|  |
| --- |
| C:\Users\lbarros.DEI\AppData\Local\Microsoft\Windows\INetCache\Content.Word\EE-C.PNG |
| Diogo Miguel Cunha Fernandes, PG47150  José Tomás Lima de Abreu, PG47386  ***Acelerómetro Capacitivo para acionamento de um airbag*** |
| Projeto  Microsensores e Microatuadores  Trabalho realizado sob a orientação de  **Professora Graça Minas**  **Professora Susana Catarino** |
| janeiro de 2022 |

**Índice**

[Lista de Figuras ii](#_Toc93047664)

[Lista de Tabelas ii](#_Toc93047665)

[Capítulo 1 Introdução 2](#_Toc93047666)

[1.1 Introdução 2](#_Toc93047667)

[Capítulo 2 Análise 2](#_Toc93047668)

[2.1 Introdução 2](#_Toc93047669)

[2.2 Requisitos e Especificações 2](#_Toc93047670)

[Capítulo 3 Design **Erro! Marcador não definido.**](#_Toc93047671)

[3.1 Introdução 2](#_Toc93047672)

[3.2 Estrutura da mola 2](#_Toc93047673)

[3.3 Princípio de operação 2](#_Toc93047674)

[3.4 Sensibilidade 2](#_Toc93047675)

[3.5 Parâmetros especificados 2](#_Toc93047676)

[Capítulo 4 Implementação 2](#_Toc93047677)

[4.1 Definições globais 2](#_Toc93047678)

[4.2 Geometria 2](#_Toc93047679)

[4.2.1 Massa 2](#_Toc93047680)

[4.2.2 Mola 2](#_Toc93047681)

[4.2.3 Âncora 2](#_Toc93047682)

[4.2.4 Braços 2](#_Toc93047683)

[4.3 Materiais 2](#_Toc93047684)

[4.4 Malha 2](#_Toc93047685)

[4.5 Estudo 2](#_Toc93047686)

[4.6 Físicas 2](#_Toc93047687)

[4.6.1 Mecânica de sólidos 2](#_Toc93047688)

[4.6.2 Efeito Eletrostático 2](#_Toc93047689)

[Capítulo 5 Resultados 2](#_Toc93047690)

[5.1 xxx 2](#_Toc93047691)

[Capítulo 6 Bibliografia 2](#_Toc93047692)

Lista de Figuras

[Figura 1 - Estrutura da mola do acelerómetro. 2](#_Toc92925694)

[Figura 2 - Diagrama esquemático de um dispositivo capacitivo MEMS. 2](#_Toc92925695)

[Figura 3 - Capacitância diferencial do acelerómetro. 2](#_Toc92925696)

Lista de Tabelas

[Tabela 2 - Parâmetros físicos e geométricos do acelerómetro. 2](#_Toc92926356)

[Tabela 3 - Parâmetros definidos mais relevantes. 2](#_Toc92926357)

[Tabela 4 - Parâmetros utilizados no desenho da massa móvel. 2](#_Toc92926358)

[Tabela 5 - Parâmetros utilizados no desenho da âncora. 2](#_Toc92926359)

[Tabela 6 - Propriedades dos *arrays* de braços. 2](#_Toc92926360)

Introdução

Introdução

O objetivo deste projeto é dimensionar e simular o princípio de funcionamento de um acelerómetro capacitivo, para o acionamento de um *airbag*.

O *airbag* é um dos elementos de segurança mais importantes num automóvel, uma vez que, em caso de acidente, pode salvar a vida de um condutor ou passageiro. O *airbag* atua quando um veículo sofre um impacto forte e tem o papel de amortecer o impacto do corpo do passageiro nas superfícies interiores do carro. Para que este atue é necessário a utilização de um sensor que detete a ocorrência de um impacto, isto é, um sensor que detete uma rápida variação de velocidade ou seja, que detete a aceleração. Em veículos automóveis ligeiros, o limiar de acionamento do *airbag* encontra-se a uma aceleração de aproximadamente 3 a 5 . [1]

Neste projeto será dimensionado um acelerómetro capacitivo, que fará a deteção da aceleração em apenas uma direção.

Análise

Introdução

O dispositivo que se pretende desenvolver trata-se de um sensor, capaz de medir a aceleração a que é sujeito, através de técnicas capacitivas. Existem várias técnicas capacitivas para determinar de forma precisa o movimento de um objeto, podendo ser através da alteração da distância entre os elétrodos, alteração da área ou alteração do dielétrico. Neste dispositivo usar-se-á a técnica de alteração da distância.

O princípio de funcionamento do acelerómetro pode ser compreendido pelo sistema convencional de mola, massa e amortecedor. A parte central do acelerómetro é constituída por uma massa suspensa, chamada de massa sísmica ou massa de prova. Sob a aplicação de uma aceleração externa, a massa de prova desloca-se, devido ao efeito da força inércia. Os deslocamentos da massa de prova implicam uma aceleração que pode ser medida por vários métodos. Para a abordagem de deteção capacitiva, o deslocamento é detetado medindo a variação de capacitância entre os elétrodos fixos e os elétrodos adjacentes à massa de prova, sendo estes os elétrodos móveis. Quando o elétrodo móvel se mexe, devido à aceleração sofrida, a distância entre os elétrodos fixo e móvel altera-se, afetando a capacitância. Se esta distância aumentar, a capacitância diminuirá. Caso a distância entre os elétrodos diminua, a capacitância aumentará. O sensor será composto por uma série de elétrodos, a que chamemos braços, intercalados entre braços fixos e braços móveis.

Para que a massa suspensa se mova conforme a aceleração sofrida, o acelerómetro deve estar fixado, através de duas âncoras, uma em cada lado do sensor, criando-se uma mola/amortecedor de cada lado da massa de prova. [2]

Requisitos e Especificações

* **Gama de funcionamento:** Prevê-se a deteção de uma aceleração máxima de **+/-** 5 g.
* **Linearidade necessária:** Como o propósito deste dispositivo é o acionamento de um airbag, não sendo necessária a leitura de valores de saída, então a linearidade não é necessária, pois o airbag será acionado assim que seja atingido o valor máximo definido.
* **Amplitude dos estímulos:** O estímulo envolvido neste dispositivo é a força mecânica aplicada à massa suspensa. A força aplicada à massa suspensa pode ser calculada por , sendo que a massa deverá estar na ordem dos , e considerando a aceleração acima referida. O deslocamento da massa suspensa deverá estar na ordem dos . O valor da capacidade obtida prevê-se na ordem dos , enquanto a sua variação deverá estar na ordem dos .
* **Restrições ao nível da geometria/configuração:** Os braços do sensor não devem estar nem muito distanciados, pois a variação da capacidade será baixa, diminuindo a sensibilidade, nem devem estar muito próximos, correndo o risco de se tocarem. Além disso, existem limitações quanto ao processo fabrico da estrutura, limitando o tamanho mínimo dos componentes.
* **Materiais usados:** Poli-silício - O silício policristalino é um material que possui cristais de silício desalinhados, sendo muito utilizado na micromaquinagem superficial.
* **Valores de saída:** Capacidade total do sensor.
* **Mede sinais contínuos ou oscilatórios?** Sabendo que, num veículo a aceleração está constantemente a variar, e uma vez que a massa móvel se desloca com a variação da aceleração, este sistema irá medir o sinal oscilatório referente à frequência de oscilação da massa móvel.
* **Variáveis a simular:** Deslocamento da massa móvel e capacidade.

Desenho

Introdução

Neste capítulo será descrito o processo de dimensionamento do acelerómetro capacitivo a desenvolver, apresentando todas as equações necessárias e respetivos cálculos.

Como visto anteriormente, sob a aplicação de uma aceleração externa, a massa de prova desloca-se. De acordo com a segunda lei de Newton, todas as forças que agem na massa de prova são iguais à força inércia que atua na massa de prova. A equação diferencial para o deslocamento em função da aceleração externa, , é representada por um sistema massa-mola-amortecedor, de segunda ordem, como apresentado na equação (6.1), onde, é a massa de prova, é o coeficiente de amortecimento, é a constante da mola e é a aceleração aplicada. [3]

|  |  |
| --- | --- |
|  | (6.1) |
|  | (6.2) |

Aplicando a transformada de Laplace à equação (6.2), obtém-se a equação (6.3) e posteriormente a equação (6.4).

|  |  |
| --- | --- |
|  | (6.3) |
|  | (6.4) |

Na equação (6.5) está representada uma função de transferência genérica para um sistema de segunda ordem, linear e invariante no tempo.

|  |  |
| --- | --- |
|  | (6.5) |

Comparando a equação (6.4) com a equação (6.5), obtém-se os seguintes parâmetros (equações (6.6) e (6.7)), onde, é a frequência natural em rad/s, é a frequência natural em Hz e é o fator de amortecimento.

|  |  |
| --- | --- |
|  | (6.6) |
|  | (6.7) |

Perante uma resposta em regime permanente, usando a equação (6.4) com , obtém-se:

|  |  |
| --- | --- |
|  | (6.8) |
|  | (6.9) |

Desta forma, é possível verificar que para uma mudança mínima no deslocamento, a aceleração deve também ser mínima.

Estrutura da mola

A topologia de uma viga de poli-silício dobrada pode ser tratada como uma mola, fornecendo uma constante de mola baixa e, portanto, maior sensibilidade para o sensor.

A constante elástica de mola desta estrutura é dada pela equação (6.10), onde é a constante de mola para uma viga dobrada, é o comprimento da viga, é a largura da viga, é a espessura da viga e é o módulo de Young do material que compõe a estrutura.

|  |  |
| --- | --- |
| Uma imagem com texto, relógio, manómetro  Descrição gerada automaticamente | (6.10) |

Na Figura 1, é mostrada uma estrutura suspensa, fixada por uma âncora. Na figura pode ver-se que quatro vigas dobradas podem ser tratadas como quatro molas conectadas em paralelo. Deste modo, para esta estrutura, a constante elástica de mola ao longo da direção pode ser determinada através da equação (6.11).

|  |  |
| --- | --- |
| Uma imagem com texto, relógio, manómetro  Descrição gerada automaticamente | (6.11) |

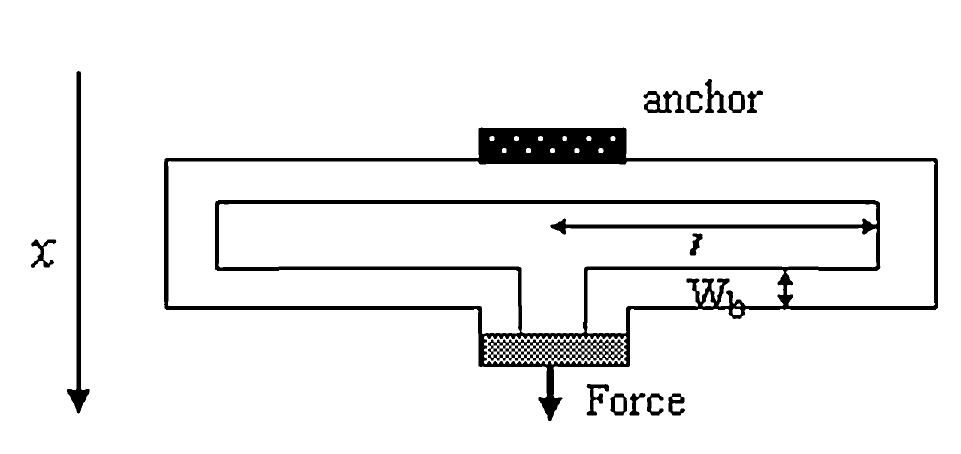


Figura 1 - Estrutura da mola do acelerómetro.

Para obter um bom desempenho e uma boa sensibilidade num acelerómetro capacitivo, é muito importante escolher bem os parâmetros, como a largura e o comprimento da mola ( e , respetivamente), que representam a suspensão do sistema de aceleração.

Para atingir uma alta sensibilidade do dispositivo, a largura da mola , deve ser o menor possível. No entanto, existe um limite mínimo para que é definido pela largura mínima possível de obter num processo de fabricação. Se esta largura for muito estreita, inferior a , será muito difícil fabricar a mola, por ser extremamente frágil, podendo ser facilmente quebrada.

Como dito anteriormente, o material utilizado para a estrutura será o poli-silício. A espessura da camada de poli-silício, , também deve ser escolhida tendo em conta o processo de fabricação.

Princípio de operação

Uma estrutura capacitiva diferencial típica de sistemas micro-eletromecânicos (*Micro-Electro-Mechanical Systems* – MEMS) é mostrada na Figura 2, onde representa a massa móvel, e denotam braços fixos enquanto e são ambos vigas flexíveis do dispositivo que permitem ancorar a massa móvel a uma superfície fixa.

Uma imagem com texto, dispositivo, relógio, contador

Descrição gerada automaticamente

Figura 2 - Diagrama esquemático de um dispositivo capacitivo MEMS.

Esta estrutura apresenta duas capacitâncias e , entre o braço superior fixo e a massa, e o braço inferior fixo e a massa. Quando a massa se encontra estática está localizada no centro entre e e as capacitâncias estáticas são obtidas pela equação (6.12), onde é a constante dielétrica do ar, é a distância entre a massa móvel e cada um dos braços fixos e é a área sobreposta  
entre e , .

|  |  |
| --- | --- |
|  | (6.12) |

Quando existir aceleração produz-se um deslocamento da massa móvel, através da deflexão das vigas, devido ao efeito da força inércia. Esta deflexão dá-se na direção oposta da aceleração aplicada. A sensibilidade do deslocamento do dispositivo é definida como o deslocamento da massa móvel por unidade de aceleração ao longo do eixo .

Uma imagem com texto, antena

Descrição gerada automaticamente

Figura 3 - Capacitância diferencial do acelerómetro.

Usando a equação (6.12) e analisando a Figura 3, considerando , a capacitância estática do pente (conjunto de braços) do acelerómetro, quando não há aceleração, é dada pela equação (6.13), onde é o número total de braços móveis, é o comprimento de um braço.

|  |  |
| --- | --- |
| Uma imagem com texto  Descrição gerada automaticamente | (6.13) |

Quando existe aceleração horizontal para a esquerda, segundo o eixo da Figura 3, assumindo uma deflexão pequena, , as capacitâncias e são dadas pelas equações (6.14) e (6.15), respetivamente.

|  |  |
| --- | --- |
|  | (6.14) |
| Uma imagem com texto, relógio  Descrição gerada automaticamente | (6.15) |

A capacitância diferencial obtida é dada pelas equações (6.16) e (6.17).

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  | | (6.16) |
|  | Uma imagem com texto, relógio, manómetro  Descrição gerada automaticamente | (6.17) |

A partir destas equações, pode-se concluir que a capacitância diferencial é diretamente proporcional ao deslocamento dos braços móveis.

A frequência de ressonância, , do sistema massa-mola é dada pela equação (6.18).

|  |  |
| --- | --- |
| Uma imagem com texto, relógio, manómetro  Descrição gerada automaticamente | (6.18) |

Considere-se , para a largura e comprimento da massa móvel, e , para a largura e comprimento de um braço.A massa da massa móvel, , inclui não só a massa móvel, mas também a massa de todos os braços móveis a ela ligados, podendo ser expressa pela equação (6.19), onde é a densidade do poli-silício.

|  |  |
| --- | --- |
|  | (6.19) |

Sensibilidade

O deslocamento do dispositivo na direção do eixo do pode ser expressa pela equação (6.20).

|  |  |
| --- | --- |
| Uma imagem com texto  Descrição gerada automaticamente | (6.20) |

A sensibilidade no deslocamento, , é dada pela equação (6.21).

|  |  |
| --- | --- |
|  | (6.21) |

Parâmetros especificados

Na Tabela 1 são apresentados todos os parâmetros físicos e geométricos dimensionados para o  
modelo do acelerómetro.

Tabela 1 - Parâmetros físicos e geométricos do acelerómetro.

|  |  |
| --- | --- |
| Parâmetros | Desenho |
| Comprimento da viga, | 270 m |
| Largura da viga, | 3 m |
| Espessura da estrutura, | 6 m |
| Espessura da massa móvel, |  |
| Comprimento da massa móvel, |  |
| Massa total da massa móvel, |  |
| Largura dos braços, |  |
| Comprimento dos braços, |  |
| Distância entre os braços, |  |
| Número de braços, |  |
| Módulo de Young do Poli-silício, |  |
| Densidade do Poli-silício, |  |
| Constante do dielétrico do ar, |  |
| Constante da mola, |  |

Implementação

Neste capítulo será descrito o processo de implementação do acelerómetro capacitivo a partir da criação de um modelo COMSOL, apresentando todos os procedimentos utilizados.

Definições globais

De forma a facilitar a implementação do modelo COMSOL e a alteração dos seus parâmetros, definiu-se um conjunto de parâmetros globais. Entre eles, os mais relevantes são apresentados na  
Tabela 2.

Tabela 2 - Parâmetros definidos mais relevantes.

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| Parâmetros | Variável teórica | Valor | Descrição |
| *num\_g* |  | 5 [] | Aceleração em |
| *acceleration* |  | *num\_g .* 9,8 [] | Aceleração |
| *tickness* |  | 6 [m] | Espessura do dispositivo |
| *fingers\_num* |  | 32 | Número de braços móveis em cada lado do acelerómetro |
| *fingers\_dist* |  | 3 [m] | Distância entre braços adjacentes |

Geometria

O primeiro passo na criação de um modelo COMSOL é o desenho do modelo, definindo-se a sua geometria e o seu domínio. A estrutura do acelerómetro pode ser dividida em várias componentes, como as âncoras, o sistema mola, a massa e os braços.

Inicialmente a geometria do modelo é definida em 2D, em “*Plane Geometry”,* e mais tarde é realizado o *extrude,* resultando um modelo em 3D, com espessura igual a *tickness.* Em seguida apresentar-se-ão as geometrias desenhadas em 2D.

Massa

A massa é representada por um retângulo, ***Profmass,*** com as dimensões *profmass\_w* por *profmass\_h*, com os respetivos valores apresentados na Tabela 3.

Tabela 3 - Parâmetros utilizados no desenho da massa móvel.

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| Parâmetros | Variável teórica | Valor [ | Descrição |
| *profmass\_w* |  |  | Largura da massa móvel |
| *profmass\_h* |  |  | Comprimento da massa móvel |

Âncora

O sistema massa-mola do acelerómetro está fixo por duas âncoras. Cada âncora está conectada a uma mola que está situada em cada lado da massa móvel. Uma âncora é representada por um retângulo, ***Anchor,*** com as dimensões: *anchor\_w* por *anchor\_h,* cujos valores são apresentados na Tabela 4.

Tabela 4 - Parâmetros utilizados no desenho da âncora.

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| Parâmetros | Valor [ | Descrição |
| *anchor\_w* |  | Largura da âncora |
| *anchor\_h* |  | Comprimento da âncora |

Mola

O acelerómetro é composto por duas molas, uma em cada lado da massa móvel. Uma mola é representada pela diferença geométrica entre dois retângulos com dimensões diferentes, obtendo-se um polígono em formato de “O”. Os parâmetros utilizados no desenho da mola são apresentados na  
Tabela 5.

Tabela - Parâmetros utilizados no desenho da mola.

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| Parâmetros | Variável teórica | Valor [ | Descrição |
| *spring\_w* |  |  | Largura da viga |
| *spring\_h* |  |  | Comprimento da mola |

O retângulo ***Spring\_Out,*** com dimensões *spring\_h*  por *(spring\_w \* 3),* define o exterior da mola. O retângulo ***Spring\_In,*** com dimensões *spring\_w* por *(spring\_h – 2 \* spring\_w),* define o interior da mola. É realizada uma diferença entre estas duas geometrias, colocando-se o retângulo *Spring\_In* centrado no interior do retângulo *Spring\_Out,* originando a geometria de mola desejada, ***Spring.***

Além disso, é feita uma união (*Union*), chamada ***Anchor\_Spring,*** composto pela mola e pela respetiva âncora. Esta geometria é colocada num dos lados do acelerómetro, e é feita uma reflexão vertical (*Mirror*) para o lado oposto do acelerómetro.

Braços

Como visto anteriormente, o acelerómetro é composto por um conjunto de braços fixos e braços móveis, estando estes últimos ligados à massa móvel. Cada braço é representado por um retângulo, com as dimensões *fingers\_h* por *fingers\_w* cujos valores são apresentados na Tabela 6. Um braço fixo é definido pelo retângulo ***finger\_fixed***, enquanto um braço móvel é definido pelo retângulo ***finger\_mov***.

Tabela - Parâmetros utilizados no desenho de um braço.

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| Parâmetros | Variável teórica | Valor [ | Descrição |
| *fingers\_w* |  |  | Largura do braço |
| *fingers\_h* |  |  | Comprimento do braço |

Um conjunto de braços fixos é definido pelo *array* ***array\_finger\_fixed*** enquanto um conjunto de braços móveisé definido pelo *array* ***array\_finger\_mov.*** Na Tabela 7 apresentam-se as propriedades destes *arrays.* Estes *arrays* têm os seus elementos intercalados, permitindo gerar-se uma capacidade entre um *finger\_fixed* e um *finger\_mov.*

Tabela 7 - Propriedades dos *arrays* de braços.

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| Nome | Objetos de *input* | Tamanho |
| *array\_finger\_fixed* | *finger\_fixed* | *fingers\_num* +1 |
| *array\_finger\_mov* | *finger\_mov* | *fingers\_num* |

Do mesmo modo para o qual foi feita a reflexão da mola-âncora, foi feita uma reflexão horizontal dos dois *arrays* de um dos lados da massa móvel para o outro.

Materiais

Como material estrutural do acelerómetro é utilizado o poli-silício (***Si - Polycrystalline silicon*** )*.*

Para implementar o dielétrico entre os vários braços do acelerómetro, de forma a permitir o surgimento de uma capacitância, é utilizado o ar (***air*** ), o dielétrico mais elementar de todos.

Malha

De forma a subdividir o domínio num conjunto de elementos discretos usou-se uma malha controlada pelas físicas aplicadas (*Physics Controlled Mesh),* com um tamanho de elementos ***Normal,*** que é criada por defeito pelo COMSOL.

Estudo

É utilizado um ***Stationary Solver*** para simular em estado estacionário e analisar o deslocamento da estrutura. De forma a avaliar o comportamento do acelerómetro perante diferentes acelerações usou-se um ***Parametric Sweep*** da variável *num\_g,* anteriormente apresentada como o valor da aceleração em a que a estrutura está sujeita, entre +5 e -5 com um *step* de 1 unidade.

Físicas

Neste projeto, é relevante simular as físicas de mecânica estrutural, a mecânica de sólidos (***Solid Mechanics*** ) e também o efeito eletrostático (***Electrostatics*** ).

Mecânica de sólidos

Nesta física são definidas as forças a serem aplicadas à estrutura do acelerómetro.

Em ***Body Load*** são selecionados todos os braços móveis do acelerómetro e também a massa móvel em si. Estes elementos da estrutura sofrem a aplicação de uma força por unidade de volume, no eixo , igual ao produto da aceleração, *acceleration,* com a densidade do material estrutural, *solid.rho.*

Em relação às condições fronteira, são indicadas para as fronteiras fixas, os braços fixos e as âncoras do acelerómetro, a fronteira ***Fixed Constraint.***

Efeito Eletrostático

Usaram-se dois ***Terminal*** de forma a colocar os braços fixos de um lado do acelerómetro a um potencial, +5 V, e do outro lado a outro potencial, -5 V. Os braços móveis, juntamente com a massa móvel, estão ao potencial GND, utilizando-se para isso ***Ground.*** Além disso, definiu-se como ***Initial Values*** toda a estrutura com o potencial a GND.

Resultados

Neste capítulo serão apresentados os resultados da simulação do acelerómetro capacitivo, analisando a resposta do dispositivo perante diferentes valores de aceleração.

Para analisar o deslocamento é selecionada a variável de interesse ***Displacement***, tal como para verificar a distribuição do potencial elétrico pela estrutura é selecionada a variável ***Electric Potential.***  Para verificar as capacitâncias produzidas no dispositivo perante diferentes acelerações usou-se uma ***Global Evaluation*** sobre a variável ***Maxwell Capacitance.***

xxx

**Gráficos**

Deslocamento da massa móvel em função da aceleração

Sensibilidade da capacitância em função da aceleração.

Potencial elétrico distribuído pela estrutura

Freq massa móvel

# Bibliografia

|  |  |
| --- | --- |
| [1] | Hella, “Hella Tech World,” [Online]. Available: https://www.hella.com/techworld/br/Tecnica/Eletrica-Eletronica/Sistema-de-Airbag-3083/. [Acedido em 8 dezembro 2021]. |
| [2] | R. Mukhiya e e. al., “SpringerLink,” 2019. [Online]. Available: https://link.springer.com/article/10.1007/s00542-018-04292-0. [Acedido em 27 dezembro 2021]. |
| [3] | N. M. M. Mourad Benmessaoud, “ResearchGate,” maio 2013. [Online]. Available: https://www.researchgate.net/publication/257439996\_Optimization\_of\_MEMS\_capacitive\_accelerometer. [Acedido em 8 dezembro 2021]. |
| [4] | C. Multiphysics, “COMSOL,” [Online]. Available: https://www.comsol.com/model/download/776001/models.mems.surface\_micromachined\_accelerometer.pdf. [Acedido em 7 dezembro 2021]. |