



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

**ESTUDO E DESENVOLVIMENTO DE UM  
SENSOR DE CAPACITÂNCIA DE FRANJA  
OTIMIZADO PARA USO SEM TOQUE**

**Autor: Gabriel Bacon Carvalho  
Orientador: Gerardo Antonio Idrobo Pizo**

**Brasília, DF  
2024**



**GABRIEL BACON CARVALHO**

**ESTUDO E DESENVOLVIMENTO DE UM SENSOR DE CAPACITÂNCIA DE  
FRANJA OTIMIZADO PARA USO SEM TOQUE**

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.

Orientador: Dr. Gerardo Antonio Idrobo Pizo

**Brasília, DF  
2024**



**REGULAMENTO E NORMA PARA REDAÇÃO DE RELATÓRIOS DE PROJETOS  
DE GRADUAÇÃO FACULDADE DO GAMA - FGA**

**Gabriel Bacon Carvalho**

Monografia submetida como requisito parcial para obtenção do Título de Bacharel em Engenharia Eletrônica da Faculdade UnB Gama - FGA, da Universidade de Brasília, em 16/09/2024, apresentada e aprovada pela banca examinadora abaixo assinada:

---

**Prof. Dr. Gerardo Antonio Idrobo Pizo, UnB/ FGA**  
Orientador

---

**Prof. Dr. Gilmar Silva Beserra, UnB/ FGA**  
Membro Convidado

---

**Prof. Dr. Henrique Gomes de Moura, UnB/ FGA**  
Membro Convidado

Brasília, DF  
2024



## RESUMO

Dentro das categorias de dispositivos de interface humana, a categoria de “sem contato” tem apresentado avanços importantes como o controle por voz adotado em massa em celulares ou a câmera utilizada em jogos eletrônicos e pesquisas, o Kinect da Microsoft. Essas tecnologias têm vantagens importantes em relação às tecnologias anteriores, o controle por voz em um carro, por exemplo, permite o menor uso de botões e por consequência um custo menor em manutenção. O Kinect permite entradas de comandos mais fluidos e naturais em jogos eletrônicos e comandos visuais para computadores adaptados. Observando essas vantagens, o trabalho propõe então um dispositivo que realize a função de um *touchpad*, mas sem toque, evitando o desgaste e permitindo comandos naturais. A interface é construída com base em sensores capacitivos de franja, apenas utilizando a tecnologia de placas de circuito impresso. Os comandos são executados em apenas um eixo, posicionando a mão por cima da área do sensor. O dispositivo pode ser construído com um custo aproximado de R\$ 210 (no Brasil) que inclui os sensores e um microcontrolador para interface com o computador. Apresentou a capacidade de funcionamento a uma distância maior que 12 mm utilizando um sensor de capacitância de franja com dimensões de 80 mm x 88 mm que obteve deltas de 750 pF. Foram encontradas dificuldades com o tempo de resposta dos comandos, era necessário em média 12 segundos para estabilizar a resposta no ponto desejado, é ruim para uso como um touchpad. Esse problema pode ser remediado com ajustes ao firmware, mas não foi possível determinar a razão principal dessa demora e uma solução definitiva. O uso desse dispositivo seria em salas de cirurgia assistidas por imagens onde o médico poderia operar um computador sem tocar o equipamento, isso evita contaminações na sala de cirurgia. O formatado plano também facilita a limpeza que no caso de um mouse comum pode ser impossível devido as rugosidades dos materiais utilizados. O avanço conquistado por essa pesquisa para o tópico é realizar um dispositivo semelhante a um *touchpad* que possa ser utilizado sem curva de aprendizado e barato o suficiente para se tornar um produto comercial diferente do Kinect que foi descontinuado e era o produto mais próximo desse uso.

**Palavras-chave:** Interface humana, sensor capacitivo, interface sem-toque.

## ABSTRACT

Within the categories of human interface devices, the "contactless" category has shown significant advancements, such as voice control, which has been widely adopted in cell phones, or the camera used in electronic games and research, Microsoft's Kinect. These technologies offer important advantages over previous technologies; for example, voice control in a car reduces the need for buttons, thereby lowering maintenance costs. The Kinect allows for more fluid and natural command inputs in electronic games and visual commands for adapted computers. Considering these advantages, this work proposes a device that functions as a touchpad but without touch, avoiding wear and tear and enabling natural commands. The interface is built using capacitive fringe sensors, relying solely on printed circuit board technology. Commands are executed on a single axis by positioning the hand above the sensor area. The device can be built at an approximate cost of R\$ 210 (in Brazil), which includes the sensors and a microcontroller for interfacing with the computer. It demonstrated the ability to function at a distance greater than 12 mm using a fringe capacitance sensor with dimensions of 80 mm x 88 mm, achieving deltas of 750 pF. Difficulties were encountered with the response time of the commands; it took an average of 12 seconds to stabilize the response at the desired point, which is unsuitable for use as a touchpad. This issue could be remedied with firmware adjustments, but it was not possible to determine the main cause of the delay or a definitive solution. The intended use of this device would be in image-assisted surgery rooms, where the doctor could operate a computer without touching the equipment, thereby avoiding contamination in the operating room. The flat format also facilitates cleaning, which can be impossible with a regular mouse due to the roughness of the materials used. The achievement for this research is to develop a device similar to a touchpad that can be used without a learning curve and is cheap enough to become a commercial product, unlike the Kinect, which was discontinued and was the closest product to this use.

**Keywords:** Human interface, capacitive sensor, touchless interfaces.

# LISTA DE ILUSTRAÇÕES

<b>Figura 1</b> – (A) <i>mouse</i> moderno e (B) tela touchscreen Fonte: fonte [20] e [21].....	22
<b>Figura 2</b> – Microsoft Kinect comparando a imagem real com a obtida pelo sensor. Fonte: [19].....	23
<b>Figura 3</b> - Quadro sinóptico da categoria que dispositivo proposto contribui. Fonte: elaborado pelo autor. ....	25
<b>Figura 4</b> - Exemplo de capacitor normal (A) e o otimizado para capacitância de franja (B) com os respectivos campos elétricos de um corte de vista lateral. Pode ser observado como diminui bastante a contribuição da capacitância direta em relação a de franja na imagem (B). Fonte: elaborada pelo autor em software Ansys. ....	29
<b>Figura 5</b> – Representação do circuito aproximado de um capacitor real. Fonte: Elaborado pelo autor baseado em Boser [1].....	30
<b>Figura 6</b> – Fluxograma do processo de desenvolvimento do sensor. Fonte: imagens ilustrativas de fontes diversas adaptadas pelo autor. ....	32
<b>Figura 7</b> – Exemplo de sensor tipo pente, com um eléctrodo carregado (amarelo) e dois eléctrodos sensores (laranja e azul). Fonte: elaborada pelo autor em software Ansys.....	34
<b>Figura 8</b> – Resultado da simulação com o valor do delta para o material borracha, apresentando o delta da reação do sensor ao deslocamento de um objeto a 12.8 mm, valores em pF. Fonte: elaborada pelo autor em software Ansys. ....	36
<b>Figura 9</b> – Resultado da simulação com o valor do delta para o material ferro, apresentando o delta da reação do sensor ao deslocamento de um objeto a 12.8 mm, valores em pF. Fonte: elaborada pelo autor em software Ansys. ....	36
<b>Figura 10</b> – Diagrama do circuito do sensor com a equação de transferência. Fonte: Elaborado por Lee [9], p. 2.....	37
<b>Figura 11</b> – Simulação com resultados do circuito de amplificação utilizado no dispositivo). Fonte: elaborada pelo autor em software QUCS.....	38
<b>Figura 12</b> – (A) Software Circuit Maker com o circuito utilizado. (B) Detalhe da largura dos eletrodos, na legenda é destacado 0.5/0.5 que significa eletrodos com 0.5 mm de largura e 0.5 mm de espaçamento entre eles. Fonte: elaborada pelo autor.....	40
<b>Figura 13</b> – Circuito do dispositivo com setores individuais legendados. Fonte: elaborada pelo autor.....	41
<b>Figura 14</b> – Tentativa de impressão por transferência de tinta. Fonte: elaborada pelo autor.....	42
<b>Figura 15</b> – (a) Tentativa de impressão por fotolitografia. (b) - Detalhes do filme fotossensível soltando a esquerda. Fonte: elaborada pelo autor. ....	43

<b>Figura 16</b> – Placa do dispositivo impressa profissionalmente com componentes soldados e sem pinos de conexão. Destaque para o ponto que causou o defeito. Fonte: elaborada pelo autor. ....	44
<b>Figura 17</b> – Placa do dispositivo durante o teste com o capacitômetro MX-1010. Fonte: elaborada pelo autor. ....	46
<b>Figura 18</b> – Teste do dispositivo em bancada. Fonte: elaborada pelo autor. ....	47
<b>Figura 19</b> – Altura da mão nos testes utilizando duas borrachas de altura 6 mm, total de 12 mm. Fonte: elaborada pelo autor.....	48
<b>Figura 20</b> – Código de Firmware do dispositivo escrito em c++. Fonte: elaborado pelo autor. ....	51
<b>Figura 21</b> – Fluxograma do Firmware do dispositivo. Fonte: elaborado pelo autor. ....	52
<b>Figura 22</b> – Gráfico de resultados dos valores encontrados para o delta de tensão de saída em Volts para cada frequência nos sensores da placa “D” Destaque em verde de um valor considerado errado. Fonte: elaborada pelo autor.....	54
<b>Figura 23</b> – Gráfico de resultados dos valores encontrados para o delta de capacitância nos sensores da placa “D” em pF. Fonte: elaborada pelo autor.....	55
<b>Figura 24</b> – Gráfico de resultados dos valores encontrados para o delta de tensão de saída em Volts para cada frequência nos sensores da placa “C”. Fonte: elaborada pelo autor.....	56
<b>Figura 25</b> – Gráfico de resultados dos valores encontrados para o delta de capacitância nos sensores da placa “C” em pF. Fonte: elaborada pelo autor.....	56
<b>Figura 26</b> – Exemplo de sensor único com setores de capacitância e indutância distintos, os vários formatos vão influenciar na capacitância e indutância. A indutância também poderia ser inserida na forma de um indutor soldado em serie com cada sensor. Fonte: elaborada pelo autor. ....	63
<b>Figura 27</b> – Exemplo de circuito do sensor único com setores de capacitância e indutância distintos em software QUCS. Fonte: elaborada pelo autor. ....	64
<b>Figura 28</b> – Exemplo de resposta em frequência para um sensor único com setores de capacitância e indutância distintos. Nesse caso, os capacitores são da ordem de 200 pF, próximos dos valores utilizados nos experimentos, mas os indutores são valores elevados de 300 e 600 mH. Embora esse caso não seja muito realista, uma indutância menor apenas alteraria os pontos de pico, sem modificar o princípio básico de funcionamento. Fonte: elaborada pelo autor.....	64

## LISTA DE TABELAS

<b>Tabela 1</b> - Pesquisa bibliográfica. Fonte: elaborada pelo autor.....	27
<b>Tabela 2</b> – Quadro comparativo dos valores de delta encontrados entre esse trabalho e as referências teóricas. Fonte: elaborada pelo autor.....	58
<b>Tabela 3</b> – Quadro descritivo de custos e consumo energético do dispositivo. Fonte: elaborada pelo autor. ....	60

# SUMÁRIO

<b>RESUMO .....</b>	<b>15</b>
<b>ABSTRACT .....</b>	<b>16</b>
<b>LISTA DE ILUSTRAÇÕES .....</b>	<b>17</b>
<b>LISTA DE TABELAS .....</b>	<b>19</b>
<b>SUMÁRIO.....</b>	<b>20</b>
<b>1 INTRODUÇÃO .....</b>	<b>22</b>
1.1 Contextualização e Definição do Problema .....	22
1.2 Objetivos.....	24
1.3 Contribuição do Trabalho.....	24
<b>2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA .....</b>	<b>27</b>
2.1 Pesquisa Bibliográfica .....	27
2.2 Sensores Capacitivos .....	28
2.3 Resposta em Frequência dos Sensores Capacitivos de Franja.....	30
2.4 Adaptação do Sensor Utilizado .....	30
<b>3 METODOLOGIA .....</b>	<b>32</b>
3.1 Desenvolvimento do Sensor .....	32
3.1.1 Modelagem dos Sensores.....	33
3.1.2 Simulação do Circuito Eletrônico.....	37
3.1.3 Escolha de Componentes. ....	38
3.1.4 Designe da Placa Impressa.....	39
3.1.5 Manufatura dos Protótipos .....	41
3.1.6 Fabricação do Circuito – Profissional .....	43
3.1.7 Validação do Sensor Produzido. ....	44
3.2 Resposta em Frequência.....	46
3.3 Firmware do Dispositivo .....	49
<b>4 RESULTADOS DOS EXPERIMENTOS .....</b>	<b>53</b>
4.1 Caracterização de Frequência.....	53
4.1.1 Sensores da placa D.....	54
4.1.2 Sensores da placa C.....	56

4.2	Teste de Movimento Lateral e Controle de Mouse .....	57
4.3	Dificuldade durante os experimentos .....	57
4.4	Discussão Dos Resultados .....	57
4.5	Ganho Entre 1,6 Khz e 25 Khz .....	59
4.6	Consumo Energético e Custo do Dispositivo .....	60
<b>5</b>	<b>SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS .....</b>	<b>62</b>
5.1	Sugestões de Trabalhos Futuros – Sensor Único .....	62
5.2	Sugestões de Trabalhos Futuros – Luva Adaptada .....	65
<b>6</b>	<b>CONCLUSÃO .....</b>	<b>66</b>
	<b>REFERENCIAS.....</b>	<b>68</b>
	<b>APÊNDICES.....</b>	<b>71</b>
	A – Resultados experimentais da placa de nomenclatura “C” .....	71
	B – Resultados experimentais da placa de nomenclatura “D” .....	73
	C – Imagens do funcionamento do dispositivo como mouse.....	75

# 1 INTRODUÇÃO

## 1.1 Contextualização e Definição do Problema

Desde antes da popularização dos computadores digitais, já existiam formas de interfaces humanas utilizadas em dispositivos como máquinas de escrever, máquinas a vapor, equipamentos manuais, entre outros. Com o surgimento dos computadores, tornou-se necessário que as interfaces acompanhassem seu desenvolvimento, visto que são parte essencial para o uso dessas tecnologias.

O princípio na criação dos dispositivos de interface humana é determinar a melhor alternativa que se encaixe no uso proposto para cada situação segundo Gentner [6]. Quando foram desenvolvidas as interfaces gráficas, a tecnologia apontadora desenvolvida foi o *mouse*, que cumpre bem essa função até o momento. Posteriormente, foi desenvolvido o display touchscreen, que permite comandos mais naturais ao incorporar o posicionamento e a ação de clique em um único gesto, algo que anteriormente era realizado em duas etapas. Um avanço então possível dentro dessa categoria é um dispositivo sem toque.

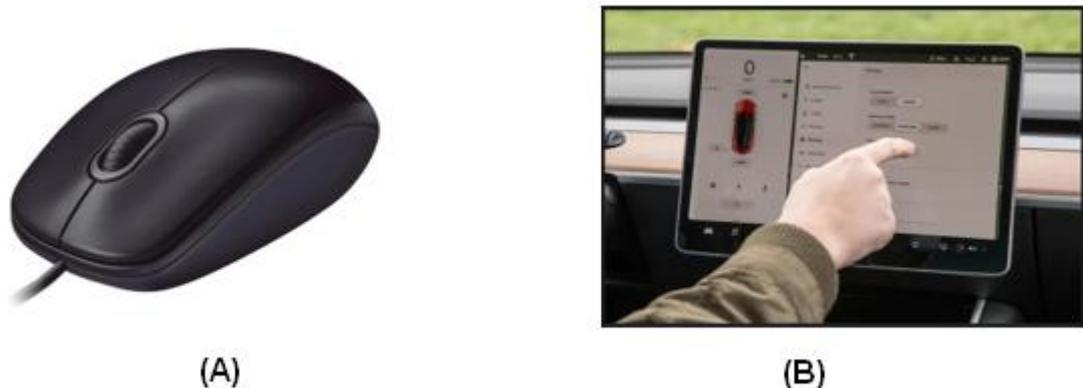


Figura 1 – (A) *mouse* moderno e (B) tela touchscreen Fonte: fonte [20] e [21].

Esse avanço é necessário, pois, apesar de o display touchscreen já ser um marco significativo dentro da categoria, um dispositivo sem toque tem vantagens muito claras. É o caso do sistema de pagamentos utilizados em cartões, em que o sistema por aproximação permite menor contaminação por microrganismos entre os clientes de uma loja e aumenta o tempo de vida do aparelho, já que os botões são menos

utilizados, o mesmo é observado no comando de voz em carros, celulares etc. Essas mesmas vantagens são almejadas para este dispositivo.

Os dispositivos de interfaces apontadoras, porém, como afirmado por Gallo [5], no momento da sua escrita em 2011 e acredita-se que até hoje, não suprem de maneira satisfatória a função sem toque que pudesse substituir em funcionalidade o *display touchscreen* e o *mouse*. Existem pesquisas nesse sentido, como Jacob [7], Ebert [4] e Lee [9], entre vários outros que Cronin [3] convenientemente listou. A maioria utiliza sistemas difíceis de configurar, baseados em câmeras como o Kinect da Microsoft, seu desempenho é baixo, com comandos incorretos sendo registrados. Isso impede que se concretizem em um produto comercialmente acessível e de fácil uso.



**Figura 2** – Microsoft Kinect comparando a imagem real com a obtida pelo sensor. Fonte: [\[19\]](#)

Além das câmeras utilizadas nas pesquisas, as outras opções citadas ainda possuem algum tipo de toque; por exemplo, os dispositivos vestíveis, como pulseiras, anéis ou semelhantes. Apesar desses dispositivos representarem avanços na área de realidade virtual, o objetivo de ter um dispositivo totalmente sem toque não é o foco.

Chao [2] comparou três soluções para uso em uma sala de cirurgia: um *tablet iPad*, uma câmera *Kinect* da Microsoft e um *Loop Pointer* (mouse que é vestido nos dedos como um anel). Nesse caso, o *iPad* e o *Loop Pointer* possuíam toque, e o melhor avaliada nos testes foi o *iPad*. Dessa forma, fica claro que não existem muitas opções comerciais. Esse artigo também deixa um manual de como comparar dispositivos diversos para a mesma funcionalidade. Considerando esse resultado, foi

decidido buscar uma tecnologia que pudesse atender a uma funcionalidade de touchpad como o Ipad, um sensor baseado em capacitância de franja pareceu adequado a essa funcionalidade uma vez que pode ser construído no mesmo formato do touchscreen.

## 1.2 Objetivos

Esta pesquisa pretende desenvolver um dispositivo que registre a posição de uma mão ao longo de um eixo.

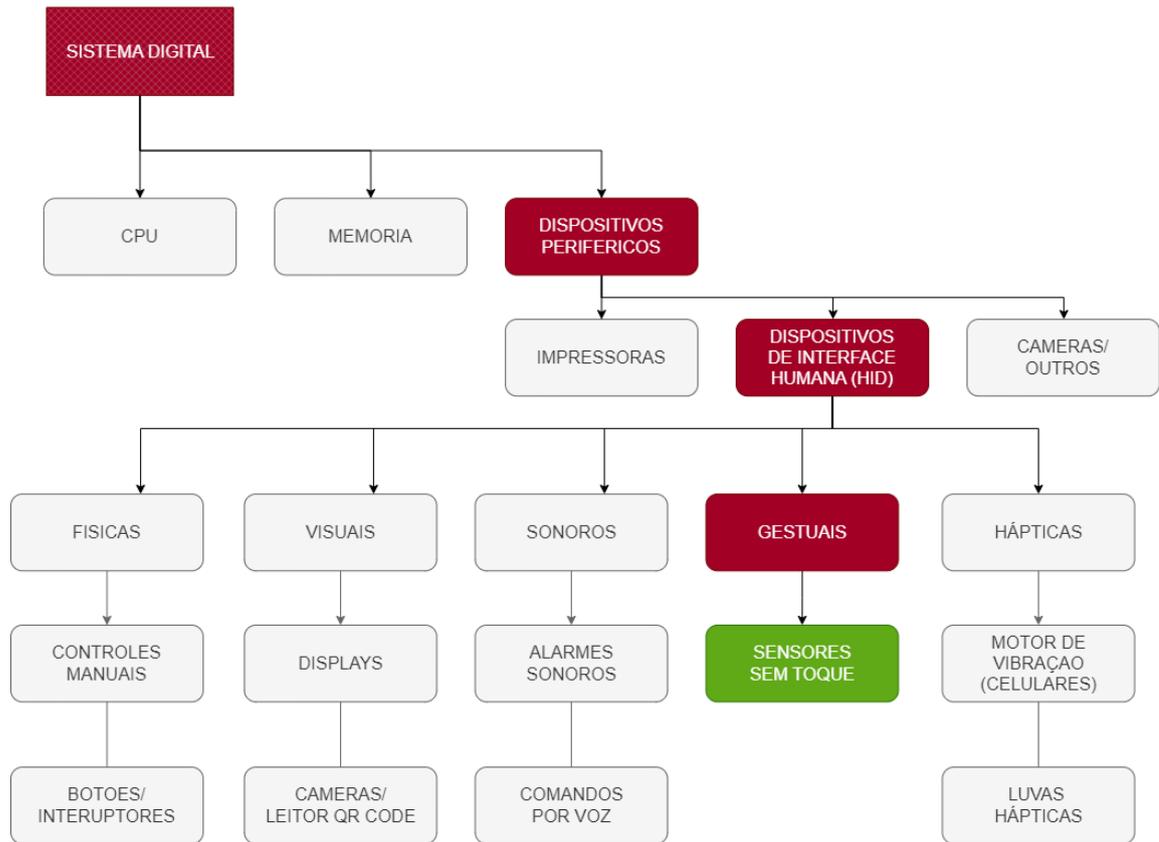
O dispositivo tem os seguintes objetivos específicos:

- Detectar a aproximação de uma mão a uma distância de 2 cm;
- Detectar de forma gradual a movimentação horizontal da mão sobre o sensor.
- Realizar o comando de *clique* apenas com a altura da mão.
- Obter os dados sem utilizar técnicas proprietárias como inteligência artificial.

Esses objetivos visam melhor implementar um dispositivo que evite a complexidade de uso e custo elevado observados nas outras soluções que buscam funcionalidades inovadoras como gestos com a mão.

## 1.3 Contribuição do Trabalho

Nesse bloco será elucidado o avanço que essa pesquisa proporciona no seu respectivo campo de pesquisa, assim como as razões porque é importante o avanço nessa área. A figura 3 demonstra dentro de outras categorias aonde a pesquisa e o dispositivo construído se adequam.



**Figura 3** - Quadro sinóptico da categoria que dispositivo proposto contribui. Fonte: elaborado pelo autor.

O objetivo final das interfaces é que elas se tornem transparentes no uso, exigindo pouco aprendizado e proporcionando acesso completo ao sistema ao qual estão conectadas. Este trabalho contribui para esse objetivo ao validar uma solução inovadora que avança em relação às tecnologias existentes, como o mouse e o touchpad realizando a mesma função com apenas o movimento da mão. É uma solução inovadora por utilizar sensores que tinham outro fim, mas sem exigir estruturas complexas, vestimentas ao corpo e configurações especiais no sistema que será implementado, aspectos que o Kinect exige. Isso ocorre, pois, os sinais que serão utilizados apenas vão interagir utilizando comandos já utilizados para o *mouse*. essa validação é importante, pois, mesmo que outras tecnologias possam atender a esse nicho, é necessário testar e documentar várias possibilidades para garantir opções futuras.

Um exemplo inspirador é o teclado desenvolvido pela Microsoft e Taylor [12], que utiliza múltiplos sensores de movimento para implementar gestos em um teclado convencional. Embora não tenha se tornado um produto comercial, essa tecnologia

oferece um potencial significativo. A proposta apresentada aqui busca não apenas oferecer uma alternativa viável, mas também explorar novas possibilidades que poderiam, eventualmente, superar as soluções tradicionais.

## 2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

### 2.1 Pesquisa Bibliográfica

A pesquisa foi realizada no banco de dados do Google Acadêmico, onde foi encontrado o artigo de Cronin [3] de 2018, que já apresentava uma pesquisa extensa e relativamente recente sobre o assunto, o que facilitou bastante. Os termos utilizados foram:

- Capacitive hand sensor;
- Capacitive proximity sensor;
- Mouse polling rate;
- Touchless Interfaces;
- Fringe Capacitive Sensor;
- Hand Gesture Control System.

Foram realizadas pesquisas nos bancos de dados da Scielo e da CAPES, porém, os artigos encontrados não eram acessíveis ou não acrescentavam à pesquisa.

Dentro desses artigos, foram encontrados os seguintes resultados principais, que fundamentaram a construção do trabalho:

**Tabela 1** - Pesquisa bibliográfica. Fonte: elaborada pelo autor.

Autor	Ano	Assunto	Contribuição
<b>Seán Cronin</b>	2019	Touchless computer interfaces in hospitals: A review	Ajudou na pesquisa de dispositivos atuais.
<b>Hyung-Kew Lee</b>	2009	A Capacitive Proximity Sensor in Dual Implementation	Definições do tipo de sensor a ser usado e exemplos de circuitos de medição.
<b>Sara Rachel Arussy Rut</b>	2020	Flexible Fringe Effect Capacitive Sensors	Definições do tipo de sensor a ser usado.

O artigo [3] pesquisou e trouxe uma análise dos dispositivos apontadores voltados para hospitais. Esse ambiente tem uma necessidade de dispositivos do tipo

que ajudem na esterilização e em situações em que os profissionais estão com as mãos ocupadas para interagir com os sistemas. Esse artigo foi fundamental para a pesquisa pois deixou claro a falta do dispositivo proposto aqui. A maioria dos dispositivos analisados envolve interações com câmeras e sensores apontadores vestíveis. Outro ponto importante destacado no artigo é o estudo sobre controles realizados por voz. Nele, constatou-se que comandos discretos, que não necessitam de interpretação (comandos previamente armazenados que respondem a um conjunto específico de palavras), são facilmente realizados por voz. No entanto, esse sistema apresenta limitações importantes, pois impõe um tempo maior para pequenos comandos de ajuste de imagens, que seriam realizados mais rapidamente por meio de gestos. O uso por voz e o uso do dispositivo proposto poderiam ser o complementares.

O artigo de Lee [8] foi um dos mais relevantes porque demonstra como construir um sensor de distância capacitivo, apresentando também resultados de diferentes topologias de sensores, o que contribui para as expectativas das simulações. O aspecto mais significativo desse artigo é o circuito de medição capacitiva que utiliza um amplificador operacional para captar o sinal e transformar o valor da capacitância em um ganho de tensão. Facilitou bastante a implementação do circuito e reduziu o tempo de desenvolvimento.

O artigo Ruth [10] implementa um sensor de dupla atuação, capaz de detectar tanto o toque quanto a distância. Diferentemente do artigo anterior, as capacitâncias e distâncias medidas são menores, provavelmente devido aos materiais e ao tamanho dos sensores. Isso influenciou confirmando que os sensores seriam os corretos e o funcionamento esperado. Esse artigo também forneceu a modelagem observada na fórmula 3.1 para a capacitância esperada do tipo de sensor com dígitos. Isso influenciou na escolha do sensor e ajudou na certeza que ao aumentar o sensor aumentaria a capacitância como planejado.

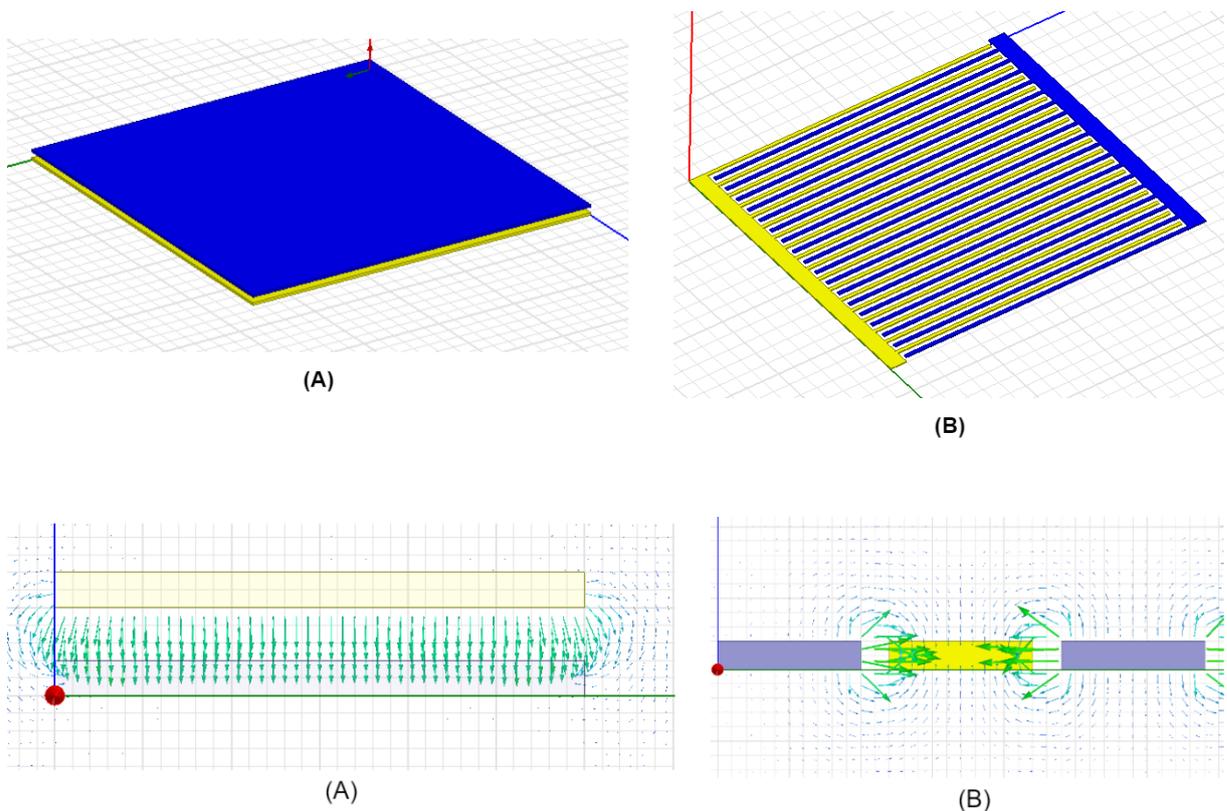
## **2.2 Sensores Capacitivos**

Os sensores propostos então são do tipo capacitores de franja, realizam iteração a distância utilizando campos elétricos. Descrito pelas leis de Gauss, de 1835, campos elétricos são definidos de forma que o campo tem origem em um elemento de carga elétrica positiva e é atraído pela carga elétrica negativa. Isso engloba todo o campo produzido, inclusive nas laterais, gerando o encurvamento em direção à carga

negativa. Esse campo elétrico originado de um eletrodo “A” induz uma carga de sinal contrário em um eletrodo “B”, e a razão da carga induzida pela diferença de tensão é a definição de capacitância descrita por Maxwell em 1873. A capacitância de franja, então, é um produto da lateral curvada desse campo elétrico produzido entre os eletrodos, que normalmente pode ser ignorada pelo valor pequeno que representa em capacitores normais.

O sensor utiliza essa capacitância de franja, e faz isso diminuindo a área paralela entre os sensores responsáveis pela capacitância direta entre as faces, o que aumenta a contribuição da capacitância de franja relativa ao total. Dessa forma, um objeto acima do sensor irá perturbar os campos elétricos afastados produzidos pelo sensor, alterando a capacitância entre os dois.

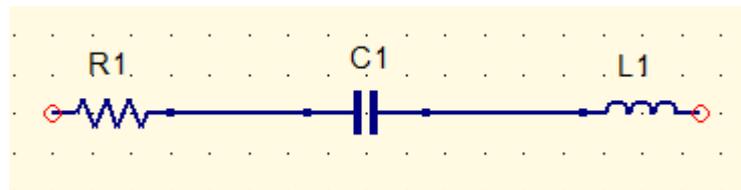
O sensor capacitivo de franja foi escolhido pelo fato de poder ser construído utilizando apenas placas impressas, sem a necessidade de uma estrutura complexa. Uma demonstração de seu funcionamento está representado na figura 4.



**Figura 4** - Exemplo de capacitor normal (A) e o otimizado para capacitância de franja (B) com os respectivos campos elétricos de um corte de vista lateral. Pode ser observado como diminui bastante a contribuição da capacitância direta em relação a de franja na imagem (B). Fonte: elaborada pelo autor em software Ansys.

## 2.3 Resposta em Frequência dos Sensores Capacitivos de Franja

O capacitor de franja também possui as outras características de um capacitor normal. Um capacitor normal real, quando submetido a uma corrente alternada, possui, além da resistência da estrutura e da capacitância, valores de indutância, que é, principalmente, afetado pelo formato e construção do capacitor. Segundo Boser [1], um modelo mais realista do capacitor é um circuito LRC em série, com:



**Figura 5** – Representação do circuito aproximado de um capacitor real. Fonte: Elaborado pelo autor baseado em Boser [1].

Sendo “j” a unidade imaginária, “w” a frequência angular do sinal de entrada em radianos, “C” a capacitância em Faraday e “L” a indutância em Henry. Logo, a impedância desse sistema pode ser modelada por:

$$Z = R + (jwL) + \left(\frac{1}{jwC}\right) \quad (1.1)$$

Observando esse modelo, é importante notar que a indutância, nesse caso pequena e chamada de indutância parasita, terá uma influência na resposta tanto nos capacitores comerciais comuns quanto no de franja. No caso do capacitor de franja, o aumento do número de placas paralelas e o seu alongamento devem alterar a indutância, que por sua vez aumenta a impedância do capacitor em altas frequências. Esse detalhe será importante na avaliação de trabalhos futuros.

## 2.4 Adaptação do Sensor Utilizado

Os artigos Lee [9] e Ruth [10] são os mais avançados encontrados na pesquisa sobre sensores capacitivos sem toque. O avanço explorado é que nos resultados não existe muita sensibilidade acima de 1 cm, tornando os sensores impróprios para distancias grandes e para um controle fino do *mouse* desejado. Esses artigos também não mostram interesse no tempo de transição dos sensores, que influencia bastante a

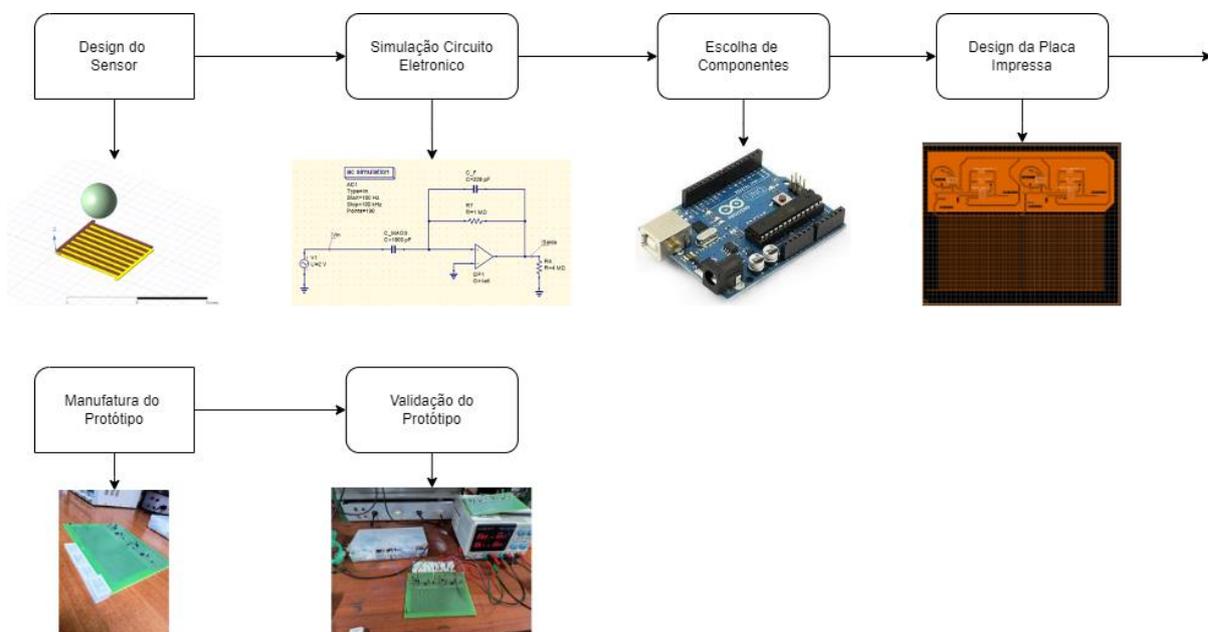
facilidade de uso, um dispositivo lento torna o uso bastante desagradável. Este trabalho realiza então uma iteração com o sensor já produzido por eles para atender aos objetivos, aumentando a área total do sensor e assim a sensibilidade passa para mais que 1,2 cm. A sensibilidade aumenta pelo fato de ter um campo elétrico mais extenso e maior possibilidade de interação com a mão. O aumento da área foi de 700x em relação ao Ruth [10] e de 8x em relação a Lee [9]. Essa topologia permite criar um mouse em um eixo utilizando as duas ou mais informações fornecidas pelos sensores. Esses são avanços pequenos, mas, como já citado, permitiria esse uso específico.

### 3 METODOLOGIA

Neste capítulo, será explorado as etapas em ordem para o projeto e construção do dispositivo proposto assim como os experimentos realizados para validação do dispositivo e sensores.

#### 3.1 Desenvolvimento do Sensor

A estrutura básica do dispositivo é a seguinte: um gerador de funções fornece o sinal para o sensor capacitivo; o sinal é então captado por um circuito de amplificação próximo ao sensor, que produz uma saída enviada às entradas analógicas do Arduino. As etapas então de desenvolvimento envolvem realizar o projeto do sensor, do circuito e ajustar o sinal e componentes para a interface do Arduino. Na figura 6 pode ser observado o fluxograma desse processo, logo depois cada etapa será explicada mais detalhadamente:



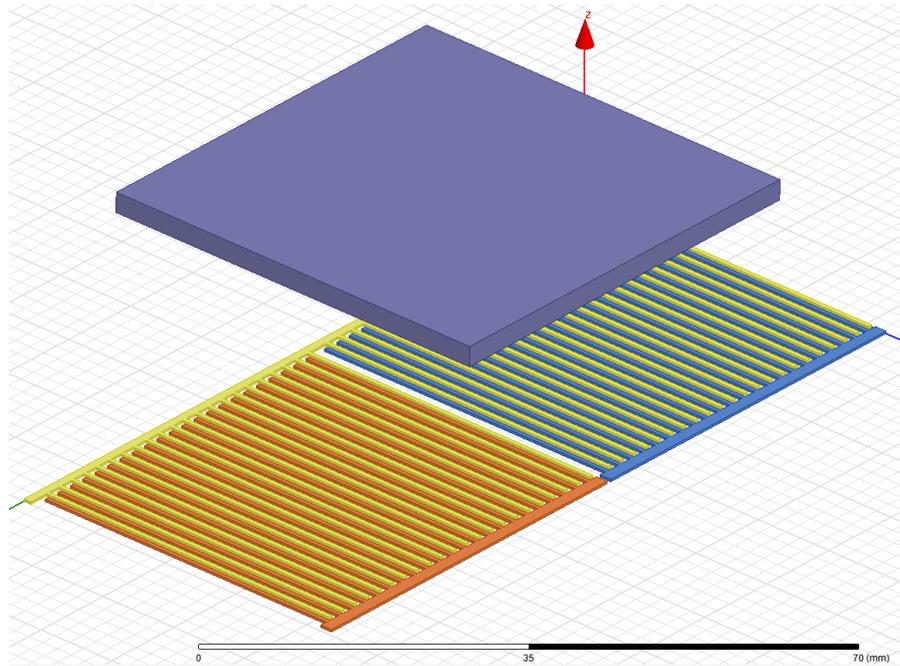
**Figura 6** – Fluxograma do processo de desenvolvimento do sensor. Fonte: imagens ilustrativas de fontes diversas adaptadas pelo autor.

### 3.1.1 Modelagem dos Sensores

O processo de modelagem do sensor tem o objetivo de determinar o desempenho esperado tanto para a capacitância básica quanto para quando for alterada antes de produzir o sensor. Esse processo é melhor realizado em simulação de software uma vez que envolve a somatória da contribuição das cargas presentes na estrutura do sensor, nesse caso a simulação do software Ansys baseada em elementos finitos foi a escolhida.

A estrutura proposta é construída realizando modificações em relação aos sensores descritos em Lee [9] e Ruth [10]. Nos trabalhos anteriores, os sensores eram construídos com espaçamento maior entre eles para evitar interferência entre os sensores e eram pequenos, destinados apenas a detectar um objeto diretamente à frente do sensor. No sensor proposto, serão utilizados eletrodos longos e próximos entre si. A questão da interferência de fato foi observada, um dos sensores apresentou maior capacitância. No entanto, é um problema simples de resolver ajustando o ganho individual no firmware.

O alongamento dos eletrodos precisa ser pelo menos do tamanho de uma mão humana, e, para isso, foi utilizada a mão do autor como referência. O tamanho do sensor é importante para que, quando a mão esteja entre os dois sensores, ela afete de forma proporcional a posição dos dois, além de permitir uma altura maior de interação. Dessa forma foi realizado um design com 80 mm x 88 mm de comprimento e largura respectivamente.



**Figura 7** – Exemplo de sensor tipo pente, com um eléctrodo carregado (amarelo) e dois eléctrodos sensores (laranja e azul). Fonte: elaborada pelo autor em software Ansys.

O eléctrodo em amarelo seria o carregado pelo sinal, os dois eléctrodos sensores são o azul e laranja. Os dois sensores poderão fornecer a informação conforme a quantidade de capacitância alterada, sendo mais alterado sobre o sensor que a mão estiver ocupando maior área diretamente acima. O quadrado em azul representa o tamanho de uma mão. Segundo Ruth [10] p. 4, a capacitância desse tipo de sensor segue o seguinte modelo:

$$C = n * L(C_{IDE} + C_{substrato} + C_{sensor}) \quad (3.1)$$

Sendo:

$C$  = capacitância do sensor

$n$  = número de linhas que se sobrepõem entre os electrodos

$L$  = extensão dos eléctrodos que sobrepõem

$C_{IDE}$  = capacitância do modelo sem o espaço dielétrico

$C_{substrato}$  = capacitância provocada pela interação com o substrato

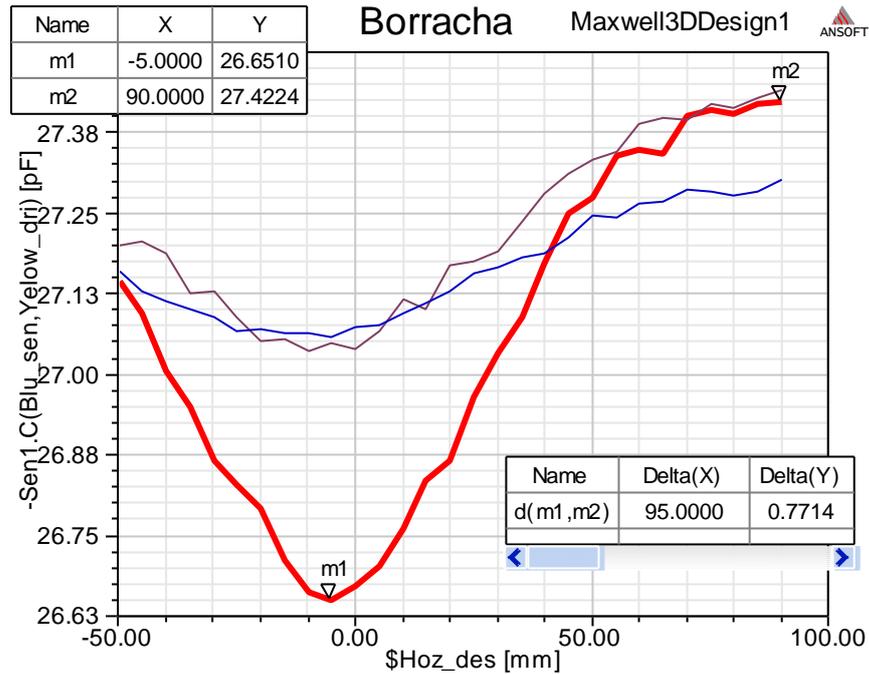
$C_{sensor}$  = capacitância sensitiva

As capacitâncias  $C_{IDE}$  e  $C_{substrato}$  são definidas pela topologia do sensor, a distância entre eléctrodos, a largura dos eléctrodos. Já  $C_{sensor}$  é dependente das constantes dieléctricas ao redor do sensor.

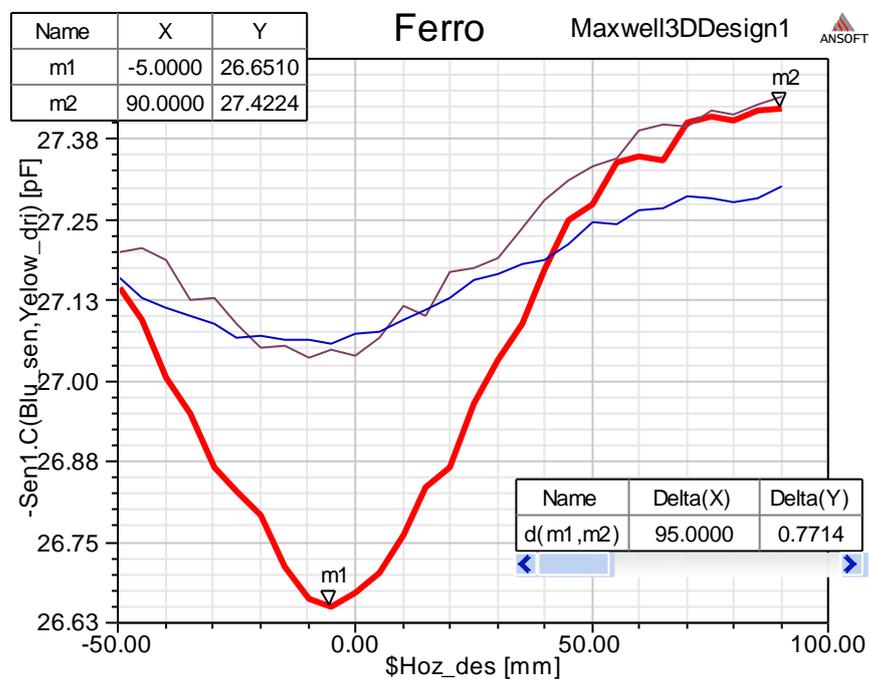
No sensor proposto, o valor afetado será  $C_{sensor}$ . Isso porque a construção é definitiva na placa impressa enquanto o dieléctrico ao redor é alterado pelo deslocamento da mão. É possível alterar a sensibilidade aumentando tanto o número de linhas ( $n$ ) ou comprimento ( $L$ ) até o máximo, que é o tamanho da mão. Um sensor maior que o objeto que está sendo avaliado não tem objetivo, pois vai gerar apenas um campo eléctrico a mais de  $C_{IDE}$  e  $C_{substrato}$ , que não vai acrescentar a sensibilidade  $C_{sensor}$ .

Essa modelagem foi utilizada para e confirmar que o sensor aumentaria a capacitância básica e por consequência a sensibilidade, porém não foi tentado prever os valores por duas razões, a simulação deveria fornecer esses dados e utilizando essa modelagem não é possível pois os valores de  $C_{IDE}$  e  $C_{substrato}$  são valores experimentais que variam com o material utilizado. A placa de circuito impresso e suas diferenças em verniz utilizado afetariam esses valores. Essa modelagem seria utilizada em um produto final caso fosse desejado diminuir ou modificar o sensor para ter um valor específico para outro projeto, um exemplo seria diminuir a capacitância para limitar a saída do circuito amplificador.

Durante a avaliação dos resultados das simulações, foram observados resultados mistos e confusos. Os sensores reagiam de forma gradativa ao deslocamento de um bloco de material próximo ao tamanho de uma mão, porém os resultados eram semelhantes para materiais não condutores, como borracha, e condutores, como metal ferro. Os resultados podem ser observados nas figuras 8 e 9:



**Figura 8** – Resultado da simulação com o valor do delta para o material borracha, apresentando o delta da reação do sensor ao deslocamento de um objeto a 12.8 mm, valores em pF. Fonte: elaborada pelo autor em software Ansys.



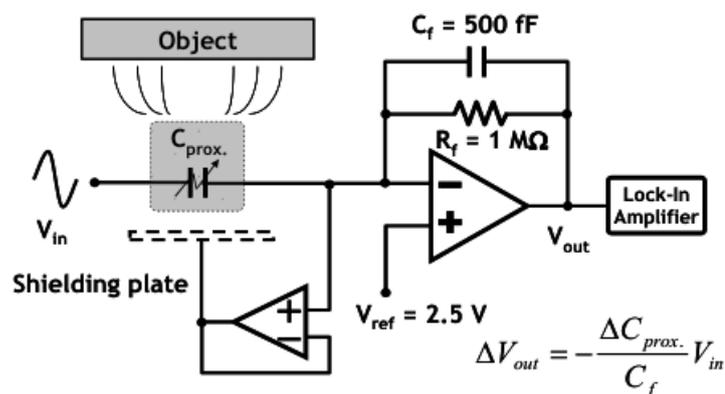
**Figura 9** – Resultado da simulação com o valor do delta para o material ferro, apresentando o delta da reação do sensor ao deslocamento de um objeto a 12.8 mm, valores em pF. Fonte: elaborada pelo autor em software Ansys.

Observando os resultados, é possível notar o erro na simulação, uma vez que, como citado nos artigos anteriores e depois verificado com o protótipo, o valor do delta para o metal ferro deveria ser muito maior, indicando um aumento da capacitância, mas na simulação a capacitância diminuiu, apresentando o mesmo resultado da borracha.

Tentou-se solucionar o problema, mas até o momento da escrita do trabalho não foi possível identificar a causa. Levando em conta os artigos encontrados, assumiu-se que isso era um erro de configuração por parte do autor e que, na realidade, seria possível realizar o design do produto proposto, uma vez que é muito simples construir o protótipo. Assim, decidiu-se continuar o estudo e implementar um protótipo desenhado e adaptado para uso no controle do mouse. A capacitância descrita nos artigos era muito pequena, então optou-se por aumentar o tamanho para o uso com uma mão inteira, e não apenas um dedo, como inicialmente pensado.

### 3.1.2 Simulação do Circuito Eletrônico

O projeto do circuito é realizado utilizando os dados obtidos na etapa de modelagem dos sensores. Essa simulação permite encontrar os componentes corretos para a construção do circuito. O circuito utilizado será o mesmo que em Lee [9]. Está detalhado na figura 10 com a equação de transferência do circuito.



**Figura 10** – Diagrama do circuito do sensor com a equação de transferência. Fonte: Elaborado por Lee [9], p. 2.

$$V_{out} = -\frac{C_{prox}}{C_f} * V_{in} \quad (3.2)$$

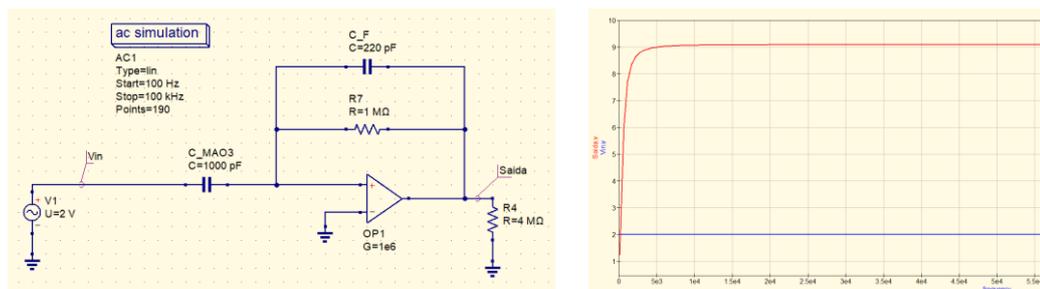
$V_{in}$  = Sinal de entrada

$V_{out}$  = tensão de saída para o Arduino

$C_{prox}$  = capacitancia dos sensores

$C_f$  = capacitor de realimentação

Esse circuito é importante pois é muito simples e permite uma amplificação ótima do sinal, utilizando poucos componentes. A simulação foi realizada no software QUCS de código aberto, na figura 11 pode se observar os resultados dessa simulação. O resultado deixa claro que o circuito está funcionando como esperado amplificando a saída do sensor de acordo com a capacitância alterada, com esse resultado é possível realizar a escolha dos componentes e implementação na placa de circuito impressa.



**Figura 11** – Simulação com resultados do circuito de amplificação utilizado no dispositivo). Fonte: elaborada pelo autor em software QUCS.

### 3.1.3 Escolha de Componentes.

Realizada as etapas anteriores e com os dados em mão, podem ser escolhidos os restantes dos componentes como capacitores, amplificadores operacionais e microcontroladores.

O Arduino foi escolhido para este trabalho por ter seis entradas analógicas, o que teoricamente permitiria o uso de seis sensores. Para comprovar a viabilidade do projeto e definir alguns parâmetros, o Arduino será suficiente.

Essa placa de desenvolvimento utiliza o microcontrolador ATmega32u4. O *datasheet* especifica que o conversor analógico-digital (ADC) possui um sinal de *clock* próprio configurado por multiplicadores para valores entre 50 kHz e 250 kHz, com conversões de resolução de 8 bits, 10 bits e 12 bits.

Com esses dados, é possível determinar a resolução, que é calculada dividindo o delta possível de tensão de entrada pelo número total de níveis. No caso, a conversão normalmente utilizada é de 10 bits, que são  $n = 2^{10} = 1024$  níveis, logo:

$$\frac{5V}{1024} = 4.88 \text{ mV/nivel}$$

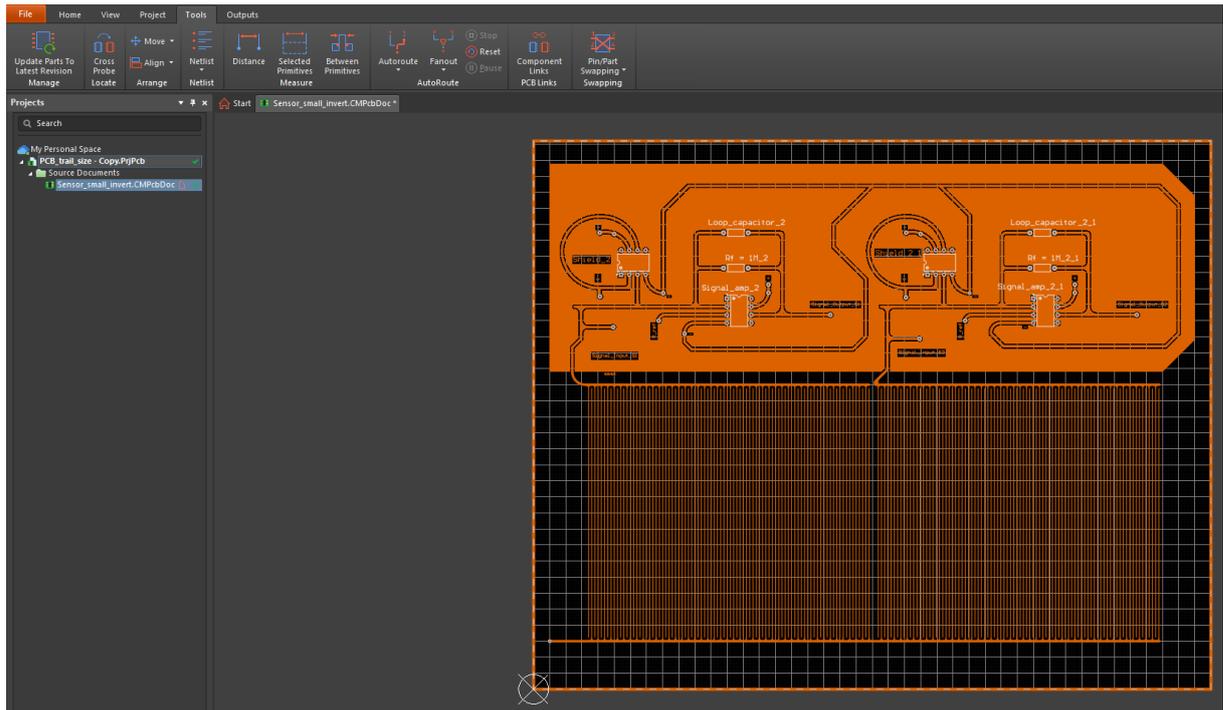
Essa é a mudança de tensão mínima possível de ser medida pelo Arduino para uma medida com esse número de bits.

A sensibilidade do dispositivo seria a melhor possível se fosse utilizado todo o espaço de 0V até 5V. Porém, como a capacitância que muda com a perturbação do sensor é apenas uma, a  $C_{sensor}$ , o valor dessa divisão  $\frac{C_{prox}}{C_f}$  nunca será zero e não será possível utilizar todo valor de 0 a 5V do Arduino. Ainda assim, um delta maior que 1 ou 2 volts é o suficiente para o controle do mouse.

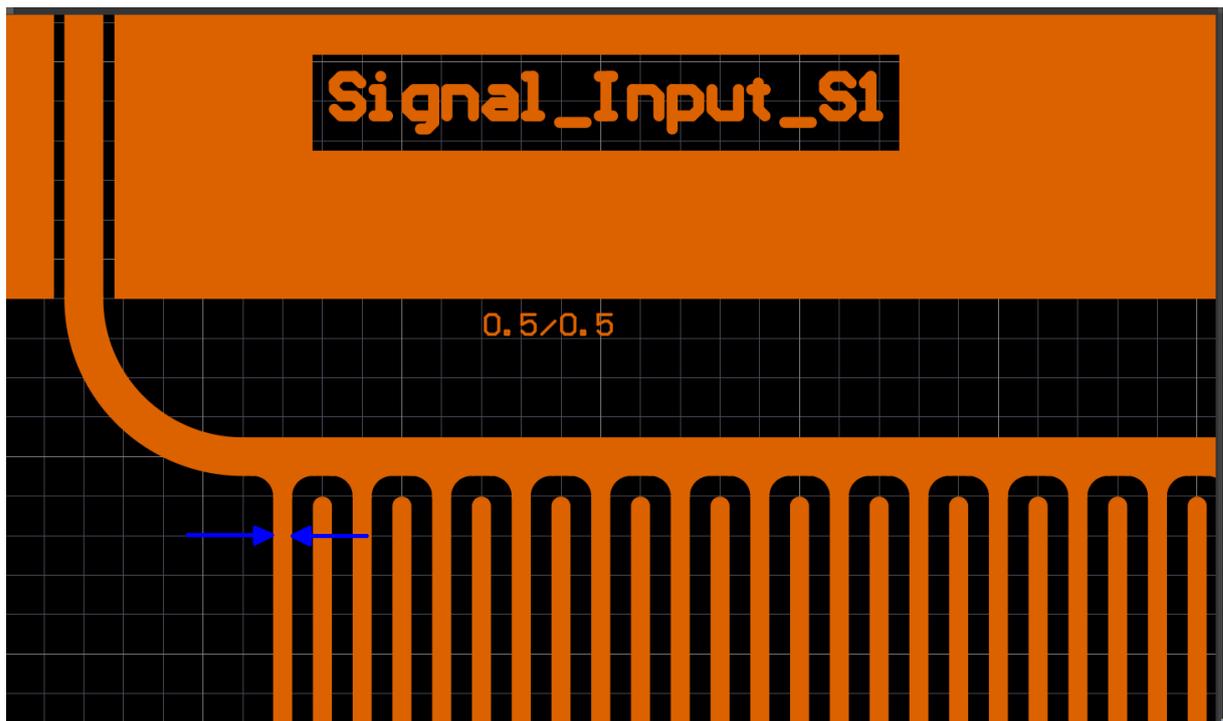
Os capacitores foram escolhidos de forma que o sinal de saída fosse próximo ao de entrada, para isso os dois precisam ser próximos, facilitando visualizar a diferença entre o sinal de entrada e saída.

### 3.1.4 Designe da Placa Impressa

Inicialmente, foi desenhado todo o circuito utilizando o software CircuitMaker, desenvolvido pela empresa Altium. O software possui todas as funções necessárias, produz os arquivos desejados para a manufatura do circuito e não tem custo de assinatura. Essa etapa foi rápida, pois todo o circuito já estava planejado e bastava integrar ao circuito amplificador. Abaixo pode ser vista a imagem do circuito produzido no software. Foram testadas diferentes larguras dos eletrodos individuais (destacados em azul na Figura 14 - b) para observar o tamanho mínimo possível de ser produzido e, assim, obter o maior número de pares de eletrodos e, por consequência, o maior delta possível. A etapa de tentar produzir amadoramente foi importante para se ter uma ideia do tamanho do eletrodo, o que ajudou a chegar a um design final pequeno o suficiente, mas sem oferecer risco de curto dos eletrodos.



(A)



(B)

**Figura 12** – (A) Software Circuit Maker com o circuito utilizado. (B) Detalhe da largura dos eletrodos, na legenda é destacado 0.5/0.5 que significa eletrodos com 0.5 mm de largura e 0.5 mm de espaçamento entre eles. Fonte: elaborada pelo autor.

O circuito é composto pela entrada do sinal na base da placa, que é direcionado aos sensores. Passado pelos sensores, o sinal é captado à esquerda, passando pelo circuito de amplificação e podendo ser observado pela saída à direita. O circuito de proteção contra sinais externos foi descartado, pois criou mais ruído do que ajudou. Todas as partes podem ser observadas na Figura 13.

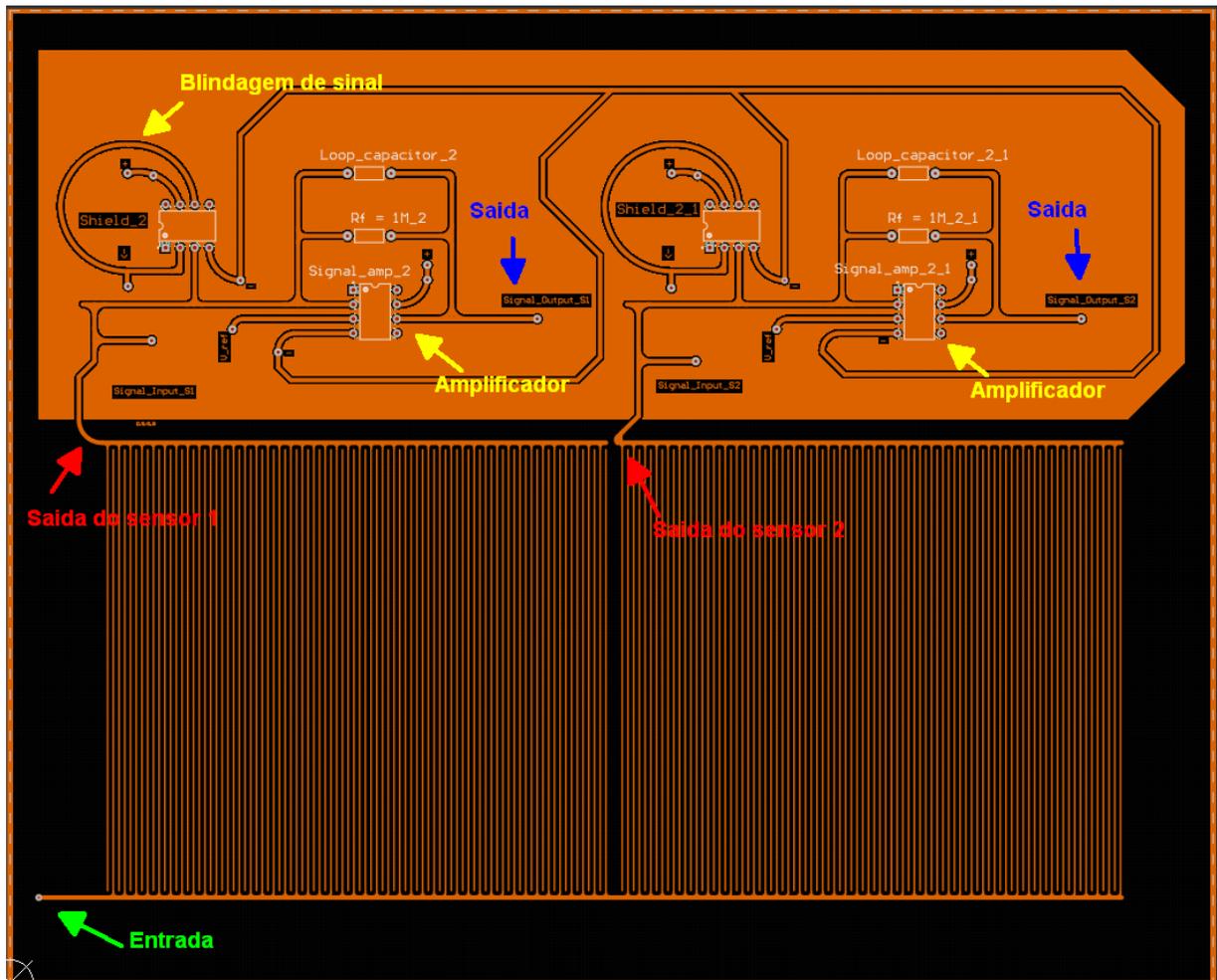


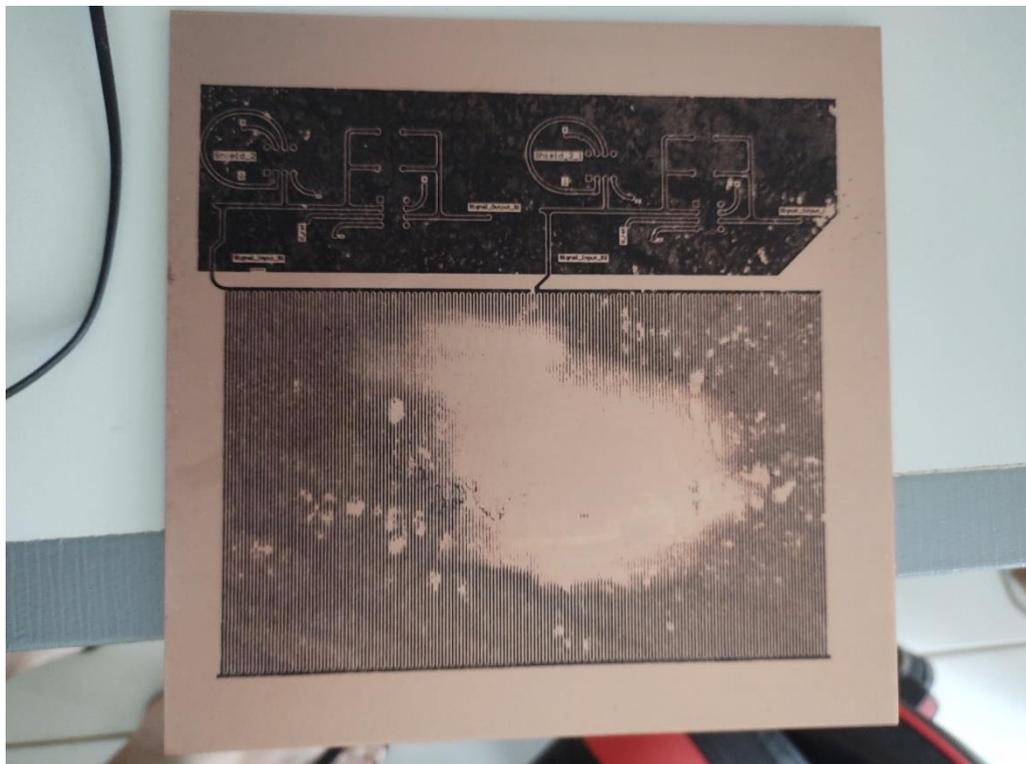
Figura 13 – Circuito do dispositivo com setores individuais legendados. Fonte: elaborada pelo autor.

### 3.1.5 Manufatura dos Protótipos

Originalmente, foi decidido fabricar o sensor contratando uma empresa especializada no Brasil. No entanto, observando que o circuito era simples, foram realizadas tentativas de manufatura da placa para talvez produzir vários modelos de sensores diferentes e explorar melhores alternativas antes de fazer um pedido para

uma empresa. Quando se faz um pedido para uma empresa, é necessário comprar em quantidades maiores para diluir o custo.

A primeira tentativa foi imprimir em laser o circuito em papel *transfer* e depois realizar a sublimação da tinta para a placa de cobre utilizando calor e pressão. O problema principal desse método foi a qualidade da transferência; a tinta nunca aderiu completamente ao cobre, principalmente na região dos sensores. Esse método também exigia pressão para garantir uma boa transferência, o que espalhava a tinta e exigia aumentar o espaçamento entre as trilhas, diminuindo o número total de eletrodos e, conseqüentemente, a sensibilidade do sensor. Todos os resultados ficaram parecidos, como mostrado na Figura 14.



**Figura 14** – Tentativa de impressão por transferência de tinta. Fonte: elaborada pelo autor.

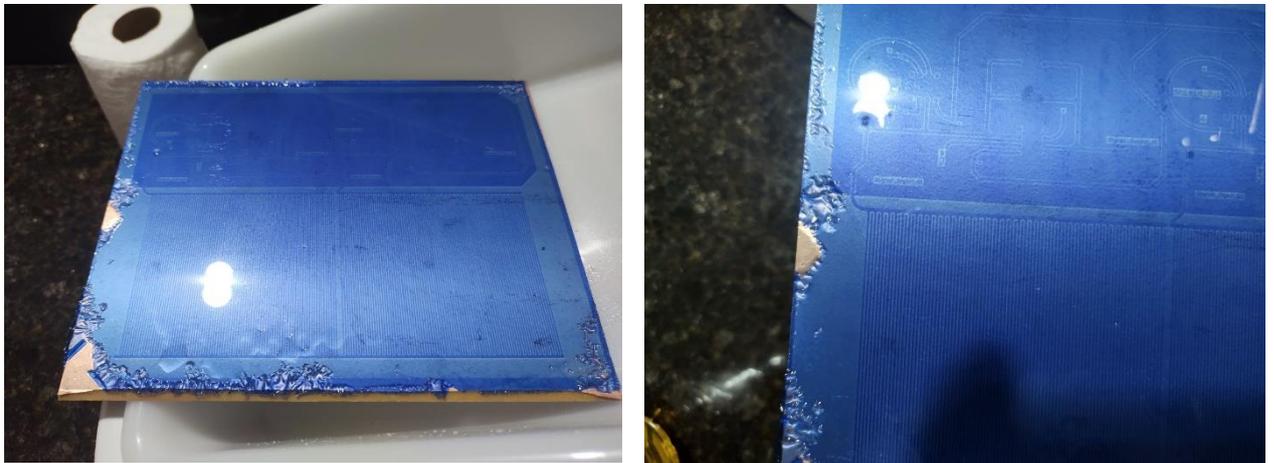
Quando constato o problema de espalhamento da tinta e com a transferência ruim, foi decidido mudar a técnica para a de litografia descrito a seguir.

Esse processo envolve a impressão do circuito em um papel transparente e a aplicação de um filme sensível à luz ultravioleta na placa de cobre. O papel transparente é posicionado sobre o filme sensível, e a luz ultravioleta é aplicada para transferir o circuito para o filme. Após a exposição, o filme que não reagiu à luz é removido com uma solução de pH levemente básico que não afeta o cobre. O último

passo é corroer o cobre exposto em uma solução ácida. Esse método é vantajoso por não alterar significativamente as trilhas do circuito, resultando em um padrão mais definido e preciso.

No entanto, esse método também falhou. Durante o passo de aplicação da luz ultravioleta ocorreu um erro, e, embora o circuito tenha aparecido claramente no filme sensível, toda a película se dissolveu ao aplicar a solução básica. O resultado dessas tentativas pode ser observado na Figura 15.

Esse método foi utilizado baseado em fóruns de eletrônica amadora e no vídeo tutorial [18].



(a)

(b)

**Figura 15** – (a) Tentativa de impressão por fotolitografia. (b) - Detalhes do filme fotossensível soltando a esquerda. Fonte: elaborada pelo autor.

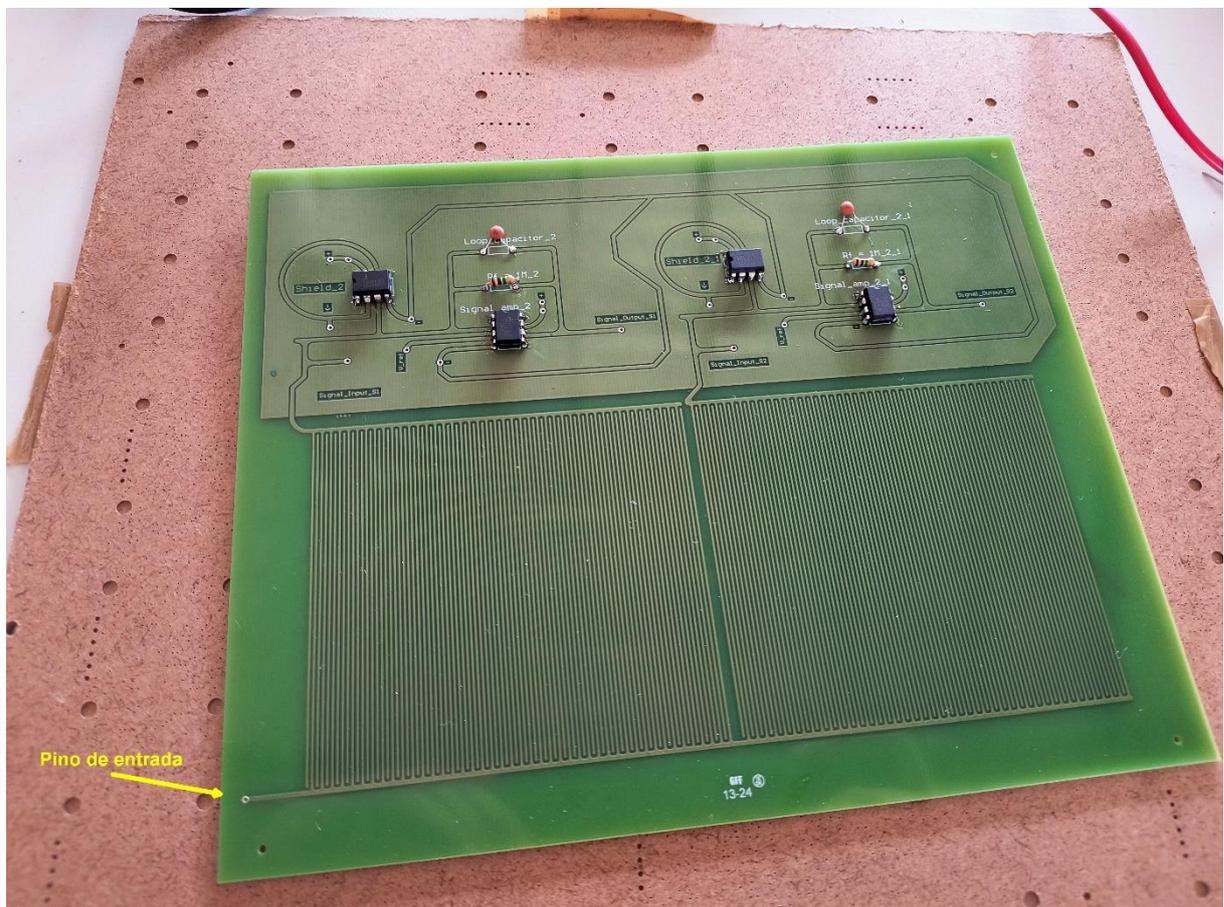
Apesar das falhas, o processo trouxe benefícios ao projeto. As diversas impressões ajudaram a aprimorar o design, permitindo verificar se os tamanhos estavam seguindo os valores utilizados no software e se eram compatíveis com a mão utilizada como modelo. Isso não evitou o erro com o pino de entrada do sinal, porém outros pinos foram concertados e adicionados no circuito amplificador antes da versão final.

### 3.1.6 Fabricação do Circuito – Profissional

Observando os resultados anteriores, foi decidido retomar o plano original e fazer um pedido online com a fabricante nacional GRIFFUS de São Paulo. Com o

design já pronto, foram produzidos os arquivos digitais Gerber para o design e a posição dos furos da placa.

No entanto, o design apresentava alguns erros identificados após a produção. O principal erro referia-se à entrada do sinal nos sensores. A entrada foi projetada com apenas um pino soldado, e o espaço para soldar o pino estava com um diâmetro menor do que o necessário. Esse é um ponto crítico, eram necessários ao menos dois pinos de entrada para garantir a confiabilidade do circuito. O erro causou problemas durante a soldagem e danificou três das cinco placas produzidas. Duas placas foram soldadas e testadas com êxito, mas uma delas apresentou problemas posteriormente. Apesar desse erro as placas eram de ótima qualidade como observado na figura 16.



**Figura 16** – Placa do dispositivo impressa profissionalmente com componentes soldados e sem pinos de conexão. Destaque para o ponto que causou o defeito. Fonte: elaborada pelo autor.

### 3.1.7 Validação do Sensor Produzido.

Realizada a etapa de manufatura, a placa foi testada com o capacitômetro MX-1010 da Minipa. O objetivo era determinar o valor básico da capacitância e escolher o

capacitor de realimentação. Nesse ponto, surgiram informações importantes que alteraram os próximos passos do experimento.

As placas apresentaram resultados em que a capacitância era de aproximadamente 210 pF no sensor da esquerda e 235 pF no sensor da direita. Esses valores eram muito além do esperado, pois segundo Lee [9] a capacitância alcançada para um sensor de 12 mm x 15 mm foi de 1.4 pF. Utilizando a fórmula (3.1) podemos observar que  $n * L$ , os valores de número e comprimento dos dígitos foram os principais alterados, sendo os dois multiplicados por valores próximos de 7 e 6 respectivamente, isso aumentaria em 42x a capacitância do sensor. Então foi uma boa surpresa quando o aumento percebido na realidade era de 140x

Esse fato não era totalmente inesperado, pois além de aumentar muito o tamanho, também foi aumentado o número de eletrodos e o sensor foi idealizado apenas para essa função, o sensor de Lee [9] foi feito em material flexível para ser aplicado em uma superfície de um robô por exemplo. Essa aplicação específica pode ter comprometido outras capacidades do sensor como a sensibilidade.

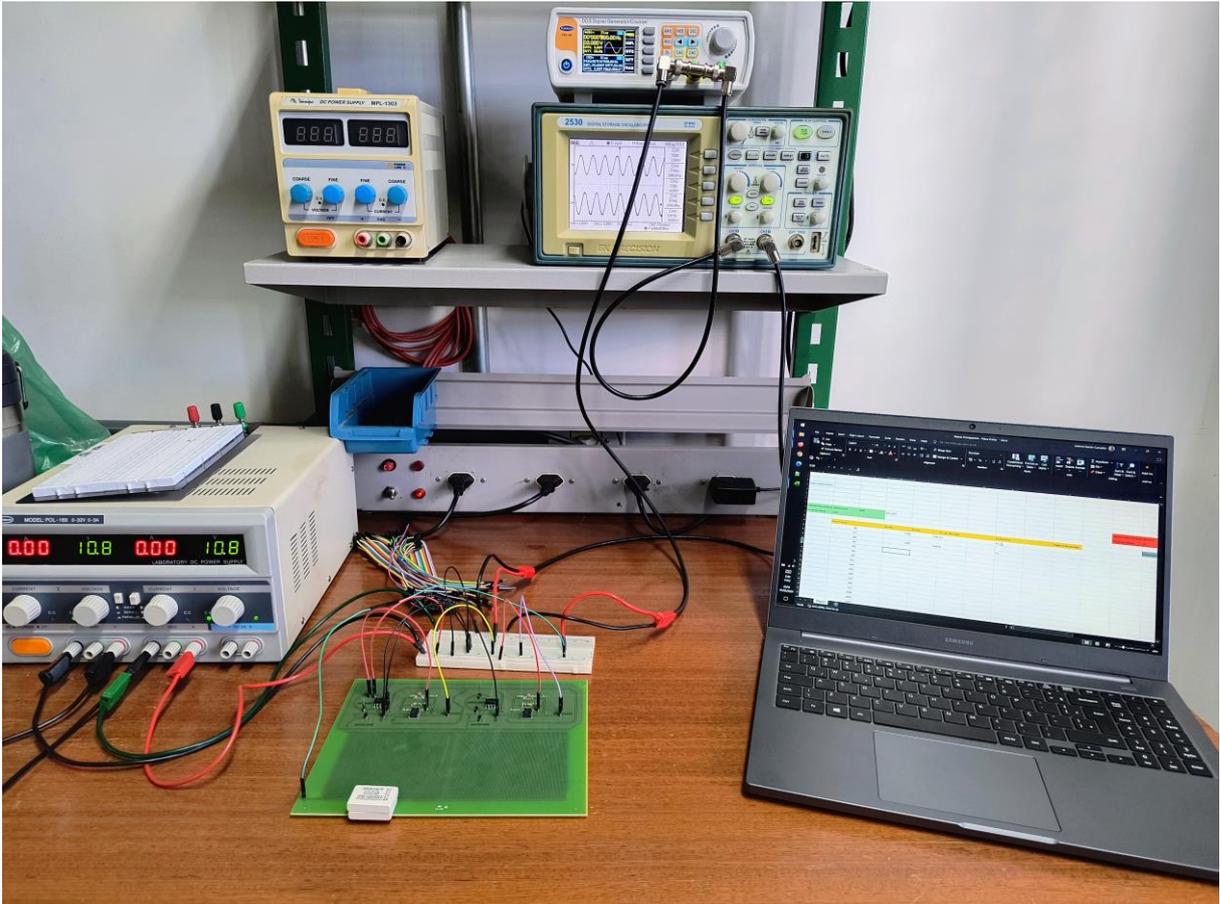
Quando foi testada a interação com uma mão, foi outra surpresa. A capacitância registrada subiu para 1100 pF, muito além do valor máximo observado nas simulações, que era de 0,28 pF, conforme ilustrado nas figuras 8 e 9 confirmando algum erro na simulação. O teste com um bloco de borracha com dimensões semelhantes às usadas nas simulações resultou em quase nenhuma alteração.



**Figura 17** – Placa do dispositivo durante o teste com o capacitômetro MX-1010. Fonte: elaborada pelo autor.

### 3.2 Resposta em Frequência.

Os testes realizados tiveram como objetivo comprovar o uso do dispositivo e descrever a resposta em frequência para facilitar estudos futuros que queiram implementar o dispositivo. Uma mão humana foi utilizada para confirmar a utilidade do dispositivo; no entanto, a forma ideal de caracterizar o sensor seria com um bloco metálico e uma estrutura que facilitasse o movimento com distâncias específicas. Essa abordagem não foi adotada devido a restrições de tempo e porque seria mais eficaz realizar esses testes em um dispositivo com conectores sem defeito. No protótipo atual, os pinos de conexão acabaram interferindo no movimento, limitando o uso originalmente planejado.

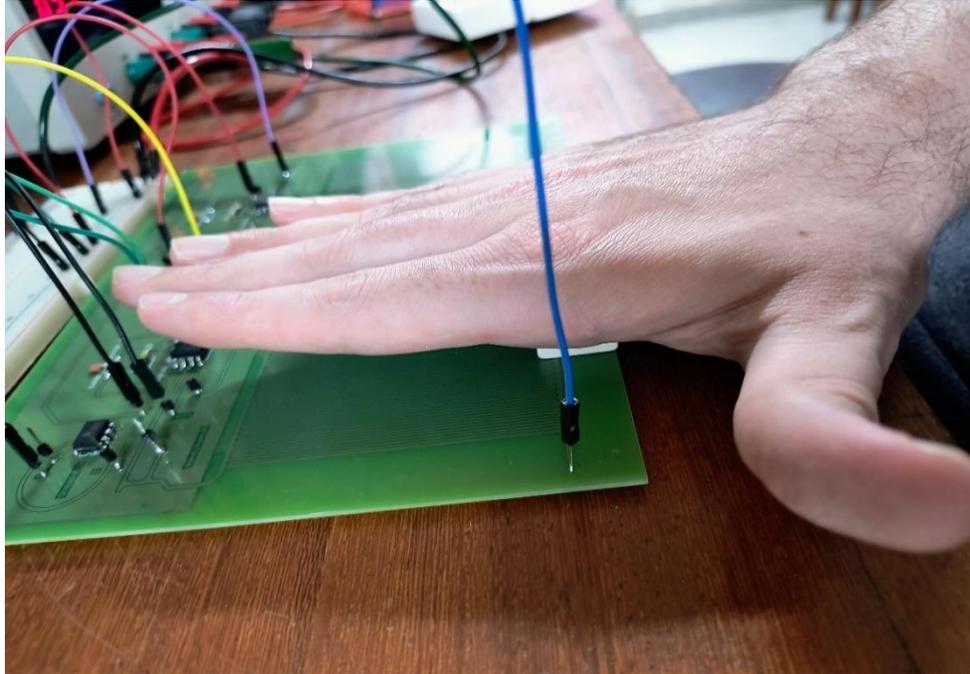


**Figura 18** – Teste do dispositivo em bancada. Fonte: elaborada pelo autor.

Na figura 18, é possível observar no meio, na parte superior, o gerador de sinais, que está utilizando uma saída com um bifurcador do sinal. O sinal de entrada é alimentado em um dos canais do osciloscópio, localizado abaixo do gerador, e diretamente no sensor. Dessa forma, é possível monitorar simultaneamente o sinal de saída e o sinal de entrada. Cada placa possui dois sensores, e, portanto, cada lado foi caracterizado individualmente.

Os amplificadores são alimentados com uma tensão simétrica de 15 V, fornecida pela fonte à esquerda da foto. As saídas e tensões de alimentação são organizadas utilizando uma placa protoboard.

As borrachas apoiadas no sensor à esquerda da foto foram utilizadas para controlar a altura da mão durante a iteração com os sensores. Optou-se por usar borrachas, pois elas não afetaram os resultados, conforme observado nos testes com o capacímetro. Assim, a mão é posicionada logo acima das borrachas e o sensor é aguardado para reagir à interação, como ilustrado na foto a seguir:



**Figura 19** – Altura da mão nos testes utilizando duas borrachas de altura 6 mm, total de 12 mm. Fonte: elaborada pelo autor.

As placas foram identificadas e catalogadas com as letras A, B, C, D e E. As placas A, B e D apresentaram defeitos, enquanto as placas C e E foram testadas com sucesso, com a placa D apresentando problemas posteriormente. Os amplificadores operacionais CA3140 foram testados com um circuito simples de amplificação e confirmados como estando em perfeito estado antes de serem soldados à placa.

O capacitor de realimentação está em paralelo com um resistor de 10 k $\Omega$ . Esse resistor é utilizado para evitar oscilações na saída do amplificador e controlar o limite, mas não afeta significativamente o funcionamento do circuito.

Foi elaborada uma Tabela para registrar os resultados da saída do amplificador com entradas de 1V, 2V e 4V e frequências variando de 100 Hz a 200 kHz. Os resultados de 1V foram iguais aos de 2V apenas com diferença de ganho, então foram descartados dos resultados finais e os valores de 4V apresentaram distorções por estar no limite de tensão fornecida pela fonte, logo também foram descartados.

A Tabela tem as seguintes informações, em cada etapa de frequência é incrementada em as frequências em oitavas. Isso acabou resultado em uma quantidade grande de testes e ocupou boa parte do desenvolvimento do dispositivo. Então é medido em cada frequência, o valor da tensão mínima que significa sem perturbação com a mão. Anotado esse dado, a mão é posicionada por cima do sensor

como na figura 19 e esperado o valor mudar na saída do dispositivo e anotado esse dado como tensão máxima ou com perturbação, então é calculado o delta de tensão ( $\Delta V$ ) para cada frequência.

Feito isso, foi gerado um Gráfico com a relação de capacitância e a interação com a mão, isso é importante para determinar a frequência de maior delta, essa é a frequência em que o dispositivo deve operar garantindo a maior sensibilidade e assim a maior distância de interação com a mão.

Feitos os testes, foi possível definir os parâmetros de amplitude e frequência do sinal para maximizar o delta na amplitude do sinal de saída para o melhor desempenho do Arduino

### 3.3 Firmware do Dispositivo

A próxima fase foi traduzir a informação do sinal em movimento para o mouse do computador. A implementação dessa função é relativamente simples com poucos sensores, mas se o número de sensores fosse maior, a complexidade e a demanda de processamento aumentariam. Ainda assim seria menos que outras soluções.

Foi utilizada uma biblioteca pronta para facilitar a integração com o chip como um mouse. Bibliotecas são conjuntos de códigos desenvolvidos por outras pessoas que evitam a necessidade de refazer o código.

A biblioteca utilizada foi a “absmouse”, que permite enviar comandos para mover o mouse para pontos específicos do ambiente gráfico. Esta abordagem é diferente do modo relativo, que apenas adiciona movimento à posição antiga do mouse. Observou-se que o modo absoluto facilita o controle, pois permite um acompanhamento mais preciso do movimento.

A placa de desenvolvimento captura os valores dos dois sensores e calcula a diferença entre o sensor esquerdo e o sensor direito. Assim, quando os sensores permanecem inalterados, o mouse fica centralizado na tela. No entanto, quando a mão se aproxima de um dos lados, o desbalanceamento causado permite o movimento preciso do mouse. O código que realiza essa operação pode ser visualizado na figura 20:

```
#include <AbsMouse.h>

//usar na placa C com pinos
```

```
const int sensor1Pin = A0; // Pino para o primeiro sensor
const int sensor2Pin = A1; // Pino para o segundo sensor
const int n1 = 1; //multiplicador para o sensor 1
const int n2 = 1; //multiplicador para o sensor 2
const int ng = 1; //multiplicador sensibilidade geral
const int buttonPin = 2; // Pino para o botão

int screenWidth = 2560; // Ajuste esses valores de acordo com a resolução da
sua tela
int screenHeight = 1080; // Ajuste esses valores de acordo com a resolução da
sua tela

bool mouseEnabled = false; // Estado do controle do mouse

unsigned long samplePeriod = 100; // Período de amostragem em milissegundos
unsigned long lastSampleTime = 0;

void setup() {
  pinMode(sensor1Pin, INPUT);
  pinMode(sensor2Pin, INPUT);
  pinMode(buttonPin, INPUT_PULLUP); // Use o resistor pull-up interno

  AbsMouse.init(screenWidth, screenHeight);
}

void loop() {
  // Ler o estado do botão
  bool buttonState = digitalRead(buttonPin);

  // Alternar o estado de mouseEnabled ao pressionar o botão
  static bool lastButtonState = HIGH;
  if (buttonState == LOW && lastButtonState == HIGH) {
    mouseEnabled = !mouseEnabled;
  }
  lastButtonState = buttonState;

  if (mouseEnabled) {
    // Verificar se o período de amostragem passou
    unsigned long currentTime = millis();
    if (currentTime - lastSampleTime >= samplePeriod) {
      // Amostrar os valores atuais dos sensores
      int sensor1Value = analogRead(sensor1Pin);
      int sensor2Value = analogRead(sensor2Pin);

      // // Print the first analog value
      // Serial.print("A0: ");
      // Serial.print(sensor1Value);

      // // Print a separator
```

```

// Serial.print(" | ");

// // Print the second analog value
// Serial.print("A1: ");
// Serial.println(sensor2Value);

// Calcular a diferença entre as leituras dos sensores
//int difference = sensor2Value * n2 - sensor1Value * n1;
int difference = sensor1Value*n1 - sensor2Value*n2;

//Serial.print("difference: ");
//Serial.println(difference);

// Calcular a posição do mouse com base na diferença
int mouseX = map(difference, -1023, 1023, 0, screenWidth);
mouseX = constrain(mouseX, 0, screenWidth); // Garantir que o valor
esteja dentro dos limites da tela

int mouseY = screenHeight / 2; // Manter a posição Y no centro

mouseX = mouseX * ng;

// Mover o mouse para a posição calculada
AbsMouse.move(mouseX, mouseY);

// Atualizar o tempo de amostragem
lastSampleTime = currentTime;
}
} else {
// Se o controle do mouse estiver desativado, centralizar o cursor do
mouse
//AbsMouse.move(screenWidth / 2, screenHeight / 2);
}
}

delay(10); // Pequeno atraso para evitar sobrecarregar o sistema
}

```

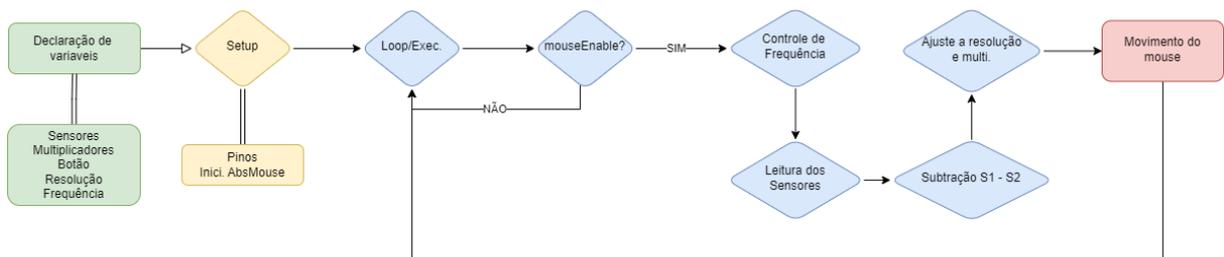
**Figura 20** – Código de Firmware do dispositivo escrito em c++. Fonte: elaborado pelo autor.

O firmware não é complexo e pode ser explicado da seguinte forma. Primeiro, são inicializadas as variáveis que serão utilizadas, como “sensor1Pin”, que está associada aos pinos de entrada do sinal. Foi adicionado um botão no pino 2 para ligar e desligar os comandos, a fim de evitar que o mouse sequestre o sistema e o torne inutilizável. As variáveis “screenWidth” e “screenHeight” devem ser modificadas para corresponder a largura e altura respectivamente do monitor em que o computador está

ligado. Em um produto comercial, isso seria feito de forma automática com a integração de outras bibliotecas. Feito isso é declarado a variável “samplePeriod” que deve ser ajustado para o período da frequência utilizada no sinal de entrada do dispositivo.

Na próxima etapa é inicializado as configurações do Arduino no campo “Setup” determinando os pinos e suas configurações.

A etapa ou bloco `loop` é iniciado e realiza a leitura do botão confirmando se pode enviar os comandos do mouse. Ao pressionar o botão é feito a leitura dos sensores, o cálculo da diferença e o ajuste do comando ao tamanho correto do monitor utilizado, esse paço é feito utilizando a função “map” que corresponde o valor da diferença na mesma proporção do valor do monitor. Por fim é realizado o comando utilizando a biblioteca “AbsMouse.move”.



**Figura 21** – Fluxograma do Firmware do dispositivo. Fonte: elaborado pelo autor.

Esse código então para ser implementado em um mouse completo, bastaria adicionar mais dois sensores e realizar a diferença entre os quatro, fazendo também o movimento vertical.

As variáveis “n1” e “n2” são responsáveis pelo ajuste fino, sendo multiplicadores que podem fazer o balanceamento dos sensores para caso um sensor esteja resultando em maior capacitância que o outro. A variável ng faz o controle do ganho para os dois lados, podendo ser ajustado caso o mouse não esteja se deslocando até o final do monitor.

## 4 RESULTADOS DOS EXPERIMENTOS

Neste capítulo, serão apresentados os resultados obtidos dos protótipos produzidos. Assim como discutido os resultados encontrados

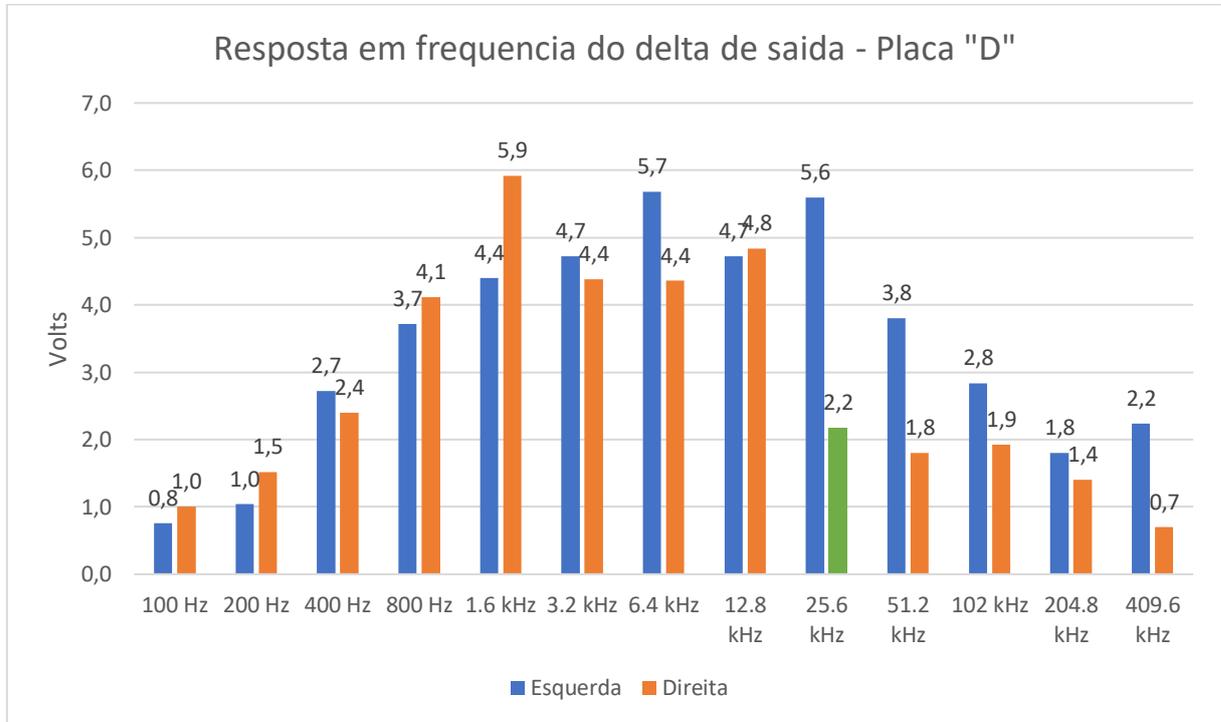
### 4.1 Caracterização de Frequência

As Tabelas a seguir mostram o resultado do delta, isto é, a diferença entre o sensor sem qualquer perturbação e o valor obtido com a mão do autor diretamente sobre o sensor, no ponto de máxima interação, que é diretamente sobre o sensor. Todos os testes foram realizados a uma distância de 12 mm com um sinal senoidal de 2 Vpp.

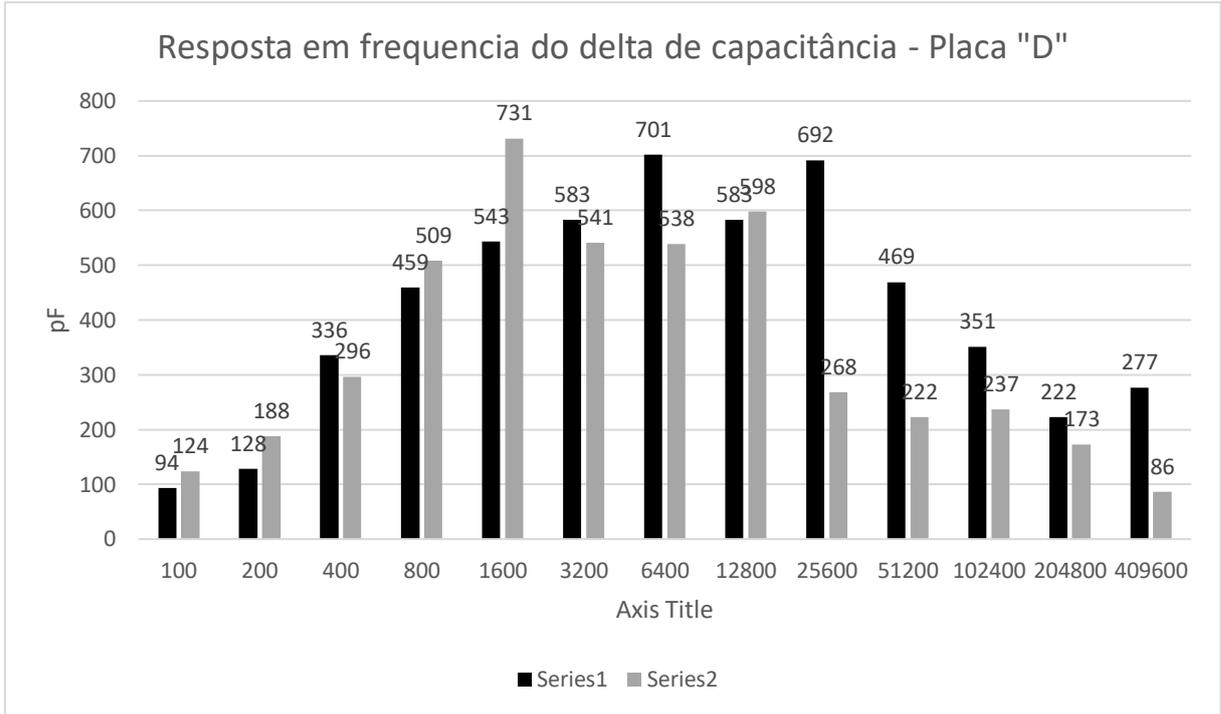
O problema encontrado com o design dos protótipos, relacionado à entrada do sinal, provocou a perda de três placas soldadas, sendo a placa designada como "C" a única que continuou funcional. Os testes realizados na placa "D" foram feitos antes de ela apresentar problemas.

### 4.1.1 Sensores da placa D

Segue os resultados referentes a placa denominada "D".



**Figura 22** – Gráfico de resultados dos valores encontrados para o delta de tensão de saída em Volts para cada frequência nos sensores da placa "D" Destaque em verde de um valor considerado errado. Fonte: elaborada pelo autor.

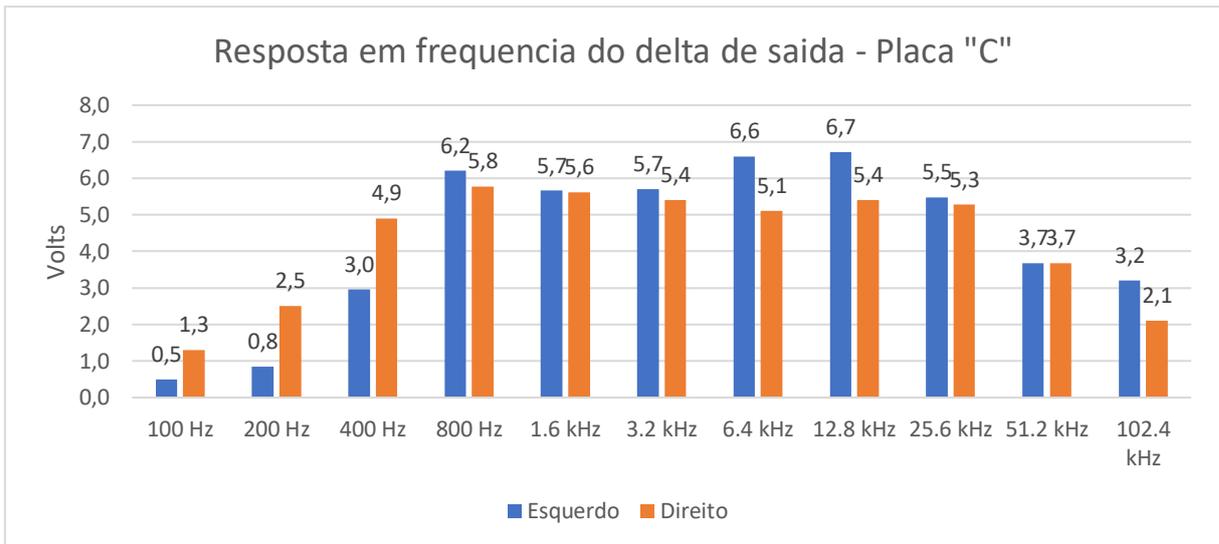


**Figura 23** – Gráfico de resultados dos valores encontrados para o delta de capacitância nos sensores da placa "D" em pF. Fonte: elaborada pelo autor.

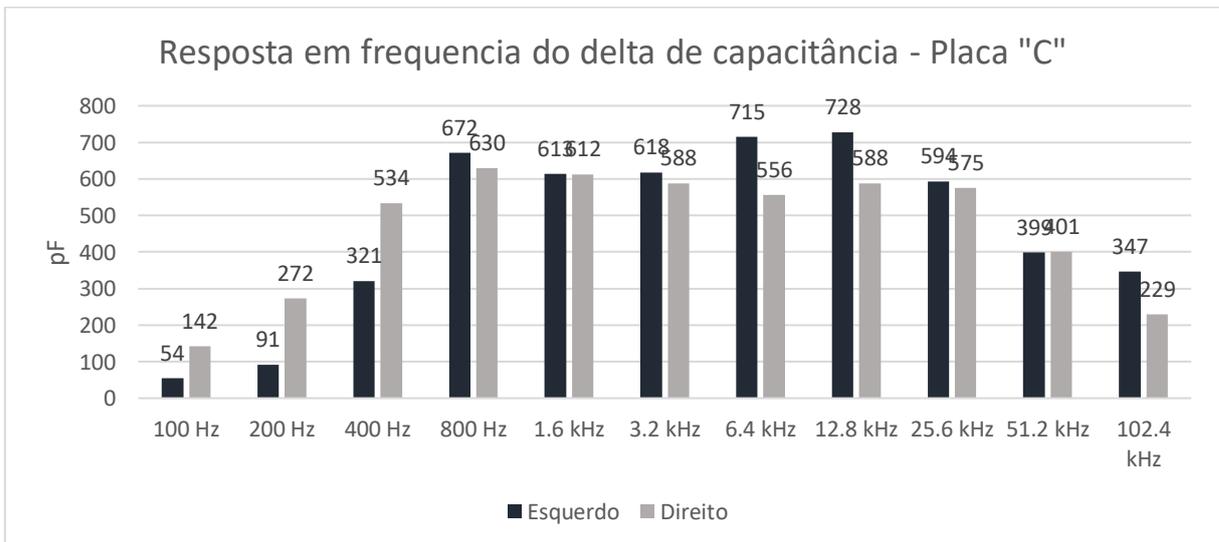
A conversão do primeiro para pF é para melhor representar a saída do sinal como foi nos artigos Lee [9] e Ruth [10], facilitando a comparação e dando o valor real do delta de capacitância observado diretamente em Faraday.

### 4.1.2 Sensores da placa C

Segue a baixo os resultados referentes a placa denominada “C”. Foi percebido que depois da frequência 102 kHz o delta do sinal reduzia bastante, e então na placa “C” não foi testado além desse valor.



**Figura 24** – Gráfico de resultados dos valores encontrados para o delta de tensão de saída em Volts para cada frequência nos sensores da placa “C”. Fonte: elaborada pelo autor.



**Figura 25** – Gráfico de resultados dos valores encontrados para o delta de capacitância nos sensores da placa “C” em pF. Fonte: elaborada pelo autor.

A Tabela com os valores completos está nos apêndices. O experimento realizado testou dois pontos de operação: o primeiro sem perturbação e o segundo

com perturbação, o resultado sendo a diferença entre os dois. Essa abordagem foi adotada porque indica que o sensor pode assumir qualquer valor dentro desse intervalo

## **4.2 Teste de Movimento Lateral e Controle de Mouse**

Durante os testes, também foi realizado o teste do sistema do mouse ligado a um computador. Os sensores foram conectados ao Arduino Leonardo e feito a configuração do firmware. A fonte simétrica foi limitada a 5 V não permitindo uma tensão maior que a suportada pelo Arduino. Então foi deslocado a mão sobre o dispositivo. O resultado foi bastante satisfatório, era possível posicionar o mouse sobre as letras no monitor. O deslocamento, porém, oscilava um pouco pela dificuldade de manter a mão parada. Foi realizado um vídeo do funcionamento disponível em: [\[LINK\]](#). O apêndice C possui imagens com amostras do vídeo.

## **4.3 Dificuldade durante os experimentos**

Durante os experimentos, foi identificado que o vento estava afetando os resultados, na placa "D" até a frequência de 1600 Hz. Os pinos utilizados na construção estavam expostos e isso causava um ganho sem a presença da mão. O problema foi identificado e todos os experimentos foram repetidos sem a presença de vento.

Os osciloscópios apresentavam valores errados em alguns casos, estando sem calibração, isso foi remediado comparando com os resultados em outras placas e testando em dois osciloscópios no início dos experimentos para confirmar que os valores estavam coerentes. Outro fator que dificultou foi a falta de integração entre o gerador de funções e os osciloscópios. Outros modelos possuem integração de forma que para realizar a resposta em frequência bastava executar um comando e o osciloscópio envia as frequências desejadas para o gerador e registra a saída como um arquivo ou de forma gráfica. Evitando assim as horas de registro manual.

## **4.4 Discussão Dos Resultados**

Os resultados foram muito satisfatórios, apesar dos problemas com as simulações. Os resultados experimentais demonstraram um delta máximo de 5,92 Volts na placa "D" e 6,7 Volts na placa "C" em um sensor de 80 x 88 mm. Esses

valores são muito maiores do que os 5 Volts que o Arduino suporta, o que implica que o dispositivo pode operar exatamente como foi planejado, alcançado o objetivo do trabalho. No início dos trabalhos era esperado valores baixos de delta, já estava programado pesquisas para aumentar esse delta caso fosse necessário, mas com esses resultados foi abandonado essa ideia apesar de ainda apresentar sugestões nas próximas seções. Na tabela dois é apresentado uma comparação com os valores encontrados nas referencias teóricas, apesar da distância encontrada por Lee [9] ser maior, o valor do delta é bem menor e indica que seria difícil implementar um sensor para controle preciso com ele dado que a sensibilidade seria pequena. Os valores também não indicam que esse artigo produziu um sensor melhor, mas sim um sensor mais especializado para esse cenário.

**Tabela 2** – Quadro comparativo dos valores de delta encontrados entre esse trabalho e as referências teóricas. Fonte: elaborada pelo autor.

Artigo	Este trabalho	Ruth [10]	Lee [9].
Delta Máximo (pF)	788	0,070	0,005
Distancia de detecção (cm)	1,3 +	0,14	10

O único fato que impede de implementar o mouse completo são os protótipos quebrarem e serem necessários dois protótipos ligados ao Arduino. A distância de operação é superior a 12 mm, menor que o disposto nos objetivos, mas com prática um operador conseguiria utilizar na distância de 20 mm.

Apesar dos resultados sugerirem que a redução do tamanho dos sensores poderia ser viável, o trabalho recomenda manter sensores com pelo menos 80 x 88 mm. Isso porque um maior delta permite uma operação a distâncias maiores e melhora a sensibilidade, resultando em um dispositivo mais eficaz, apesar de ter dimensões maiores e pior facilidade de implementação.

No entanto, um aspecto que não foi bem sucedido foi a fluidez no uso do dispositivo. A fluidez referida é o tempo necessário para realizar uma operação. O dispositivo, ao ser afetado por um movimento, demorava mais de 12 segundos para alterar totalmente a saída. Esse tempo variava bastante com base nas frequências

utilizadas pelo sinal de entrada e apresentavam diferentes velocidades dependendo de estar no início, meio ou final da mudança. Por exemplo, quando o sinal estava em 1,720 Volts em estado sem perturbação, ao movimentar a mão, o valor subia rapidamente para 2,6 Volts e depois estabilizava lentamente em 3,2 Volts. Esse atraso é problemático, pois nenhum usuário ficará satisfeito esperando tanto tempo para movimentar o mouse. Esse problema pode ser resolvido com ajustes no pós-processamento dos sinais no firmware, como limitar o movimento apenas aos intervalos em que o sinal varia mais rapidamente. Essa necessidade de otimização motivou a mudança para o microcontrolador Artix-M7, que permitiria ajustes melhores.

Alguns valores considerados errados foram observados, como o valor destacado em verde nos resultados da placa "D". Esses valores ocorreram porque o experimento foi realizado usando blocos de borracha para posicionar a mão sobre o sensor. Esse método não é o mais preciso, pois a mão não era posicionada exatamente da mesma forma a cada tentativa, resultando em variações significativas nos valores. Apesar disso, a tendência em relação às frequências foi observada em todas as placas testadas, a tendência de apresentar maior delta entre as frequências de 1,6 kHz e 25 kHz.

#### **4.5 Ganho Entre 1,6 Khz e 25 Khz**

Segundo os resultados obtidos, existe essa tendência já citada. Primeiramente foi assumido que isso poderia ser um efeito da indutância parasita do sensor, que pela construção e tamanho maior, deveria ter de ser maior que o capacitor de realimentação. Dessa forma a impedância do sensor iria diminuir mais rápido que o capacitor comercial causando a queda do sinal, além do fato de em baixas frequências o sensor bloquear pois é uma reação normal de capacitores em baixas frequências.

A outra teoria seria uma reação do corpo humano como terra ou neutro no circuito. As altas frequências poderiam diminuir a impedância do corpo com o dispositivo permitindo o corpo absorver mais os campos elétricos.

Infelizmente não foi possível confirmar nenhuma das teorias antes de terminar a escrita desse projeto.

## 4.6 Consumo Energético e Custo do Dispositivo

O consumo energético e custo foi estimado para próximo de um mouse de custo e desempenho mediano e pode ser observado o cálculo na Tabela 3:

Tabela 3 – Quadro descritivo de custos e consumo energético do dispositivo. Fonte: elaborada pelo autor.

Nome da peça	Quantidade	Custo Unitário (reais)	Custo total (reais)	Consumo Total (watts)	Fontes
<b>Gerador de função ICL8038</b>	1	R\$ 35	R\$ 35	< 1 Watt	<a href="#">[14]</a>
<b>Sensor</b>	1	R\$ 61	R\$ 61	-	Consulta – Griffus PCB
<b>Micro-Proc Cortex-M7</b>	1	R\$ 42	R\$ 42	< 10 Watts	<a href="#">[17]</a>
<b>Amplificador CA3140</b>	2	R\$ 6,50	R\$ 13	< 1 Watt	<a href="#">[15]</a>
<b>Mão de Obra</b>	2 Horas	R\$ 8,50	R\$ 17	-	<a href="#">[13]</a>
<b>Total</b>			<b>R\$ 210</b>	< 10 Watts	

Os valores utilizados nesta Tabela são um pouco diferentes do custo do protótipo e aqui não está inserido o custo de desenvolvimento, apenas da construção. As diferenças de custo se devem ao fato de o microprocessador ser comprado como peça e não como placa de desenvolvimento, o que reduz significativamente o custo em comparação ao protótipo. A placa do sensor foi avaliada com base em um lote de 1000 unidades, o que seria um pedido mais realista do que as 5 unidades produzidas para o protótipo.

Embora seja um produto de nicho com um preço elevado devido ao baixo volume de produção, a simplicidade do sensor reduz o custo. O preço total de R\$ 210 está dentro do esperado para um produto dessas características, onde mouses podem variar entre R\$ 50 e R\$ 1000 sem alterar o funcionamento principal. Portanto, um dispositivo que poderia reduzir o tempo de limpeza de uma sala de cirurgia, com custo de hora parada de R\$ 783 [16], custar R\$ 210 é considerado normal. Registrado por

Johnson [8], já houve casos de um médico utilizar 7 minutos instruindo uma pessoa a operar um computador para executar comandos no software. O preço final certamente seria mais caro por exigir certificados para o ambiente hospitalar, ainda assim seria barato comparado ao custo do tempo economizado.

O Arduino Leonardo, que utiliza o microprocessador ATmega32u4, foi substituído para o cálculo, pois era apenas uma peça para validar o protótipo. Após os testes, ficou claro que não possuía processamento suficiente para a demanda. O processador Cortex-M7, por exemplo, teria maior capacidade de processamento para realizar cálculos em tempo real, o necessário, pois foi observado que é preciso um certo pós-processamento dos dados dos sinais para melhorar o desempenho, realizando ajustes de ganho dos sensores e funções como o clique.

O consumo energético foi calculado da seguinte forma: uma placa de desenvolvimento utilizando o mesmo microprocessador pode ser alimentada com uma fonte de 10 watts via USB. Assim, é correto afirmar que o consumo é menor que esse valor. Consultando o site do fabricante, é possível confirmar que o consumo real está próximo de  $58.5 \mu\text{W}/\text{MHz} \times 6 = 351 \mu\text{W}$  para o Cortex-M7. Embora pareça pouco, é comum nessa arquitetura de processadores embarcados. Somado ao consumo dos amplificadores e do gerador de sinal, que, segundo seus respectivos datasheets, é de menos de 1 watt, uma fonte ou conexão USB que fornece 10 watts seria mais do que suficiente para todo o dispositivo.

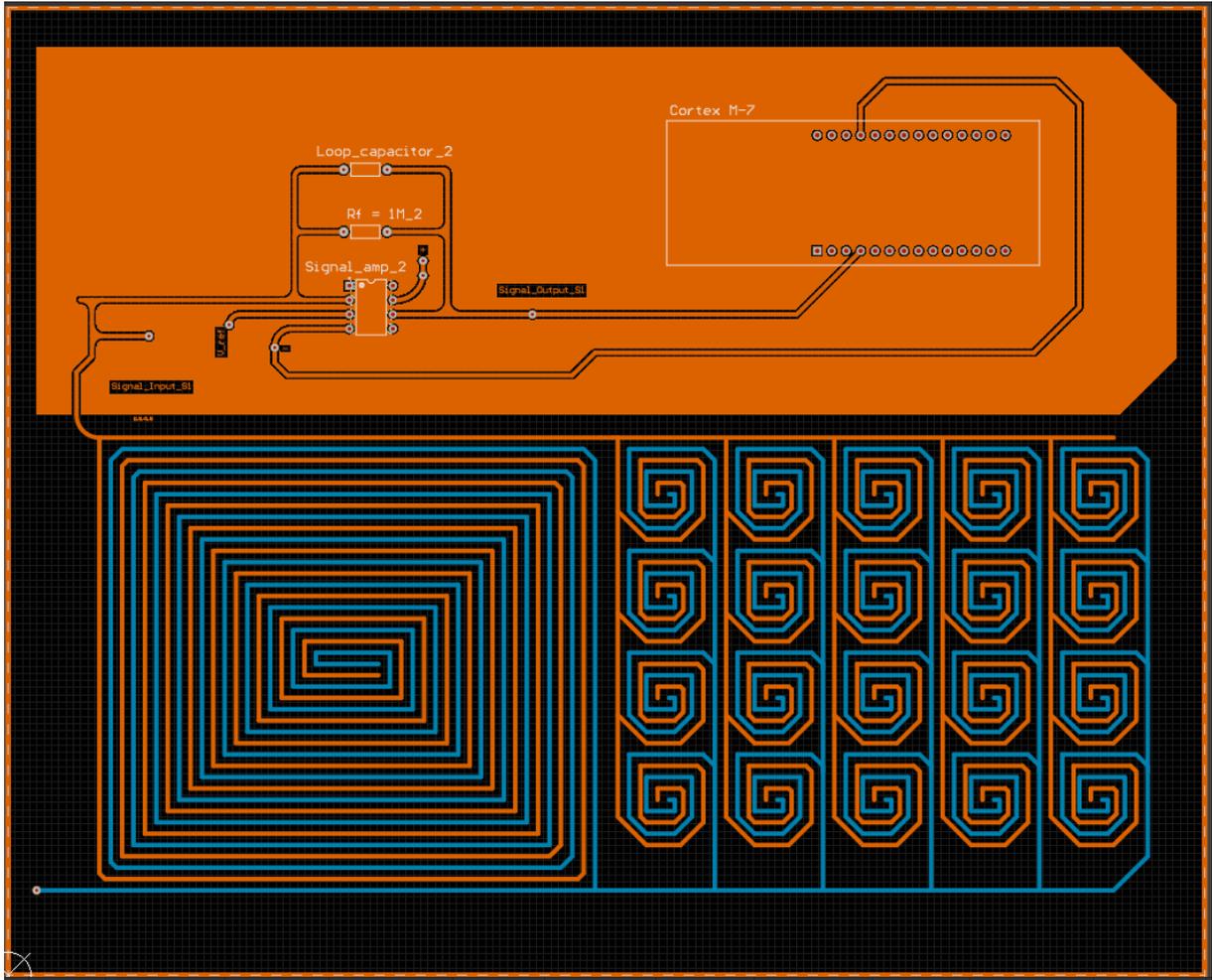
## 5 SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS

Durante o trabalho e observando os resultados, foi teorizado algumas sugestões de trabalhos que poderiam melhorar essa pesquisa, principalmente em vista dos problemas encontrados que tomaram tempo e não permitiram um trabalho mais profundo.

### 5.1 Sugestões de Trabalhos Futuros – Sensor Único

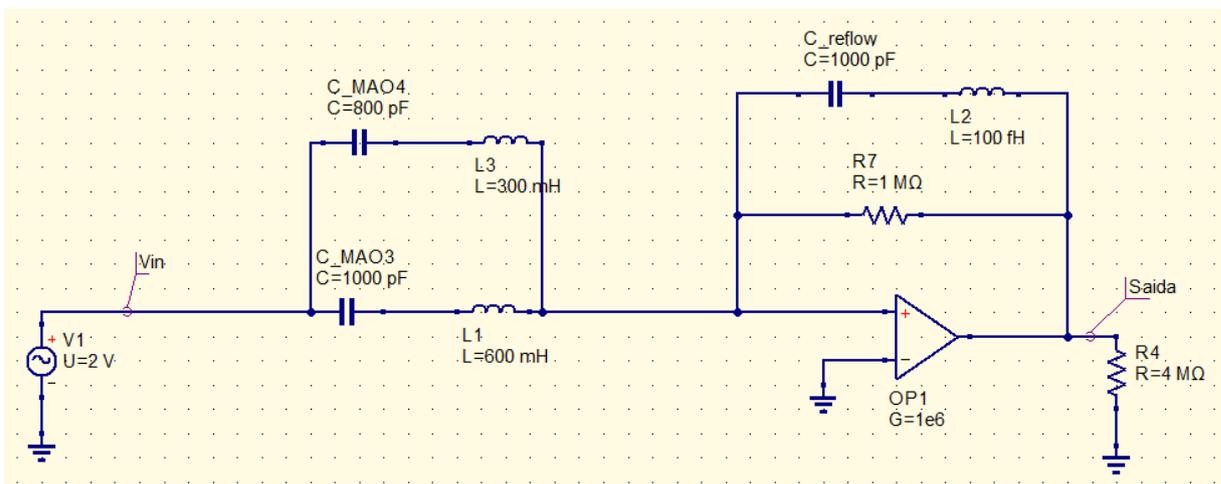
Uma sugestão possível vem da modelagem discutida pela fórmula (3.2), a qual implica que os sensores possuem uma frequência de ressonância em função da sua construção, onde o sinal tem maior amplitude. Isso abre a possibilidade de construir um dispositivo composto por sensores de diferentes tamanhos, que produzem diferentes valores de indutância e capacitância, conforme explorado por Wang [14] e observado durante os experimentos.

A construção seria de um único sensor extenso com vários setores, cada um funcionando como um sensor individual. Os setores teriam formatos diferentes e seriam conectados ao circuito amplificador. Utilizando um microprocessador com a capacidade de realizar a transformada de Fourier em tempo real, seria possível determinar a localização da mão com base nas amplitudes de cada frequência e realizar a entrada do sinal de acordo. Esse dispositivo poderia até realizar a leitura de pequenos gestos, como abrir e fechar a mão, similar ao que é feito pelo dispositivo Pixel 4 da Google e descrito no artigo Sato [11]. Isso não impactaria significativamente o tamanho do dispositivo, mas melhoraria a funcionalidade. A Figura 26 e 27 exemplifica como seria a construção, incluindo o microcontrolador no lugar do amplificador do sensor 2.



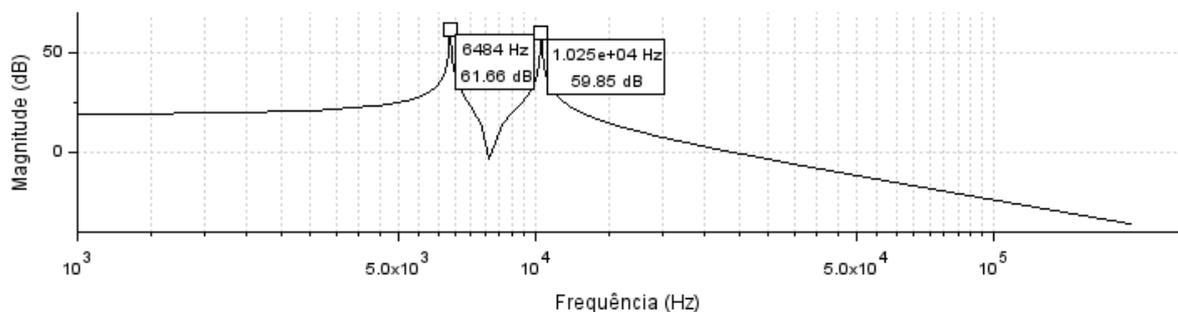
**Figura 26** – Exemplo de sensor único com setores de capacitância e indutância distintos, os vários formatos vão influenciar na capacitância e indutância. A indutância também poderia ser inserida na forma de um indutor soldado em serie com cada sensor. Fonte: elaborada pelo autor.

O circuito equivalente ficaria da seguinte forma:



**Figura 27** – Exemplo de circuito do sensor único com setores de capacitância e indutância distintos em software QUCS. Fonte: elaborada pelo autor.

Foi deduzido a fórmula equivalente a (3.2) para esse circuito, seguindo o mesmo método, porém com uma complexidade maior devido às impedâncias paralelas. A modelagem foi simulada no software Scilab utilizando a função de plotagem de Bode para melhor compreensão de todo o sistema descrito e demonstrado o resultado para valores simulados de 200 pF, para a capacitância dos sensores e 300 mH e 600 mH como indutância desses sensores. O resultado pode ser observado na figura 28.



**Figura 28** – Exemplo de resposta em frequência para um sensor único com setores de capacitância e indutância distintos. Nesse caso, os capacitores são da ordem de 200 pF, próximos dos valores utilizados nos experimentos, mas os indutores são valores elevados de 300 e 600 mH. Embora esse caso não seja muito realista, uma indutância menor apenas alteraria os pontos de pico, sem modificar o princípio básico de funcionamento. Fonte: elaborada pelo autor.

Dessa forma, fica bem claro como avançar nesse caso. Aplicando sinais com uma frequência específica e lendo esses sinais em um microprocessador adequado, seria possível observar os picos encontrados e fazer o posicionamento baseado nesses picos.

Ainda no contexto de sensores com formatos diferentes, também seria interessante desenvolver um sensor impresso em uma esfera. Durante os testes, foi observado que o uso de um sensor plano gerava desconforto, pois a mão não tem um formato plano naturalmente. Um sensor com a curva natural da mão seria mais ergonômico.

## 5.2 Sugestões de Trabalhos Futuros – Luva Adaptada

Um cenário que também deveria ser explorado é a possibilidade de um médico utilizar uma luva modificada. Esse acessório já é utilizado nesse contexto e não violaria a premissa do dispositivo. A luva mencionada seria descartável e teria uma pequena bateria que aumentaria a tensão estática da luva em poucos volts. Considerando que o sensor já está sensível o suficiente, esse pequeno aumento na tensão poderia permitir uma distância muito maior para interação e reduzir significativamente o risco de contato com o aparelho. A luva seria praticamente imperceptível, pois não teria lógica integrada, apenas um material condutor e uma pequena bateria.

O mesmo objetivo poderia ser alcançado com uma luva de dupla camada, onde um material condutor seria inserido entre as camadas. Esse material na parte externa da mão, iria garantir uma homogeneidade de todas as iterações com o dispositivo por diferentes médicos e melhoraria a distância de detecção uma vez que é sensível a matérias condutores. O material deveria ser seguro e estéril para caso a luva fosse perfurada.

## 6 CONCLUSÃO

A pesquisa bibliográfica demonstrou que existem artigos na área de interfaces sem toque, porém também revelou uma falta de pesquisas mais específicas sobre como alcançar a performance já estabelecida no mercado de mouses. Essa performance, como mostrado por Wimmer [10], afeta amplamente a aceitação das tecnologias. Portanto, se for concretizado um dispositivo com as características propostas aqui, ele será uma alternativa com potencial: não revolucionária, mas que realiza o básico de um dispositivo de interface apontadora.

Os resultados experimentais confirmaram a viabilidade do uso desse dispositivo, ao realizar todas as etapas necessárias. O produto exigiria ajustes precisos no pós-processamento e uma integração eficaz de todas as partes, incluindo o gerador de sinal e o microprocessador.

Os valores encontrados foram de um delta máximo de 6,7 Volts, possibilitando quase o uso completo dos 5 Volts disponíveis no Arduino. Esses valores foram bem diferentes do inicialmente esperados, pois esse valor convertido para a capacitância é de 730,1 pF, sendo que os artigos consultados trabalhavam com valores de 1,4 pF. Apesar dos sensores serem menores, os valores esperados eram de 60 pF.

Por fim, apesar de alcançado os objetivos, foi observado que não poderia ser um produto final, o formato da placa plana torna um produto ruim a longo prazo que causaria dificuldades de uso. Isso também leva as próximas pesquisas, aonde o dispositivo poderia ser construído utilizando um formato curvo mais ergonômico.

Os casos de uso do produto seriam em salas de cirurgias que os médicos utilizariam para manipular imagens como é o caso de procedimentos utilizando o equipamento de raio-x para guiar o médico dentro do corpo humano. Nesse caso poderia ser feito até um estudo para modificar a luva do cirurgião e ajudar no ganho dos sensores.

Essa tecnologia poderia migrar também para outros setores como no alimentício que permitirá cozinheiros manipularem sistemas com as mãos contaminadas ou fabricas com esse mesmo tipo de ambiente.

Por fim, essa tecnologia passou muitos anos sendo estudada para casos especiais como permitir robôs a terem sensibilidade táctil, mas não foi pensada e

estudada como um dispositivo apontador, é um encontro obvio de duas áreas que já deveriam ter sido estudadas juntas.

# REFERENCIAS

[1] Boser, O., & Newsome, V. (1987). High frequency behavior of ceramic multilayer capacitors. *IEEE transactions on components, hybrids, and manufacturing technology*, 10(3), 437-439.

[2] Chao, C., Tan, J., Castillo, E. M., Zawaideh, M., Roberts, A. C., & Kinney, T. B. (2014). Comparative efficacy of new interfaces for intra-procedural imaging review: the Microsoft Kinect, Hillcrest Labs Loop Pointer, and the Apple iPad. *Journal of digital imaging*, 27, 463-469.

[3] Cronin, S., & Doherty, G. (2019). Touchless computer interfaces in hospitals: A review. *Health informatics journal*, 25(4), 1325-1342.

[4] Ebert, L. C., Hatch, G., Ampanozi, G., Thali, M. J., & Ross, S. (2012). You can't touch this: touch-free navigation through radiological images. *Surgical innovation*, 19(3), 301-307.

[5] Gallo, L., Placitelli, A. P., & Ciampi, M. (2011, June). Controller-free exploration of medical image data: Experiencing the Kinect. In *2011 24th international symposium on computer-based medical systems (CBMS)* (pp. 1-6). IEEE.

[6] Gentner, D. R., & Grudin, J. (1996). Design models for computer-human interfaces. *Computer*, 29(6), 28-35.

[7] Jacob, M. G., Wachs, J. P., & Packer, R. A. (2013). Hand-gesture-based sterile interface for the operating room using contextual cues for the navigation of radiological images. *Journal of the American Medical Informatics Association*, 20(e1), e183-e186.

[8] Johnson, R., O'Hara, K., Sellen, A., Cousins, C., & Criminisi, A. (2011, May). Exploring the potential for touchless interaction in image-guided interventional radiology. In Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems (pp. 3323-3332).

[9] Lee, H. K., Chang, S. I., & Yoon, E. ACAPACITIVE PROXIMITY SENSOR IN DUAL IMPLEMENTATION WITH TACTILE IMAGING CAPABILITY ON A SINGLE FLEXIBLE PLATFORM FOR ROBOT ASSISTANT APPLICATIONS.

[10] Ruth, S. R. A., Feig, V. R., Kim, M. G., Khan, Y., Phong, J. K., & Bao, Z. (2021). Flexible fringe effect capacitive sensors with simultaneous high-performance contact and non-contact sensing capabilities. *Small Structures*, 2(2), 2000079.

[11] Sato, M., Poupyrev, I., & Harrison, C. (2012, May). Touché: enhancing touch interaction on humans, screens, liquids, and everyday objects. In Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems (pp. 483-492).

[12] Taylor, S., Keskin, C., Hilliges, O., Izadi, S., & Helmes, J. (2014, April). Type-hover-swipe in 96 bytes: A motion sensing mechanical keyboard. In Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems (pp. 1695-1704).

[13] Custo de auxiliar de fábrica. Disponível em: <<https://www.vagas.com.br/cargo/auxiliar-de-fabrica>>. Acesso em: 09/08/2024

[14] Custo de gerador de função ICL8038. Disponível em: <<https://www.huinfinito.com.br/gerador-funcoes/820-icl8038.html>>. Acesso em: 09/08/2024

[15] Custo do amplificador operacional CA3140. Disponível em: <<https://www.huinfinito.com.br/amplificador-operacional/23-ca3140.html>>. Acesso em: 09/08/2024

[16] Custo de uma hora parada de uma sala de cirurgia. Disponível em: <<https://medicinasa.com.br/custo-centro-cirurgico/>>. Acesso em: 09/08/2024

[17] Custo do Micro-processador Cortex M7. Disponível em: <<https://br.mouser.com/c/semiconductors/>>. Acesso em: 09/08/2024

[18] Tutorial de manufatura de circuito impresso em litografia, sitio consultado em 20/08/2024: <https://www.youtube.com/watch?v=cRCFGZxm0&t=79s>

[19] Imagem comparativa do Kinect e imagem obtida pelo sensor do aparelho, sitio consultado em 21/08/2024: <http://www.skygamers.co.za/2017/10/30/official-microsoft-kills-kinect/>

[20] Imagem ilustrativa de mouse comum, sitio consultado em 21/08/2024: <https://www.eletronicasantana.com.br/mouse-usb-m90-preto---logitech-09810/p>

[21] Imagem ilustrativa de dispositivo touch-screen, sitio consultado em 21/08/2024: <https://www.autocar.co.uk/car-news/technology/analysis-are-touchscreens-good-thing>

# APÊNDICES

## A – Resultados experimentais da placa de nomenclatura “C”

Essa tabela apresenta os resultados para a resposta do sensor a entrada de um sinal de 2 Vpp para diferentes frequências. O capacitor de realimentação foi de 221 pF. Na última coluna está o valor convertido de delta para capacitância em pF. As medidas foram realizadas a uma distância entre a mão e o sensor de 12 mm.

Sensor esquerdo –

Frequência (Hz)	Mínimo (V)	Máximo (V)	$\Delta V$ (Max-Min)	$\Delta pF$ (Max-Min)
100	0,40	0,90	0,50	54,2
141	0,50	1,00	0,50	54,2
200	0,60	1,44	0,84	91,0
283	0,84	3,90	3,06	331,5
400	1,04	4,00	2,96	320,7
566	1,33	7,12	5,79	627,3
800	1,50	7,70	6,20	671,7
1131	1,72	7,40	5,68	615,3
1600	1,84	7,50	5,66	613,2
2263	1,90	7,00	5,10	552,5
3200	2,00	7,70	5,70	617,5
4525	2,00	8,44	6,44	697,7
6400	2,00	8,60	6,60	715,0
9051	2,00	9,28	7,28	788,7
12800	2,00	8,72	6,72	728,0
18102	2,00	7,50	5,50	595,8
25600	2,00	7,48	5,48	593,7
36204	2,00	7,32	5,32	576,3
51200	2,00	5,68	3,68	398,7
72408	2,00	5,44	3,44	372,7
102400	2,00	5,20	3,20	346,7

Sensor direito –

Frequência (Hz)	Mínimo	Máximo	$\Delta V$ (Max-Min)	$\Delta pF$ (Max-Min)
100	0,50	1,80	1,30	141,7
141	0,65	2,40	1,75	190,7
200	0,70	3,20	2,50	272,4
283	1,00	3,50	2,50	272,4
400	1,10	6,00	4,90	534,0
566	1,40	5,70	4,30	468,6
800	1,62	7,40	5,78	629,9
1131	1,76	7,20	5,44	592,8
1600	1,88	7,50	5,62	612,4
2263	2,00	8,20	6,20	675,6
3200	2,00	7,40	5,40	588,4
4525	2,00	8,70	6,70	730,1
6400	2,00	7,10	5,10	555,8
9051	2,00	7,40	5,40	588,4
12800	2,00	7,40	5,40	588,4
18102	2,00	7,20	5,20	566,6
25600	2,00	7,28	5,28	575,4
36204	2,00	6,28	4,28	466,4
51200	2,00	5,68	3,68	401,0
72408	2,00	4,88	2,88	313,8
102400	2,00	4,10	2,10	228,8

## B – Resultados experimentais da placa de nomenclatura “D”

Essa tabela apresenta os resultados para a resposta do sensor a entrada de um sinal de 2 Vpp para diferentes frequências. O capacitor de realimentação foi de 221 pF. Na última coluna está o valor convertido de delta para capacitância em pF. As medidas foram realizadas a uma distância entre a mão e o sensor de 12 mm.

Sensor esquerdo –

Frequência (Hz)	Mínimo(V)	Máximo(V)	$\Delta V$ (Max-Min)	$\Delta pF$ (Max-Min)
100	2,00	2,76	0,76	94
200	3,40	4,44	1,04	128
400	5,68	8,40	2,72	336
800	7,68	11,40	3,72	459
1600	8,00	12,40	4,40	543
3200	7,28	12,00	4,72	583
6400	6,32	12,00	5,68	701
12800	5,28	10,00	4,72	583
25600	4,00	9,60	5,60	692
51200	3,20	7,00	3,80	469
102400	2,56	5,40	2,84	351
204800	2,12	3,92	1,80	222
409600	1,96	4,20	2,24	277

Observação: O número de frequências utilizadas aqui é menor, pois foi uma primeira leitura inicial para validar a placa, e seriam feitas mais leituras, mas a placa apresentou problemas antes que fosse possível.

## Sensor Direito –

Frequência (Hz)	Mínimo(V)	Máximo(V)	$\Delta V$ (Max-Min)	$\Delta pF$ (Max-Min)
100	1,00	2,00	1,00	124
200	2,14	3,66	1,52	188
400	3,20	5,60	2,40	296
800	4,28	8,40	4,12	509
1600	4,88	10,80	5,92	731
3200	4,62	9,00	4,38	541
6400	4,04	8,40	4,36	538
12800	2,76	7,60	4,84	598
25600	2,55	4,72	2,17	268
51200	2,20	4,00	1,80	222
102400	2,08	4,00	1,92	237
204800	2,00	3,40	1,40	173
409600	2,00	2,70	0,70	86

## C – Imagens do funcionamento do dispositivo como mouse

As próximas imagens mostram partes do vídeo que foi utilizado o dispositivo como mouse. O dispositivo foi configurado com uma tensão simétrica de 5 V para evitar danos ao Arduino. O Objetivo era deslocar o mouse até estar sobre o símbolo de igual e depois sobre a letra “a” da palavra amostragem.

```

1  #include <AbsMouse.h>
2
3  //usar na placa C com pinos
4
5  const int sensor1Pin = A0; // Pino para o primeiro sensor
6  const int sensor2Pin = A1; // Pino para o segundo sensor
7  const int n1 = 1; //multiplicador para o sensor A0
8  const int n2 = 2; //multiplicador para o sensor A1
9  const int ng = 1.6; //multiplicador sensibilidade geral
10 const int buttonPin = 2; // Pino para o botão
11
12 int screenWidth = 1920; // Ajuste esses valores de acordo com a resolução da sua tela
13 int screenHeight = 1080; // Ajuste esses valores de acordo com a resolução da sua tela
14
15 bool mouseEnabled = false; // Estado do controle do mouse
16
17 unsigned long samplePeriod = 100; // Período de amostragem em milissegundos
18 unsigned long lastSampleTime = 0;
19
20 void setup() {
21   pinMode(sensor1Pin, INPUT);
22   pinMode(sensor2Pin, INPUT);
23   pinMode(buttonPin, INPUT_PULLUP); // Use o resistor pull-up interno

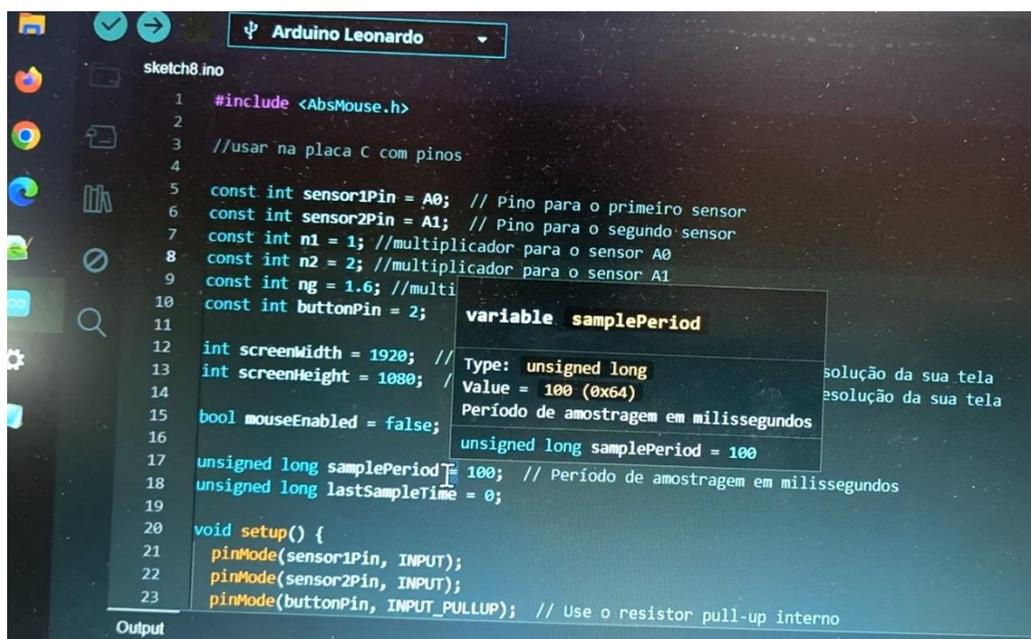
```

Output

```

Sketch uses 5762 bytes (20%) of program storage space. Maximum is 28672 bytes.
Global variables use 219 bytes (6%) of dynamic memory, leaving 2341 bytes for local variables. Maximum is 2560 bytes.
Connecting to programmer: .
Found programmer: Id = "CATERIN"; type = S
  | Software Version = 1.0; No Hardware Version given.
  | Programmer supports auto addr increment.
  | Programmer supports buffered memory access with buffersize=128 bytes.
  |
  | Programmer supports the following devices:
  | | Device code: 0x44

```



```

sketch8.ino
1  #include <AbsMouse.h>
2
3  //usar na placa C com pinos
4
5  const int sensor1Pin = A0; // Pino para o primeiro sensor
6  const int sensor2Pin = A1; // Pino para o segundo sensor
7  const int n1 = 1; //multiplicador para o sensor A0
8  const int n2 = 2; //multiplicador para o sensor A1
9  const int ng = 1.6; //multi
10 const int buttonPin = 2;
11
12 int screenWidth = 1920; //
13 int screenHeight = 1080; //
14
15 bool mouseEnabled = false;
16
17 unsigned long samplePeriod = 100; // Período de amostragem em milissegundos
18 unsigned long lastSampleTime = 0;
19
20 void setup() {
21   pinMode(sensor1Pin, INPUT);
22   pinMode(sensor2Pin, INPUT);
23   pinMode(buttonPin, INPUT_PULLUP); // Use o resistor pull-up interno

```

variable samplePeriod

```

Type: unsigned long
Value = 100 (0x64)
Período de amostragem em milissegundos
unsigned long samplePeriod = 100

```

Output

```

1  #include <AbsMouse.h>
2
3  //usar na placa C com pinos
4
5  const int sensor1Pin = A0; // Pino para o primeiro sensor
6  const int sensor2Pin = A1; // Pino para o segundo sensor
7  const int n1 = 1; //multiplicador para o sensor A0
8  const int n2 = 2; //multiplicador para o sensor A1
9  const int ng = 1.6; //multi
10 const int buttonPin = 2;
11
12 int screenWidth = 1920; //
13 int screenHeight = 1080; //
14
15 bool mouseEnabled = false;
16
17 unsigned long samplePeriod = 100; // Período de amostragem em milissegundos
18 unsigned long lastSampleTime = 0;
19
20 void setup() {
21   pinMode(sensor1Pin, INPUT);
22   pinMode(sensor2Pin, INPUT);
23   pinMode(buttonPin, INPUT_PULLUP); // Use o resistor pull-up interno

```

**variable samplePeriod**

Type: unsigned long

Value = 100 (0x64)

Período de amostragem em milissegundos

unsigned long samplePeriod = 100

resolução da sua tela  
resolução da sua tela