a frequência mais próxima de uma aplicação em atenuação de tremores fisiológicos em pacientes acometidos pela Doença de Parkinson.

#### Descrição do experimento

Durante este experimento, foram utilizadas diversas ferramentas e equipamentos. No Destaque 1, destacamos a ferramenta "Politerm POL-40", que é um gerador de funções responsável por emular o comportamento dos sensores piezoelétricos. Ele gera uma onda senoidal com frequência de 10 hertz e amplitude configurada em tensões baixas, em torno de 10 mV, para obter um sinal semelhante ao apresentado na figura. A figura 23 mostra a configuração da onda senoidal de entrada,



com amplitude próxima à gerada pelo sensor piezoelétrico e suficiente para manter a estabilidade do osciloscópio em 1 volt, de acordo com a resposta observada do piezoelétrico.

No Destaque 2, temos o osciloscópio "BK PRECISION 2530", que desempenha um papel importante ao exibir simultaneamente os sinais de dois canais. O canal 1 foi conectado à entrada do circuito, recebendo a onda senoidal gerada pelo Politerm POL-40, enquanto o canal 2 foi conectado ao ponto indicado como saída do circuito. Essa configuração permitiu visualizar uma diferença significativa entre a amplitude de entrada, com pico de 1 volt, e a amplitude de saída, extremamente próxima de zero. Essa diferença indica o sucesso do experimento, mostrando que um tremor de Parkinson (entrada) se tornaria insignificante em termos de amplitude (saída), devido à dissipação de energia, principalmente em forma de calor.

No Destaque 3, é mencionado o Circuito de Antoniou, montado em uma protoboard de acordo com os dados da simulação para configuração de baixa frequência. Para a montagem, uma fonte de bancada foi configurada como simétrica, com a tensão positiva de 5 volts conectada a uma das trilhas de alimentação da protoboard e a tensão negativa de 5 volts conectada a uma das trilhas negativas. Os amplificadores operacionais, resistores e capacitor foram colocados na placa e interconectados por meio de jumpers. A entrada do circuito foi conectada ao gerador de sinal, enquanto a saída foi conectada ao osciloscópio. Além disso, foi realizada uma conexão direta entre o gerador de sinal e o osciloscópio para permitir a sobreposição da onda de entrada com a saída, facilitando a análise visual. O circuito de Antoniou é composto por 4 resistores, 2 amplificadores operacionais (LM741) alimentados com aproximadamente 5 volts (seu ganho máximo) e um capacitor, conforme mostrado na figura 25.

Por fim, no Destaque 4, menciona-se a ferramenta "Politerm POL-16B", uma fonte DC utilizada para alimentar a protoboard, especificamente os dois amplificadores operacionais LM741 utilizados no Circuito de Riordan. A fonte está conectada a uma trilha de alimentação da protoboard, e através de jumpers, a alimentação é fornecida aos pontos onde os LM741 requerem energia.

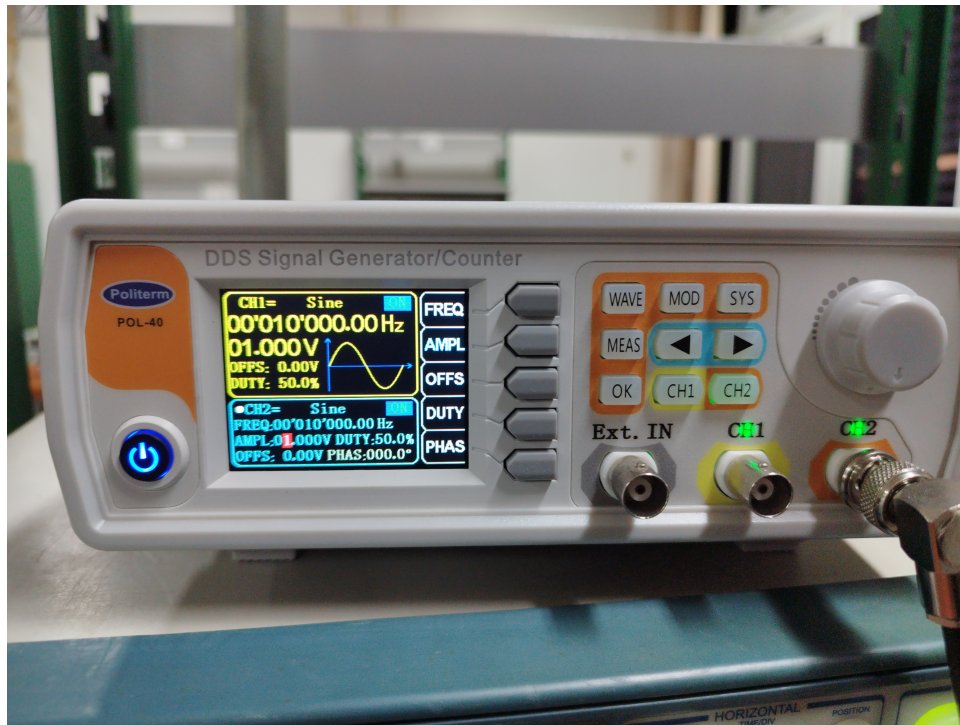


Figura 23 – Gerador de sinal do experimento (Destaque 01 ampliado)

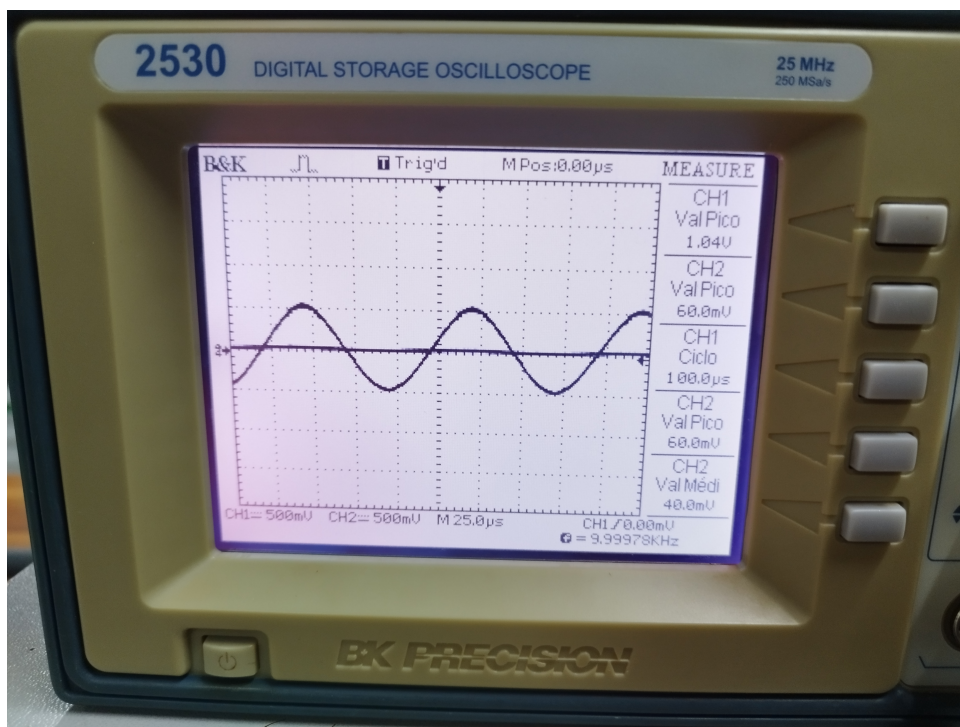


Figura 24 – Osciloscópio de bancada (Destaque 02 ampliado)

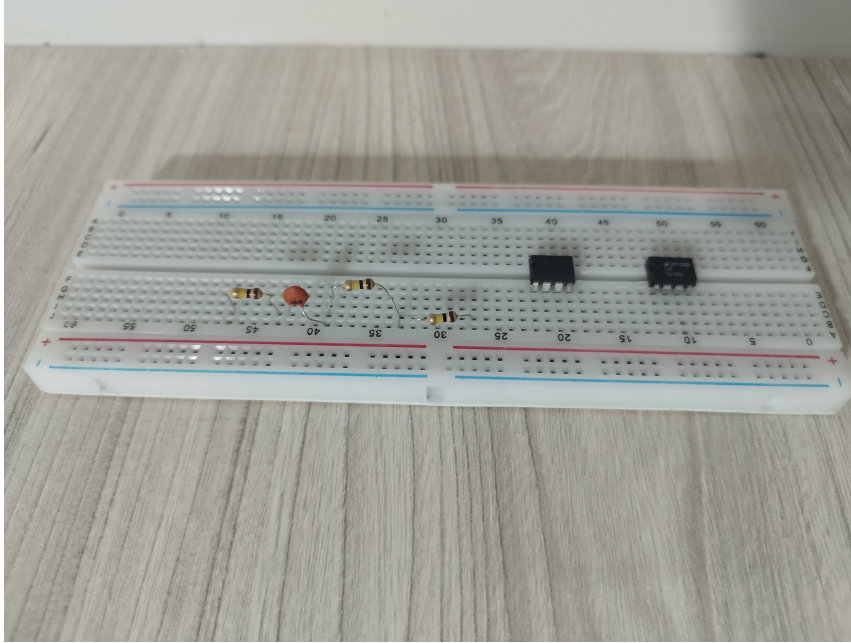


Figura 25 – Protoboard com o Circuito de Antoniou montado para uma frequência de "tuning" de 10 Hertz (Destaque 03 ampliado)

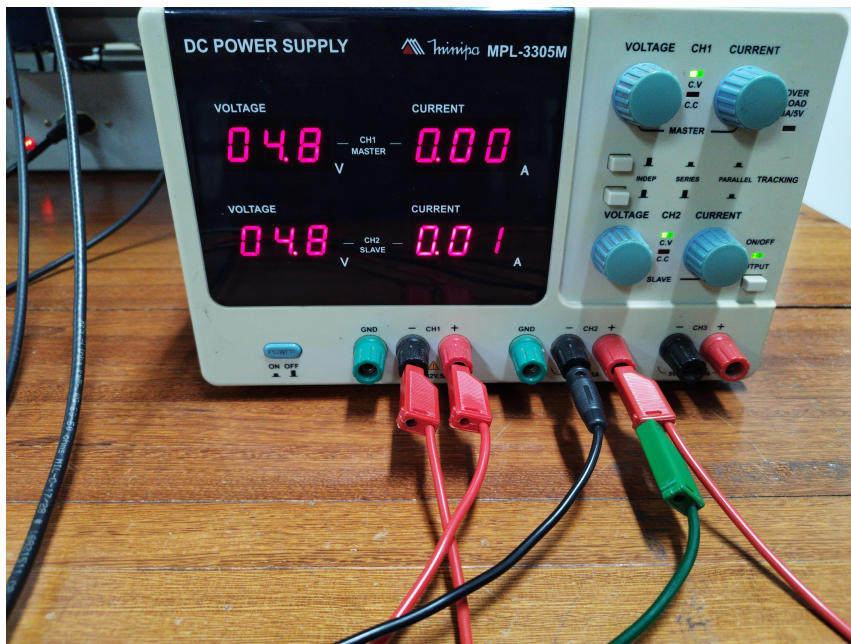


Figura 26 – Fonte de bancada, configurada como simétrica, para alimentar os amplificadores do Circuito de Antoniou (Destaque 04 ampliado)

### 3.1.7 Execução do experimento de integração do circuito já validado ao sensor piezoelétrico sofrendo perturbação controlada em tempo real

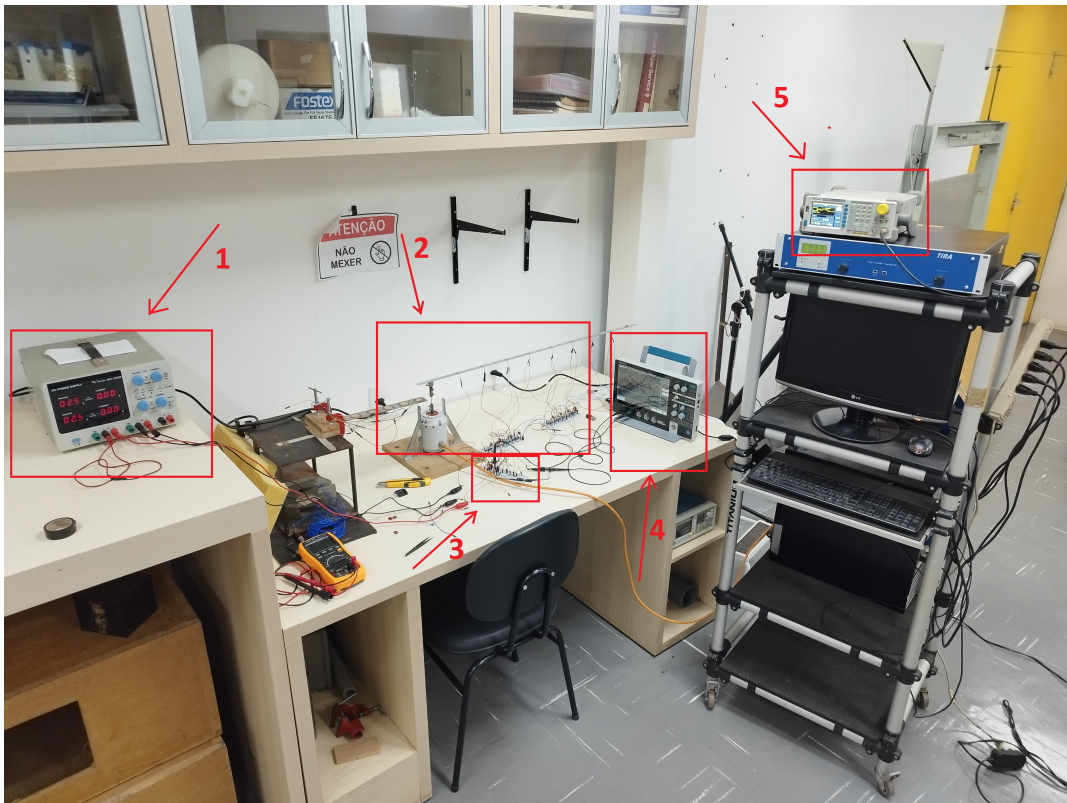


Figura 27 – Bancada de laboratório em que houve a integração do sensor piezoelétrico sofrendo vibrações ao circuito atenuador (Circuito de Antoniou). Fonte: Autoria Própria

Após a implementação do Circuito de Antoniou em bancada e a eficácia deste ser devidamente comprovada, este mesmo circuito foi levado ao laboratório da FT/UnB, onde foi possível integrar com o sistema em que sensores piezoelétricos podem sofrer vibrações controladas. Com a saída do sensor piezoelétrico conectado ao circuito e monitorada via osciloscópio, juntamente com a saída do circuito, foi feita uma comprovação do correto funcionamento do sistema, que seguiu o comportamento que era esperado.

## Descrição do experimento

No destaque 1, utilizamos a ferramenta "DC Power Supply" para alimentar os circuitos LM741 (amplificadores operacionais) com uma tensão DC. Durante a execução do experimento, observamos que valores de tensão constante entre 2,8 volts e 5 volts eram ideais, mantendo as condições esperadas de funcionamento e evitando danos aos componentes do Circuito de Antoniou. Na figura 28, é possível visualizar a fonte utilizada no experimento, configurada como simétrica, com uma tensão DC de 2,8 volts.

No destaque 2, é possível visualizar o sistema em que o "shake" está conectado à viga que possui sensores piezoelétricos ao longo dela. Através desses sensores, a vibração da viga é reconhecida pelo osciloscópio.

No destaque 3, é apresentada a protoboard com o Circuito de Antoniou devidamente montado. Optamos por utilizar o Circuito de Antoniou devido à sua robustez e previsibilidade, uma vez que é capaz de manter um comportamento constante em um amplo leque de frequências, conforme demonstrado por simulações computacionais.

No destaque 4, temos a figura mais importante para a visualização dos resultados do experimento. O osciloscópio possui 2 canais conectados, sendo o canal 1 (c1) representando a entrada do circuito eletrônico, ou seja, a saída do sensor piezoelétrico, e o canal 2 (c2) representando a saída do circuito. O sinal do piezoelétrico (c1) possui uma forma de onda senoidal, com amplitude variável entre 500mV e 1V. Esse sinal é inserido no terminal de entrada do Circuito de Antoniou, e após passar pelo circuito, a saída (c2) mostra a atenuação ocorrida, apresentando uma reta com valores extremamente baixos devido à dissipação de energia em forma de calor. A análise dos dados confirmou o sucesso do experimento, com a amplitude de saída do sinal sendo extremamente baixa em relação à entrada.

No destaque 5, temos um gerador de sinal responsável por enviar comandos ao "shake" para controlar as vibrações. Realizamos testes com uma vibração senoidal de baixa frequência e amplitude de 2 volts. Testamos frequências de 10 hertz até 55 hertz, consideradas baixas para este experimento, a fim de verificar a estabilidade do comportamento do circuito diante de possíveis mudanças de frequência. A amplitude foi configurada em 2 volts para que a saída do sensor piezoelétrico se aproximasse de uma senoide com amplitude de 1 volt, valor previamente validado para o Circuito de Antoniou.

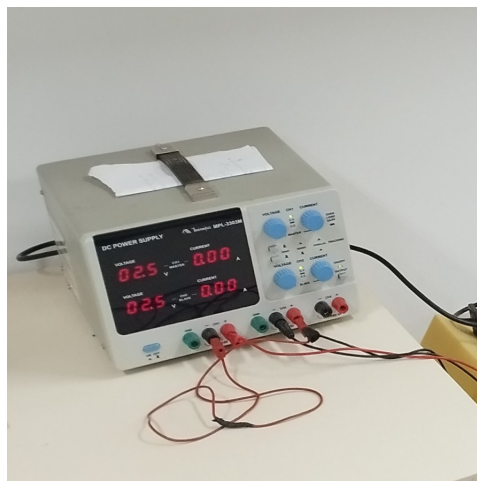


Figura 28 – Fonte de bancada, configurada como simétrica, para alimentar os amplificadores do Circuito de Antoniou (Destaque 01 ampliado)

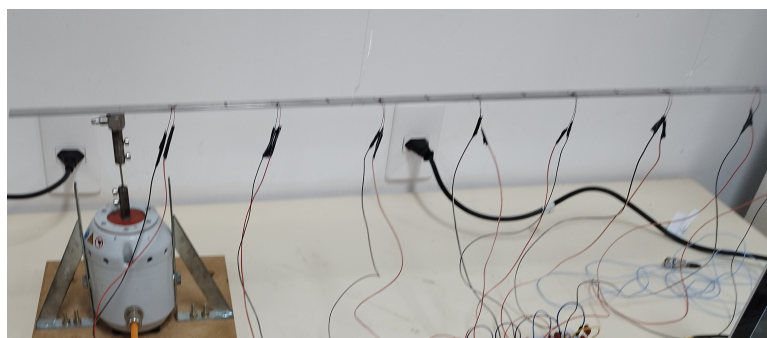


Figura 29 – Viga com vibração mecânica gerada pelo shake acoplado (Destaque 02 ampliado)

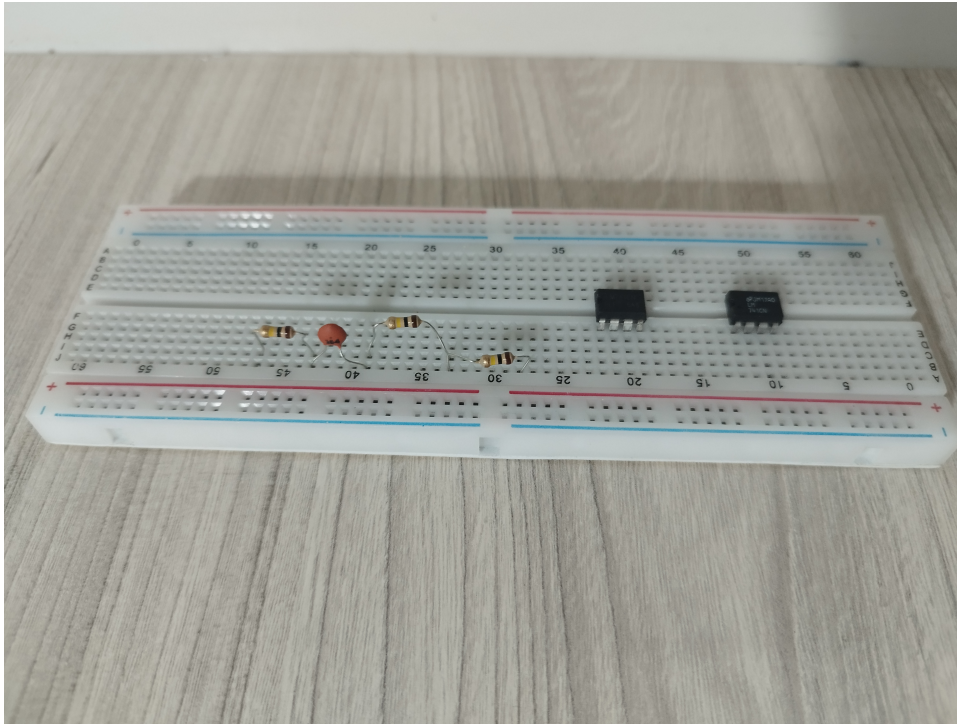


Figura 30 – Circuito de Antoniou sobre a mesa do experimento (Destaque 03 ampliado)



Figura 31 – Osciloscópio do experimento plotando a entrada do circuito (saída do piezoelétrico na cor amarela, enquanto que a saída atenuada é plotada na linha azul (Destaque 04 ampliado)



Figura 32 – Osciloscópio do experimento plotando a entrada do circuito (saída do piezoelétrico na cor amarela, enquanto que a saída atenuada é plotada na linha azul (Destaque 05 ampliado)

### 3.1.8 Materiais piezoelétricos aplicados a circuitos ressonantes de vibrações

Como já foi dito anteriormente no presente trabalho, o sensor que irá realizar a captação das vibrações são piezoelétricos. A seguir seguem os sensores com suas principais especificações técnicas, e ao final delas, uma análise que demonstra o que cada especificação pode influenciar no sistema. Informações disponíveis no datasheet dos sensores em <https://www.steminc.com/MENU/menu.asp> (Acesso em 25/05/2023 às 10:22).

– SMD07T05R412WL

- \* Classificação: IP67
- \* Medidas: (7mm, 5mm, 0,4mm) (comprimento, largura, espessura)
- \* Massa: 1,4 gramas
- \* Material de construção: polímero de íon de lítio
- \* Temperatura de operação: -30 °C a +85 °C
- \* Tensão de alimentação: 1,5 V a 25 V.
- \* Campo vibracional máximo: 4,2 G.
- \* Tempo de resposta: 1ms.
- \* Ângulo de detecção:  $\pm 30^\circ$



- \* Sensibilidade: 3 mV/g.
  - \* Impedância de saída: 1 kOhm.
  - \* Faixa de frequência: 5Hz a 10KHz.
  - \* Fator de qualidade máximo: 2000.
- SMD07T03R411
- \* Classificação: IP67
  - \* Medidas: (7mm, 3mm, 0,4mm) (comprimento, largura, espessura)
  - \* Massa: 1,1 gramas
  - \* Material de construção: polímero de íon de lítio
  - \* Temperatura de operação: -30 °C a +85 °C
  - \* Tensão de alimentação: 1,5 V a 25 V.
  - \* Campo vibracional máximo: 4,1 G.
  - \* Tempo de resposta: 1ms.
  - \* Ângulo de detecção:  $\pm 30^\circ$
  - \* Sensibilidade: 3 mV/g.
  - \* Impedância de saída: 1 kOhm.
  - \* Faixa de frequência: 5Hz a 10KHz.
  - \* Fator de qualidade máximo: 2000.
- SMD063T07R111
- \* Classificação: IP67
  - \* Medidas: (6,3mm, 7mm, 1,1mm) (comprimento, largura, espessura)
  - \* Massa: 0,5 gramas
  - \* Material de construção: polímero de íon de lítio
  - \* Temperatura de operação: -30 °C a +85 °C
  - \* Tensão de alimentação: 1,5 V a 25 V.
  - \* Campo vibracional máximo: 0,2 G.
  - \* Tempo de resposta: 1ms.
  - \* Ângulo de detecção:  $\pm 30^\circ$
  - \* Sensibilidade: 0,4 mV/g.
  - \* Impedância de saída: 2,2 kOhm.
  - \* Faixa de frequência: 20Hz a 200KHz.
  - \* Fator de qualidade máximo: 1500.
- SMPL7W8T02412WL
- \* Classificação: IP67

- \* Medidas: (7mm, 8mm, 0,24m) (comprimento, largura, espessura)
- \* Massa: 1,2 gramas
- \* Material de construção: polímero de íon de lítio
- \* Temperatura de operação: -30 °C a +85 °C
- \* Tensão de alimentação: 1,5 V a 25 V.
- \* Campo vibracional máximo: 4,2 G.
- \* Tempo de resposta: 1ms.
- \* Ângulo de detecção:  $\pm 30^\circ$
- \* Sensibilidade: 2 mV/g.
- \* Impedância de saída: 4,7 kOhm.
- \* Faixa de frequência: 10Hz a 50KHz.
- \* Fator de qualidade máximo: 1000.

A "classificação" é referente a capacidade do sensor de ser submetido a situações em que é exposto a água e poeira sem sofrer danos. Neste caso, todos são IP67, o que confere uma boa resistência a água e poeira. A parte de medidas deve ser analisada cautelosamente, considerando que sensores maiores vão atuar de forma melhor, porém vão gastar mais espaço e elevar o custo, portanto, devem ser escolhidos os menores possíveis que sejam capazes de realizar os objetivos do trabalho. Já a massa, de maneira geral, o quanto maior, a confiabilidade se torna maior, porém pode comprometer a viabilidade de uma estrutura *wearable*, portanto, deve ser selecionada a opção com menor massa possível em que o objetivo se mostre como atingido. Quanto ao material, é possível dizer que este influencia diretamente no funcionamento do piezo, no presente caso, todos os piezo citados são de polímero de íon de lítio, que é um ótimo material para essa aplicação, considerando sua alta resistência ao calor, resistência a choques mecânicos e baixo índice de dureza. Já a temperatura de operação representa a temperatura em que o comportamento do piezo se mantém dentro do esperado, como todas as faixas são muito amplas, isto não é um problema para o projeto. A tensão de alimentação é um indicativo muito importante para saber se existe a possibilidade do uso de determinado piezo ou não, tendo em vista que é necessário observar se a energia que "entrará" no sensor será suficiente para atingir essa faixa de tensão elétrica (neste caso, todos os sensores são considerados adequados), já o campo vibracional máximo representa a intensidade máxima de vibração que o sensor pode medir com precisão, ou seja, quanto maior esse número, melhor. O tempo de resposta é importante pois, o tempo é fundamental para que o sistema de atenuação possa atuar de maneira adequada, pois, caso seja lento, acaba por perder sua aplicabilidade. O ângulo de detecção, como o próprio nome sugere, representa a angulação que o sensor é capaz de detectar forças mecânicas, logo quanto maior este valor é, melhor para o projeto. A sensibilidade está

relacionada a capacidade de detectar mudança nos estímulos mecânicos, portanto, o quanto maior for o valor deste índice, melhor. Já a impedância de saída, se refere ao sinal de saída do sensor, de forma geral, quanto maior for este valor, melhor para se obter um sinal de boa qualidade. A faixa de frequência por sua vez, é de suma importância passar por análise para ver se esta se encontra na faixa de frequências que serão trabalhadas ao longo do trabalho (todos os sensores piezo da lista estão de acordo com a aplicação pretendida). Por fim, o fator de qualidade é uma métrica de desempenho, que relaciona a energia recebida pelo sensor com a energia dissipada, o quanto maior for este valor, mais qualidade pode se afirmar que o sensor possui.

Os sensores citados, no processo de modelagem do circuito por via de software foram emulados por componentes tais como o capacitor, resistor e a fonte senoidal.

Nas simulações iniciais, o sensor selecionado para o uso e modelagem foi o SMD07T03R411, considerando o seu bom fator de qualidade e a disponibilidade mais abundante em relação aos demais sensores piezoelétricos.

## 4

# Discussão

O presente trabalho tem por objetivo dimensionar 3 topologias de circuitos atenuadores de vibrações para diferentes frequências e concomitantemente a análise e dimensionamento de circuitos, a caracterização dos sensores piezoelétricos deveria ser analisada, para que dessa forma, se houvesse a ciência das características do sinal de entrada que os circuitos submetidos a testes deveriam ser capazes de realizar uma efetiva atenuação.

Com a realização de um experimento de caracterização, se tornou possível ter uma referência clara, e assim simular de forma mais acertiva e dimensionar os circuitos com maiores informações.

Considerando a conhecida entrada que deveria ser atenuada e as topologias de circuitos emuladores de indutância utilizados, foram feitas simulação para 10, 500 e 1000 Hz para que se fosse possível ter a ciência do comportamento do circuito em um amplo leque de frequências. Ao longo das simulações, foi notável que as respostas em frequência possuíam notáveis variações (a mais intensa para o Circuito de Gyrator), logo em seguida, o Circuito de Riordan que apresenta variações mais suaves, e o que menos sofreu variações, o Circuito de Antoniou, que pouco varia sua resposta mediante uma alteração de frequência.

Portanto, apesar de ser o circuito analisado que mais utiliza componentes e possui montagem menos compactada, o Circuito de Antoniou foi escolhido para ser submetido a maiores testes, indo a bancada de laboratório para de fato atenuar sinais. Em um aspecto ligado apenas a montagem em protoboard do circuito, a Topologia de Gyrator seria mais interessante, pois possui um amplificador operacional a menos, o que representa um menor consumo de energia, além de menos componentes passivos, o que facilita a montagem.

Uma questão que poderia ser aperfeiçoada para uma melhor visualização de resultado, seria a execução do trabalho em sua totalidade usando de um osciloscópio mais preciso, pois o "BK PRECISION 2530" utilizado no experimento em que o Circuito de Antoniou é submetido ao sinal do gerador, emulando o piezoelétrico submetido a vibrações, possui uma sensibilidade baixa, fazendo com que os testes fossem feitos a uma amplitude de tensão 10 vezes superior a tensão obtida via experimento de caracterização do sensor (amplitude obtida na caracterização é 0,1 volts, enquanto a utilizada nos experimentos de bancada foi em torno de 1 volt). Apesar desse fator que não contribui positivamente com os resultados obtidos ao longo do experimento,

é possível inferir que a credibilidade do experimento não é comprometida, pois via simulação em software, foi observado que essa diferença de amplitude de sinal de entrada não é capaz de alterar o comportamento esperado de atenuação no circuito. Outrossim, é importante ressaltar que as respostas em frequência para baixa frequência são as mais importantes para a aplicação visada para os circuitos que são estudados ao longo do presente trabalho. Isso se mostra verídico, pois de acordo com (FAHN, 2003), os tremores parkinsonianos ocorrem em frequência relativamente baixas ( em torno de 10 Hz), portanto os demais experimentos em diferentes frequências foram realizados a fim de demonstrar o funcionamento do circuito em diversas condições para se ter ciência por completo do comportamento do objeto de estudo em questão. Portanto, apenas ressaltando o que foi dito anteriormente, a robustez do Circuito de Antoniou foi significativamente superior, haja vista que mesmo com grandes diferenças de frequência de "tuning" o comportamento se mostrou estável, diferente de Gyrator, que mostra diferenças muito notáveis, assim como Riordan, que embora não tenha diferenças tão grandes quanto a mencionada topologia de Gyrator, possui uma mudança que pode ser significativa em termos da atenuação de tremores.

Por fim, ao visualizar o resultado de toda a análise realizada dos circuitos ao longo do trabalho, é possível afirmar que existem sólidos indícios de que é possível aplicar os experimentos realizados para uma atenuação de uma pessoa acometida por tremores fisiológicos decorrentes da Doença de Parkinson, assim podendo eventualmente devolver uma determinada independência e qualidade de vida para esse vasto grupo de pessoas.

# 5

## Conclusão

Ao longo deste trabalho, foram realizadas simulações comprovando a eficiência de três circuitos de emulação de indutância, sendo eles os circuitos Riordan, Gyrtator e Antoniou. Todos esses circuitos emuladores de indutância demonstraram comportamento de filtros eletrônicos, em que em todos os casos, se mostram como satisfatórios para a finalidade.

Entre as topologias citadas, existem circuitos mais robustos (que são capazes de suportar variações de frequência sem alterar o seu comportamento) em relação a outros. Por esta razão foram feitos testes mais aprofundados partindo da topologia do Circuito de Antoniou (que possui o comportamento mais estável mediante alterações de frequência), que em bancada manteve o seu comportamento esperado, tanto em um primeiro momento de testes em que este era ligado a um gerador de sinal que buscava emular o comportamento do sensor piezoelétrico quando submetido a vibrações, tanto quando o circuito de fato foi ligado ao sistema que sofria vibrações que excitavam o piezoelétrico e o sinal do próprio sensor era enviado ao circuito.

O resultado do trabalho se mostrou como satisfatório, pois foi comprovado durante o desenvolvimento do projeto que é viável realizar o uso dos circuitos eletrônicos mencionados para amenizar vibrações, pois estes (em principal o Circuito de Antoniou) se mostram efetivos para a finalidade. A partir do sucesso obtido nos experimentos, se torna possível afirmar que existem fortes indícios que com avanço de pesquisas na área de atenuação de tremores, é possível realizar uma atenuação eficiente dos tremores fisiológicos o que é muito importante ao considerar a grande quantidade de enfermos de Doença de Parkinson e outras doenças com sintomas similares. A utilização de um dispositivo dotado deste circuito poderia vir a ser capaz de devolver a independência e qualidade de vida de inúmeras pessoas acometidas pelas patologias mencionadas.

Todavia, existem questões que poderiam vir a ser melhoradas em um trabalho futuro, tal como um estudo detalhado do consumo energético de cada circuito, dimensionamento de uma bateria que seja capaz de manter o circuito em funcionamento por tempo hábil para uso, além de realizar uma busca de solução no âmbito da microeletrônica para construir o circuito em uma pequena área para assim viabilizar a sua aplicação.

## 6

## Referências

- [1] P. C. Curie, J. Curie, "Mémoire sur les Effets Électriques Produits par des Pressions Mécaniques," *Annales de Chimie et de Physique*, 5<sup>a</sup> série, Vol. 5, pp. 289-294 (1880).
- [2] Fahn, S. (2003). *A Doença de Parkinson: Uma Abordagem Prática*. Lippincott Williams Wilkins.
- [3] CHRISTOFOLETTI, Gustavo et al. Eficácia de tratamento fisioterapêutico no equilíbrio estático e dinâmico de pacientes com doença de Parkinson. *Fisioterapia e Pesquisa*, v. 17, p. 259-263, 2010.
- [4] Uhl, W. R., Wieler, H. (2020). Parkinson's Disease: Symptoms, Diagnosis and Treatments. *Frontiers in neurology*, 11, 706. <https://doi.org/10.3389/fneur.2020.00706>
- [5] Moura, B. B. (2021). *MODELOS ESPECTRAIS DE VIGAS ACOPLADAS À PIEZOELÉTRICOS SHUNT PARA ATENUAÇÃO DE VIBRAÇÃO E DE ONDAS ELÁSTICAS*. ENM.DM, Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade de Brasília, Brasília, Distrito Federal, xvii, 84p.
- [6] Noh, K. H., Choi, J. (2015). Controle de vibração de máquinas baseado em materiais piezoelétricos. *Revista de Engenharia Elétrica*, 7(2), 109-116.
- [7] Kumar, A., Rajput, R. K. (2019). *Fundamentos de circuitos elétricos*. Elsevier.
- [8] Kalia, L.V. et al. "Epidemiology and the Clinical Features of Parkinson's Disease." *Movement Disorders: A Comprehensive Guide to Diagnosis and Treatment*. Ed. Michael S. Okun e Michael S. Jankovic. Cambridge University Press, 2019.
- [9] Lang, Anthony E. et al. "The Basal Ganglia and Involuntary Movement Disorders." *Movement Disorders: A Comprehensive Guide to Diagnosis and Treatment*. Ed. Michael S. Okun e Michael S. Jankovic. Cambridge University Press, 2019.
- [10] Sedra, A.S., Smith, K.C. (2014). *Microelectronic Circuits*. Oxford University Press.
- [11] DORF, Richard C.; SVOBODA, James A. *Introdução aos Circuitos Elétricos*. São Paulo: Pearson, 2016.
- [12] <https://pt.wikipedia.org/wiki/Quartzo> Acesso em 27/01/2023 às 13:39. Fonte utilizada para obtenção da figura 6.
- [13] <https://spectrum-engenharia.com/voce-conhece-o-efeito-piezeletrico-e-suas-aplicacoes/> Acesso em 27/01/2023 às 15:18.

- [14] Mudry, G. Metamaterials: What Are They and What Are They Used For?. Disponível em: <<https://www.azom.com/article.aspx?ArticleID=16072>>. Acesso em: 03 Fev. 2023.
- [15] GyroGlove, a luva que promete amenizar os tremores da doença de Parkinson Por Emerson Alecrim Disponível em: <https://tecnoblog.net/arquivo/190510/parkinson-luva-gyroglove/> Acesso em 05/02/2023 às 11:14
- [16] IBGE calcula que 200 mil pessoas sofrem de Mal de Parkinson no Brasil. Disponível em: <https://cbn.globoradio.globo.com/media/audio/255167/ibge-calcula-que-200-mil-pessoas-sofrem-de-mal-de-.htm> Acesso em: 05/02/2023
- [17] Zambolini-Vicente, B et al. “EXPERIMENTAL EVALUATION OF SYNTHETIC INDUCTORS APPLIED IN PASSIVE SHUNT CIRCUITS TO VIBRATION MITIGATION.” (2017).
- [18] <https://www.steminc.com/MENU/menu.asp> (Acesso em 25/05/2023 às 10:22)
- [19] Aguirre, L. A. “Fundamentos de Instrumentação.” (2013). Pearson 2013