

**UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO  
ESCOLA DE ENGENHARIA DE SÃO CARLOS**

**Allan Alves Hota**

**Estudo de sensores capacitivos para detecção de variação  
no escoamento de fluidos e formação de vórtices**

**São Carlos**

**2019**



**Allan Alves Hota**

**Estudo de sensores capacitivos para detecção de variação  
no escoamento de fluidos e formação de vórtices**

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia Elétrica com Ênfase em Eletrônica, da Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, como parte dos requisitos para obtenção do título de Engenheiro Eletricista.

Orientador: Prof. Edson Gesualdo

**São Carlos  
2019**

AUTORIZO A REPRODUÇÃO TOTAL OU PARCIAL DESTE TRABALHO,  
POR QUALQUER MEIO CONVENCIONAL OU ELETRÔNICO, PARA FINS  
DE ESTUDO E PESQUISA, DESDE QUE CITADA A FONTE.

Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca Prof. Dr. Sérgio Rodrigues Fontes da  
EESC/USP com os dados inseridos pelo(a) autor(a).

H832e Hota, Allan Alves  
Estudo de sensores capacitivos para detecção de  
variação no escoamento de fluidos e formação de  
vórtices / Allan Alves Hota; orientador Edson Gesualdo.  
São Carlos, 2019.

Monografia (Graduação em Engenharia Elétrica com  
ênfase em Eletrônica) -- Escola de Engenharia de São  
Carlos da Universidade de São Paulo, 2019.

1. Sensor. 2. Capacitor. 3. Frequência. 4.  
Escoamento. 5. Vórtice. I. Título.

# FOLHA DE APROVAÇÃO

Nome: Allan Alves Hota

Título: “Estudo de sensores capacitivos para detecção de variação no escoamento de fluídos e formação de vórtices”

Trabalho de Conclusão de Curso defendido e aprovado

em 14 / 06 / 2019,

com NOTA 9,0 ( nao , zero ), pela Comissão Julgadora:

*Prof. Assistente Edson Gesualdo - Orientador - SEL/EESC/USP*

*Prof. Associado Ricardo Quadros Machado - SEL/EESC/USP*

*Mestre Elian João Agnoletto - Doutorando - SEL/EESC/USP*

Coordenador da CoC-Engenharia Elétrica - EESC/USP:  
Prof. Associado Rogério Andrade Flauzino



## RESUMO

HOTA, A. **Estudo de sensores capacitivos para detecção de variação no escoamento de fluidos e formação de vórtices.** 2019. 62p. Monografia (Trabalho de Conclusão de Curso) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2019.

Este trabalho tem como objetivo o estudo e desenvolvimento de um sistema para detecção de variações no escoamento de fluidos dentro de uma tubulação. Dentre a variedade de medidores de fluxo existentes, este sistema se baseia na detecção de vórtices utilizando a propriedade de capacitância. Buscou-se o desenvolvimento de um sistema com implementação simplificada e de baixo custo, utilizando-se para isto um oscilador de relaxação e um microcontrolador. Posteriormente, implementou-se um amplificador de transimpedância a fim de obter maior sensibilidade. Com isso, foi possível analisar a linearidade na medição do nível do fluido no sensor e na variação da concentração de substância. Também pôde-se observar a variação do sinal em relação ao escoamento do fluido pelo sensor.

**Palavras-chave:** Sensor. Capacitor. Frequência. Escoamento. Vórtice.





## **ABSTRACT**

HOTA, A. **Study of capacitive sensors for detection of fluid flow variation and vortex formation.** 2019. 62p. Monografia (Trabalho de Conclusão de Curso) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2019.

This work is aimed at studying and developing a system in order to detect fluid flow variations inside a pipeline. Among a variety of existing flow meters, this system is based on vortex detection using the propriety of capacitance. The development of a system with simplified implementation and low cost was sought, using for such purpose a relaxation oscillator and a micro-controller. Afterward, a transimpedance amplifier was implemented in order to obtain higher sensitivity. Thus, it was possible to analyze the linearity in the measurement of the fluid level inside the sensor and the variation of substance concentration. Also, it was possible to observe the signal variation in relation to the fluid flowing through the sensor.

**Keywords:** Sensor. Capacitor. Frequency. Flow. Vortex.



## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Capacitor com placas dispostas cilindricamente opostas. . . . .	21
Figura 2 – Ilustração do sensor a ser construído. . . . .	23
Figura 3 – Diagrama de blocos com circuito oscilador. . . . .	23
Figura 4 – Diagrama de blocos com circuito amplificador de transimpedância. . . . .	23
Figura 5 – Simulação FEMM com placas. . . . .	24
Figura 6 – Simulação FEMM com placas posicionadas internamente ao tubo de acrílico. . . . .	25
Figura 7 – Simulação FEMM com ar como dielétrico. . . . .	25
Figura 8 – Dimensões do capacitor com placas cilindricamente opostas. . . . .	26
Figura 9 – Gráfico capacitância <i>versus</i> distância entre as placas. . . . .	27
Figura 10 – Gráfico capacitância <i>versus</i> comprimento das placas. . . . .	28
Figura 11 – Gráfico capacitância <i>versus</i> constante dielétrica. . . . .	29
Figura 12 – Gráfico capacitância <i>versus</i> variação incremental de $z$ . . . . .	30
Figura 13 – Placas de cobre utilizadas no sensor. . . . .	31
Figura 14 – Construção do sensor capacitivo. . . . .	31
Figura 15 – Detalhe da fixação do PVC no centro do tubo. . . . .	32
Figura 16 – Esquema multivibrador astável com 555. . . . .	33
Figura 17 – Esquemático PIC e chaveadores. . . . .	35
Figura 18 – Diagrama em blocos no LabVIEW. . . . .	36
Figura 19 – Painel frontal LabVIEW. . . . .	36
Figura 20 – Bomba d’água utilizada. . . . .	37
Figura 21 – Montagem do sistema hidráulico. . . . .	38
Figura 22 – Circuito amplificador de transimpedância. . . . .	39
Figura 23 – Circuito amplificador completo. . . . .	40
Figura 24 – Osciloscópio Tektronix TDS 1002. . . . .	41
Figura 25 – Gerador de sinais B&K Precision 4011A. . . . .	41
Figura 26 – Fonte Minipa MPC-3003D. . . . .	41
Figura 27 – Implementação dos circuitos eletrônicos . . . . .	43
Figura 28 – Frequência <i>versus</i> nível de água . . . . .	45
Figura 29 – Frequência <i>versus</i> concentração de $Mg(OH)_2$ . . . . .	46
Figura 30 – Frequência <i>versus</i> nível de água com novo circuito. . . . .	48
Figura 31 – Resultado do experimento dinâmico com novo circuito. . . . .	49
Figura 32 – Sinal resultante para $C_x = 100pF$ . . . . .	50
Figura 33 – Sinal resultante para $C_x = 22pF$ . . . . .	50
Figura 34 – Sinal resultante na iminência de saturação para $C_x = 22pF$ . . . . .	51
Figura 35 – Resultado com o tubo vazio. . . . .	52

Figura 36 – Resultado com o tubo cheio. . . . .	52
Figura 37 – Filtro <i>Notch</i> . . . . .	53
Figura 38 – Sinal resultante após filtro <i>Notch</i> . . . . .	54
Figura 39 – Sinal após retificação. . . . .	54

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Valores de constantes dielétricas . . . . .	21
Tabela 2 – Frequência medida com o microcontrolador e osciloscópio . . . . .	44
Tabela 3 – Circuito oscilador - enchendo sensor com água . . . . .	45
Tabela 4 – Concentração de $Mg(OH)_2$ . . . . .	46
Tabela 5 – Experimento dinâmico com duas placas opostas . . . . .	47
Tabela 6 – Experimento dinâmico com placas associadas em paralelo . . . . .	47
Tabela 7 – Circuito amplificador - enchendo sensor com água . . . . .	48
Tabela 8 – Sensor acoplado à tubulação . . . . .	51



## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

CMOS	Complementary Metal Oxide Semiconductor
CSV	Comma-separated values
FEMM	Finite Element Method Magnetics
IoT	Internet of Things
LabVIEW	Laboratory Virtual Instrument Engineering Workbench
PIC	Peripheral Interface Controller
PVC	Polyvinyl chloride
PWM	Pulse Width Modulation
SI	Sistema Internacional de unidades
USB	Universal Serial Bus
VISA	Virtual Instrument Software Architecture





## SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	17
2	EMBASAMENTO TEÓRICO	19
2.1	Vazão	19
2.2	Capacitância	20
3	MATERIAIS E MÉTODOS	23
3.1	Simulação	24
3.2	Análise teórica da capacitância	25
3.3	Sensor capacitivo	30
3.4	Oscilador de relaxação	32
3.4.1	Multivibrador astável	32
3.5	Circuito chaveador	33
3.6	Microcontrolador PIC	34
3.7	Visualização e coleta de dados	35
3.8	Análise estática	36
3.9	Montagem hidráulica	37
3.10	Análise dinâmica	38
3.11	Amplificador de transimpedância	38
4	RESULTADOS	43
4.1	Montagem experimental	43
4.2	Oscilador	43
4.3	Aquisição de dados	44
4.4	Experimento estático	44
4.5	Experimento dinâmico	47
4.6	Amplificador de transimpedância	47
5	CONCLUSÃO	55
	REFERÊNCIAS	57
	APÊNDICES	59
	APÊNDICE A – CÓDIGO DO PIC PARA CHAVEAMENTO E TRANSMISSÃO DE DADOS VIA USB	61



## 1 INTRODUÇÃO

Com a robotização e automação de processos cada vez mais presentes em vários setores da indústria, os sensores se tornam essenciais, possibilitando o controle mais preciso e confiável, melhorando a qualidade e reduzindo os custos e desperdícios.

A indústria agrícola, por exemplo, é um dos setores que vem se expandindo muito ultimamente em termos de tecnologia (REDAÇÃO AGRISHOW, 2019), e há anos que tem despertado interesse no desenvolvimento de trabalhos relacionados à área, como medição da concentração de herbicidas (RISSARDI, 2009) e medição da umidade do solo com sensores capacitivos (SCHUGURENSKY; CAPRARO, 2008). Um dos aspectos relevantes no setor é relacionado à utilização de agrotóxicos. O seu uso no Brasil deve ser rigorosamente controlado, evitando a contaminação do solo, da água e do ar.

A medição de fluxo é de grande importância para controlar o uso de substâncias, monitorar e detectar anomalias na tubulação em tempo real, otimizando assim os processos relacionados às tubulações aplicadas. Existem diversos tipos de medidores comerciais de fluxo disponíveis, como medidores magnéticos, ultrassônicos, de turbina e *Vortex*. Grande parte desses medidores são de complexa construção, tornando o custo elevado. Um dos tipos mais utilizados é o de turbina, por ser um dos mais simples, porém com a desvantagem de apresentar maior restrição no escoamento do fluido.

O presente trabalho teve como objetivo apresentar o estudo de um sensor capacitivo com a finalidade de detectar e medir o nível do fluido em reservatórios, concentração de substâncias a partir das propriedades dielétricas, e escoamento de fluidos através da formação de vórtices na tubulação. O sensor do tipo capacitivo foi escolhido por possuir um funcionamento simples, de baixa interferência no escoamento e por ser de baixo custo.

Para isso, utilizou-se os princípios de capacitância, programas para simulação e visualização de dados, e circuitos integrados para a geração e processamento de sinais. Inicialmente foi montado um circuito oscilador de relaxação para a medição da capacitância e posteriormente foi apresentado um circuito amplificador de transimpedância como substituto. Também, escolheu-se utilizar um microcontrolador PIC pela sua versatilidade e disponibilidade de comunicação USB.



## 2 EMBASAMENTO TEÓRICO

Neste capítulo serão apresentados os conceitos que fundamentam o desenvolvimento deste projeto.

### 2.1 Vazão

Vazão tem como definição a quantidade de fluido que atravessa uma seção em um intervalo de tempo. Pode ser expressa tanto em quantidade volumétrica quanto mássica. A vazão volumétrica no Sistema Internacional de unidades (SI) é expressa em metros cúbicos por segundo ( $m^3/s$ ) e a mássica em kilogramas por segundo ( $kg/s$ ). A medição da vazão pode ser realizada a partir de diferentes técnicas, como o tubo de Pitot, tubo venturi, turbinas, ultrassom e *Vortex*.

A técnica *Vortex* consiste na geração de vórtices através de obstáculos posicionados no escoamento do fluido. Então, um sensor percebe essas perturbações e gera um sinal que é proporcional à vazão. Este sensor pode ser do tipo piezoelétrico, óptico, magnético, ultrassônico, capacitivo, dentre outros.

A formação de vórtices depende da velocidade de escoamento do fluido e da dimensão do obstáculo posicionado na tubulação. Em velocidades baixas, não há formação de vórtices, pois as linhas fluidas acompanham a forma do obstáculo. À medida que se aumenta a velocidade, as linhas não conseguem mais acompanhar e acabam provocando a formação de velocidades locais elevadas, de baixa pressão e com tendência de reversão de direção. Em velocidades médias, o vórtice mantém em uma posição fixa, mas acaba aumentando e se separando do obstáculo a partir de um certo limiar de velocidade (DELMEE, 1982).

Para medir a frequência de formação de vórtices, pode-se aplicar o número de Strouhal para relacionar com a velocidade de escoamento do fluido, conforme a equação:

$$S = \frac{fD}{V} \quad (2.1)$$

onde:

$S$  é o número de Strouhal, sem dimensões;

$f$  é a frequência de sucessão de vórtices;

$D$  é uma variável da geometria do obstáculo;

$V$  é a velocidade do fluido.

Como  $S$  é uma constante e  $D$  é um valor constante uma vez escolhido o obstáculo, a frequência de formação de vórtices é diretamente proporcional à velocidade de escoamento

do fluido (DELMEE, 1982).

## 2.2 Capacitância

O capacitor é constituído de duas placas metálicas separadas por um isolante elétrico, conhecido como dielétrico, e que é capaz de armazenar energia na forma de campo elétrico.

A capacitância relaciona a quantidade de carga acumulada e a diferença de potencial entre as placas do capacitor (WALKER; RESNICK; HALLIDAY, 2009)

$$C = \frac{Q}{V} \quad (2.2)$$

cuja unidade de medida no SI é *farads* (F), em que um *farad* é definido como um *coulomb* por *volt*.

Por ser uma constante de proporcionalidade, a capacitância independe da carga e da diferença de potencial, sendo determinada apenas pela geometria e tipo de dielétrico.

Considerando um capacitor de placas planas e paralelas, pode-se expressar a relação da capacitância com as propriedades geométricas e do dielétrico:

$$C = \frac{k \cdot \epsilon_0 \cdot A}{d} \quad (2.3)$$

em que,  $A$  representa a área da superfície da placa,  $d$  a separação entre as placas,  $\epsilon_0$  é a permissividade do vácuo e  $k$  a constante dielétrica do material.

Ainda, para placas dispostas cilindricamente opostas conforme a Figura 1, pode-se calcular a capacitância através da seguinte equação (MANAF; TRIYANA, 2016):

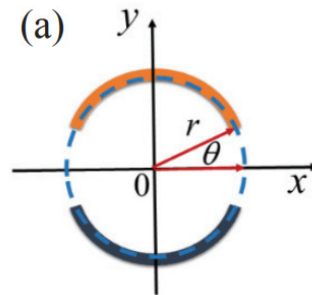
$$C = \frac{2 \cdot k \cdot z \cdot \epsilon_0}{\pi} \cdot \ln \frac{\sin \theta}{1 - \cos \theta} \quad (2.4)$$

onde  $z$  é o comprimento da placa e  $\Theta$  é o ângulo relacionado à separação entre as bordas das placas, como indicado na Figura 1.

O ângulo  $\Theta$  depende da largura  $L$  da placa e do diâmetro  $d$  do cilindro:

$$\Theta = \frac{\pi}{2} - \frac{L}{d} \quad (2.5)$$

Figura 1: Capacitor com placas dispostas cilindricamente opostas.



Fonte: Manaf e Triyana (2016)

A tabela a seguir apresenta as constantes dielétricas de alguns materiais.

Tabela 1: Valores de constantes dielétricas

Material	Constante dielétrica [ $k$ ]
Ar (1 atm)	1,00054
Poliestireno	2,6
Papel	3,5
Óleo de transformador	4,5
Pirex	4,7
Mica rubi	5,4
Porcelana	6,5
Silício	12
Germânio	16
Etanol	25
Água (20°C)	80,4
Água (25°C)	78,5
Titânia	130
Titanato de estrôncio	310

Fonte: Walker, Resnick e Halliday (2009)



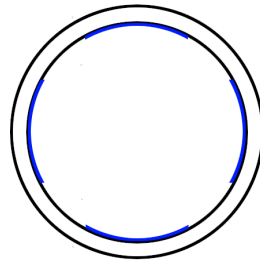


### 3 MATERIAIS E MÉTODOS

Nesta seção serão apresentados os materiais, recursos e a metodologia empregados na implementação do projeto, iniciando pela simulação do comportamento do sistema, descrevendo a construção do sensor, montagem dos circuitos eletrônicos, interface para coleta dos dados, montagem do sistema hidráulico e experimentos realizados.

O sensor a ser construído consiste em placas metálicas posicionadas na borda de um tubo de acrílico cilíndrico, representados na Figura 2.

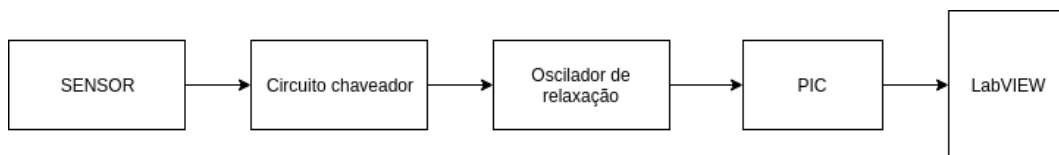
Figura 2: Ilustração do sensor a ser construído.



Fonte: Autoria própria.

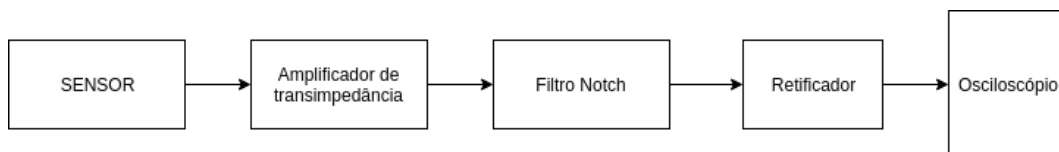
O sistema inicialmente foi montado de acordo com o diagrama na Figura 3. Posteriormente, foi montado um segundo circuito conforme o diagrama da Figura 4.

Figura 3: Diagrama de blocos com circuito oscilador.



Fonte: Autoria própria.

Figura 4: Diagrama de blocos com circuito amplificador de transimpedância.



Fonte: Autoria própria.

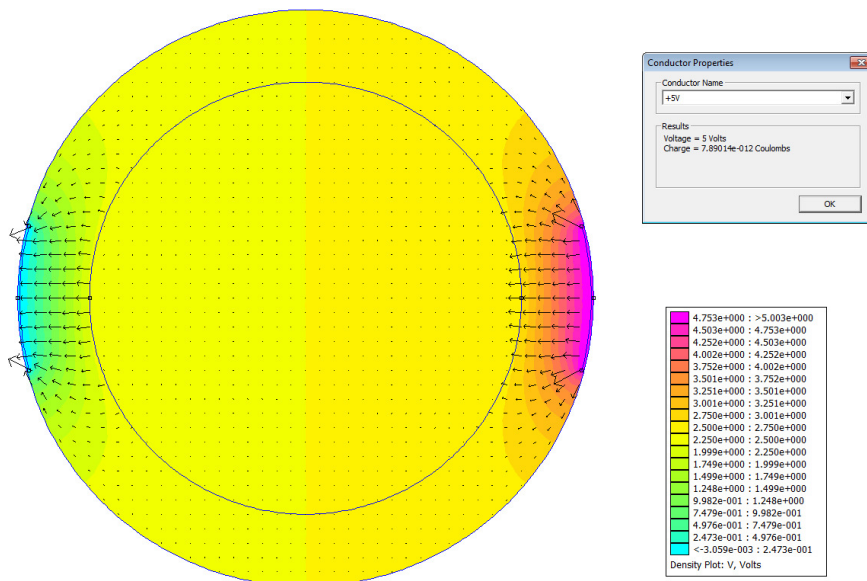
### 3.1 Simulação

A simulação do sensor capacitivo foi realizada através do software FEMM, *Finite Element Method Magnetics*, um software gratuito, de código aberto e baixo consumo de recursos computacionais para a solução de problemas em duas dimensões e axissimétricos de eletromagnetismo e eletrostática utilizando o método de elementos finitos (MEEKER, 2013). Esta ferramenta é comumente utilizada nas áreas de ciência e engenharia.

A simulação consistiu em analisar o comportamento das linhas de campo elétrico entre as placas metálicas posicionadas externa e internamente ao tubo de acrílico, e estimar o valor da capacitância a partir do valor da carga elétrica obtida no FEMM.

Na Figura 5, é exibida a simulação das placas posicionadas externamente ao tubo utilizando uma constante dielétrica. Pode-se perceber que as linhas de campo praticamente não conseguem atravessar o acrílico.

Figura 5: Simulação FEMM com placas.



Fonte: Autoria própria.

Já na Figura 6, é possível notar a diferença quando as placas são posicionadas no interior do tubo.

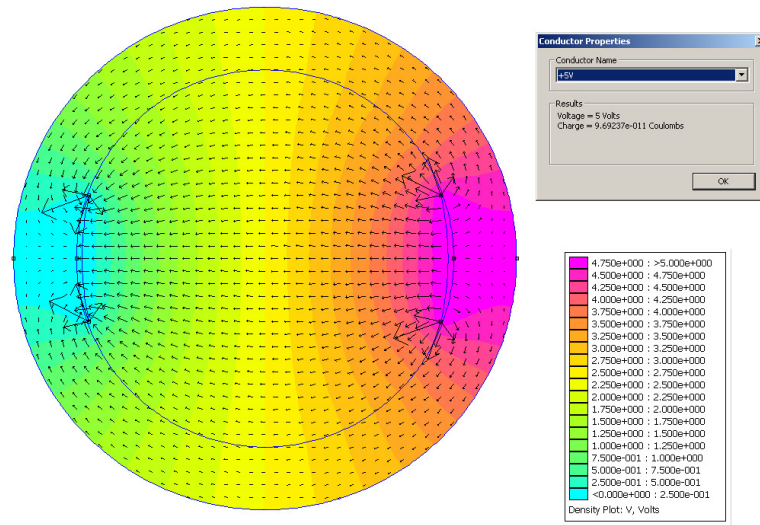
Em seguida, repetiu-se a simulação alterando o dielétrico do meio. No caso, utilizou-se ar.

As capacitâncias estimadas para a água e o ar a partir da equação 2.2 são:

$$C_{\text{água}} = \frac{9,692 \times 10^{-11}}{5} = 19,38 \text{ pF}$$

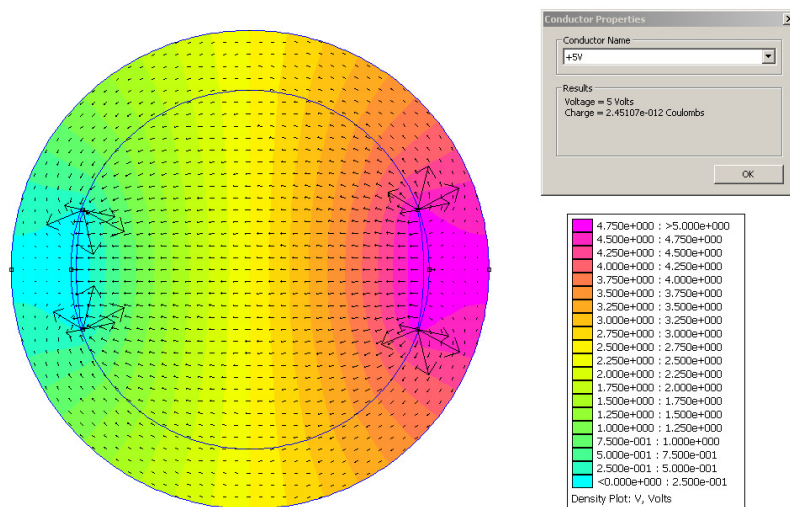
$$C_{\text{ar}} = \frac{2,451 \times 10^{-12}}{5} = 0,49 \text{ pF}$$

Figura 6: Simulação FEMM com placas posicionadas internamente ao tubo de acrílico.



Fonte: Autoria própria.

Figura 7: Simulação FEMM com ar como dielétrico.



Fonte: Autoria própria.

### 3.2 Análise teórica da capacitância

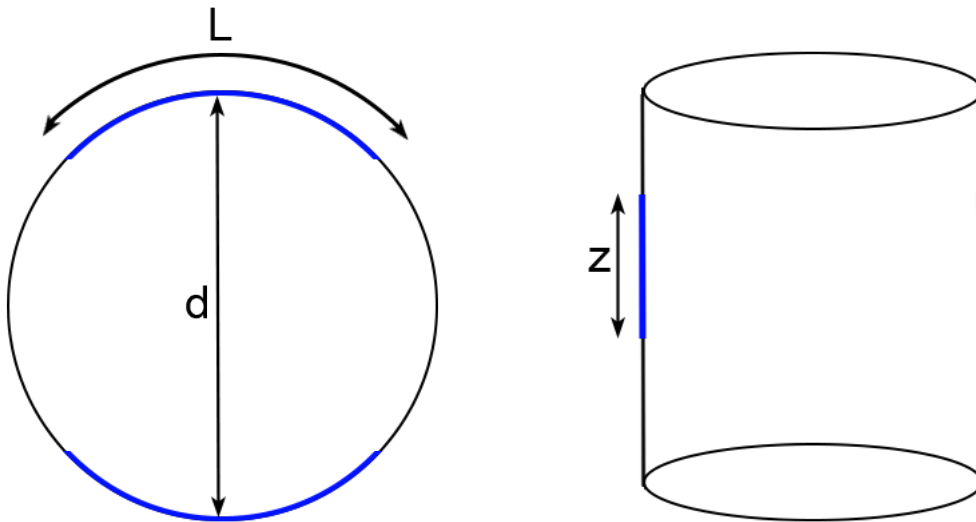
Com o propósito de obter o comportamento da capacitância teórica para diferentes parâmetros de um capacitor, foram construídos quatro diferentes gráficos, baseando-se nas equações 2.4 e 2.5.

Inicialmente, foram adotados os seguintes valores para os parâmetros da equação:

- Largura da placa ( $L$ ):  $15\text{mm}$
- Comprimento da placa ( $z$ ):  $50\text{mm}$
- Distância entre placas ( $d$ ):  $30\text{mm}$
- Constante dielétrica ( $k$ ): 80
- Permissividade do vácuo ( $\epsilon_0$ ):  $8.85 \times 10^{-12}$

A Figura 8 ilustra a disposição e as dimensões das placas.

Figura 8: Dimensões do capacitor com placas cilíndricamente opostas.

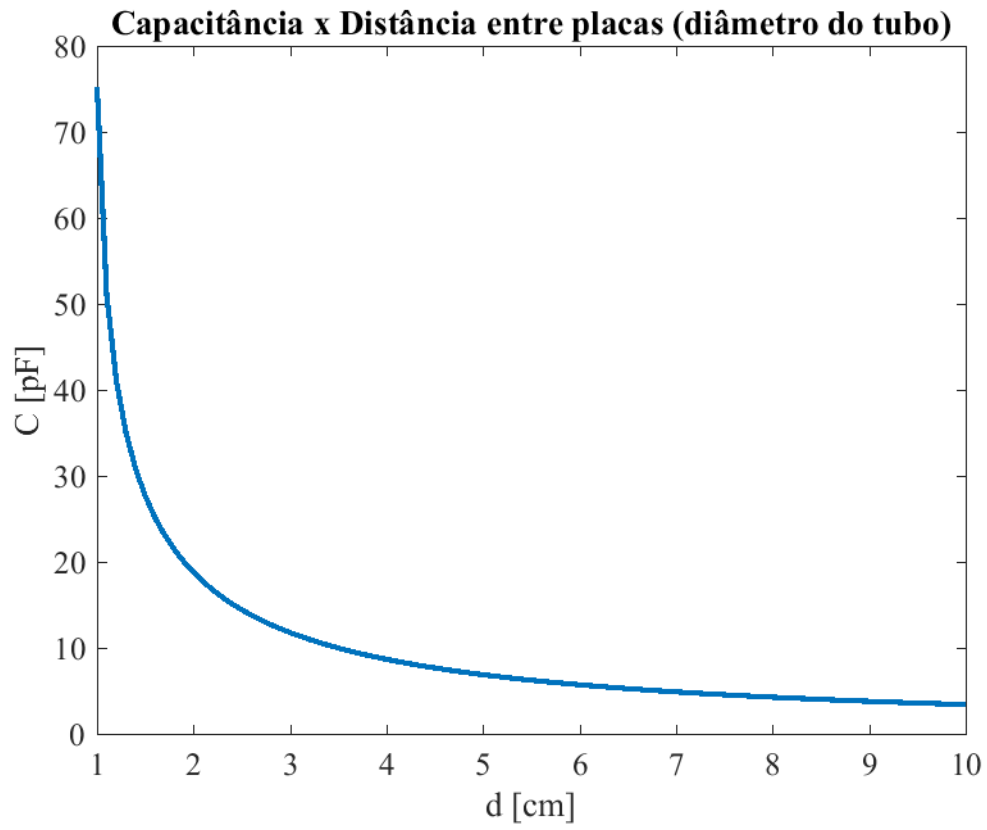


Fonte: Autoria própria.

1. Variação da distância entre as placas:

Neste gráfico, variou-se  $d$  entre 1 e 10 centímetros.

Figura 9: Gráfico capacitância *versus* distância entre as placas.

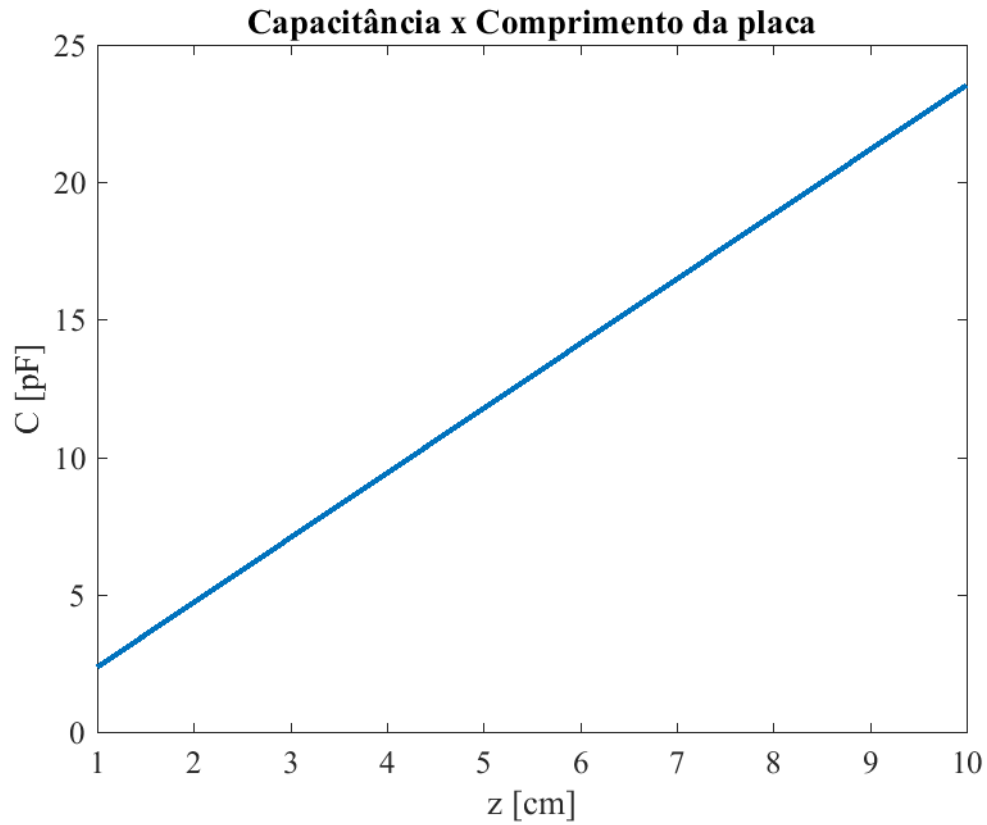


Fonte: Autoria própria.

## 2. Variação do comprimento das placas:

Os comprimentos das placas foram variados entre 1 e 10 centímetros, mantendo-se os outros parâmetros constantes.

Figura 10: Gráfico capacitância *versus* comprimento das placas.

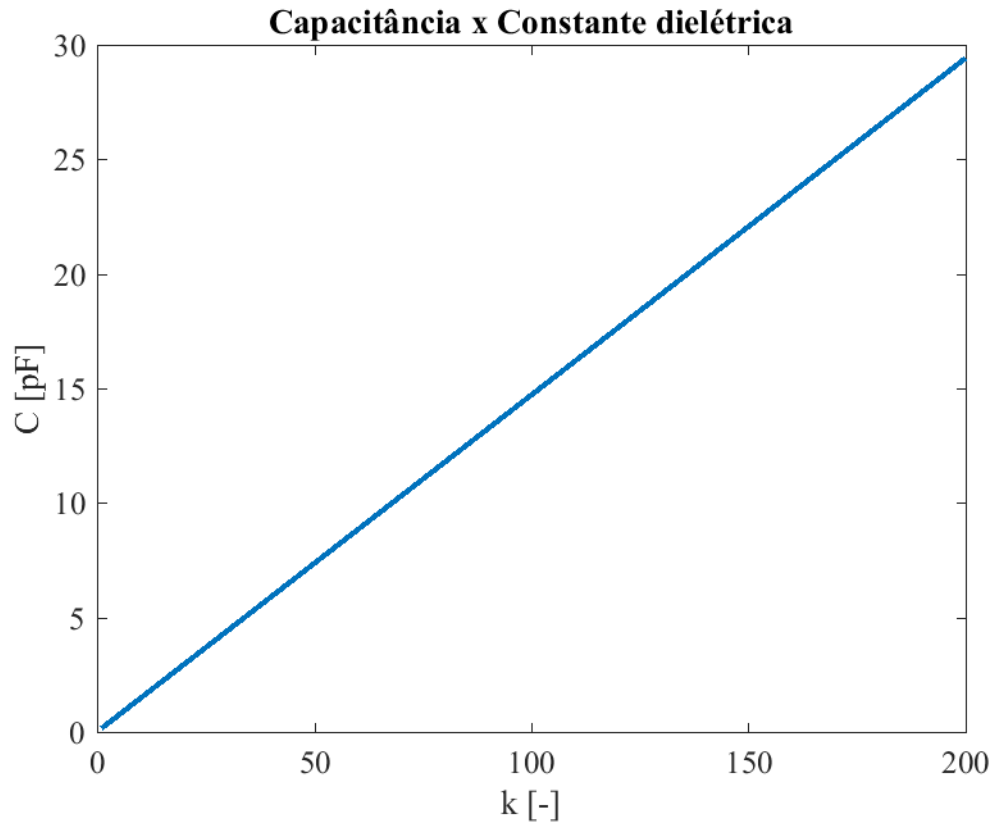


Fonte: Autoria própria.

### 3. Variação da constante dielétrica:

Neste gráfico obteve-se os valores de capacitâncias para os valores de  $k$  entre 1 e 200.

Figura 11: Gráfico capacitância *versus* constante dielétrica.

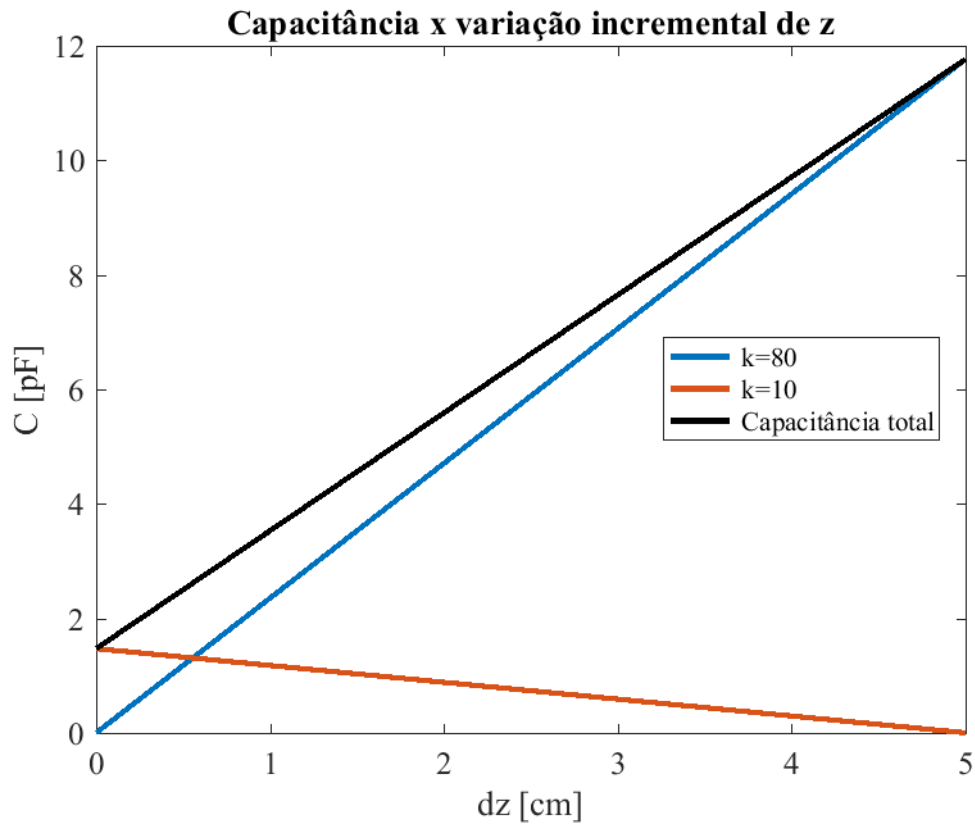


Fonte: Autoria própria.

#### 4. Variação incremental da proporção entre dois dielétricos diferentes:

Por fim, foram plotadas as curvas dos valores de capacitâncias variando-se a proporção de dois dielétricos distintos entre as placas, simulando o preenchimento gradual das placas. A capacitância resultante é a associação de dois capacitores diferentes em paralelo, em que um deles tem o comprimento de suas placas aumentando gradualmente e o outro diminuindo na mesma proporção. O gráfico mostra tanto o valor individual das capacitâncias quanto o valor da associação.

Figura 12: Gráfico capacitância *versus* variação incremental de  $z$ .



Fonte: Autoria própria.

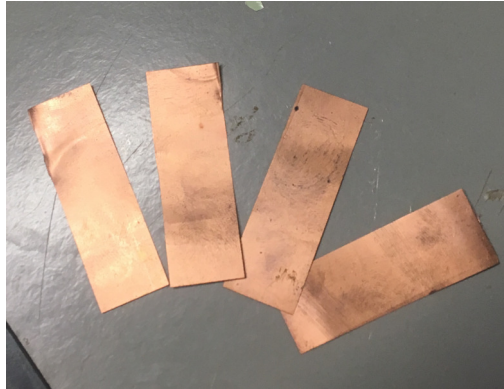
### 3.3 Sensor capacitivo

Para a construção do sensor capacitivo, foi utilizado como base um tubo de acrílico com diâmetro externo de  $40\text{mm}$  e espessura de  $5\text{mm}$ . O acrílico, por ser transparente, facilita a construção e a visualização da passagem do fluido pelo sensor.

Foram utilizadas quatro placas finas de cobre com dimensões de  $50\text{mm}$  de comprimento por  $15\text{mm}$  de largura para a composição dos capacitores.



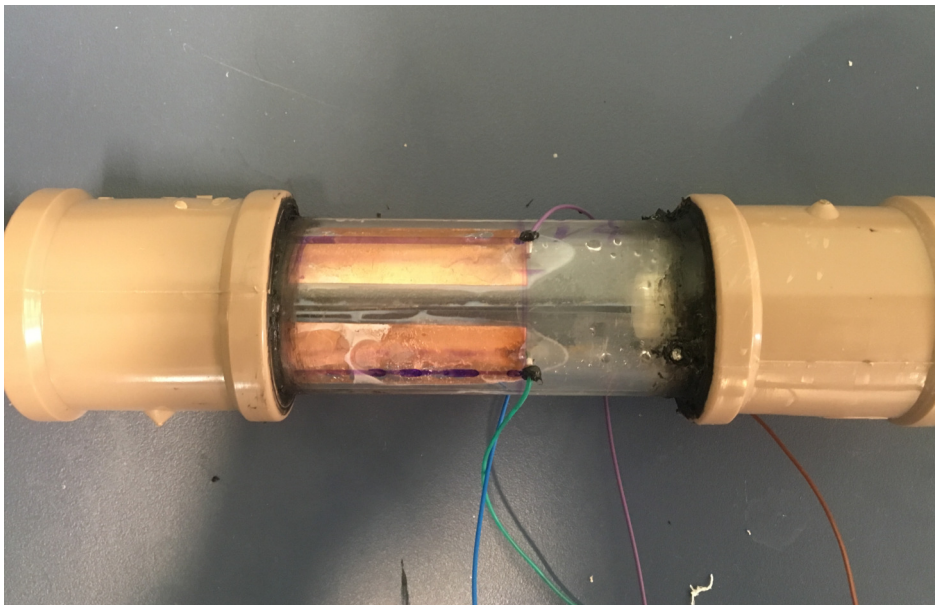
Figura 13: Placas de cobre utilizadas no sensor.



Fonte: Autoria própria.

Após a soldagem de um fio em cada placa de cobre, estas foram coladas igualmente espaçadas no interior do tubo com cola instantânea à base de cianoacrilato. Os fios foram passados por pequenos furos próximos às placas e vedados com silicone.

Figura 14: Construção do sensor capacitivo.



Fonte: Autoria própria.

Também foi utilizado uma pequena peça cilíndrica de PVC, fixada ao centro da tubulação com três finos parafusos. Esta peça tem como finalidade a formação de vórtices na tubulação.

Figura 15: Detalhe da fixação do PVC no centro do tubo.



Fonte: Autoria própria.

### 3.4 Oscilador de relaxação

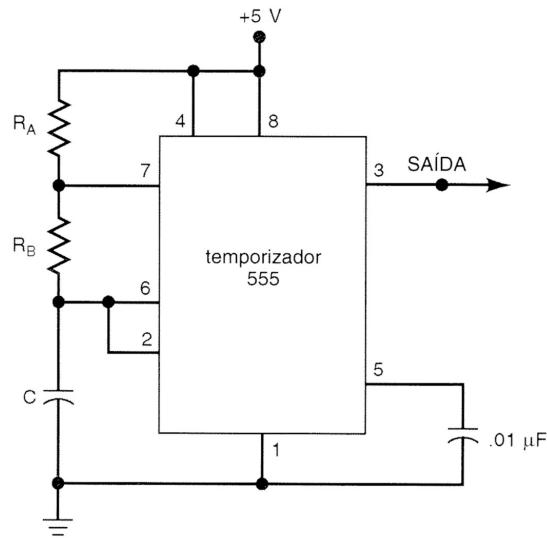
Neste projeto foi projetado um oscilador de relaxação com a finalidade de medir a variação da capacitância do sensor. Osciladores de relaxação são circuitos capazes de gerar um sinal com frequência controlada pela carga e descarga de um capacitor. Dessa forma, é possível relacionar o valor da frequência do sinal com a capacitância do sensor construído.

#### 3.4.1 Multivibrador astável

O multivibrador astável é um tipo de circuito gerador de *clock* que não possui estados estáveis, alternando indefinidamente entre seus estados em intervalos determinados de tempo.

Um multivibrador astável pode ser montado utilizando um 555, conforme a configuração da Figura 16.

Figura 16: Esquema multivibrador astável com 555.



Fonte: [Tocci, Widmer e Moss \(2007\)](#)

A frequência de oscilação, o tempo no estado alto e o tempo no estado baixo podem ser calculados a partir das seguintes equações:

$$f = \frac{\sqrt{2}}{(R_A + 2R_B)C} \quad (3.1)$$

$$T_H = \frac{(R_A + R_B)C}{\sqrt{2}} \quad (3.2)$$

$$T_L = \frac{R_B C}{\sqrt{2}} \quad (3.3)$$

O multivibrador astável foi construído conforme a Figura 16. O LM555 é um circuito integrado muito estável e preciso para a geração de atraso de tempo ou oscilações ([TEXAS INSTRUMENTS, 2000. Revised in 2015](#)).

A capacitância  $C$  é uma associação de um capacitor comercial em paralelo com o sensor. Essa associação se faz necessária porque o valor da capacitância do sensor é baixo. Os valores do capacitor comercial juntamente com os resistores foram ajustados de acordo com as equações 3.1, 3.2 e 3.3 a fim de manter o valor da frequência de saída na faixa de  $100kHz$ .

### 3.5 Circuito chaveador

Para realizar as medições entre todas as combinações possíveis das placas do sensor, foi necessário implementar um circuito chaveador para selecionar um par de placas de

cada vez. Assim, para um total de quatro placas existem seis combinações totais possíveis, sendo duas combinações entre placas opostas e quatro entre placas adjacentes. Para isso, foram utilizados dois multiplex 74HC4051 em conjunto com um microcontrolador PIC.

O circuito integrado 4051 é um chaveador analógico de 8 canais controlado digitalmente. Utiliza a tecnologia CMOS e possui baixo consumo de energia comparado à esta tecnologia de circuitos integrados (TEXAS INSTRUMENTS, 2002. Revised in 2015).

### 3.6 Microcontrolador PIC

O PIC 18F4550 foi utilizado com a finalidade de controlar os sinais de chaveamento das placas do sensor capacitivo, calcular o valor da frequência a partir da saída do circuito oscilador e transmitir os dados via USB.

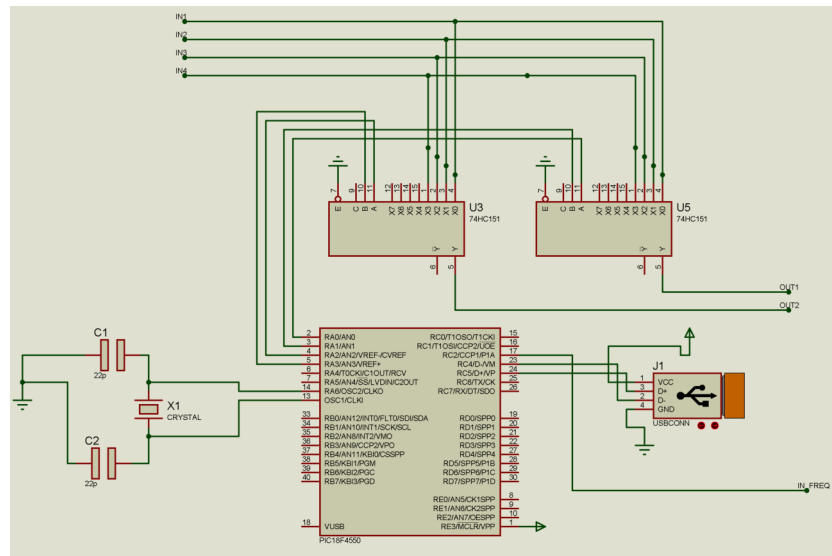
Este microcontrolador apresenta alta performance computacional, durabilidade, menor consumo de energia, possui interface USB 2.0 e diferentes opções de oscilador, incluindo o uso de cristal (MICROCHIP TECHNOLOGY INC., 2009).

Utilizou-se a configuração com um cristal externo para obter uma frequência de  $48MHz$  e, com isso, utilizar a interface USB com sua maior velocidade.

Para o cálculo da frequência do sinal lido, utiliza-se o módulo CCP (*Capture, Compare, PWM*) do PIC, em que foi configurado para realizar a captura a cada 16 pulsos contados, juntamente com um timer para cronometrar o intervalo do tempo.

O esquemático de conexão do PIC juntamente com os chaveadores são representados na Figura 17, em que as entradas IN1, IN2, IN3 e IN4 são os fios relativos às placas do sensor, e as saídas OUT1 e OUT2 são as conexões da combinação resultante.

Figura 17: Esquemático PIC e chaveadores.

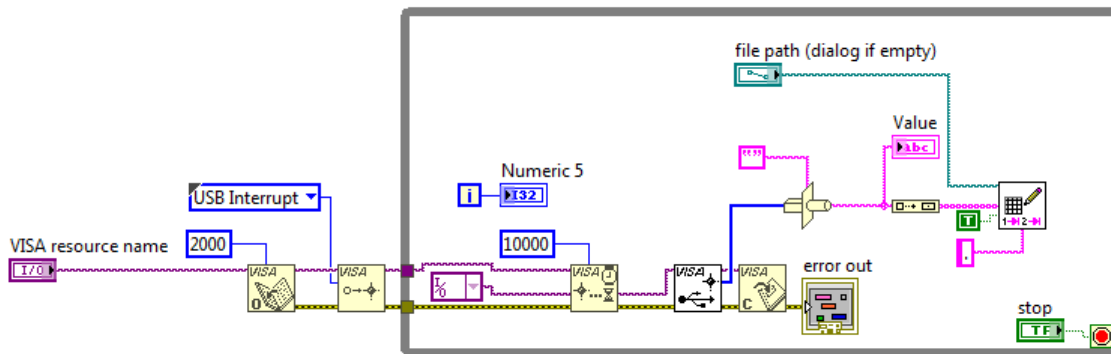


Fonte: Autoria própria.

### 3.7 Visualização e coleta de dados

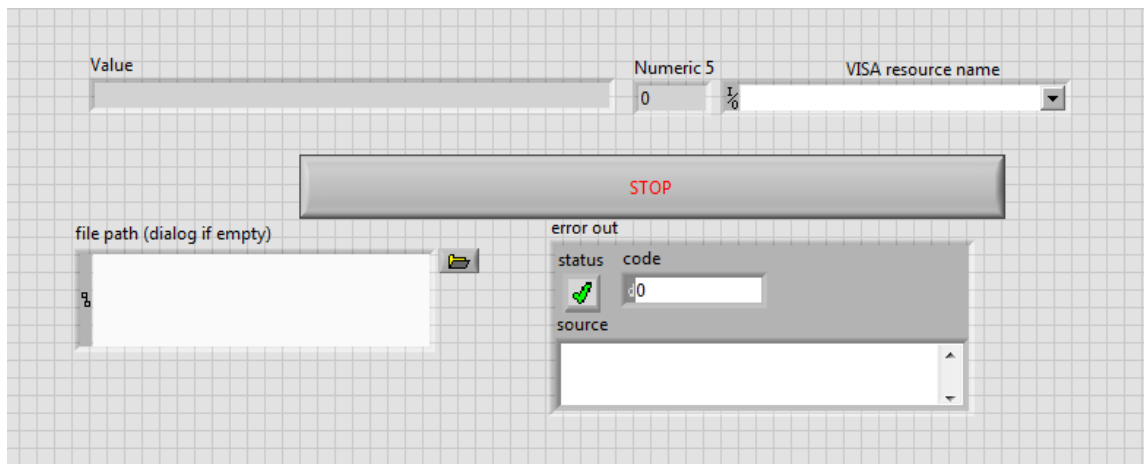
Os dados transmitidos via USB do PIC foram coletados utilizando o software LabVIEW, abreviação de *Laboratory Virtual Instrument Engineering Workbench*, uma plataforma de ambiente de desenvolvimento que utiliza uma linguagem de programação gráfica. Realizar medições e automatizar processos são as principais aplicações desta ferramenta. A programação é realizada via diagrama de blocos, e a interface é exibida em um painel frontal. Os valores lidos do par de sensor e da frequência são armazenados em um arquivo CSV. O diagrama de blocos montado para este trabalho é mostrado na Figura 18. A comunicação com o PIC é realizada através do driver VISA (*Virtual Instrument Software Architecture*) do fabricante, e os dados são obtidos via interrupção. Também construiu-se o painel frontal (Figura 19), onde é possível escolher a interface do microcontrolador, o diretório para gravar os dados e também visualizar os valores obtidos em tempo real.

Figura 18: Diagrama em blocos no LabVIEW.



Fonte: Autoria própria.

Figura 19: Painel frontal LabVIEW.



Fonte: Autoria própria.

### 3.8 Análise estática

Neste experimento realizaram-se medições com o sensor capacitivo fechado em uma das extremidades a fim de constatar a variação da frequência em relação à proporção de ar e água entre as placas. Também verificou-se a variação em relação à densidade do fluido, diluindo-se Hidróxido de magnésio na água proporcionalmente com o auxílio de uma seringa.

### 3.9 Montagem hidráulica

A fim de realizar as medições com o fluido em movimento, foi utilizada uma bomba d'água periférica da marca Vonder, modelo BPV375. Esta bomba é bivolt, possui uma potência de 540/480 Watts e vazão máxima de 33 litros por minuto.

Figura 20: Bomba d'água utilizada.



Fonte: Autoria própria.

Foram utilizados canos de PVC de 3/4" e um registro simples para realizar o controle da vazão de água que passa pelo sensor.

Figura 21: Montagem do sistema hidráulico.



Fonte: Autoria própria.

### 3.10 Análise dinâmica

Após a montagem da parte hidráulica, foram realizadas as medições da capacitância entre as placas com a água em movimento. Através do registro, variou-se a velocidade de escoamento da água e, conseqüentemente, a frequência de ocorrência de vórtices dentro da tubulação.

### 3.11 Amplificador de transimpedância

Posteriormente, o oscilador de relaxação foi substituído por um amplificador de transimpedância com a finalidade de aumentar a sensibilidade do circuito para a detecção de uma menor variação da capacitância.

O amplificador de transimpedância é um circuito conversor de corrente para tensão implementado com amplificadores operacionais. O circuito implementado consiste em três módulos: o primeiro é o amplificador de transimpedância, em que é aplicado um sinal  $V_e$

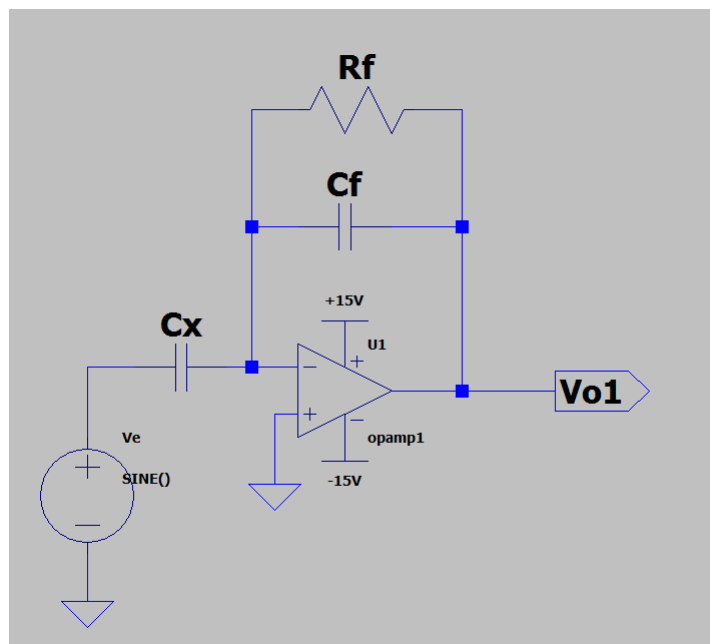


de corrente alternada (C.A.) sobre o sensor cuja capacitância é  $C_x$ , e o sinal de saída  $V_{o1}$  do amplificador é uma tensão diretamente proporcional à  $C_x$ , com um ganho ajustado pelo capacitor de realimentação  $C_f$  do amplificador operacional (DEMORI; FERRARI; STRAZZA, 2009).

A relação entre o sinal de entrada e saída é dada por:

$$V_{o1} = -\frac{C_x}{C_f} \times V_e \quad (3.4)$$

Figura 22: Circuito amplificador de transimpedância.



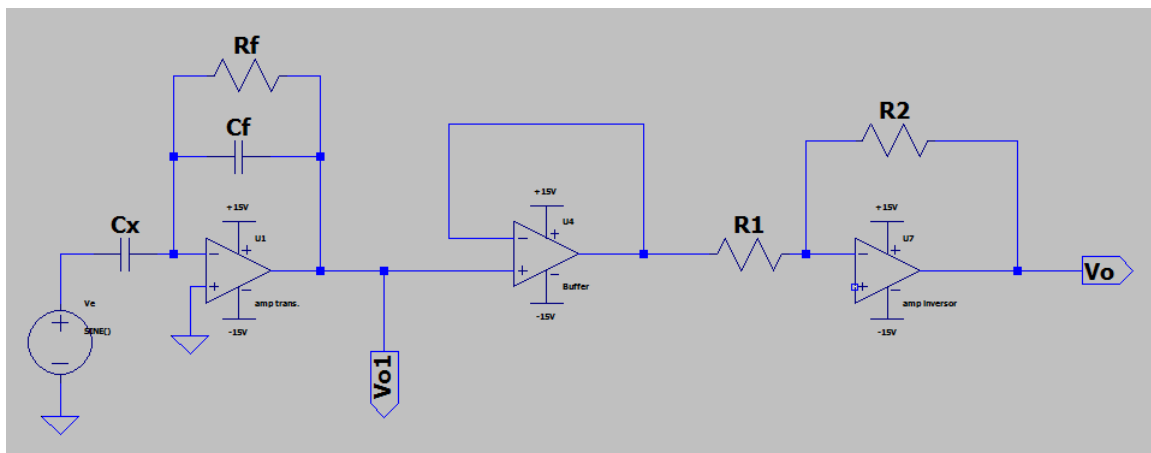
Fonte: Autoria própria.

O segundo módulo consiste em um *buffer* para a isolação entre os circuitos, e o último módulo consiste em um amplificador inversor a fim de ajustar o ganho do sinal, dado pela razão entre os resistores de realimentação e de entrada.

Dessa forma, a saída final do circuito é dada pela equação:

$$V_o = \frac{C_x}{C_f} \times \frac{R_2}{R_1} \times V_e \quad (3.5)$$

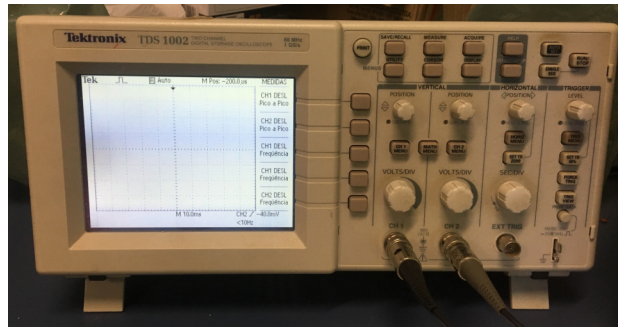
Figura 23: Circuito amplificador completo.



Fonte: Autoria própria.

Para realizar os experimentos com este circuito, foram utilizados um osciloscópio digital da marca Tektronix modelo TDS 1002 com 2 canais, um gerador de sinais B&K Precision modelo 4011A e uma fonte de bancada Minipa modelo MPC-3003D, que possui duas fontes independentes.

Figura 24: Osciloscópio Tektronix TDS 1002.



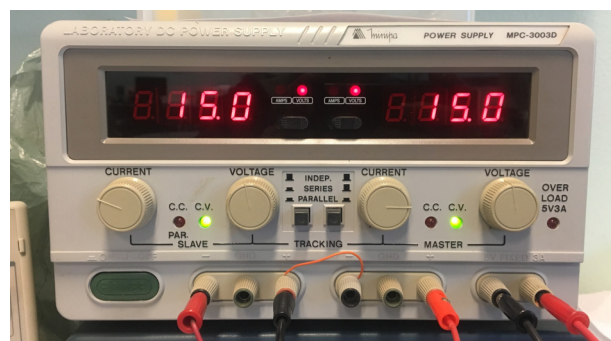
Fonte: Autoria própria.

Figura 25: Gerador de sinais B&K Precision 4011A.



Fonte: Autoria própria.

Figura 26: Fonte Minipa MPC-3003D.



Fonte: Autoria própria.

Então, repetiu-se o experimento estático, enchendo o tubo com água gradualmente e, em seguida, realizou-se a medição com a água em circulação, variando a vazão através do registro.

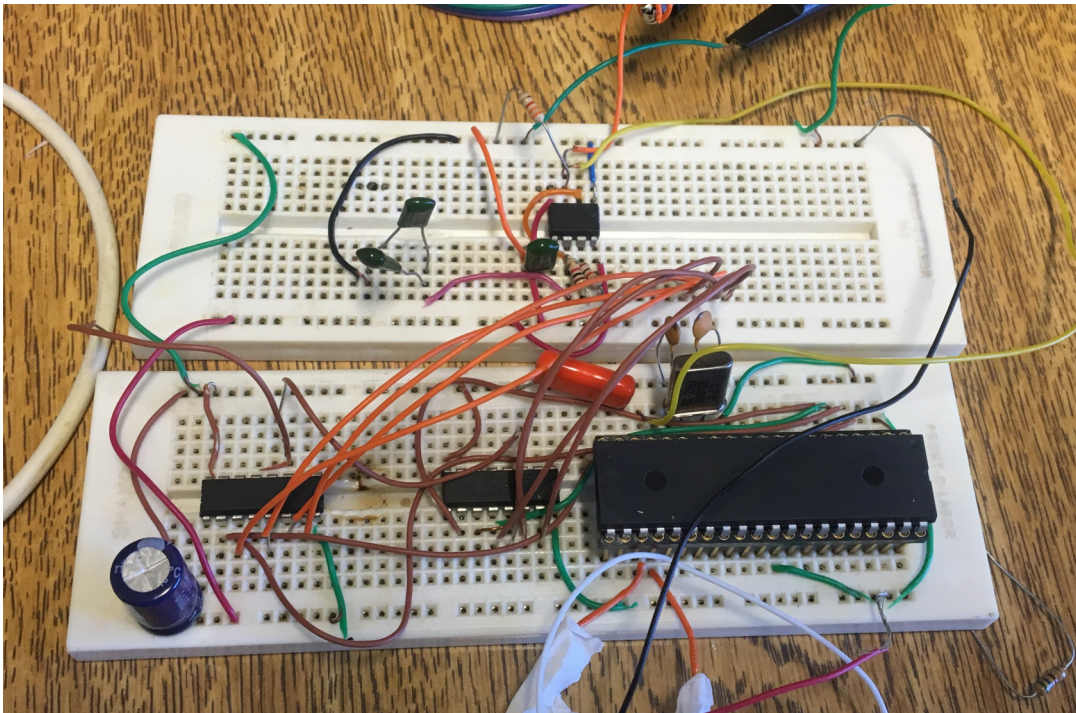
## 4 RESULTADOS

Neste capítulo são apresentados e discutidos os resultados alcançados durante o desenvolvimento do projeto, iniciando com a montagem experimental, medições realizadas com o PIC em conjunto com o LabVIEW dos experimentos com o circuito de relaxação e, posteriormente, são apresentados os resultados obtidos com o circuito amplificador de transimpedância.

### 4.1 Montagem experimental

A implementação do circuito referente ao oscilador de relaxação juntamente com os chaveadores 4051 e o PIC é mostrada na Figura 27.

Figura 27: Implementação dos circuitos eletrônicos



Fonte: Autoria própria.

### 4.2 Oscilador

O circuito oscilador foi ajustado para obter uma frequência de saída na ordem de  $100kHz$  e um ciclo de trabalho não muito desproporcional, ou seja, com valores de  $T_H$  e  $T_L$  próximos. Dessa forma, utilizou-se os seguintes valores de componentes:

$C$  = capacitor comercial de  $500pF$  associado em paralelo com o sensor;

$R_A = 1k\Omega$ ;

$R_B = 10k\Omega$ .

### 4.3 Aquisição de dados

A precisão da medição do microcontrolador junto com o LabVIEW foi validada utilizando um gerador de sinais e comparando com um osciloscópio de bancada. A Tabela 2 mostra a comparação das medições obtidas.

Tabela 2: Frequência medida com o microcontrolador e osciloscópio

Gerador [kHz]	Osciloscópio [kHz]	Microcontrolador [kHz]
5,00	5,01	7,08
10,00	9,98	10,05
20,74	20,75	20,76
50,15	50,15	50,21
75,00	74,98	75,00
100,00	99,97	100,00
109,90	109,90	110,09
120,00	119,90	120,00
130,00	129,90	130,43
140,00	140,00	141,18
150,00	150,00	150,00
160,00	159,90	160,00
169,90	169,98	171,43
180,00	180,00	181,82
190,00	190,10	190,48
200,10	200,00	200,00
209,90	209,90	210,53
250,00	249,90	250,00
300,00	300,00	300,00
312,30	312,00	315,79
407,20	407,30	413,79
552,20	552,80	571,43

Aferiu-se que o microcontrolador apresentou uma boa precisão na faixa de frequências medidas, com um erro maior nos extremos das frequências medidas. O erro nestas faixas de frequências está associado ao método da programação do PIC. Porém, na faixa entre  $50kHz$  e  $100kHz$ , em que o circuito oscilador foi projetado para funcionar, o PIC mostrou-se bem preciso na medição.

### 4.4 Experimento estático

Realizou-se primeiramente o experimento medindo a frequência resultante através do LabVIEW com o tubo inicialmente vazio e encheu-se com água gradualmente, realizando

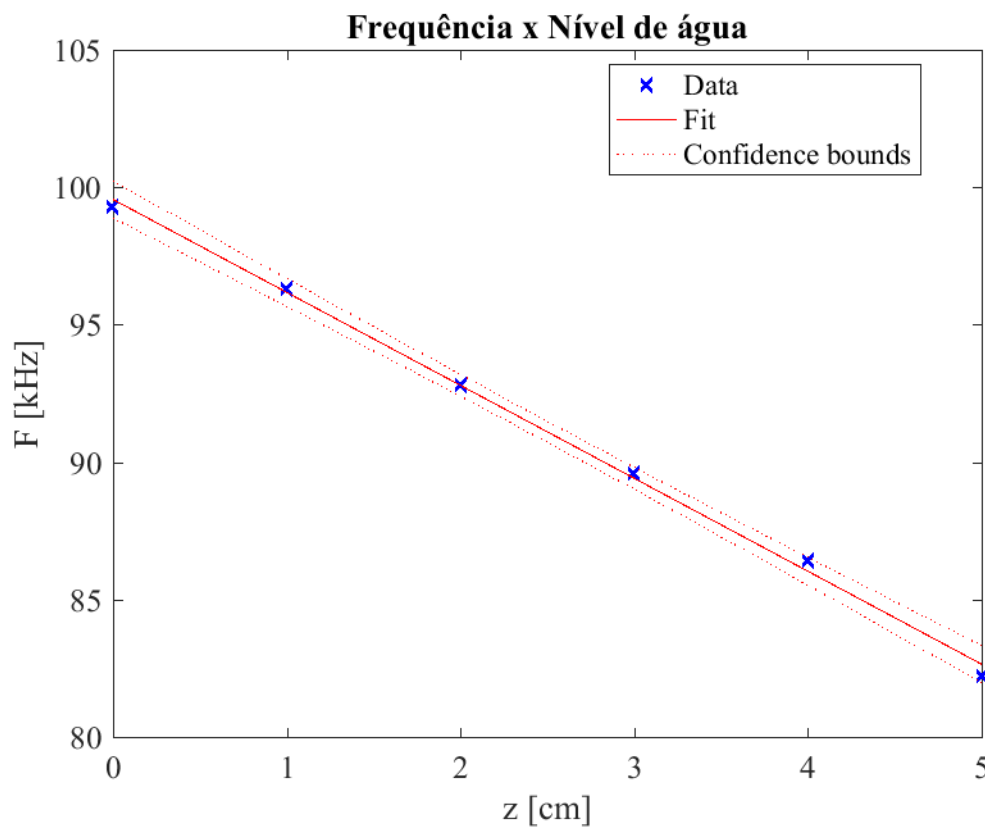
a medição a cada centímetro. Os valores obtidos são mostrados na Tabela 3.

Tabela 3: Circuito oscilador - enchendo sensor com água

Nível de água [cm]	Frequência [kHz]
0	99,3
1	96,3
2	92,8
3	89,6
4	86,4
5	82,2

A partir desses dados, construiu-se um gráfico da frequência em relação ao nível da água.

Figura 28: Frequência *versus* nível de água



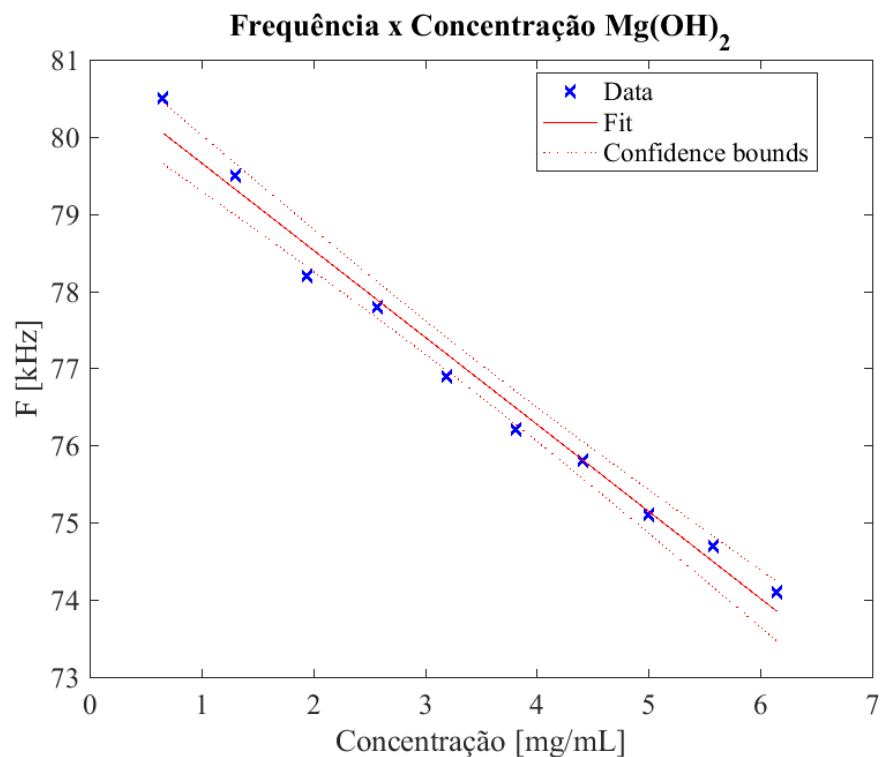
Fonte: Autoria própria.

Posteriormente, realizou-se o experimento variando a densidade da água, diluindo-se Hidróxido de magnésio ( $Mg(OH)_2$ ). Realizou-se medições a cada 50 mililitros de  $Mg(OH)_2$  diluídos na água. A Tabela 4 apresenta as medições em relação à quantidade e também à concentração de  $Mg(OH)_2$ .

Tabela 4: Concentração de  $Mg(OH)_2$ 

Quantidade de $Mg(OH)_2$ [mL]	Concentração de $Mg(OH)_2$ [mg/mL]	Frequência [kHz]
0,5	0,66	80,5
1	1,31	79,5
1,5	1,95	78,2
2	2,58	77,8
2,5	3,20	76,9
3	3,81	76,2
3,5	4,41	75,8
4	5,00	75,1
4,5	5,58	74,7
5	6,15	74,1

O gráfico na Figura 29 relaciona a capacitância com a concentração de Hidróxido de magnésio.

Figura 29: Frequência *versus* concentração de  $Mg(OH)_2$ .

Fonte: Autoria própria.

Dessa forma, observou-se uma boa linearidade em ambos os experimentos, possibilitando relacionar diretamente a frequência obtida com o nível de fluido e também com a concentração de soluções. Os erros nas medições da concentração de  $Mg(OH)_2$  podem ser atribuídos à imprecisão da seringa na dosagem da substância.



## 4.5 Experimento dinâmico

Ligou-se a bomba d'água e controlou-se com o registro a vazão de água que passa pelo sensor com a finalidade de detectar a formação de vórtices. Foram realizadas medições com o registro em três posições diferentes: totalmente aberta, metade aberta e totalmente fechada.

Tabela 5: Experimento dinâmico com duas placas opostas

Posição do registro	Frequência [kHz]
Aberto	84,51
Metade aberto	84,51
Fechado	84,51

Também realizou-se a medição utilizando as quatro placas do sensor, associando-as em paralelo, com o intuito de aumentar a sensibilidade do circuito.

Tabela 6: Experimento dinâmico com placas associadas em paralelo

Posição do registro	Frequência [kHz]
Aberto	74,53
Metade aberto	74,53
Fechado	74,53

Com isso, observou-se que o circuito estável não apresentou sensibilidade suficiente para a detecção de vórtices neste experimento.

## 4.6 Amplificador de transimpedância

Ao conectar o novo circuito, repetiu-se o experimento estático enchendo o tubo com água gradualmente para verificar o comportamento e a sensibilidade deste amplificador. Foram utilizados os seguintes parâmetros:

$$V_e = 508mV \text{ (pico a pico)}$$

$$\text{Frequência} = 10kHz$$

$$C_f = 100pF$$

$$R_f = 2M\Omega$$

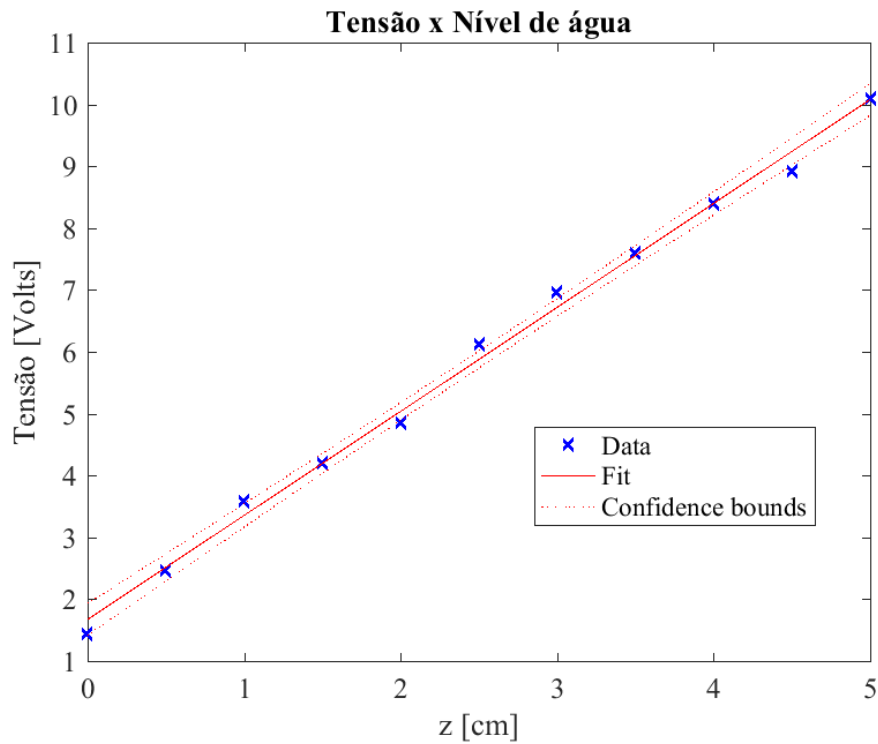
$$R_1 = 1k\Omega$$

$$R_2 = 10k\Omega$$

Os dados obtidos são apresentados na Tabela 7. Com esses dados, foi construído também um gráfico, mostrado na Figura 30.

Tabela 7: Circuito amplificador - enchendo sensor com água

Nível de água [cm]	Tensão [Volts]
0	1,44
0,5	2,46
1	3,58
1,5	4,20
2	4,86
2,5	6,12
3	6,96
3,5	7,60
4	8,40
4,5	8,92
5	10,1

Figura 30: Frequência *versus* nível de água com novo circuito.

Fonte: Autoria própria.

A partir deste gráfico pôde-se constatar a linearidade e boa resolução na tensão de saída.

Ao acoplar o circuito ao sensor no sistema hidráulico para realizar a análise dinâmica do fluido, obteve-se um sinal resultante inesperado. O sinal na saída do amplificador apresentou saturação e frequência de  $60Hz$ , conforme a Figura 31.

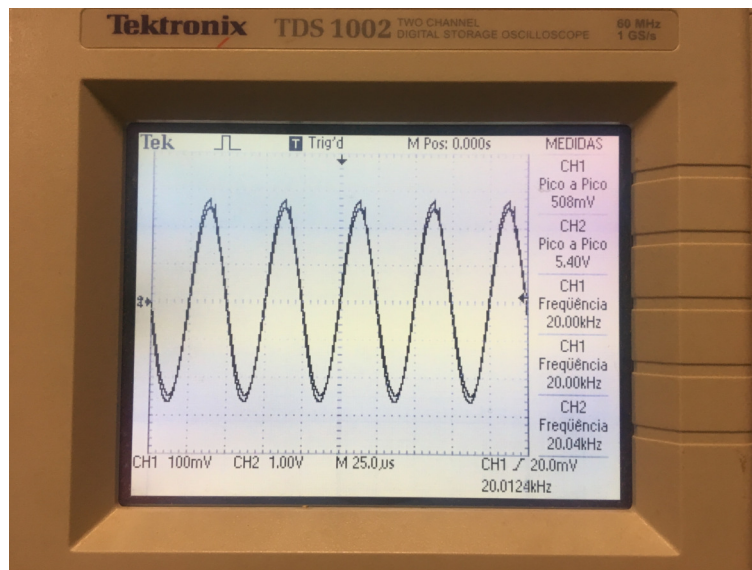
Figura 31: Resultado do experimento dinâmico com novo circuito.



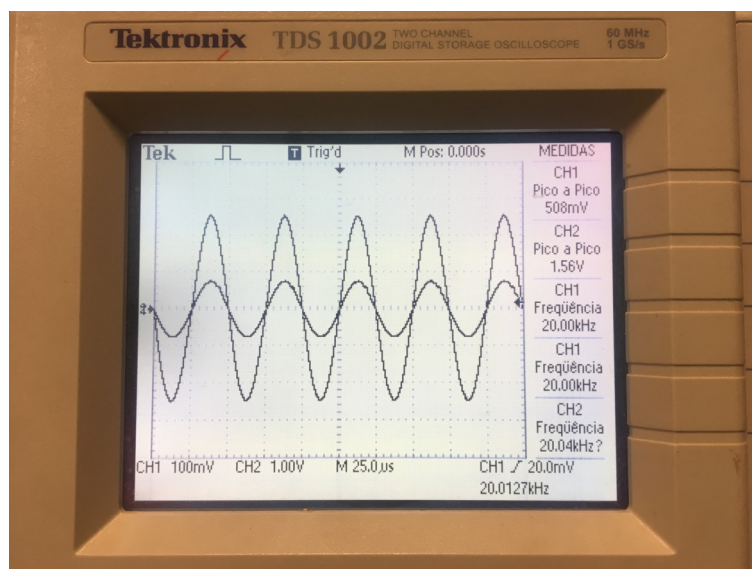
Fonte: Autoria própria.

Para validar o correto funcionamento do circuito, foram realizadas medições com capacitores comerciais para a capacitância  $C_x$ .

Primeiramente, utilizou-se  $C_x = C_f = 100pF$  e obteve-se uma saída com um ganho de 10 vezes. Em seguida, substituiu-se  $C_x$  por um capacitor de  $22pF$  que resultou em um ganho aproximado de 3 vezes. As Figuras 32 e 33 mostram os sinais de entrada e saída para cada capacitor.

Figura 32: Sinal resultante para  $C_x = 100pF$ .

Fonte: Autoria própria.

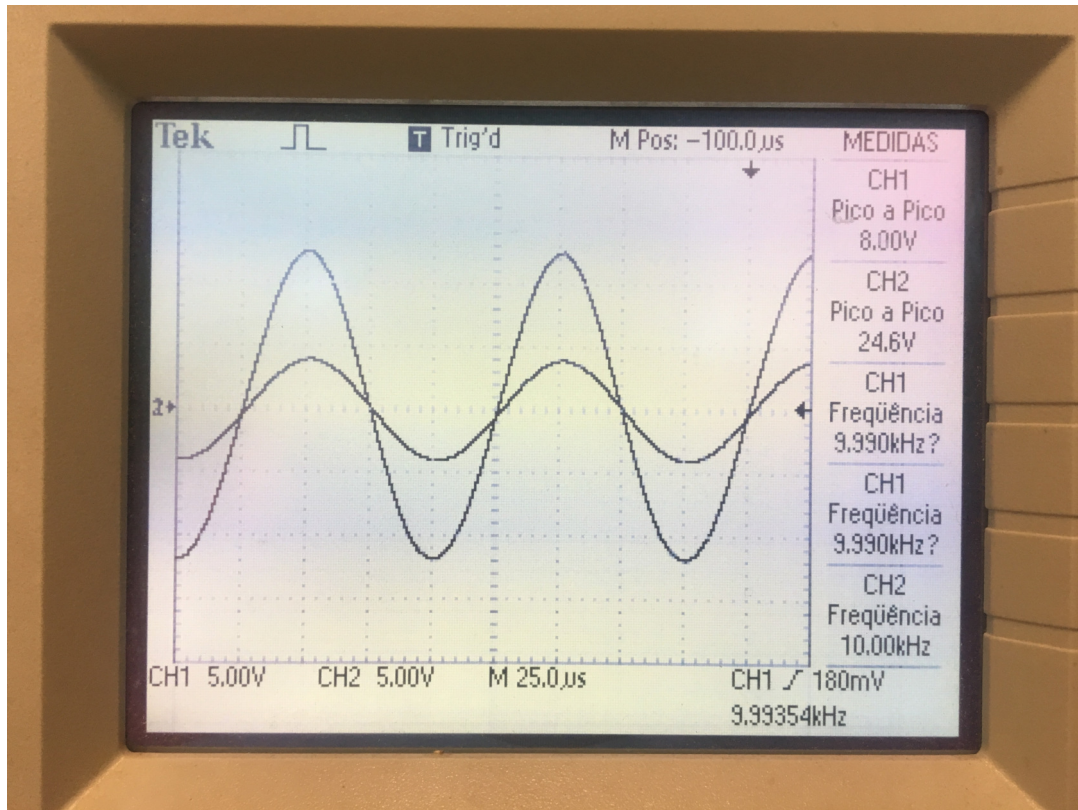
Figura 33: Sinal resultante para  $C_x = 22pF$ .

Fonte: Autoria própria.

Em seguida, mediu-se o valor de tensão máxima aplicada na entrada na iminência da saturação.

Para  $C_x = 22pF$ , obteve-se que o sinal máximo de entrada é de  $8,00V$ , o que resulta numa saída de  $24,6V$ .

Figura 34: Sinal resultante na iminência de saturação para  $C_x = 22pF$ .



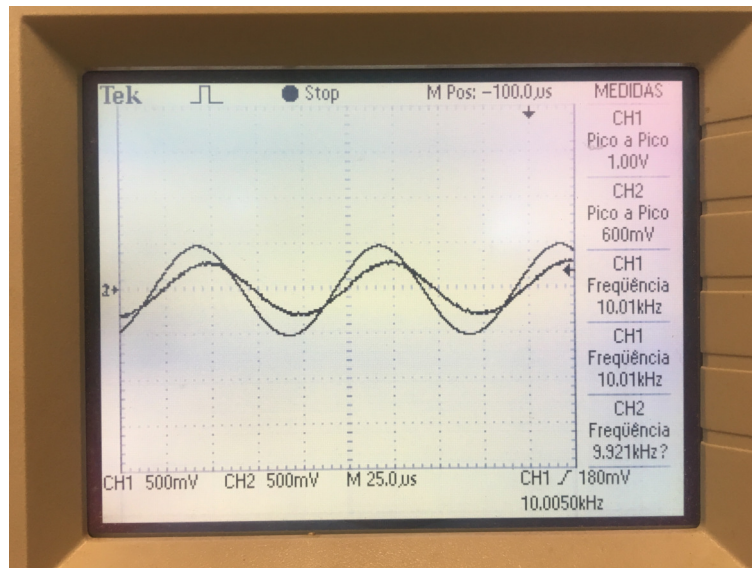
Fonte: Autoria própria.

Posteriormente, conectou-se novamente o circuito à tubulação, e realizou-se a medição com o tubo vazio e completamente cheio, porém sem ligar a bomba d'água. Os resultados obtidos foram colocados na Tabela 8.

Tabela 8: Sensor acoplado à tubulação

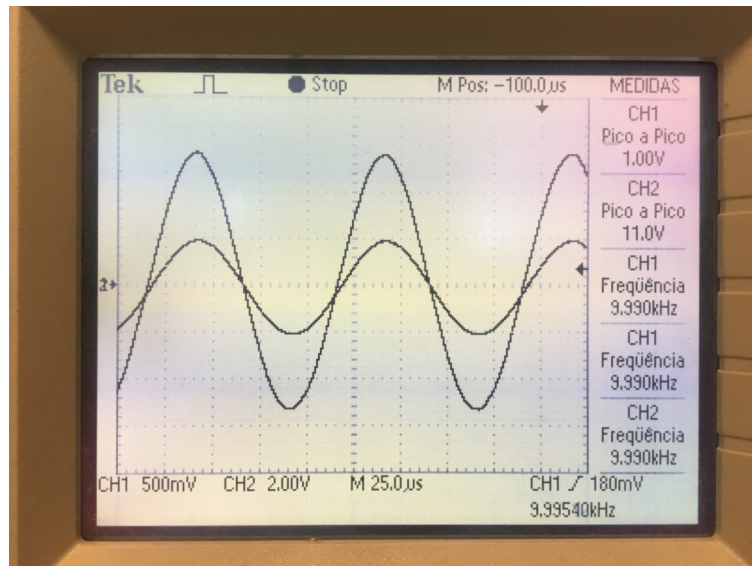
Nível de água	Tensão pico a pico [Volts]
Vazio	0,6
Completamente cheio	11,30

Figura 35: Resultado com o tubo vazio.



Fonte: Autoria própria.

Figura 36: Resultado com o tubo cheio.



Fonte: Autoria própria.

Pode-se observar nas Figuras 35 e 36 que os sinais resultantes são bem definidos e coerentes, o que indica o funcionamento correto do circuito amplificador.

Em seguida, ligou-se a bomba novamente e instantaneamente o sinal de  $60\text{Hz}$  surgiu novamente. Isto trouxe indícios que, de alguma maneira, a alimentação da bomba estava interferindo na medição.

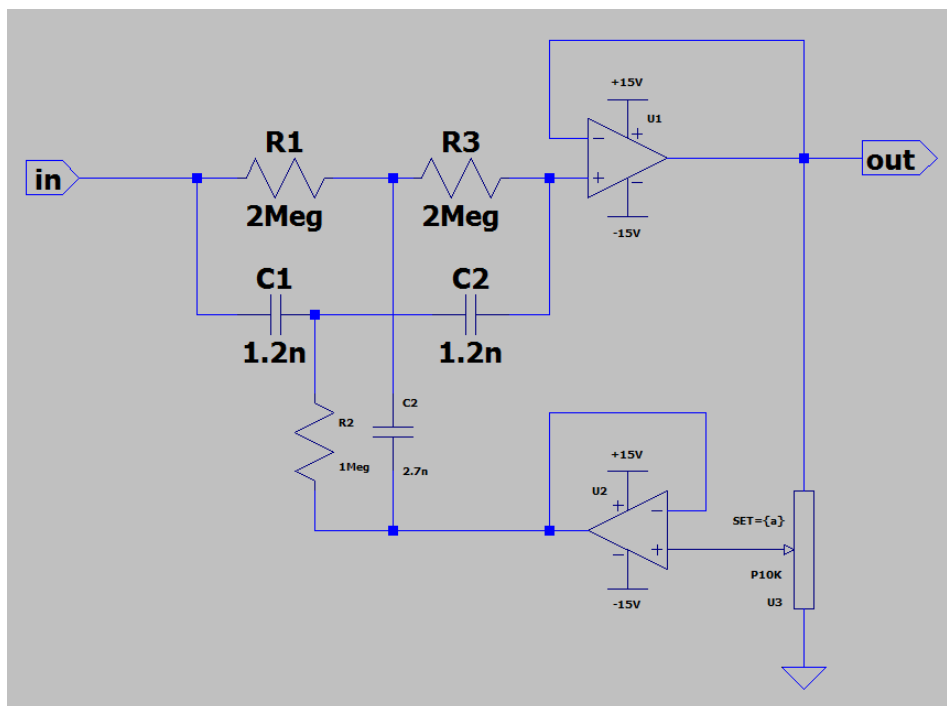
Para eliminar a possibilidade de ser poluição da rede elétrica, incluiu-se dois capacitores de  $2200\mu F$  na fonte de alimentação: um deles entre o  $+15V$  e o terra, e o outro entre o terra e o  $-15V$ . Porém, observou-se que o comportamento continuou exatamente o mesmo.

Além disso, observou-se que quando a bomba d'água é desligada, o sinal continua presente, diminuindo com o passar do tempo. Também observou-se um sinal de  $60Hz$ , de menor amplitude quando a bomba está conectada no filtro de linha mesmo na posição desligada, desaparecendo completamente apenas quando retirado da tomada.

Outra tentativa para a eliminação desta frequência foi a inclusão de uma bobina *choke* no sinal de entrada, porém não obteve-se nenhum resultado diferente.

Então, montou-se o circuito esquematizado na Figura 37. Este circuito se trata de filtro rejeita-faixa do tipo *Notch*, e foi implementado com a finalidade de eliminar a frequência de  $60Hz$  (STOUT; KAUFMAN, 1976).

Figura 37: Filtro *Notch*.

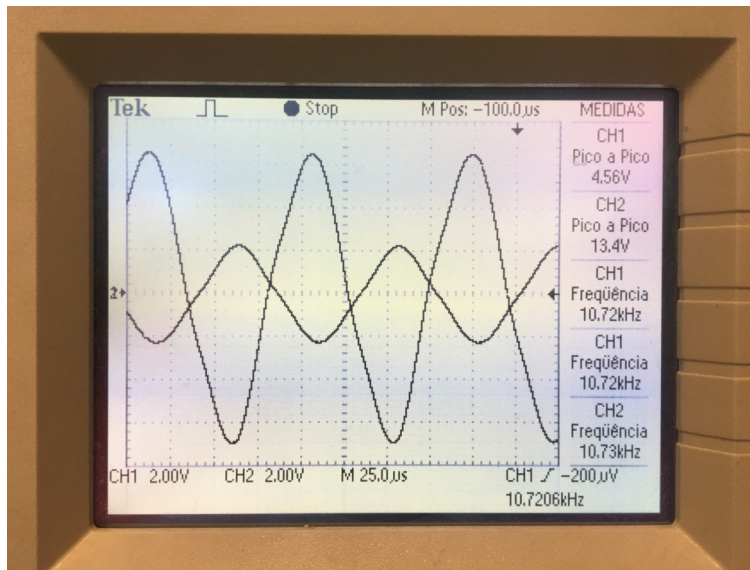


Fonte: Autoria própria.

O filtro foi colocado na saída do módulo amplificador de transimpedância e observou-se os resultados.

Constatou-se que o sinal de  $60Hz$  foi bem atenuado, permitindo a observação do sinal de interesse, como mostrado na figura 38. Porém, ao variar o fluxo de água que passa pelo sensor, não observou-se mudanças conclusivas.

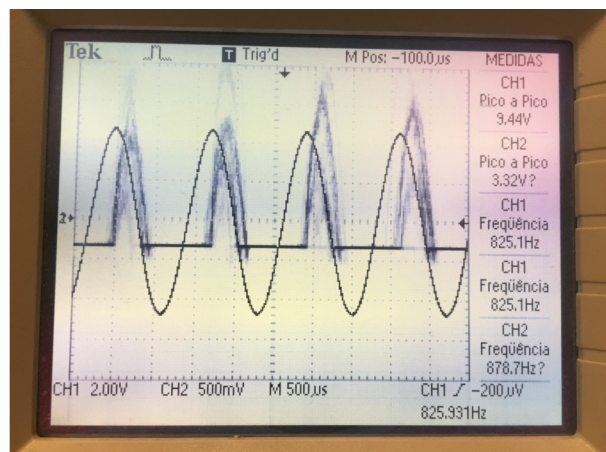
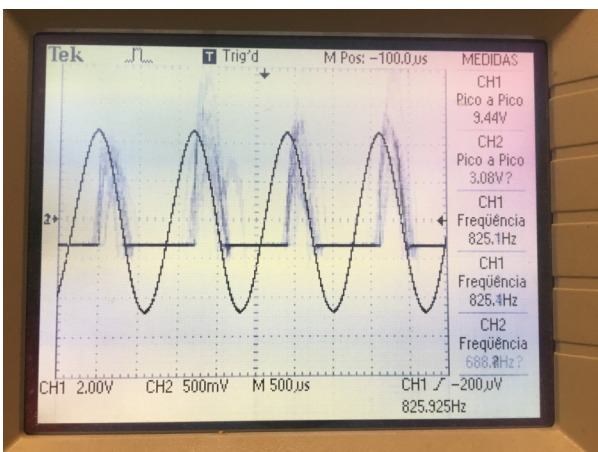
Figura 38: Sinal resultante após filtro *Notch*.



Fonte: Autoria própria.

Por fim, analisou-se o sinal após um retificador, e reduziu-se a frequência do sinal de entrada. Com isso, pôde-se observar variações na amplitude do sinal, conforme a Figura 39. Como a bomba d'água produzia muitas bolhas de ar aleatoriamente, não foi possível distinguir a variação ocasionada pelas bolhas de ar da variação ocasionada pelos vórtices.

Figura 39: Sinal após retificação.



Fonte: Autoria própria.



## 5 CONCLUSÃO

Neste trabalho foi apresentado a montagem de um sensor capacitivo para a detecção e medição do nível de um fluido, vazão e concentração de uma substância através da variação de sua densidade. Os resultados apresentados mostram a precisão e sensibilidade atingidas para cada experimento realizado.

Através de todos os métodos empregados, foi possível explorar, fixar e utilizar em conjunto os conhecimentos adquiridos ao longo do curso, com ênfase nas disciplinas de física, transdutores, sistemas digitais e aplicação de microprocessadores. Tais métodos foram expostos nos capítulos 2 e 3, consistindo na teoria utilizada como base para o projeto, nos materiais e procedimentos para a sua implementação.

A escolha do sensor do tipo capacitivo se deu pelas vantagens de ser mais simples em relação a outros métodos de detecção e também por ser de baixo custo. Ainda que seja um método invasivo, não possui muita interferência no escoamento do fluido.

Além disso, optou-se pelo microcontrolador PIC para o processamento por ser versátil, amplamente conhecido e utilizado em diferentes aplicações, além de possuir comunicação USB para a transmissão de dados. Em conjunto com o PIC, utilizou-se o LabVIEW para a leitura e gravação dos dados.

Em relação aos circuitos eletrônicos, o circuito oscilador com o 555 possibilitou uma fácil implementação para a detecção de variações da capacitância. Embora tenha apresentado limitações com sensibilidade para a detecção na variação de escoamento, o circuito trouxe resultados com boa precisão e linearidade na medição do nível do fluido e da concentração de substâncias dentro da tubulação, demonstrando eficiência pela sua simplicidade no funcionamento e implementação.

Para contornar a falta de sensibilidade, buscou-se um circuito alternativo ao oscilador de relaxação. Foi utilizado um circuito amplificador de transimpedância, um circuito mais complexo e que demanda o uso de fonte simétrica e fonte de corrente alternada. Foram obtidos resultados inesperados, ocasionados pela interferência da alimentação da bomba no sensor. Com isso, buscou-se confirmar e eliminar essa interferência utilizando um filtro *Notch*. O sinal de  $60Hz$  foi eliminado pelo filtro, porém, mesmo assim, não foi possível obter resultados conclusivos relacionando a vazão do fluido com o sinal resultante.

Como sugestão para trabalhos futuros, propõe-se melhorar o projeto dos circuitos para obter maior sensibilidade e melhor estabilidade nas medições do fluxo, e até mesmo utilizar outros métodos de detecção de *Vortex*, como fotosensores. Sugere-se também como trabalho futuro a inserção de um medidor de vazão comercial na tubulação para a obtenção de uma referência dos valores medidos. Por fim, como melhoria, pode-se implementar um

sistema embarcado para a coleta e processamento de dados e, com isso, constituir um projeto de Internet das coisas (IoT), integrando-se a outros sistemas a fim de centralizar as informações e compor um projeto mais completo.

## REFERÊNCIAS

- DELMEE, G. J. **Manual de medição de vazão**. 2. ed. [S.l.: s.n.], 1982.
- DEMORI, M.; FERRARI, V.; STRAZZA, D. A sensor system for oil fraction estimation in a two phase oil-water flow. **Proceedings of the Eurosensors XXIII conference**, 2009.
- MANAF, M. N.; TRIYANA, K. Analytical solutions for capacitance of a semi-cylindrical capacitive sensor. **AIP Conference Proceedings**, v. 1755, n. 1, p. 020002, 2016. Disponível em: <<https://aip.scitation.org/doi/abs/10.1063/1.4958467>>.
- MEEKER, D. **Finite Element Method Magnetics : MagneticsTutorial**: Femm 4.2 magnetostatic tutorial. 2013. Disponível em: <<http://www.femm.info/wiki/MagneticsTutorial>>. Acesso em: 20 outubro 2018.
- MICROCHIP TECHNOLOGY INC. **PIC18F2455/2550/4455/4550 Data Sheet**. 2009. Disponível em: <<http://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/39632e.pdf>>. Acesso em: 28 outubro 2018.
- REDAÇÃO AGRISHOW. **Agrishow 2019 é palco de soluções para agricultura 4.0**. 2019. Disponível em: <<https://digital.agrishow.com.br/agrishow-2019-e-palco-de-solucoes-para-agricultura-4-0/>>. Acesso em: 12 abril 2019.
- RISSARDI, G. D. O. **Estudos preliminares para determinação de concentração em sistemas de mistura de herbicidas via sensor capacitivo**. São Carlos: [s.n.], 2009.
- SCHUGURENSKY, C.; CAPRARO, F. **Control automático de riego agrícola con sensores capacitivos de humedad de suelo. Aplicaciones en vid y olivo**. 2008.
- STOUT, D.; KAUFMAN, M. **Handbook of Operational Amplifier Circuit Design**. 1. ed. U.S.A.: McGraw-Hill Book Company, 1976.
- TEXAS INSTRUMENTS. **Datasheet: LM555 Timer**. 2000. Revised in 2015. Disponível em: <<http://www.ti.com/lit/ds/symlink/lm555.pdf>>. Acesso em: 17 outubro 2018.
- \_\_\_\_\_. **Datasheet: CD74HC4051-EP Analog Multiplexer and Demultiplexer**. 2002. Revised in 2015. Disponível em: <<http://www.ti.com/lit/ds/symlink/cd74hc4051-ep.pdf>>. Acesso em: 17 janeiro 2018.
- TOCCI, R. J.; WIDMER, N. S.; MOSS, G. L. **Sistemas Digitais: Princípios e Aplicações**. 10. ed. [S.l.: s.n.], 2007.
- WALKER, J.; RESNICK, R.; HALLIDAY, D. **Fundamentos de Física: Eletromagnetismo - Vol. 3**. 8. ed. [S.l.]: John Wiley & Sons, Inc., 2009.



## **Apêndices**



## APÊNDICE A – CÓDIGO DO PIC PARA CHAVEAMENTO E TRANSMISSÃO DE DADOS VIA USB

```

//Variaveis Globais
char flag0 = 0x00;
int t1 = 0, aux = 1;
unsigned long time1, time2;
unsigned long freq1, freq2;
char txt1[12], txt2[12];
unsigned char leitura[64] absolute 0x500;
unsigned char envio[64] absolute 0x540;

//Rotina de Interrupcao

void interrupt() {
    //Interrupcao do USB
    if (USBIF_bit) {
        USB_Interrupt_Proc(); // Keep Alive USB
    }

    //Interrupcao do contador
    if (CCP1IF_bit) {
        CCP1IF_bit = 0x00;
        if (!flag0.B0) {
            time1 = (CCPR1H << 8) + CCPR1L;
            flag0.B0 = 0x01;
        } else {
            time2 = (CCPR1H << 8) + CCPR1L;
            flag0.B0 = 0x00;
            flag0.B1 = 0x01;
        }
    }
}

//Funcao Principal
void main() {

    CMCON = 0x07; //desabilita comparadores
    ADCON1 = 0x0F;
    T1CON = 0x01; // Seleciona timer3 como timer de referencia ccp e habilita timer 1
    CCP1CON = 0x07; // seleciona modo de captura a cada 16 pulsos de subida
    CCP1IE_bit = 0x01;
    GIE_bit = 0x01;
    PEIE_bit = 0x01;
    TRISA = 0x00; //Faz a selecao dos sensores
    TRISC = 0x04; // Leitura Modulo CCP e transmissao usb
    PORTC = 0x00; // inicializa porta com 0
    PORTA = 0x01; // Inicializa porta com 01

    HID_Enable( & leitura , & envio); //Liga USB
    Delay_ms(5000); // Espera inicializar corretamente

    while (1) {
        if (aux <= 0x0E) {
            if (t1 == 0) {
                time2 = abs(time2 - time1);
                time2 = (time2) >> 4;
            }
        }
    }
}

```

```
freq1 = 12 * (1 / (time2 * 1E-6)); //converte a captura do modulo ccp em
    frequencia

LongToStr(aux, txt2); //converte dados em string
LongToStr(freq1, txt1); //converte dados em string
strcat(txt2, txt1);
strcpy(envio, txt2); //copia para buffer do USB

while (!HID_Write( & envio, 64));
delay_ms(200);
t1++;
}
if (t1 == 1) { // Faz a selecao dos sensores
    aux++;
    if (aux == 5 || aux == 10 || aux == 15) {
        aux++;
    }
    PORTA = aux;
    t1 = 0;
    CCP1IF_bit = 0x00;
}
}
else {
    PORTA = 0x01;
    aux = 1;
}
}
}
```