

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

**Gabriel Coelho Antonini**

**Estudos Preliminares de um Sistema de Tomografia  
Capacitiva não-invasivo**

**São Carlos**

**2019**



**Gabriel Coelho Antonini**

**Estudos Preliminares de um Sistema de Tomografia  
Capacitiva não-invasivo**

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).

C672e            Coelho Antonini, Gabriel  
                  Estudos Preliminares de um Sistema de Tomografia  
                  Capacitiva não-invasiva / Gabriel Coelho Antonini;  
                  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. Tomografia Capacitiva. 2. Escoamento de  
                  líquido. 3. Sensores Capacitivo. 4. Imageamento  
                  tomográfico. 5. Permissividade Elétrica. I. Título.

# FOLHA DE APROVAÇÃO

Nome: Gabriel Coelho Antonini

Título: “Estudos Preliminares de um Sistema de Tomografia Capacitiva não-invasivo”

Trabalho de Conclusão de Curso defendido e aprovado

em 14 / 06 / 2019,

com NOTA 9,7 (nove, sete), pela Comissão Julgadora:

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

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

*Dr. Heitor Vinicius Mercaldi - Doutorado - EESC/USP*

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



*Dedico este projeto à minha família que sempre esteve presente em todos os momentos da minha graduação, me confortando em momentos difíceis e me apoiando em todas as minhas decisões. Dedico à todos meus amigos que tornaram minha formação mais prazerosa e produtiva, em especial aos meus amigos do time de Natação e do time de Polo Aquático; e aos meus irmãos da República Rota 69.*

## RESUMO

ANTONINI, G. **Estudos Preliminares de um Sistema de Tomografia Capacitiva não-invasivo** . 2019. 76p. Monografia (Trabalho de Conclusão de Curso) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2019.

O trabalho aborda estudos iniciais para elaboração de um sistema não invasivo de tomografia capacitiva, para detecção de fase e variações na permissividade de líquidos em uma tubulação. A pesquisa tem como objetivo desenvolver um sistema completo para avaliação das propriedades (fase e permissividade) do escoamento dentro da tubulação. O sistema completo consiste de um sistema de aquisição, transmissão, armazenamento e processamento dos dados. A execução dessa pesquisa procura contribuir com as diversas áreas onde o controle de escoamento dentro de um tubo seja necessária, priorizando o desenvolvimento tecnológico e a segurança na área. Com a pesquisa, foi possível aplicar conhecimentos técnicos inerentes como, eletrônica analógica e digital, instrumentação, programação e processamento de dados.

**Palavras-chave:** Tomografia Capacitiva. Escoamento de líquidos. Sensores Capacitivos. Imageamento tomográfico. Permissividade Elétrica.

## ABSTRACT

ANTONINI, G. **Preliminary Studies of a Non-Invasive Capacitive Tomography System.** 2019. 76p. Monografia (Trabalho de Conclusão de Curso) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2019.

The work addresses initial studies to develop a non-invasive capacitance tomography system for phase detection and electric permittivity of liquids in a pipeline. The research aims to develop a complete system to evaluate the properties (phase and permittivity) of the flow inside the pipe. The complete system consists of an acquisition, transmission, storage and processing of data system. The execution of this research seeks to contribute to the several areas where flow control inside a pipe is necessary, prioritizing technological development and safety in the area. With the research, it was possible to apply technical knowledge inherent to the studies in Electrical Engineering, on analog and digital electronics, instrumentation, programming and data processing.

**Keywords:** Capacitance Tomography. Flow of liquids test. Capacitive Sensors. Tomographic Imaging. Electrical Permittivity.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Constantes dielétricas de alguns materiais. . . . .	18
Figura 2 – Fluxograma para definição de técnicas tomográficas. . . . .	20
Figura 3 – Esquemático do sistema de ECT . . . . .	21
Figura 4 – Sensores opostos com a tubulação vazia. . . . .	23
Figura 5 – Sensores adjacentes com a tubulação vazia. . . . .	23
Figura 6 – Sensores opostos com a tubulação cheia de água. . . . .	24
Figura 7 – Sensores opostos, tubulação com água e uma bolha de ar. . . . .	25
Figura 8 – Sensores opostos, tubulação com água e uma esfera de vidro. . . . .	25
Figura 9 – Linhas de campo no tubo cheio de água com esferas de vidro de diferentes diâmetros posicionadas no centro. . . . .	26
Figura 10 – Microcontrolador PIC 18f4550 . . . . .	27
Figura 11 – Esquemático completo dos pinos do microcontrolador PIC18f4550 . . . . .	28
Figura 12 – Bits de controle módulo CCP . . . . .	29
Figura 13 – Diagrama de blocos do módulo de captura. . . . .	30
Figura 14 – Diagrama de blocos do módulo USB. . . . .	31
Figura 15 – Ambiente de desenvolvimento do compilador MikroC. . . . .	32
Figura 16 – Ferramenta HID Terminal. . . . .	32
Figura 17 – Programação Gráfica. . . . .	33
Figura 18 – Interface Homem-Máquina. . . . .	34
Figura 19 – Ambiente de desenvolvimento MATLAB. . . . .	35
Figura 20 – Imagem Tomográfica gerada utilizando MATLAB. . . . .	36
Figura 21 – Circuito oscilador elaborado utilizando Isis Proteus 8. . . . .	37
Figura 22 – Comparação entre frequência teórica e frequência aferida. . . . .	39
Figura 23 – Esquema de cores e letras dos sensores, para referência. . . . .	40
Figura 24 – Quatro placas de cobre instaladas internamente ao tubo de acrílico. . . . .	40
Figura 25 – Vista superior da montagem das 4 placas de cobre. . . . .	41
Figura 26 – Capacitância aferida entre os sensores Amarelo e Verde quando submersos em água. . . . .	43
Figura 27 – Capacitância aferida conforme variação de volume de $Mg(OH)_2$ na mistura. . . . .	44
Figura 28 – Fotografia do circuito completo dos sensores e da instrumentação. . . . .	45
Figura 29 – Esquemático completo do circuito oscilador, elaborado no Isis Proteus 8. . . . .	45
Figura 30 – Circuito Ativo para medição de capacitância. . . . .	47
Figura 31 – Circuito Ativo completo para medição de capacitância. . . . .	48
Figura 32 – Medições dos sensores Amarelo e Verde quando submersos em água. . . . .	53
Figura 33 – Capacitância aferida entre os sensores Amarelo e Verde variando o volume de $Mg(OH)_2$ na mistura. . . . .	54

Figura 34 – Imagens geradas durante o preenchimento do tubo com água. . . . .	55
Figura 35 – Imagens geradas variando a concentração de hidróxido de magnésio. . . . .	55
Figura 36 – Imageamento não calibrado no tubo com esfera de vidro no centro. . . . .	56
Figura 37 – Imageamento calibrado no tubo com esfera de vidro no centro. . . . .	56
Figura 38 – Imageamento não calibrado do tubo com esfera de vidro no centro, utilizando o circuito ativo. . . . .	57
Figura 39 – Imageamento calibrado do tubo com esfera de vidro no centro utilizando o circuito ativo. . . . .	58

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Valores teóricos de capacitância para o circuito . . . . .	18
Tabela 2 – Valores máximos e mínimos para o circuito oscilador. . . . .	37
Tabela 3 – Dados para validação do circuito oscilador. . . . .	38
Tabela 4 – Tabela de capacitâncias aferidas com ar como dielétrico. . . . .	41
Tabela 5 – Tabela de capacitâncias aferidas com água como dielétrico. . . . .	42
Tabela 6 – Capacitância entre os sensores Amarelo e Verde quando submersos em água. . . . .	43
Tabela 7 – Capacitância aferida entre os sensores Amarelo e Verde variando o volume de Mg(OH) <sub>2</sub> na mistura. . . . .	44
Tabela 8 – Valores resultantes do processo de varredura de frequência, utilizando o circuito completo. . . . .	46
Tabela 9 – Valores aferidos com capacitores comerciais cerâmicos . . . . .	49
Tabela 10 – Capacitâncias aferidas utilizando valores de frequência diferentes para o sinal senoidal de entrada. . . . .	49
Tabela 11 – Capacitâncias medidas utilizando o circuito ativo com tubo vazio. . . . .	50
Tabela 12 – Valores de calibração do sensor com o tubo vazio. . . . .	51
Tabela 13 – Valores de calibração do sensor com o tubo cheio de água. . . . .	52
Tabela 14 – Medições dos sensores Amarelo e Verde quando submersos em água. . . . .	53
Tabela 15 – Capacitância aferida entre os sensores Amarelo e Verde variando o volume de Mg(OH) <sub>2</sub> na mistura. . . . .	54
Tabela 16 – Capacitâncias aferidas pelos sensores, com e sem a esfera de vidro. . . . .	57

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ECT	Electrical Capacitance Tomography
PIC	Programmable Interface Controller
PWM	Pulse Width Modulation
PID	Product ID
VID	Vendor ID
HID	Human Interface Device
FEMM	Finite Element Methods Magnetics
USB	Universal Serial Bus
CCP	Capture Compare PWM
RAM	Random Access Memory

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b>	<b>15</b>
<b>1.1</b>	<b>Objetivo</b>	<b>15</b>
<b>1.2</b>	<b>Definição do problema</b>	<b>15</b>
<b>2</b>	<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b>	<b>17</b>
<b>2.1</b>	<b>Sensor Capacitivo</b>	<b>17</b>
2.1.1	O que é um sensor capacitivo	17
<b>2.2</b>	<b>Tomografia</b>	<b>18</b>
2.2.1	Princípios de uma tomografia	18
2.2.2	Tomografia capacitiva	20
<b>3</b>	<b>MATERIAIS E MÉTODOS</b>	<b>22</b>
<b>3.1</b>	<b>Simulações</b>	<b>22</b>
3.1.1	FEMM	22
<b>3.2</b>	<b>Microcontrolador</b>	<b>27</b>
3.2.1	PIC	27
3.2.2	Módulo CCP	28
3.2.3	Transmissão USB	30
3.2.4	Programação PIC	31
<b>3.3</b>	<b>Processamento de Dados</b>	<b>32</b>
3.3.1	Labview	32
3.3.2	MATLAB	34
<b>3.4</b>	<b>Oscilador</b>	<b>37</b>
3.4.1	Validação circuito oscilador.	38
<b>3.5</b>	<b>Sensores</b>	<b>39</b>
3.5.1	Validação sensores	41
<b>3.6</b>	<b>Circuito Completo</b>	<b>44</b>
3.6.1	Circuito oscilador	44
3.6.1.1	Testes do circuito completo	46
3.6.2	Circuito ativo	47
<b>4</b>	<b>RESULTADOS E COMENTÁRIOS</b>	<b>51</b>
<b>4.1</b>	<b>Imageamento</b>	<b>54</b>
4.1.1	Imageamento utilizando o Circuito Oscilador	54
4.1.2	Imageamento utilizando o circuito ativo	57
<b>5</b>	<b>CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS</b>	<b>59</b>

<b>REFERÊNCIAS . . . . .</b>	<b>60</b>
<b>APÊNDICES</b>	<b>61</b>
<b>APÊNDICE A – PROGRAMAÇÃO DO MICROCONTROLADOR PIC PARA AQUISIÇÃO E TRANSMISSÃO DE DADOS DO CIRCUITO OSCILADOR . . . . .</b>	<b>62</b>
<b>APÊNDICE B – PROGRAMAÇÃO DO MICROCONTROLADOR PIC PARA AQUISIÇÃO E TRANSMISSÃO DE DADOS DO CIRCUITO ATIVO . . . . .</b>	<b>65</b>
<b>APÊNDICE C – PROGRAMAÇÃO EM MATLAB PARA ANÁLISE DOS DADOS E CONSTRUÇÃO DA TOMOGRA- FIA, OBTIDOS PELO CIRCUITO OSCILADOR . .</b>	<b>68</b>
<b>APÊNDICE D – PROGRAMAÇÃO EM MATLAB PARA ANÁLISE DOS DADOS E CONSTRUÇÃO DA TOMOGRA- FIA, OBTIDOS PELO CIRCUITO ATIVO . . . . .</b>	<b>73</b>

# 1 INTRODUÇÃO

A utilização de tubulações na indústria e no campo é essencial para o escoamento de diversas substâncias, que podem ser líquidos, sólidos e gases; não necessariamente esse escoamento ocorre de maneira monofásica, intencionalmente ou não. Em plantas industriais como refinarias de petróleo é comum encontrar escoamentos bifásicos de óleo e gás na mesma tubulação; em outros casos, como em pulverizadores de campos agrícolas, um escoamento bifásico pode estar condicionado a um agente estranho, muitas vezes danoso ao sistema. Portanto, é de suma importância analisar o fluxo no interior das tubulações, tanto para compreender as características do meio, como para monitorar o escoamento durante o percurso, garantindo um funcionamento eficiente e seguro.

O monitoramento do fluxo é necessário para garantir um processo adequado, porém é importante que esse monitoramento não interfira no escoamento ou que atrapalhe os processos; assim torna-se necessário o desenvolvimento de técnicas e equipamentos que realizem a coleta de dados e o monitoramento de maneira não invasiva. Nos últimos anos diversos tipos de sensores e técnicas de imageamento industriais e agrícolas vem surgindo e uma delas é a Tomografia de Processos (TP). Dessa maneira foi proposto utilizar a técnica de imageamento por tomografia capacitiva (ECT) para a detecção de mudanças de fase e variações na concentração e fluxo dos fluidos no interior do tubo. Dessa forma, esse projeto procurou desenvolver e adaptar técnicas de tomografia capacitivas, assim como obter dados práticos e teóricos de escoamentos multifásicos, de maneira não invasiva no interior de uma tubulação. (RISSARDI, 2009).

## 1.1 Objetivo

O objetivo deste trabalho é desenvolver um sistema não-invasivo de tomografia capacitiva, para isso é necessário que os seguintes itens sejam atendidos:

- a) Circuito completo para leitura de capacitância dos sensores capacitivos.
- b) Método de transmissão de dados para o processamento dos sinais.
- c) *Software* de análise de dados para geração de imagens.

## 1.2 Definição do problema

O sistema em questão trata-se de um equipamento de tomografia capacitiva instalado no interior de um cano de acrílico com escoamento confinado. Esses sensores serão capazes de determinar pequenas variações na permissividade elétrica do líquido no interior da tubulação, com auxílio do circuito da ECT, os dados dessa variação serão adquiridos, e transmitidos em tempo real para um microcontrolador, que processará os dados, afim de aferir variações na permissividade elétrica e gerar imagens internas ao tubo na ocorrência de fases. A instalação dos

sensores deverá ser feita no interior da tubulação, de maneira que o posicionamento desses não interfira nas características do fluxo confinado, assim criando um sistema não-invasivo.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 Sensor Capacitivo

#### 2.1.1 O que é um sensor capacitivo

O sensor capacitivo é um dispositivo elétrico, utilizado amplamente para a detecção de objetos ou mudanças no meio em que se encontra, sem mesmo ter contato com o meio. Esse dispositivo é composto por duas placas paralelas de material condutor elétrico, separadas por um meio dielétrico, com a propriedade de armazenar energia e suprir, cargas elétricas ao sistema. A capacitância elétrica é a grandeza escalar, que determina a “razão entre a magnitude de carga total em ambos os condutores e a magnitude da diferença de potencial entre os condutores” (HAYAT; BUCK, 2003). Na equação 2.1,  $C$  representa a capacitância, que  $q$  a carga e  $dV$  a diferença de potencial.

$$C = q/dV \quad (2.1)$$

A capacitância é independente do potencial e da carga total, pois sua razão é constante, depende apenas das dimensões físicas do sistema de condutores e da permissividade do dielétrico do meio. A unidade de medida de capacitância é Farad, onde um farad é definido por um coulomb por volt. A permissividade dielétrica representada pela letra  $\epsilon$ , é a propriedade física que rege a interação de um campo elétrico com determinado material ou a capacidade de polarização de um meio em função de um campo elétrico determinado. Na equação 2.2, sendo  $\epsilon_0$  a permissividade do vácuo  $8,85418 * 10^{-12} F/m$  e  $\epsilon_r$  a constante dielétrica do material (adimensional).

$$\epsilon = \epsilon_0 * \epsilon_r \quad (2.2)$$

Dessa forma para um conjunto de placas paralelas, com dimensões pré estabelecidas, pode-se descrever a capacitância em função da permissividade dielétrica do sistema como:

$$C = \epsilon * (A/d) \quad (2.3)$$

Na equação 2.3 temos  $\epsilon$  a permissividade do meio,  $A$  a área das placas (em metros) e  $d$  o distanciamento das placas paralelas (em metros).

A medição da permissividade de um material é feita de maneira indireta utilizando duas ou mais placas condutoras paralelas com dimensões fixas, para medir a capacitância do meio e assim determinar a permissividade do dielétrico. A Figura 1 mostra valores de permissividade relativa de alguns dielétricos.

Sabendo-se que cada material possui sua própria permissividade elétrica, pode-se então elaborar um sistema de sensores capacitivos, a fim de fazer a aquisição da permissividade elétrica

Figura 1: Constantes dielétricas de alguns materiais.

Material	$\epsilon_r$
Vácuo (definição)	1
Ar	1,0005
Dióxido de carbono	1,001
Teflon	2,1
Polietileno	2,26
Borracha	2,5 até 3
Nylon	3,5
Quartzo	3,8
Vidro	4 até 7
Silica	4,2
Gelo	4,2 (altas frequências) ou 90 (DC)
Mica	5,4
Cloreto de Sódio	5,9
Procelana	6
Óxido de alumínio	8,8
Silício	11,8
Ferrite (NiZn)	12,4
Álcool etílico	25
Água (destilada)	80
Dióxido de titânio	100
Titanato de Bário	1200

(HAYAT; BUCK, 2003)

do meio. Para isso a geometria dos sensores deve ser constante durante todo o decorrer do experimento, uma vez que pela equação 3, temos que para duas placas condutoras com áreas e distâncias fixas a variação se deve unicamente pela variação na permissividade elétrica. Assim, determina-se variações de fase e substâncias no sistema.

No caso, para instalação do sensor internamente ao tubo de acrílico, foi necessário estimar a área que o sensor deveria ter, a fim de permitir o dimensionamento do circuito de captura, visando a sensibilidade e precisão das leituras. Na tabela 2.1.1, abaixo, apresentam-se as capacitâncias estimadas do sistema para dois materiais, água e ar, utilizando-se de um sensor de cobre de  $7,5 * 10^{-4}m^2$ , com as placas separadas de  $3cm$ , como as utilizadas nos experimentos desse trabalho.

Tabela 1: Valores teóricos de capacitância para o circuito

Dielétrico do meio	Capacitância teórica (pF)
Ar	0,221
Água destilada	17,675

## 2.2 Tomografia

### 2.2.1 Princípios de uma tomografia

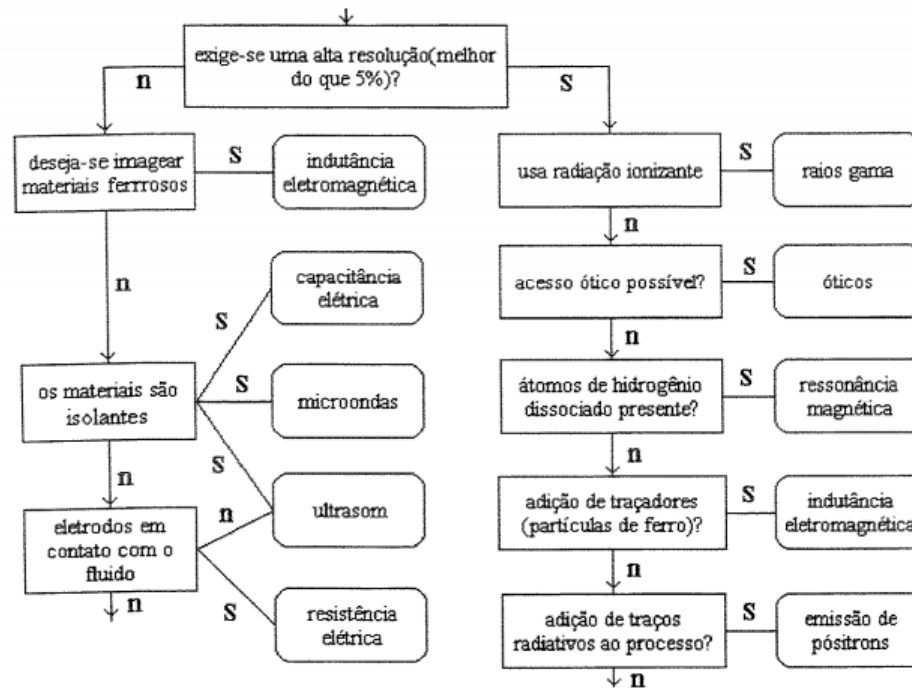
A palavra tomografia é derivada das palavras de origem gregas tomos, "fração" e grafen "registro" ou seja registro das frações, no caso para composição de imagens. A utilização de tomografia é muito difundida no meio médico, de onde se originou na década de 70 e muitas vezes atrelada ao termo "computadorizada" (Tomografia Computadorizada), que se refere à utilização de computadores para aquisição e processamento das imagens. (SOARES, 2009)

Já na década de 80, o conceito e a aplicação de tomografia deixou de ser restrito à área médica e passou a ter uma série de aplicações industriais. Entre os principais tipos de tomografia encontramos:

- a) Tomografia através do uso de radiação eletromagnética;
  - Tomografia ótica;
  - Tomografia por raios-X;
  - Tomografia por emissão de raios pósitron;
- b) Tomografia através de ressonância eletromagnética;
- c) Tomografia através do princípio acústico;
- d) Tomografia através de propriedades elétricas e magnéticas;
  - Tomografia por indução eletromagnética;
  - Tomografia por resistência elétrica;
  - Tomografia por impedância elétrica;
  - Tomografia por capacitância elétrica.

Para tomar a decisão de qual tipo de tomografia deve ser utilizada para determinado tipo de aplicação, pode-se recorrer ao fluxograma criado por M.S. Beck e apresentado, em português por Azevedo Filho. (SOARES, 2009)

Figura 2: Fluxograma para definição de técnicas tomográficas.

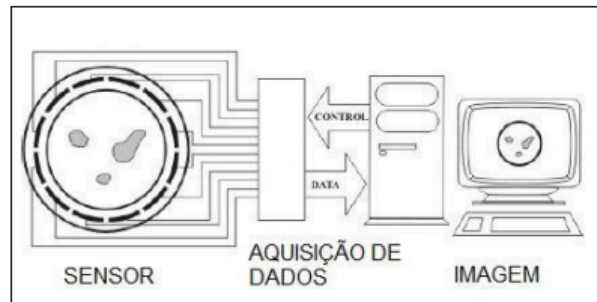


Para a elaboração desse trabalho foi escolhida a tomografia por capacitância elétrica (TCE). Esse tipo de tomografia é atualmente o mais utilizado para tomografia de processos. É adequada para processos de tomografia em meios dielétricos e com permissividades relativas distintas entre os materiais.

### 2.2.2 Tomografia capacitiva

A tomografia elétrica, em especial a tomografia capacitiva, é a técnica mais utilizada atualmente em aplicações de análise de processos, onde é necessário analisar a distribuição de permissividades de uma ou mais fases ou de um ou mais líquidos no sistema. As principais características positivas dessa técnica são a utilização de sensores não intrusivos, o baixo-custo do material empregado e a velocidade de resposta do sistema permitindo uma análise apurada da morfologia de um escoamento multifásico. Um sistema completo de tomografia capacitiva, em geral, consiste de sensores não-intrusivos, um sistema de aquisição de dados e um microcomputador para análise dos dados, como exemplificado no esquema de montagem na Figura 3, abaixo.

Figura 3: Esquemático do sistema de ECT



(RISSARDI, 2009)

Para cada sistema deve-se escolher tanto a quantidade como a disposição dos sensores, a fim de proporcionar a melhor análise do possível do escoamento. A reconstrução de imagens é obtida através das medidas das  $N$  capacitâncias entre os pares de eletrodos; para um sistema de  $n$  eletrodos, pode-se obter  $N * (N - 1)/2$  medidas de capacitância.

## 3 MATERIAIS E MÉTODOS

### 3.1 Simulações

#### 3.1.1 FEMM

O FEMM (Finite Element Method Magnetics), é um *software* de elementos finitos para resolução de problemas magnéticos e eletrostáticos de baixa frequência, para superfícies planas e eixo-simétricos. O pacote contém três elementos principais, o *Shell* interativo, responsável pela interface homem-máquina; o *Triangle*, que é um discretizador, utilizado para criar a malha de elementos finitos (em formato de triângulos); e um *Solver*, responsável por resolver o problema. Utilizou-se o módulo para resolução de problemas eletrostáticos, afim de entender o comportamento das linhas de campo elétrico e a sua magnitude em diferentes partes da tubulação, utilizando diferentes meios e configurações.

Nas figuras apresentadas abaixo, pode-se ver as linhas de campo elétrico, representadas pelas setas pretas, o tamanho das setas representa o módulo do vetor do campo elétrico  $\mathbf{E}$ , a direção das setas representa a direção do campo elétrico. Afim de facilitar a visualização da magnitude do campo elétrico foi adicionado uma escala de cores.

Foi então modelado o corte da seção perpendicular da tubulação e adicionando-se as propriedades elétricas de cada material presentes no experimento. A primeira simulação, Figura 4, representa a seleção de dois sensores opostos, em uma tubulação de acrílico com o cano vazio. A segunda simulação, 5, representa a seleção de dois sensores adjacentes, com a tubulação vazia.

Na simulações abaixo, foi utilizado um tubo de acrílico de  $3\text{cm}$  de diâmetro interno,  $4\text{cm}$  de diâmetro externo e placas de cobre com  $1,5\text{cm}$  de comprimento. Os eletródos foram posicionados distânciados de  $90^\circ$  entre si.

Figura 4: Sensores opostos com a tubulação vazia.

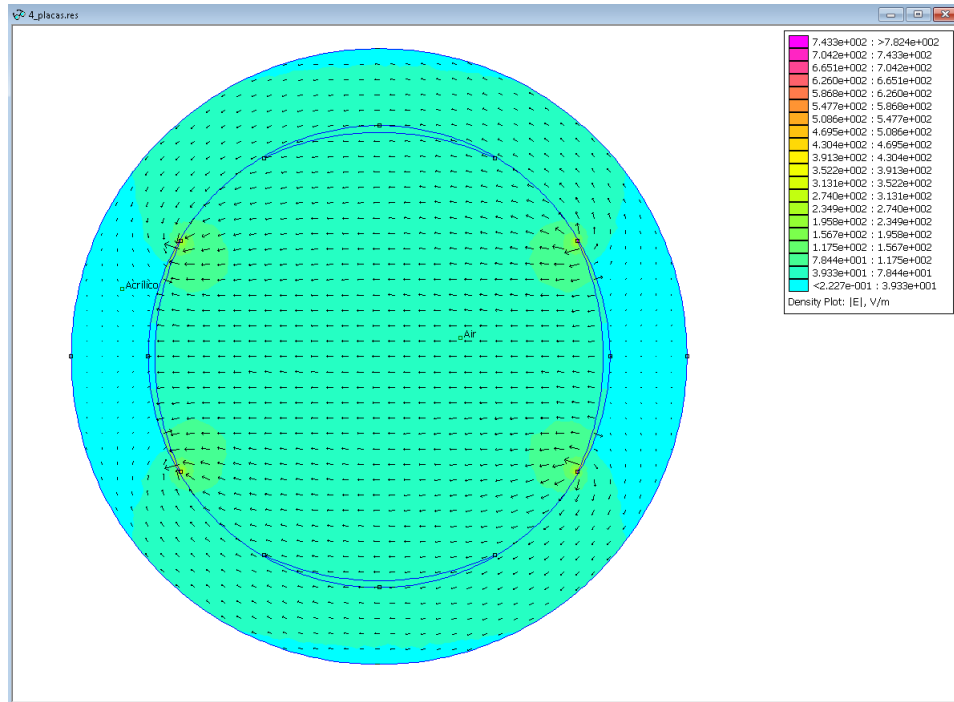
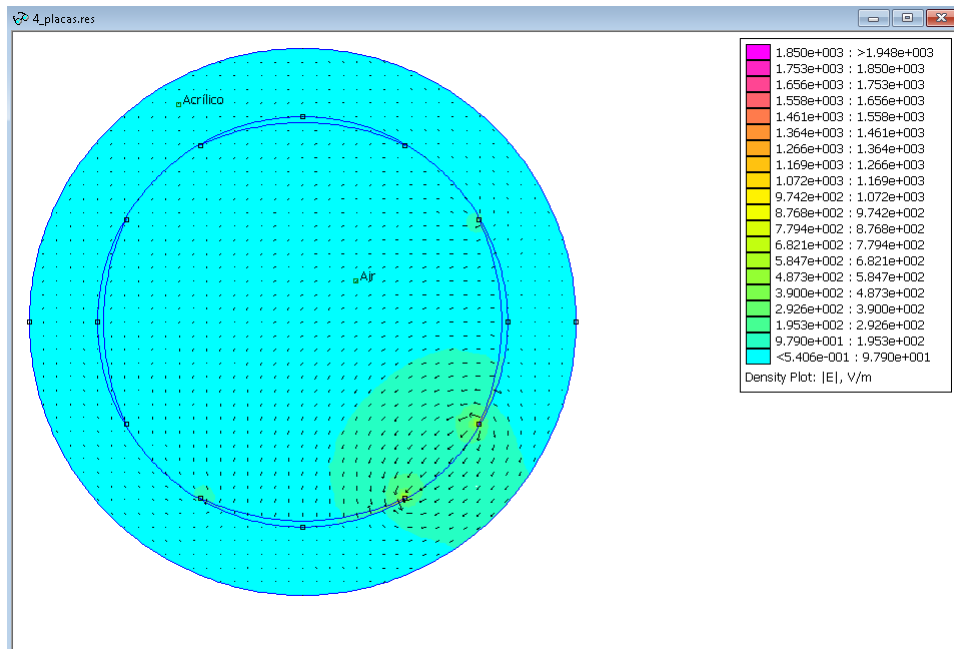


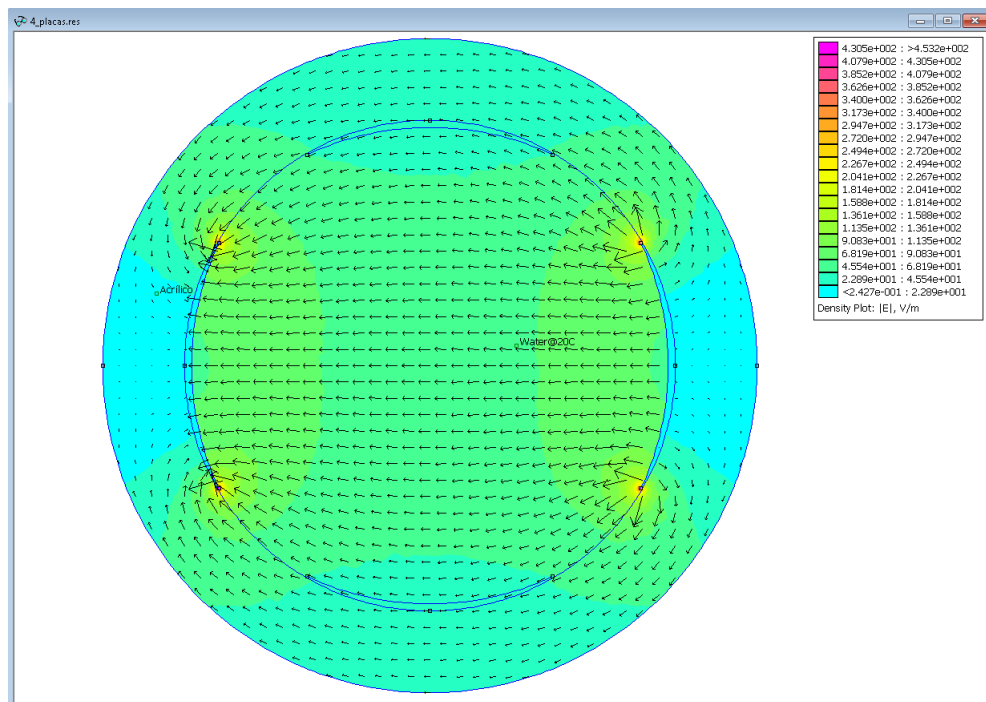
Figura 5: Sensores adjacentes com a tubulação vazia.



Observando se as duas figuras, podemos perceber um padrão de comportamento das linhas de campo tanto para os sensores opostos como os adjacentes. Pode-se observar também que existem linhas de campo expressivas na interface de acrílico, dessa forma, pode-se inferir que os valores de capacitância obtidos através dos sensores teram uma componente relativa as linhas de campo presentes na parede da tubulação de acrílico, produzindo um resultado que não reflete a variação da permissividade do fluido.

Em seguida foram simuladas três situações, com os sensores opostos selecionados: na primeira simulação Figura 6 o cano foi preenchido com água, na segunda preencheu-se a tubulação com água e bolahs de ar com 1cm de diâmetro Figura 7 e na terceira foi introduzido uma esfera de vidro de 1cm de diâmetro Figura 8.

Figura 6: Sensores opostos com a tubulação cheia de água.



Percebe-se claramente que com a introdução de um meio de permissividade elétrica maior no interior do cano, a intensidade das linhas de campo elétrico se torna menor no interior do cano, isso porque a permissividade elétrica é determinada pela capacidade do material se polarizar quando aplicado um campo elétrico, assim reduzindo o campo elétrico dentro do fluido. Portanto quanto maior a permissividade, maior o valor da capacitância do meio, ou seja, quando se trata de um meio com permissividade maior, as capacitâncias parasitas relativas ao cano de acrílico são proporcionalmente menores, quando comparadas com a tubulação vazia.

Figura 7: Sensores opostos, tubulação com água e uma bolha de ar.

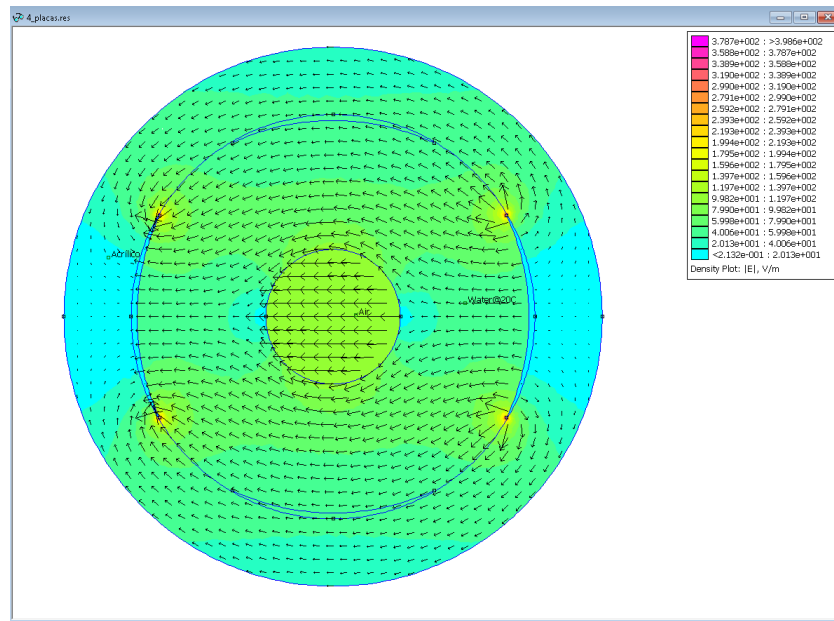
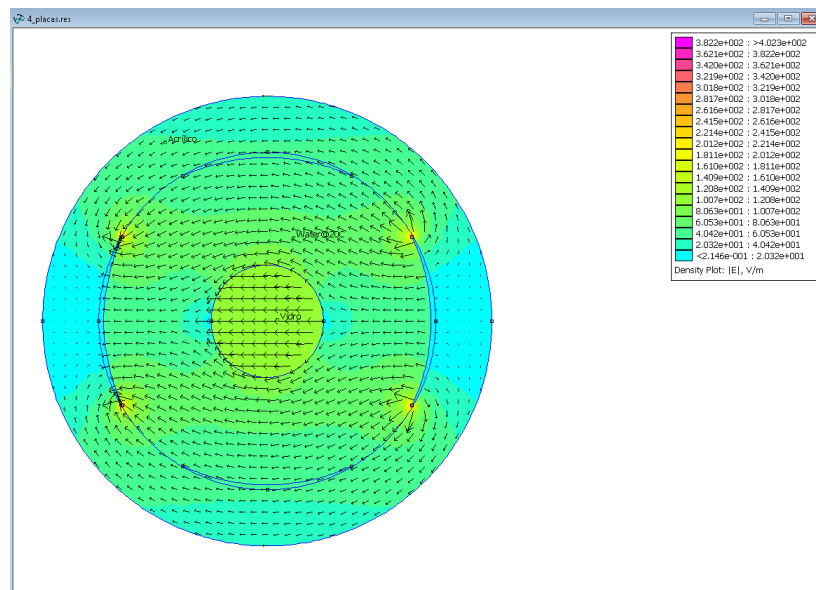


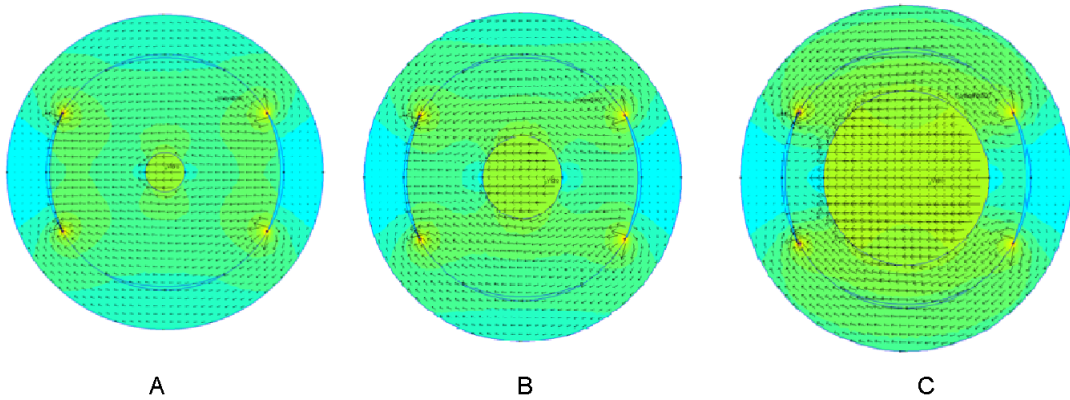
Figura 8: Sensores opostos, tubulação com água e uma esfera de vidro.



Ao se introduzir um objeto de permissividade elétrica diferente da água no interior do cano, no caso com permissividade elétrica muito inferior ao meio que a envolve, percebe-se novamente uma mudança no perfil das linhas de campo elétrico, dessa vez com um aumento na intensidade do campo dentro do objeto de menor permissividade, como era esperado; e assim gerando uma leitura de capacitância inferior nos sensores. Também fica claro, comparando se as Figuras 7 e 8, que tanto a bolha de ar como a esfera de vidro, produzem um perfil de linhas e intensidade de campo elétrico muito parecidas, isso por que as suas permissividades relativas são muito inferiores as da água, sendo 80,8 vezes menor para o ar e 23,7 vezes menor para o vidro.

Afim de se entender o comportamento das linhas de campo quando um objeto de permissividade muito inferior à água é introduzido no sistema, simulou-se o sistema com 3 objetos de diâmetros diferentes em seu interior, o primeiro com  $0,5\text{cm}$  de diâmetro, o segundo com  $1\text{cm}$  e o terceiro com  $2\text{cm}$ , como mostra a figura 9, dessa maneira foi possível entender melhor o comportamento das linhas de campo e como esse perfil altera os valores das capacitâncias.

Figura 9: Linhas de campo no tubo cheio de água com esferas de vidro de diferentes diâmetros posicionadas no centro.



a)  $d = 0,5\text{cm}$  b)  $d = 1\text{cm}$  c)  $d = 2\text{cm}$

## 3.2 Microcontrolador

### 3.2.1 PIC

Os microcontroladores PIC (*Programmable Intelligent computer*), são circuitos integrados pertencentes à família dos microcontroladores programáveis de estrutura Harvard modificada. Internamente, o circuito integrado possui todos os componentes necessários para a execução de um sistema digital programável. Possui em sua forma básica, uma CPU (*Central Processing Unit*), uma memória RAM (*Random Access Memory*), uma EEPROM (*Electrically Erasable Programmable Read Only Memory*) e Linhas de entrada e Saída Digitais, encapsuladas dentro de um microchip.

Existem inúmeros microcontroladores PIC sendo subdivididos em famílias conforme sua capacidade de processamento, quantidade de pinos e utilizações especiais. As principais versões são PIC10FXX, PIC18FXX e PIC24FXX; Dentro de cada famílias PIC existem diversos modelos, abrangendo diferentes encapsulamentos, número de portas, funções disponíveis, *clocks*, etc.

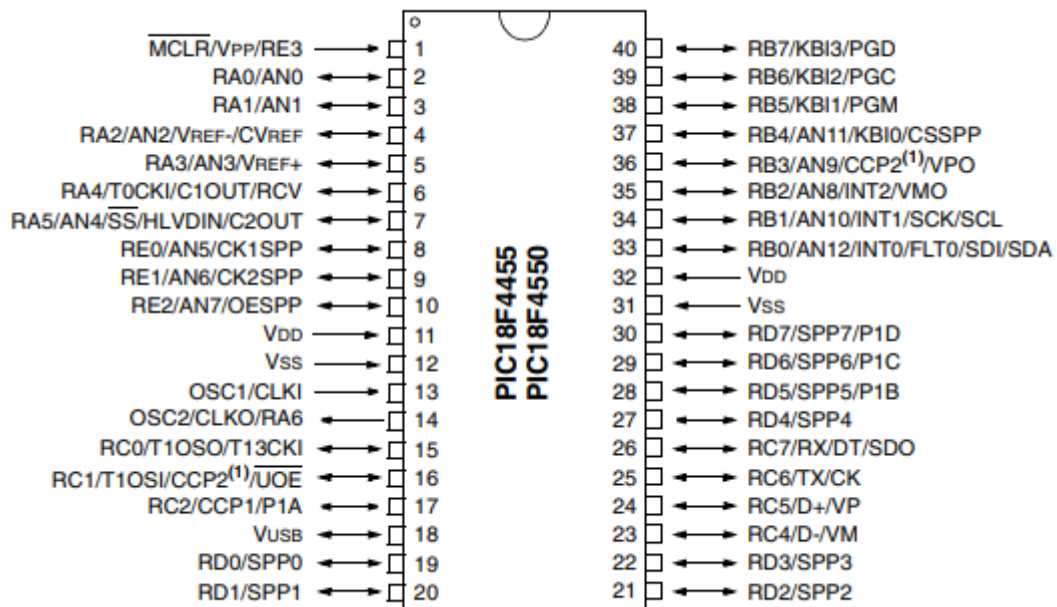
Para este trabalho foi escolheu-se o modelo PIC18F4550, essa escolha se deve ao baixo valor do componente, grande quantidade de memória RAM (2 kB), porta serial USB 2.0 (com taxa de transmissão de 12Mb/s) e dois Módulos CCP (*Capture-Compare-PWM*). A visualização circuito integrado pode ser visto na figura 10 e o esquema de pinagem na figura 11.

Figura 10: Microcontrolador PIC 18f4550



Fonte: Microchip (2018).

Figura 11: Esquemático completo dos pinos do microcontrolador PIC18f4550



Fonte: Microchip (2018).

Outras características importantes estão listadas abaixo e foram retiradas diretamente do *datasheet* do fabricante, no site da microchip (MICROCHIP, 2018)

- a) Memória *FLASH* com 32 *Kbytes*;
- b) Memória *SRAM* com 2 *Kbytes*;
- c) Memória *EEPROM* com 256 *bytes*;
- d) *Chip* com 40 pinos (sendo 35 configuráveis);
- e) Total de 13 portas configuráveis como entradas analógicas;
- f) 2 Módulos CCP;
- g) 4 *Timers* (2 de 8 *bitss* e 2 de 16 *bits*);
- h) Cristal interno de 4 MHz;
- i) Frequência máxima de operação 48 MHz;
- j) 2 comparadores;
- k) 5 portas (A,B,C,D, E).

### 3.2.2 Módulo CCP

O módulo de captura, comparação e PWM ou abreviadamente CCP, foi desenvolvido a fim de auxiliar a medição e o controle de sistemas baseados em pulsos. O módulo CCP contém

um registrador de *16bits*, que pode operar de três maneiras diferentes, como o nome sugere: com captura, comparação ou geração de sinais (pulsos). O registrador de controle do módulo CCP é composto pelos seguintes bits como indicados na figura 12, Onde os quatro primeiros bits “CCPxM3:CCPxM0”, são responsáveis por *setar* o modo de operação do módulo, sendo as principais configurações descritas abaixo.

Figura 12: Bits de controle módulo CCP

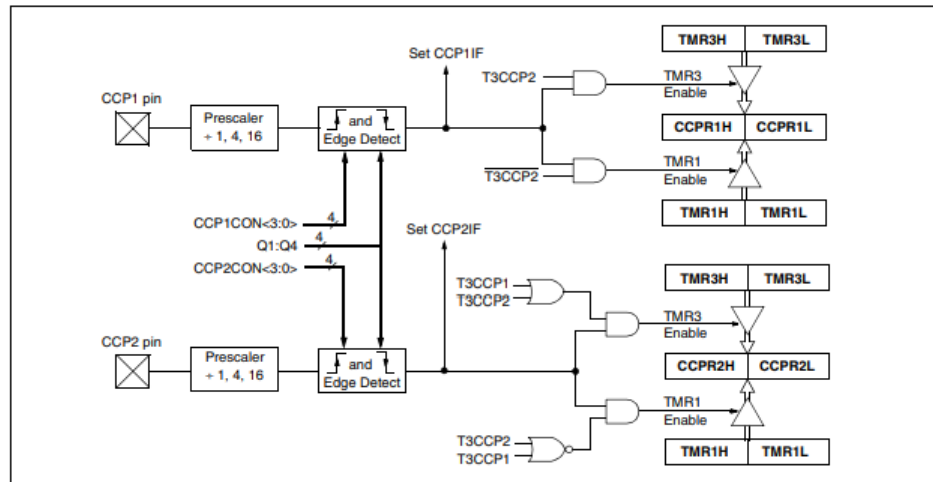
U-0	U-0	R/W-0	R/W-0	R/W-0	R/W-0	R/W-0	R/W-0
_(1)	_(1)	DCxB1	DCxB0	CCPxM3	CCPxM2	CCPxM1	CCPxM0
bit 7							bit 0

Fonte: Microchip (2018).

- a) 0000 - Desabilita o módulo CCP;
- b) 0010 - Habilita o módulo de comparação;
- c) 0100 - Modo de captura (subida de borda);
- d) 0101 - Modo de captura (descida de borda);
- e) 0110 - Modo de captura (a cada 4 subidas de borda);
- f) 0111 - Modo de captura (a cada 16 subidas de borda);
- g) 11xx - Modo PWM.

Para aquisição dos sinais gerados pelo sistema, utilizou-se o modo de captura a cada 16 subidas de borda; essa opção foi escolhida devido ao fato de apresentar maior precisão na aquisição dos dados. O modo de captura desse módulo funciona registrando dois valores de *16 bits* do TMR1 ou do TMR2 (o *timer* utilizado pode ser setado selecionando o registrador T3CON3) e comparando a diferença de pulsos entre as duas capturas, dessa forma tendo conhecimento da frequência do *clock* utilizado é possível calcular a frequência do sinal de entrada. O diagrama de blocos do modo de captura do módulo CCP encontra-se na Figuras 13, abaixo.

Figura 13: Diagrama de blocos do módulo de captura.

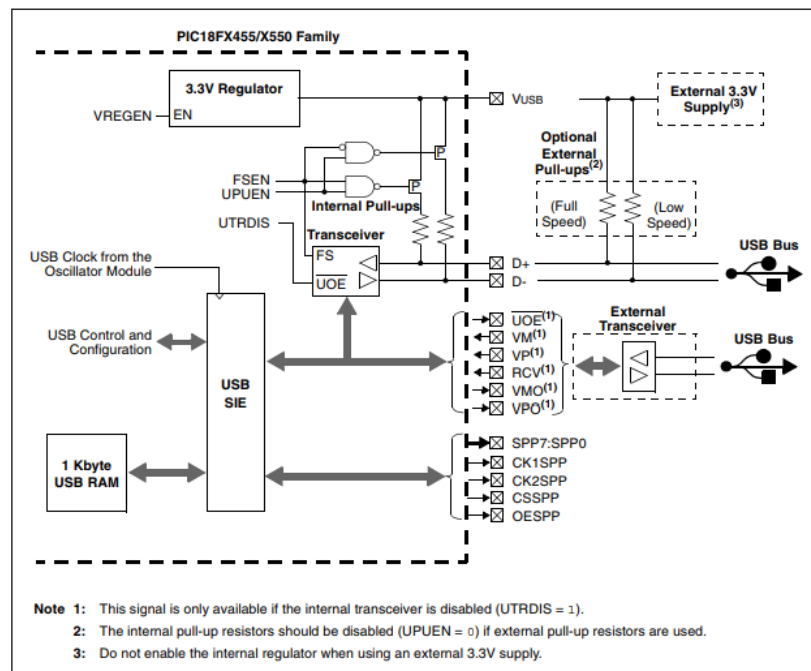


Fonte: Microchip (2018).

### 3.2.3 Transmissão USB

O protocolo USB (*Universal Serial Bus*) é um padrão de comunicação definido em conjunto por várias empresas, a fim de padronizar conectores e protocolos de comunicação entre dispositivos periféricos; lançado em 1996, atualmente possui três gerações (USB 1.X, 2.0 e 3.X). No microprocessador PIC18f4550 encontra-se uma versão de comunicação serial USB 2.0 com duas velocidades de operação 1,5Mb/s em *Low Speed* e 12Mb/s em *Full Speed*. O módulo USB do PIC possui uma RAM dedicada de 1Kbyte. O diagrama de blocos do módulo USB do PIC18f4550 se encontra na Figura 14.

Figura 14: Diagrama de blocos do módulo USB.



Fonte: Microchip (2018).

### 3.2.4 Programação PIC

Para programar os microcontroladores PIC existem diversas possibilidades, tanto quando se trata de linguagens de programação, quanto para compiladores, a escolha desses depende unicamente da aplicação prevista e do conhecimento prévio de cada desenvolvedor. Dentre as Linguagens disponíveis para programação estão *Assembly*, *C*, *Basic*, *Pascal*, *ladder*; desde que seja possível gerar um arquivo *.hex* de acordo com o PIC específico, é possível programar. Já para os compiladores, os mais utilizados são o CSS, MikroC e MPLAB, cada um com suas vantagens e desvantagens.

Para esse trabalho, foi escolhido a linguagem de programação C e foi utilizado o compilador *MikroC*, devido a sua ampla biblioteca, que facilita a implementação da comunicação USB. O ambiente de desenvolvimento desse compilador é mostrado na Figura 15. Os códigos desenvolvidos para o PIC se encontram nos apêndices A e B.

A utilização do compilador é intuitiva, nele é possível selecionar o modelo do microcontrolador PIC que será utilizado, o tipo e a frequência do cristal, as bibliotecas incluídas, dentre outras muitas disponibilidades de projeto possíveis. Dentro das opções *Tools*, existe a ferramenta HID Terminal que permite a criação de maneira simples de descritores de comunicação USB (dentro dos descritores são especificados os valores PID, VID e tamanho do *buffer* de comunicação) e também permite a utilização de um terminal para a leitura de dados recebidos pela porta do dispositivo. A Figura 16 abaixo, mostra a ferramenta.

Figura 15: Ambiente de desenvolvimento do compilador MikroC.

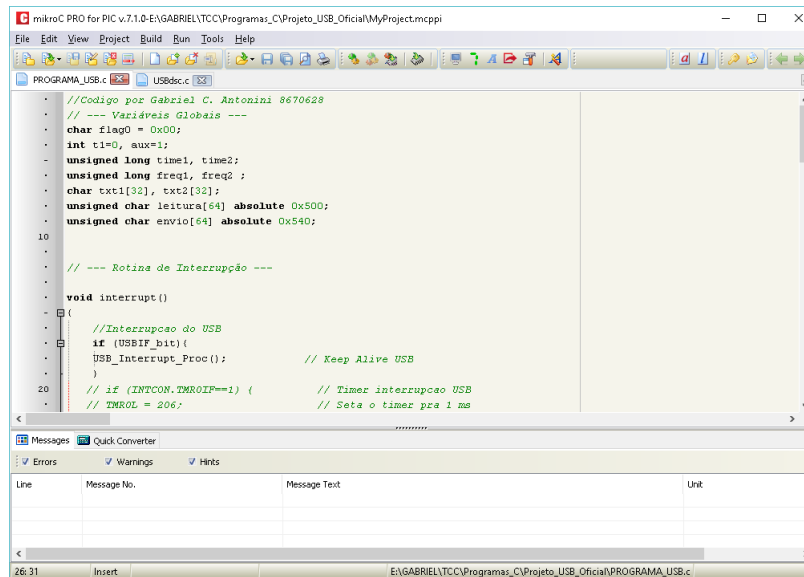
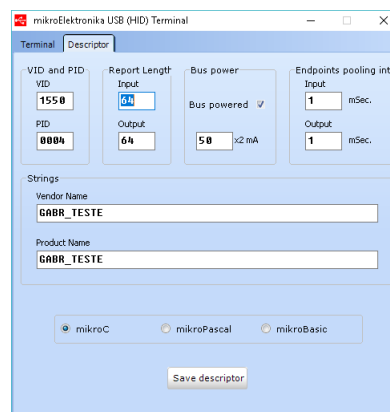


Figura 16: Ferramenta HID Terminal.



### 3.3 Processamento de Dados

#### 3.3.1 Labview

O *LabView* é um *Software* de engenharia de sistemas criado especificamente para aplicações que necessitam de testes, medições, controles e de fácil acesso ao *hardware* e às informações obtidas por sensores externos ao computador. (INSTRUMENTS, 2019)

O *software* se utiliza de programação gráfica desenvolvida pela National Instruments em 1986 e é amplamente utilizada para problemas e projetos envolvendo aquisição de dados e automação de processos, tudo isso é obtido através de um modelo de fluxo de dados, onde pode-se de maneira simples criar interfaces para obtenção e tratamento de dados.

Para esses experimento o *Labview* foi utilizado para interfacear os dados transmitidos via USB pelo micro controlador PIC, tratá-los e armazená-los em um formato que permitisse o

pós processamento desses dados (o formato escolhido foi o .csv). Na Figura 17 encontramos a programação gráfica da interface e na Figura 18 encontramos a interface homem máquina criada pelo *software*.

Figura 17: Programação Gráfica.

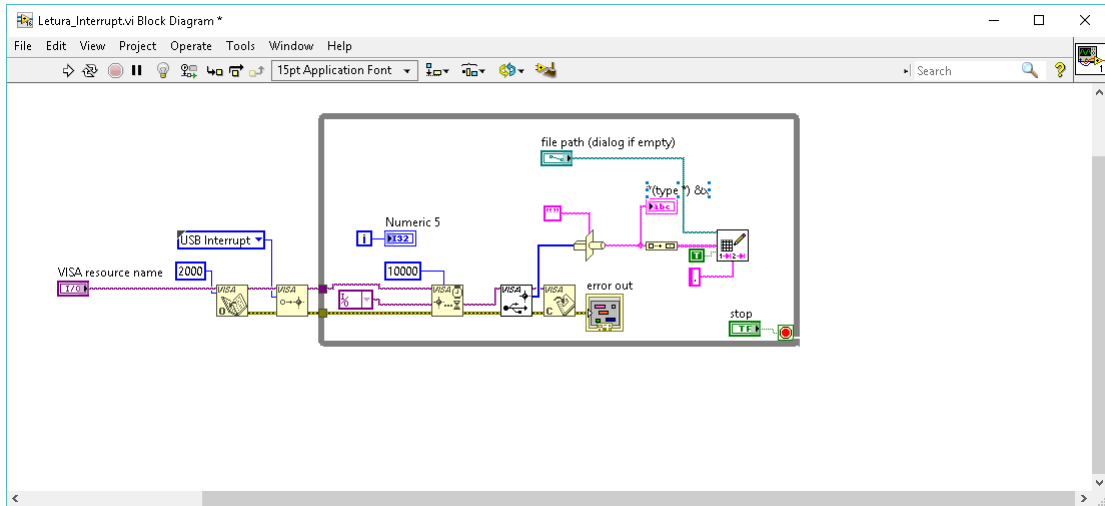
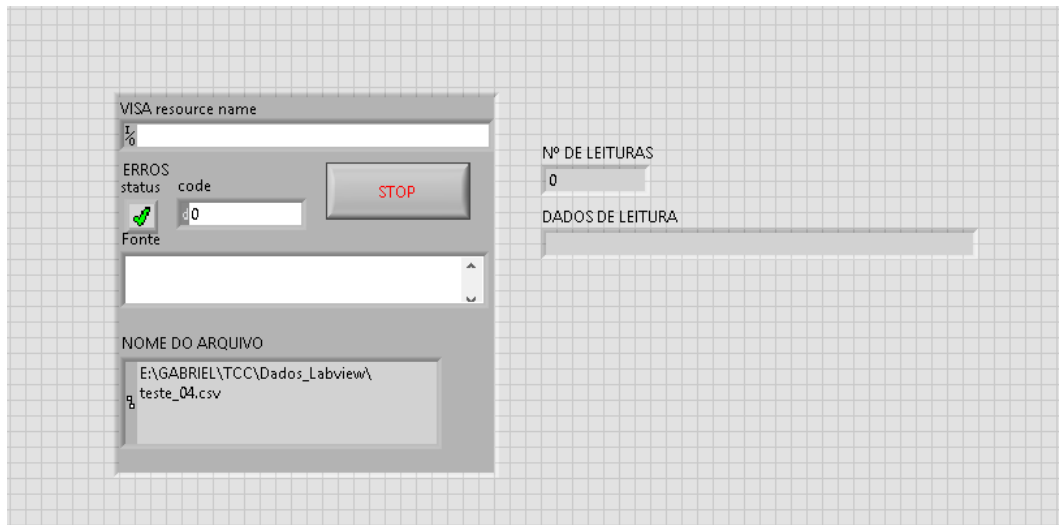


Figura 18: Interface Homem-Máquina.



O programa em questão funciona de maneira bem simples, inicialmente estabelece conexão com a USB, através de uma comunicação USB *raw* (é necessário fazer a instalação de *firmware* próprio), em seguida aguarda interrupções USB para fazer a captura dos dados e escrita no arquivo .csv. Na Figura 18, que mostra a interface homem máquina, podemos destacar os campos *VISA resource name*, onde é feita a seleção da porta USB que será lida e o nome do arquivo a ser gravado.

### 3.3.2 MATLAB

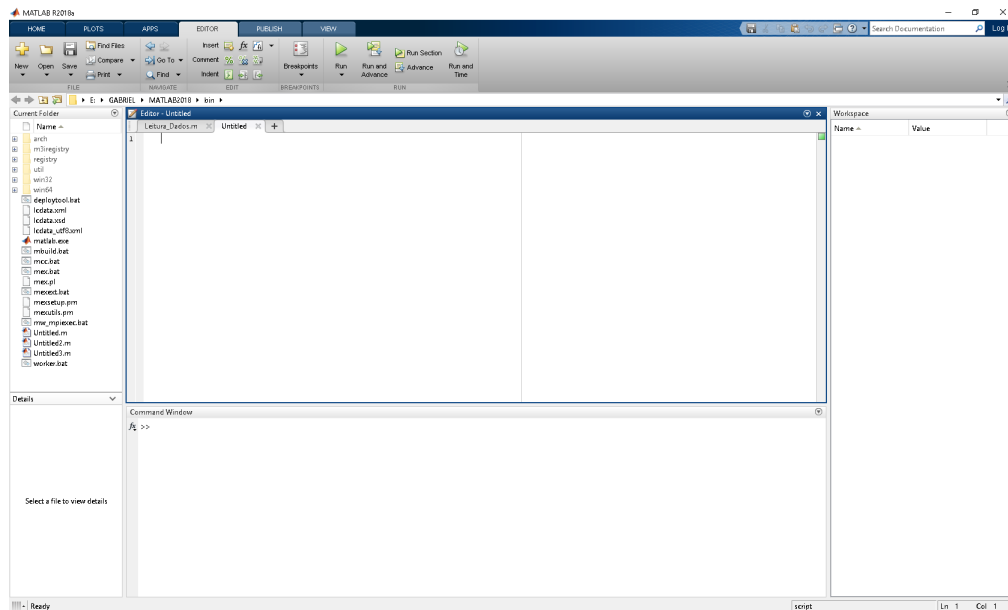
O *software* Matlab (*Matrix Laboratory*), é um *Software* comercial produzido pela MathWorks; é um uma plataforma de programação integrada, que inclui interfaces gráficas e uma grande quantidade de *ToolBoxes* especializadas, para resolver uma grande gama de problemas específicos.(FERREIRA, 2009)

O *Software* é voltado para problemas de cálculo numérico, faz a integração de análises de cálculo numérico, cálculo matrizes, processamento digital de sinais e construção de imagens; tudo isso em um ambiente de rápida aprendizagem e simplicidade.

A Figura 19, retrata o ambiente de desenvolvimento do *Matlab* e pode se perceber a existência de algumas janelas. A janela superior esquerda é a janela responsável por mostrar o diretório do arquivo que se está trabalhando; a janela inferior esquerda mostra os detalhes dos arquivos quando selecionados na janela acima. A janela central superior é o ambiente de desenvolvimento de programas, ou *scripts*, onde é possível escrever códigos na linguagem própria do *Matlab*; a janela central inferior é a janela de comandos, nela é possível executar comandos variados a qualquer momento, sem a necessidade de implementá-los no *Script*, muito útil para testes rápidos e *debugs* do programa; Por fim, a janela da direita, é a janela das variáveis, nela pode-se averiguar os valores instantâneos das variáveis, assim como acessar as matrizes e

tabelas geradas durante a execução do programa.

Figura 19: Ambiente de desenvolvimento MATLAB.

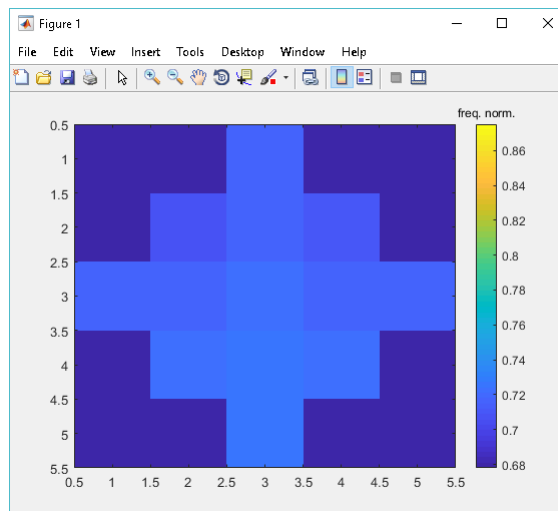


Para o experimento pretendido nessa prática, foi necessário a utilização de uma *Toolbox* específica para análise e tratamento de imagens, o *Image Processing Toolbox*; com a instalação dessa ferramenta é possível, importar dados, realocar dados, tratar os dados e por fim criar uma imagem.

No caso das imagens do sensor, foi utilizado um modelo simples de representação do tubo e as imagens foram geradas conforme as linhas de campo apresentadas nos experimentos com o *Software* de elementos finitos FEMM. Devido ao pequeno número de sensores e consequentemente o número de permutações entre eles, foi realizado um modelo com 25 pixels, ou seja, uma matriz 5x5, sendo que cada pixel é gerado pela composição de 6 medidas, relativas as permutações das placas e posteriormente ponderadas. Cada um dos pares de sensores gera uma matriz de sensibilidade, conforme as linhas de campo elétrico das simulações do FEMM; a partir dessas matrizes que determinam a componente do campo elétrico na direção dos sensores, utiliza-se o valor de capacitância aferido nos sensores para determinar o valor de cada pixel em decorrência do valor da componente do campo elétrico para cada pixel. Os códigos desenvolvidos em MATLAB se encontram nos apêndices C e D.

Na Figura 20, os pixels com a coloração azul escuro, representam as seções do tubo de acrílico, nas quais não é feita nenhuma medição, já na parte central encontram-se as medidas aferidas normalizadas. No processo de calibração e normalização das frequências foi aferida a maior frequência possível do sistema e utilizada para normalizar as outras medidas.

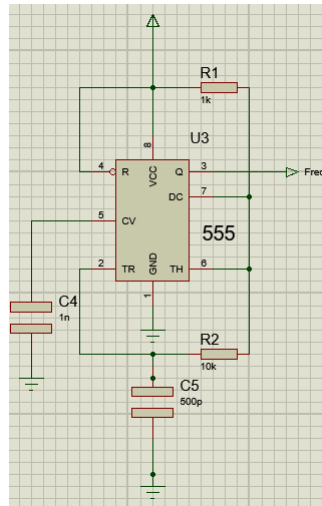
Figura 20: Imagem Tomográfica gerada utilizando MATLAB.



### 3.4 Oscilador

Para se medir se as capacitâncias entre os sensores, utilizou-se um oscilador astável, que gera em sua saída um sinal de onda quadrada, que relaciona a frequência de maneira inversamente proporcional a capacitância de entrada. Para construir o oscilador, foi utilizado o CI LM555. A montagem completa do circuito oscilador está apresentada na figura 21

Figura 21: Circuito oscilador elaborado utilizando Isis Proteus 8.



A partir dessa montagem pode se definir a equação que rege a frequência do circuito, estabelecida pela capacitância C5 e dos resistores R1 e R2; vale ressaltar que o capacitor C4 é utilizado para estabilização do sinal de saída. A relação estabelecida pode ser vista na equação 3.1, abaixo.

$$f = \sqrt{2} / ((R1 + 2 * R2) * C5) \quad (3.1)$$

Os valores máximos e mínimos para a montagem desse circuito, são apresentados pelo *datasheet* do fabricante e podem ser observados na Tabela 2.

Tabela 2: Valores máximos e mínimos para o circuito oscilador.

Componente	Valor limite
R1+R2	max 3 MΩ
R1	min 1kΩ
R2	min 1kΩ
C	min 500 pF
C	max 2,2 nF
F	max 1 MHz
Iout	200 mA
Vcc	18 V

### 3.4.1 Validação circuito oscilador.

A fim de validar o circuito oscilador, foi realizado um experimento acoplado-se capacitores de valores conhecidos em paralelo com o capacitor C5 do circuito da Figura 21 e verificando-se as frequências resultantes e comparando as com o valor teóricos esperados. Os resultados desse experimento estão apresentados na Tabela 3.

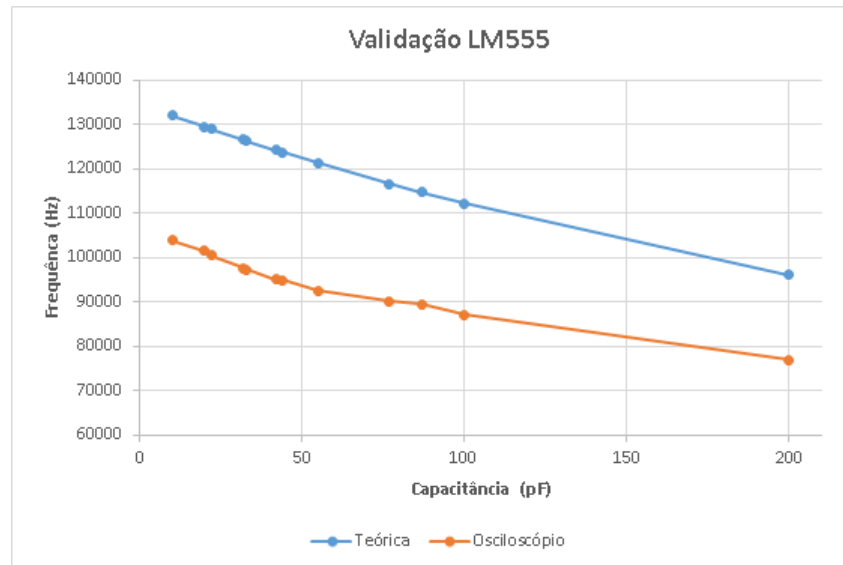
Tabela 3: Dados para validação do circuito oscilador.

Capacitor (pF)	Frequência			Capacitância	
	Teórica (Hz)	Osciloscópio (Hz)	Variação (%)	Aferida (pF)	Erro (pF)
10	132046	103900	21,3%	148,2	138,2
20	129507	101500	21,6%	163,5	143,5
22	129011	100500	22,1%	170,1	148,1
32	126586	97660	22,9%	189,6	157,6
33	126348	97300	23,0%	192,1	159,1
42	124250	95170	23,4%	207,6	165,6
44	123793	94930	23,3%	209,4	165,4
55	121340	92640	23,7%	226,9	171,9
77	116713	90220	22,7%	246,4	169,4
87	114725	89470	22,0%	252,7	165,7
100	112239	87200	22,3%	272,3	172,3
200	96205	76990	20,0%	374,7	174,7

Percebe-se que os valores de frequência teóricos são muito superiores aos valores medidos no circuito, porém foi possível perceber que a variação entre a frequências teórica e a aferida ficou constante para toda a faixa de capacitância utilizada, em média, a teórica, ficou 22,8% maior. Dessa maneira, foi teorizado que a variação de frequência estava ligada à capacitâncias parasitas no circuito; utilizando as frequências aferidas calculou-se as capacitâncias reais medidas pelo circuito e desses valores subtraídos os valores dos capacitores comerciais utilizados para teste e foi constatado na média um erro de  $161pF$ , devido a capacitâncias parasitas e outros tolerâncias não determinadas no circuito, não bem determinadas.

Com esse experimento também foi possível determinar o comportamento do circuito para diferentes capacitâncias e valores de frequência, percebeu-se que o comportamento do circuito foi razoavelmente linear para os diferentes capacitores utilizados, que compreendiam a faixa de utilização do circuito. Pode-se ver na Figura 22, o comportamento aproximadamente linear do circuito, tão como os valores teóricos de frequência.

Figura 22: Comparação entre frequência teórica e frequência aferida.

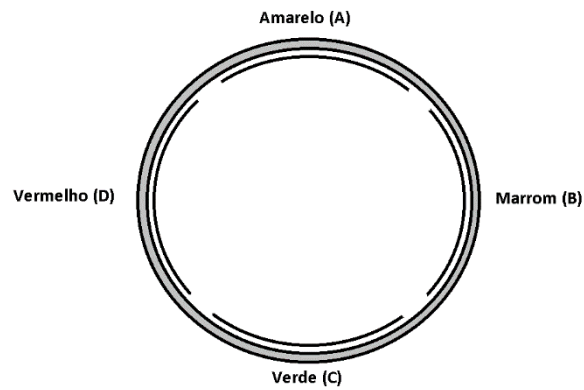


Comparando-se as duas retas pode-se calcular o valor do coeficiente angular de cada uma das retas; o coeficiente angular da curva teórica é  $mt = -188,64Hz/pF$ ; já para a curva aferida o coeficiente é  $ma = -141,63Hz/pF$ , o desvio padrão das variações em todo o espectro de capacitâncias aferidas foi de 1,04%. Percebe-se dessa maneira que o circuito ainda que se comporte de maneira análoga a linear não temo mesmo coeficiente angular que a curva teórica, isso se deve principalmente à ruídos no circuito e a não linearidade dos componentes utilizados.

### 3.5 Sensores

Os sensores utilizados são feitos a partir de um recorte de uma folha de cobre de 0,15mm de espessura, com 1,5cm de largura por 5cm de comprimento, totalizando uma área de 7,5cm<sup>2</sup>. As dimensões foram definidas a partir de testes preliminares, nos quais foram testadas as capacitâncias entre as placas nos meios de interesse e conseqüentemente as faixas de frequência geradas em conjunto com o oscilador astável. Na Figura 23 abaixo está esquematizado a disposição de cores de fios e as letras correspondentes a cada sensor no tubo.

Figura 23: Esquema de cores e letras dos sensores, para referência.



Para a montagem do sistema, foi utilizado um tubo de acrílico de  $3\text{cm}$  de diâmetro interno e  $4\text{cm}$  de diâmetro externo. O cano foi posicionado em uma base de acrílico, na seção central interna do tubo foram feitas 4 ranhuras espaçadas de  $90^\circ$ , de aproximadamente  $3\text{cm}$  por  $1,5\text{cm}$ , a fim de acomodar os sensores com firmeza, como mostra as Figuras 24 e 25, abaixo.

Figura 24: Quatro placas de cobre instaladas internamente ao tubo de acrílico.

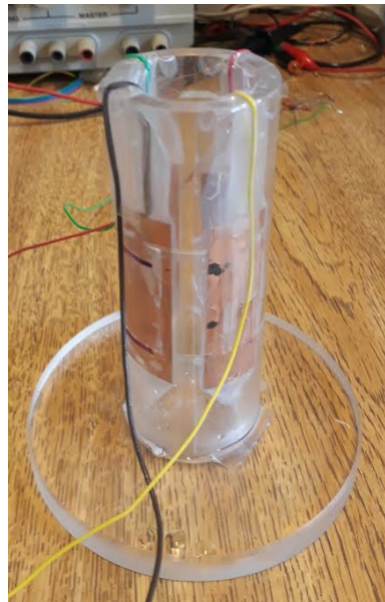
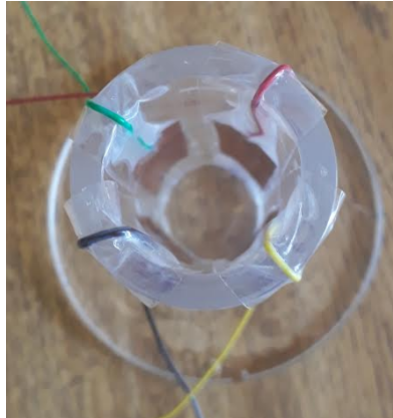


Figura 25: Vista superior da montagem das 4 placas de cobre.



### 3.5.1 Validação sensores

Com as placas posicionadas e dispostas conforme a Figura 25, foram tomadas medidas das capacitâncias entre as placas, utilizando tanto ar como água como dielétricos, a fim de comparar com os valores de capacitância calculados teoricamente. Os valores de capacitância aferidos entre os sensores estão dispostos nas Tabelas 4 e 5, abaixo.

Tabela 4: Tabela de capacitâncias aferidas com ar como dielétrico.

AR					
Sensor 1	Sensor 2	Frequência Osciloscópio (Hz)	Frequência PIC (Hz)	Capacitância aferida (pF)	Capacitância corrigida (pF)
Amarelo	Marrom	99460	99999	177,09	16,09
Amarelo	Verde	100700	100840	168,75	7,75
Amarelo	Vermelho	100600	100840	169,42	8,42
Marrom	Verde	100100	100840	172,76	11,76
Marrom	Vermelho	99900	99999	174,11	13,11
Verde	Vermelho	99820	99999	174,65	13,65
Médias		100097	100420	172,80	11,80

Tabela 5: Tabela de capacitâncias aferidas com água como dielétrico.

Água					
Sensor 1	Sensor 2	Frequência Osciloscópio (Hz)	Frequência PIC (Hz)	Capacitância aferida (pF)	Capacitância corrigida (pF)
Amarelo	Marrom	83180	83333	309,61	148,61
Amarelo	Verde	83140	83960	310,00	149,00
Amarelo	vermelho	82160	82191	319,66	158,66
Marrom	Verde	84050	84507	301,23	140,23
Marrom	Vermelho	83950	83916	302,19	141,19
Verde	Vermelho	83680	83916	304,77	143,77
Médias		83360	83637	307,91	146,91

Percebe-se que para ambos os dielétricos os valores de capacitância aferidos ficaram muito distantes dos valores teóricos calculados, apresentados na Figura 22. Sabe-se ainda pela seção de validação do circuito oscilador LM555, que o próprio circuito sofre com capacitâncias parasitas e tolerâncias dos componentes utilizados, apresentando em média  $161pF$ , entre capacitâncias parasitas e desvio dos componentes; dessa forma podemos estimar o valor médio das capacitâncias aferidas, descontando os erros:  $11,80pF$  (ar),  $146,91pF$  (água).

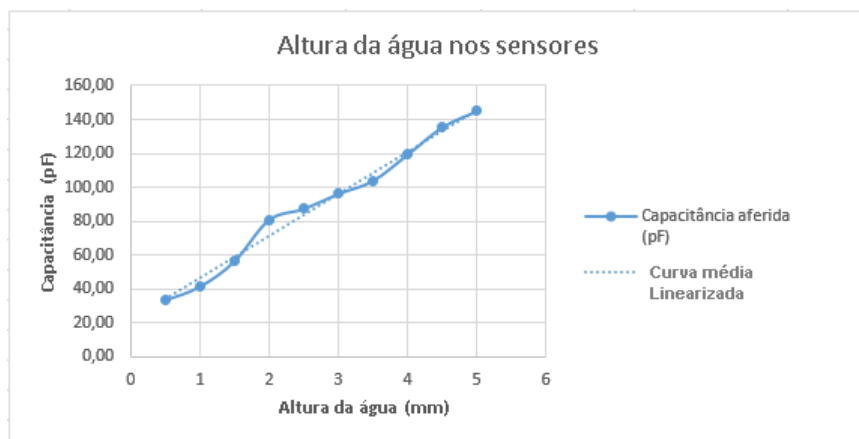
Mesmo descontando os erros na medição, percebe-se que os valores divergem dos valores teóricos apresentados na Figura 22. Deduziu-se então que esses erros se devem em parte aos fios que ligam os sensores da tubulação ao circuito no *proto-board*, uma vez que esses não são blindados. Pelo fato da água utilizada nos experimentos não ser destilada apresentando impurezas, dentre elas sais minerais que a tornam condutora, contribui para os erros observados.

Foi realizado um terceiro ensaio no qual os sensores opostos Amarelo e Verde foram submersos em água até a totalidade de seu comprimento e medidas as capacitâncias no decorrer do processo. Deve-se notar que o valor de erro de  $161pF$ , foi descontado das capacitâncias medidas. Os dados obtidos nesse ensaio são apresentados na Tabela 6 e na Figura 26, abaixo.

Tabela 6: Capacitância entre os sensores Amarelo e Verde quando submersos em água.

Água (mm)	Frequência Osciloscópio (Hz)	Capacitância aferida (pF)	Capacitância corrigida (pF)
0,5	97000	194,26	33,26
1	95890	202,30	41,30
1,5	93900	217,18	56,18
2	90800	241,67	80,67
2,5	89999	248,27	87,27
3	88950	257,09	96,09
3,5	88050	264,83	103,83
4	86300	280,34	119,34
4,5	84560	296,40	135,40
5	83560	305,93	144,93

Figura 26: Capacitância aferida entre os sensores Amarelo e Verde quando submersos em água.



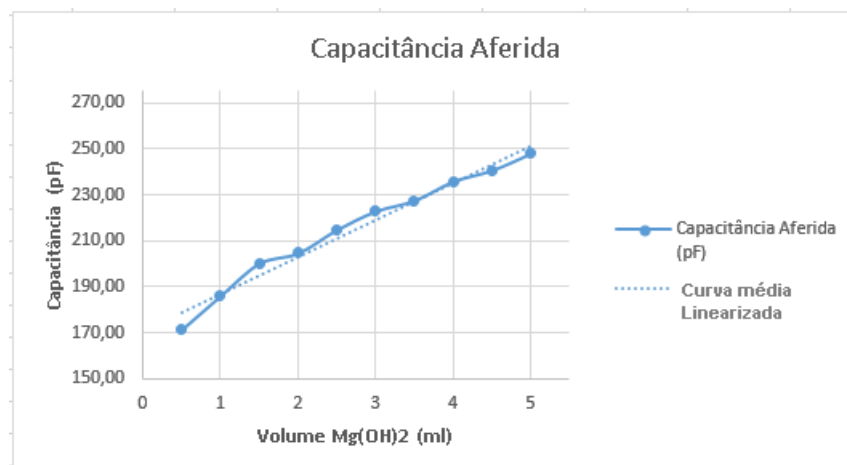
Percebe-se que a variação de capacitância conforme o aumento do nível de água nos sensores teve um comportamento quase que linear, e os valores de capacitância aferidos estão de acordo com dois experimentos anteriores.

A seguir, foi realizado um terceiro experimento, com o tubo completamente cheio de água (60ml), acrescentando-se hidróxido de magnésio ( $Mg(OH)_2$ ), a fim de alterar a permissividade elétrica do meio. Mediu-se a capacitância a cada 0,5ml de hidróxido de magnésio acrescentados na mistura, até um valor total de 5ml. Os dados desse ensaio estão apresentados na Tabela 7 e na Figura 27.

Tabela 7: Capacitância aferida entre os sensores Amarelo e Verde variando o volume de  $Mg(OH)_2$  na mistura.

Volume $Mg(OH)_2$ (ml)	Frequência Osciloscópio (Hz)	Capacitância Aferida (pF)	Capacitância Corrigida (pF)
0,5	80900	332,43	171,43
1	79500	347,09	186,09
1,5	78200	361,17	200,17
2	77800	365,60	204,60
2,5	76900	375,73	214,73
3	76200	383,77	222,77
3,5	75800	388,44	227,44
4	75100	396,72	235,72
4,5	74700	401,52	240,52
5	74100	408,82	247,82

Figura 27: Capacitância aferida conforme variação de volume de  $Mg(OH)_2$  na mistura.



Percebe-se que conforme a concentração varia na mistura de hidróxido de magnésio na mistura a capacitância aumenta, de maneira quase linear, o que atende as expectativas desse ensaio. Percebe-se que para diferentes variações no meio, os sensores foram capazes de identificá-las e quantificá-las.

### 3.6 Circuito Completo

#### 3.6.1 Circuito oscilador

Após a validação individual de cada bloco do circuito, testou-se o sistema como um todo. A Figura 28 apresenta a fotografia do circuito completo, dos sensores e da instrumentação. Na Figura 29, apresenta-se o esquemático completo do circuito de aquisição de dados.

Figura 28: Fotografia do circuito completo dos sensores e da instrumentação.

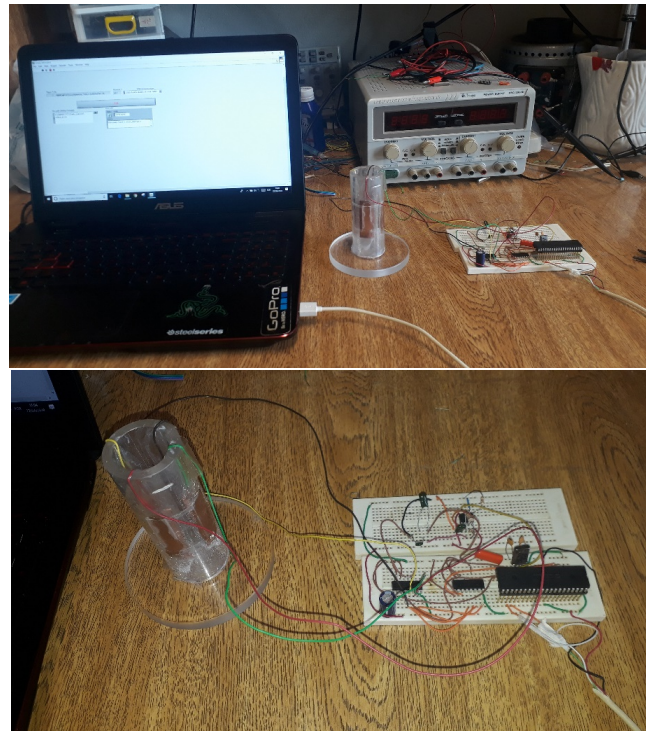
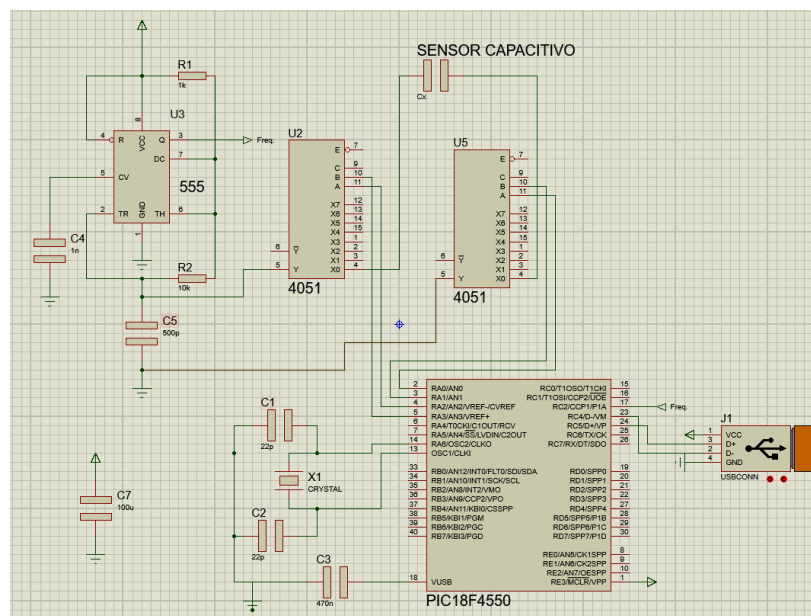


Figura 29: Esquemático completo do circuito oscilador, elaborado no Isis Proteus 8.



A Figura 29, mostra todos os componentes, o LM555 utilizado como oscilador astável, gerando uma onda no pino 3; o capacitor  $C_x$  que representa o par de placas de cobre dentro do tubo de acrílico, dois multiplexadores de 8 canais 4051, responsáveis pela seleção dos sensores; o microcontrolador PIC18f4550, que lê a onda quadrada pelo pino 17 (módulo CCP) e faz a transmissão desses dados pela porta USB. Na prática o capacitor  $C_7$  foi utilizado entre o VCC

e o Terra do circuito para garantir a estabilidade de tensão; O capacitor C3, no pino 18 do microcontrolador é responsável, por manter a tensão de 3,3V da porta de dados USB.

### 3.6.1.1 Testes do circuito completo

A fim de validar o sistema de aquisição de dados, compreendida pela parte de *hardware* (PIC) e pela parte de *software* (Programação do microcontrolador e *Labview*), foi proposto o seguinte experimento, utilizando um gerador de frequência analógico e um osciloscópio digital, fei-se a varredura do valores de frequências pertinentes ao experimento final e comparou-se os valores obtidos pelo circuito PIC e o osciloscópio. Os dados levantados neste experimento de validação se encontram na Tabela 8, abaixo.

Tabela 8: Valores resultantes do processo de varredura de frequência, utilizando o circuito completo.

Frequências			Variação de frequência		
Gerador (Hz)	Osciloscópio (Hz)	PIC (Hz)	Gerador/Osciloscópio (Hz)	Osciloscópio/PIC (%)	Gerador/ PIC (%)
5000	5008	7079	-0,2%	29,3%	29,4%
10000	9980	10053	0,2%	0,7%	0,5%
20740	20750	20761	0,0%	0,1%	0,1%
50150	50150	50209	0,0%	0,1%	0,1%
75000	74980	75000	0,0%	0,0%	0,0%
100000	99970	99999	0,0%	0,0%	0,0%
109900	109900	110091	0,0%	0,2%	0,2%
120000	119900	120000	0,1%	0,1%	0,0%
130000	129900	130434	0,1%	0,4%	0,3%
140000	140000	141176	0,0%	0,8%	0,8%
150000	150000	150000	0,0%	0,0%	0,0%
160000	159900	160000	0,1%	0,1%	0,0%
169900	169980	171428	0,0%	0,8%	0,9%
180000	180000	181818	0,0%	1,0%	1,0%
190000	190100	190476	-0,1%	0,2%	0,2%
200100	200000	199999	0,0%	0,0%	-0,1%
209900	209900	210526	0,0%	0,3%	0,3%
250000	249900	250000	0,0%	0,0%	0,0%
300000	300000	300000	0,0%	0,0%	0,0%
312300	312000	315789	0,1%	1,2%	1,1%
407200	407300	413793	0,0%	1,8%	1,8%
552200	552800	571428	-0,1%	3,3%	3,4%

Na tabela 8, as células preenchidas com uma tonalidade de cinza apresentam valores de frequência fora do intervalo de interesse do estudo, portanto não devem ser considerados. Já os valores que se encontram nas demais células são os valores pertinentes ao experimento. calculou-se as variações de frequência entre Gerador e Osciloscópio, Osciloscópio e PIC e Gerador e PIC, foi assim então determinada a média de variação de frequência para cada um dos casos, resultando em 0,02%, 0,27% e 0,25%, respectivamente.

Dessa forma concluiu-se que o circuito atende as necessidades para análises que compreendam objetos de estudo com mudanças na permissividade elétrica grandes, como a fração de

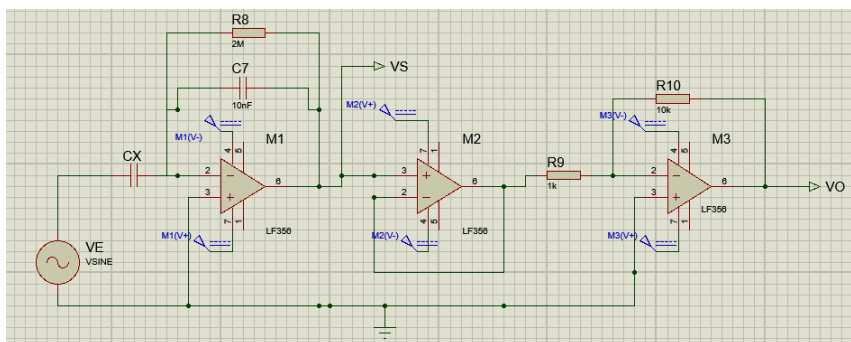
preenchimento do sensor, diferentes concentrações de um composto, dentre outras aplicações que não necessitem de uma precisão tão grande.

### 3.6.2 Circuito ativo

A fim de encontrar uma solução alternativa para o circuito oscilador astável, uma vez que pelos testes preliminares e validações percebeu-se que a precisão dessa abordagem não seria suficiente para tomografias mais precisas, projetou-se um circuito ativo que utiliza um amplificador de transimpedância para a leitura das capacitâncias com maior precisão. (DEMORI; FERRARI; STRAZZA, 2009)

Uma versão mais elaborada e explicativa foi apresentada por (FILHO, 2002), e foi utilizado como ponto de partida para a execução do circuito contido nesse trabalho. O circuito projetado está apresentado na Figura 30, abaixo.

Figura 30: Circuito Ativo para medição de capacitância.



O sinal senoidal é aplicado entre as placas nas quais deseja-se medir a capacitância, e em seguida é utilizado em um amplificador de transimpedância que gerar um ganho no sinal senoidal proporcional à capacitância medida. O ganho no primeiro estágio amplificador é dado pela equação 3.2, abaixo:

$$VS_{max}(\omega) = -(C_x/C_1) * VE_{max}(\omega) \quad (3.2)$$

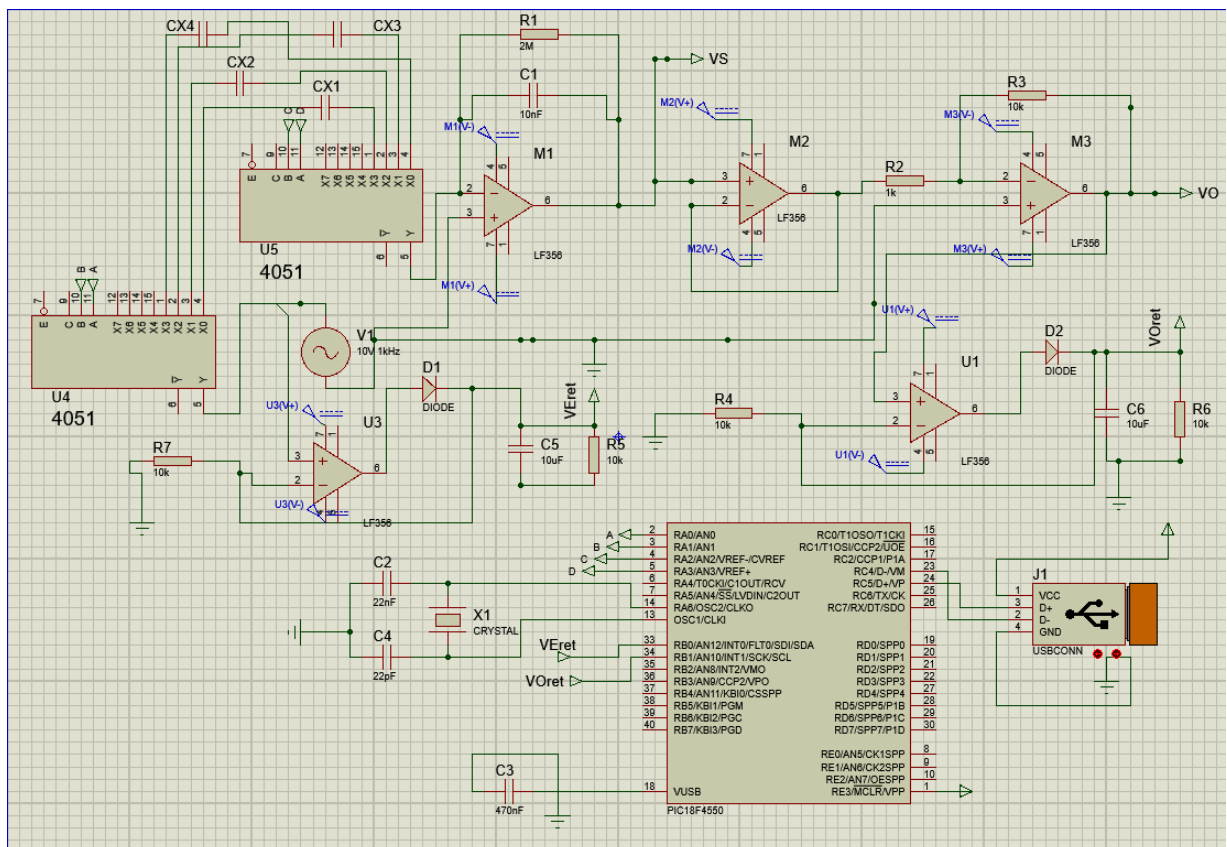
Dessa maneira, pode-se determinar o o valor da capacitância através do ganho gerado nesse módulo. Afim de melhorar a sensibilidade do circuito, foi escolhido um valor de  $C_1$  superior aos possíveis valores de  $C_x$ , de maneira que o valor de Ganho seja inferior ao ganho unitário e utilizou-se um resistor em paralelo  $R_1$ , para criar um caminho de condução da corrente DC de polarização. Utilizou-se um capacitor de  $100pF$  para  $C_1$  e para a senóide foi utilizado um valor de  $1V$  de pico e  $f = 20kHz$ , respeitando a condição que garante que os ganhos são lineares e dependentes da capacitância de entrada  $C_x$ , quando  $|j * \omega * C_f * R_f| \gg 1$ , é respeitado. Uma vez que os valores de saída do primeiro módulo tem um ganho inferior à 1, é necessário amplificar esse sinal para aumentar o ganho; dessa forma foram acrescentados os módulos M2 e

M3, sendo o módulo M2 um *buffer* para isolação do circuito e o módulo M3, que permite um ganho  $G_2 = 10$ . A equação final do circuito é dado pela equação 3.3, abaixo.

$$V_{Omax}(\omega) = G_1 * G_2 * V_{Emax}(\omega) \quad (3.3)$$

Utilizando os valores acima mencionados obtém-se a resolução de  $1V/pF$ , podendo aferir valor de até  $150pF$ , antes da saturação do sinal. Para aferir os valores de  $V_{Omax}$  e  $V_{Emax}$ , foi necessário, utilizar um retificador de meia-onda de precisão, afim de converter a tensão CA para CC, uma vez que para utilizar os módulo A/D do PIC é necessário que o valor de entrada seja um valor CC de até  $5V$ . O módulo A/D do PIC possui  $10\ bits$ , com 1024 possíveis níveis de leitura de tensão; utilizando a escala de  $0$  à  $5\ V$  o valor mínimo que pode ser lido é de aproximadamente  $0,005V$ . O circuito completo dessa montagem pode ser visto na Figura 31.

Figura 31: Circuito Ativo completo para medição de capacitância.



Afim de validar esse circuito, foram testados alguns capacitores comerciais com valores próximos da faixa de operação do circuito, os valores medidos podem ser vistos na Tabela 9, apresentada abaixo.

Tabela 9: Valores aferidos com capacitores comerciais cerâmicos

Valor Nominal (pF)	Valor Máximo Tolerância (pF)	Valor Médio Aferido (pF)	Variação (%)
10	11	11,59	5%
20	22	23,56	7%
32	33,6	32,1	-5%
47	49,35	47,82	-3%

Percebe-se que para valores menores de capacitância a variação percentual é relativamente alta, porém ao se tratar de capacitores cerâmicos as tolerâncias são muito altas, muitas vezes extrapolando o valor de  $1pF$ , dessa forma pode-se dizer que os valores aferidos estão de acordo com o esperado e portanto o circuito está funcionando corretamente.

Para determinar o valor ideal de frequência do sinal de entrada senoidal, foram ensaiados diferentes valores de frequência utilizando um capacitor nominal de  $10pF$ , apresentou uma capacitância de  $12,2pF$  quando medido por um multímetro de precisão. Na tabela 10, percebe-se que a capacitância aproximou-se mais do valor medido, foi utilizando uma frequência aproximadamente em  $20kHz$  e portanto esse foi o valor de frequência utilizado para prosseguir com os experimentos.

Tabela 10: Capacitâncias aferidas utilizando valores de frequência diferentes para o sinal senoidal de entrada.

Frequência (kHz)	Capacitância Aferida (pF)
0,5	6,90
1	10,21
10	11,40
20	12,04
50	11,96
100	11,95

O sensores capacitivos Verde e Amarelo foi acoplados diretamente ao circuito, afim de aferir a capacitância com o tubo vazio, para isso o circuito aferiu dados por 5 minutos e a média final do valor de capacitância foi de  $1,80pF$ . O valor teórico na Tabela 1 é de  $0,221pF$ , cuja diferença é devida a capacitâncias parasitas e as tolerâncias dos componentes do circuito.

Mediu-se e comparou-se as capacitâncias entre placas, afim de validar o circuito e posteriormente calibrar o sensor. Os valores estão apresentados na Tabela 11, abaixo.

Tabela 11: Capacitâncias medidas utilizando o circuito ativo com tubo vazio.

AR		
Sensor 1	Sensor 2	Capacitância Aferida (pF)
Amarelo	Marrom	2,54
Amarelo	Verde	1,80
Amarelo	Vermelho	2,69
Marrom	Vermelho	2,02
Marrom	Verde	2,76
Verde	Vermelho	2,90

Todos os valores medidos estão dentro do esperado. Percebe-se que os menores valores, que se distanciam mais da média são as combinações Amarelo-Verde e Marrom-Vermelho, sendo esses pares os pares opostos, ou seja, os mais distantes, portanto corrobora a teoria de capacitância apresentada no primeiro capítulo deste trabalho.

## 4 RESULTADOS E COMENTÁRIOS

Neste Capítulo apresent-se os resultados obtidos utilizando o sistema completo de aquisição de dados.

Afim de validar o sistema como um todo, e comparar com os valores esperados, foram conduzidos os mesmos experimentos utilizados para validar os módulos individualmente (LM555, pic18F4550 e dos sensores), sendo estes: teste de calibração do tubo de acrílico completo com água, preenchendo-se o tubo de acrílico gradualmente com água, acrescentando-se gradualmente hidróxido de Magnésia à água e por fim, inserindo uma esfera de vidro no tubo.

No primeiro experimento foi conduzido um teste de calibração dos sensores, fazendo a leitura das placas com o tubo vazio, por 5 minutos, os valores médios para cada sensor, apresentam-se, na Tabela 12, abaixo.

Tabela 12: Valores de calibração do sensor com o tubo vazio.

Sensores	Frequência Média (pF)	Capacitância Medida (pF)	Capacitância Corrigida (pF)
AB	94863	209,90	48,90
AC	95144	207,81	46,81
AD	94676	211,30	50,30
BC	94488	212,72	51,72
BD	94957	209,20	48,20
CD	95051	208,50	47,50
<b>Média</b>	94863	209,91	48,91

Ao comparar os valores obtidos nesse experimento, com os da Tabela 4, na qual foram apresentados os valores médios de capacitância das placas com o tubo em vazio, percebe-se que a média da capacitância entre os sensores, foi menor, quando comparado com os valores apresentados na Tabela 12; dessa forma, pode-se sugerir que ao acrescentar os multiplexadores 74LM4051, que selecionam os pares de sensores, acrescenta-se um valor de erro, nesse caso, fazendo a comparação direta dos valores, pode se sugerir que o aumento do erro foi de  $37,11pF$ , no total  $198,11pF$ .

No segundo experimento, o tubo de acrílico foi preenchido completamente com água e os valores amostrado de capacitância durante um período de aproximadamente 2 minutos, afim de aferir com precisão os valores de capacitância de base para os experimentos futuros. Na Tabela 13, estão apresentados os valores obtidos.

Tabela 13: Valores de calibração do sensor com o tubo cheio de água.

Sensores	Frequência Média (pF)	Capacitância Medida (pF)	Capacitância Corrigida (pF)
AB	77563	368,24	170,13
AC	77435	369,68	171,57
AD	77386	370,23	172,12
BC	77365	370,46	172,35
BD	77346	370,68	172,57
CD	77331	370,85	172,74
<b>Média</b>	77404	370,02	171,91

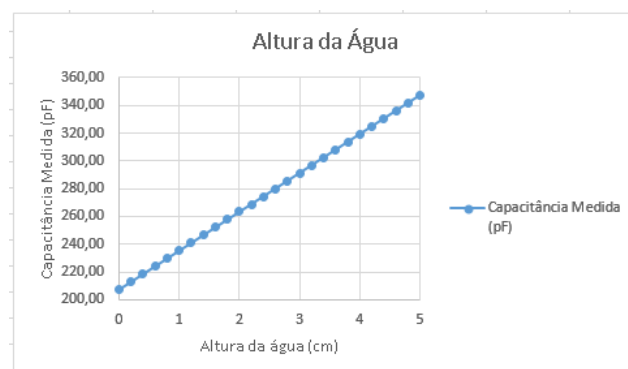
Os valores apresentados na coluna de capacitância corrigida da tabela 13 acima, consideram o valor de erro encontrado no experimento anterior,  $198,11pF$ ; mesmo subtraindo-se o valor de erro das capacitâncias medidas, os valores se distanciam dos valores observados da Tabela 5, na qual o valor médio das capacitâncias foi de  $146,91pF$ , ou seja, uma variação de  $25pF$ , quando comparado com os dados obtidos nesse experimento.

O terceiro experimento, consistiu-se em encher gradualmente o tubo com água, afim de comparar diretamente com os dados da Tabela 6, os dados apresentados na Tabela 14, são relativos aos sensores Verde e Amarelo e foram gerados a partir da média de 4 amostragens por altura da água.

Tabela 14: Medições dos sensores Amarelo e Verde quando submersos em água.

Altura da água (cm)	Frequência Medida (Hz)	Capacitância Medida (pF)
0	95238	207,11
0,20	94488	212,72
0,40	93750	218,33
0,60	93023	223,94
0,80	92307	229,56
1,00	91603	235,17
1,20	90909	240,78
1,40	90225	246,40
1,60	89552	252,00
1,80	88888	257,62
2,00	88235	263,23
2,20	87591	268,84
2,40	86956	274,45
2,60	86330	280,07
2,80	85714	285,68
3,00	85106	291,29
3,20	84507	296,90
3,40	83916	302,51
3,60	83333	308,13
3,80	82758	313,74
4,00	82191	319,35
4,20	81632	324,96
4,40	81081	330,57
4,60	80536	336,19
4,80	80000	341,79
5,00	79470	347,41

Figura 32: Medições dos sensores Amarelo e Verde quando submersos em água.



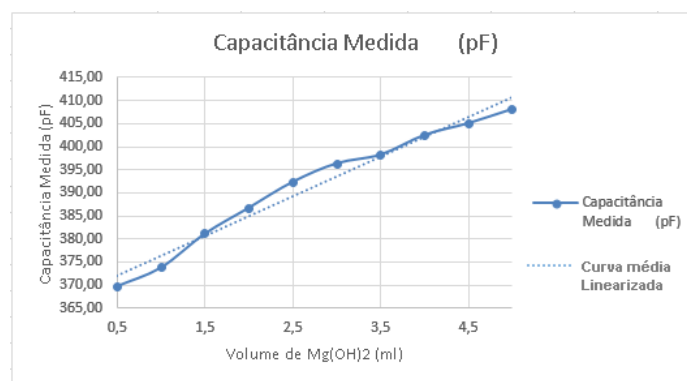
Ao analisar os dados percebe-se que o sistema se comporta de maneira linear, o que comprova a funcionalidade do sistema e a precisão quando os sensores são analisados individualmente. A reta da Figura 32, apresenta um coeficiente angular de  $3153,6 \text{ Hz/cm}$ .

No quarto experimento, adicionou-se gradualmente hidróxido de magnésio ( $\text{MgOH}_2$ ) à 60 ml de água e medindo-se as capacitâncias, os dados obtidos nesse experimento estão apresentados na Tabela 15 e na figura 33.

Tabela 15: Capacitância aferida entre os sensores Amarelo e Verde variando o volume de  $Mg(OH)_2$  na mistura.

Volume de $Mg(OH)_2$ (ml)	Frequência medida (Hz)	Capacitância Medida (pF)
0,5	77431	369,72
1	77075	373,74
1,5	76433	381,08
2	75949	386,69
2,5	75471	392,31
3	75134	396,31
3,5	74975	398,21
4	74621	402,47
4,5	74411	405,02
5	74160	408,08

Figura 33: Capacitância aferida entre os sensores Amarelo e Verde variando o volume de  $Mg(OH)_2$  na mistura.



Analisando-se dados obtidos no experimento e comparando os com o gráfico da Figura 33, percebe-se que a resposta obtida não apresenta a mesma linearidade podendo-se se atribuir a isso a quantidade de hidróxido de magnésio acrescentado em sequência pela falta de exatidão da seringa comercial utilizada e pela precipitação do hidróxido no tubo. Nesse caso o valor do coeficiente angular da reta é  $654,2 Hz/ml$ .

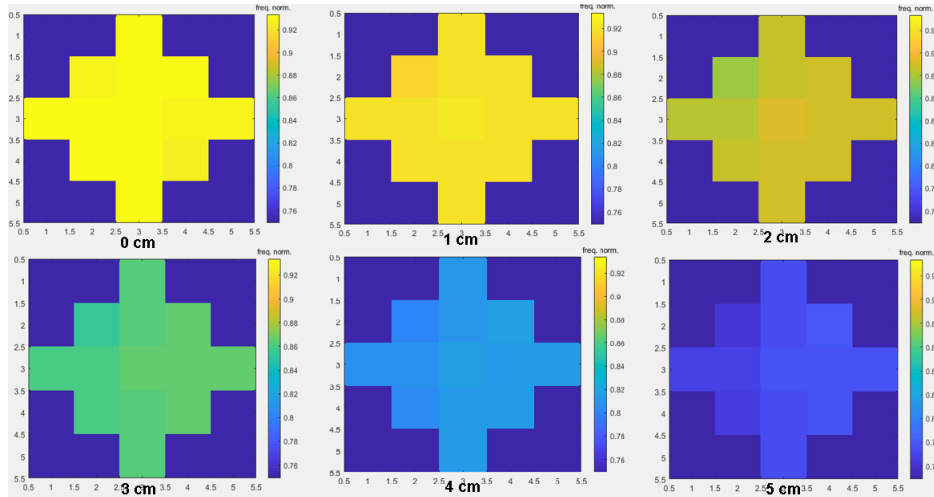
## 4.1 Imageamento

### 4.1.1 Imageamento utilizando o Circuito Oscilador

Após apresentar os resultados numéricos referentes a um par individual de placas paralelas no circuito, foram processados todos os dados das diversas interações dos sensores e foi gerada a imagem do interior do tubo. Seguindo a mesma ordem dos experimentos anteriores, abaixo está apresentado a sequência de 6 imagens que foram capturadas enquanto o tubo se enchia de água. Na primeira imagem apresenta-se o interior do tubo completamente amarelo, para o tubo todo vazio. Na segunda imagem apresenta-se o interior do tubo preenchido por  $1cm$

de água e assim sucessivamente até a sexta imagem, para a qual o sensor está completamente preenchido com água. As seis imagens descritas anteriormente podem ser vistas na Figura 34.

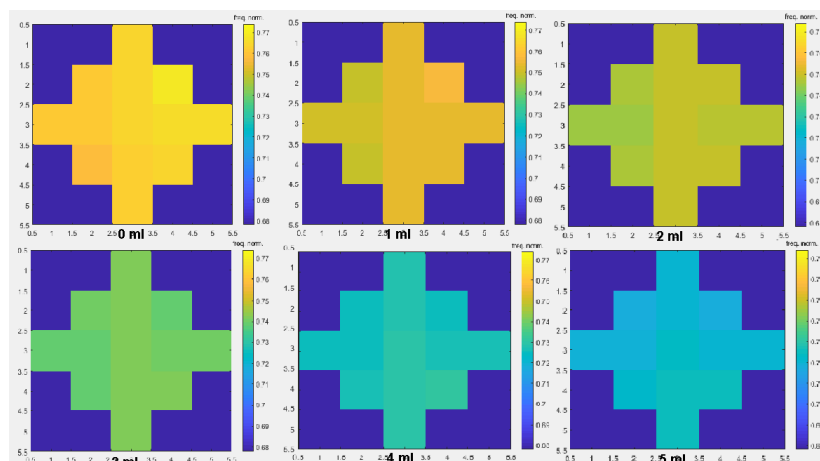
Figura 34: Imagens geradas durante o preenchimento do tubo com água.



A partir desse experimento, percebe-se que o sistema é capaz de detectar mudanças no meio assim como na quantidade e/ou no nível de água. Deve-se notar que a variação da permissividade do meio foi de um aumento de 80,8 vezes aproximadamente, portanto as mudanças foram marcantes.

Foram utilizados os dados colhidos durante o experimento com o hidróxido de magnésio, e as imagens referentes à esse experimento podem ser vistas na figura 35 a baixo. Cada uma das imagens geradas representa uma concentração de  $Mg(OH)_2$ , na primeira o tubo está completamente cheio de água, sem adição do hidróxido, nas imagens em sequência foi acrescentado 1ml de hidróxido a cada imagem.

Figura 35: Imagens geradas variando a concentração de hidróxido de magnésio.



Percebe-se pelas imagens que o aumento na concentração de hidróxido de magnésio no tubo gerou um aumento na permissividade elétrica do meio e consequentemente um aumento na capacitância medida através das placas. Fica claro que as medidas de alguns sensores apresentam uma variação dos outros, para a mesma concentração de hidróxido, afim de reduzir essa variação, as imagens apresentadas acima foram geradas a partir da média de 18 medidas por combinação de placas; resultando em uma imagem mais uniforme.

No terceiro experimento, foi introduzido uma esfera de vidro no interior do tubo, afim de verificar as mudanças na permissividade do meio. Foram geradas as imagens do tubo preenchido de água, quando introduzido uma esfera de vidro de  $2\text{cm}$  de diâmetro no centro do tubo. A fim de gerar uma imagem mais precisa calibrou-se cada par de sensores utilizando a média da leitura de 1000 valores por par e ajustando essa média à média global das medidas. Abaixo pode-se ver as duas figuras, uma utilizando a calibração do sistema Figura 36 e a outra não Figura 37.

Figura 36: Imageamento não calibrado no tubo com esfera de vidro no centro.

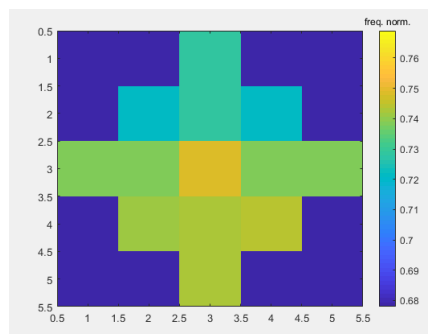
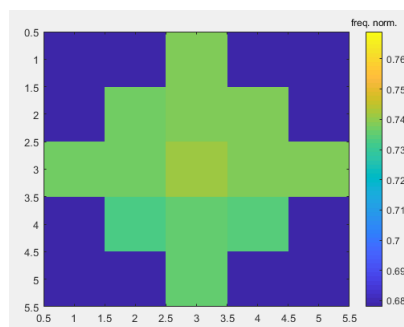


Figura 37: Imageamento calibrada no tubo com esfera de vidro no centro.



Em ambas as figuras pode-se ver uma variação na cor do centro do tubo, o que representa uma permissividade elétrica inferior ao resto do tubo, que está preenchido de água. Ainda pode-se notar que para a figura calibrada, os valores das leituras laterais é mais homogênea, assim como a diferença entre os meios água e vidro. Na primeira figura, não calibrada, a tonalidade do centro do tubo se destaca mais, porém os valores laterais da água variam muito, demonstrando uma falta de precisão desse circuito.

#### 4.1.2 Imageamento utilizando o circuito ativo

Inseriu-se a mesma esfera de vidro utilizada no experimento anterior, posicionada no centro do tubo. Inicialmente, foi medida a capacitância média entre os sensores amarelo e verde, com e sem a esfera de vidro afim de validar a mudança na capacitância aferida; o valor das capacitâncias médias aferidas com e sem a esfera de vidro estão apresentados na Tabela 16, abaixo.

Tabela 16: Capacitâncias aferidas pelos sensores, com e sem a esfera de vidro.

Sensor 1	Sensor 2	Capacitância Aferida (pF)	
		AR	Esf. Vidro
Amarelo	Verde	1,51	1,53
Amarelo	Vermelho	2,19	2,31

Percebe-se que, para ambos os sensores, os valores médios de capacitância foram superiores quando a esfera foi introduzida no centro do tubo, pois a permissividade relativa ( $\epsilon_r$ ) do vidro é de aproximadamente 4 vezes a permissividade do ar.

Em seguida foram formadas duas imagens com a esfera de vidro posicionada entre os sensores. A figura 38, mostra a imagem do dispositivo não calibrada e a figura 39 mostra a imagem calibrada.

Figura 38: Imageamento não calibrado do tubo com esfera de vidro no centro, utilizando o circuito ativo.

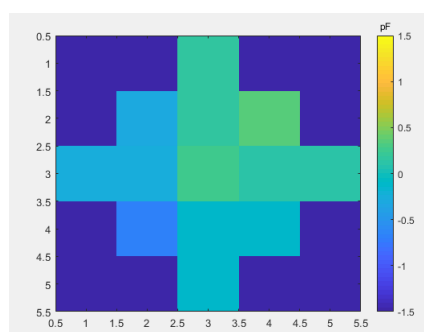
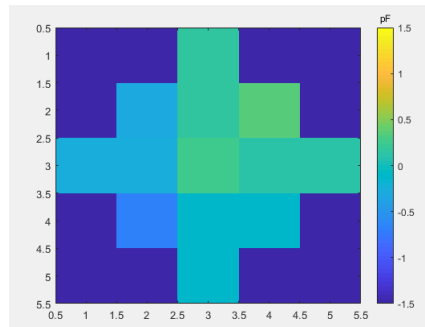


Figura 39: Imageamento calibrado do tubo com esfera de vidro no centro utilizando o circuito ativo.



Ambas as imagens apresentaram resultados similares, com valores de capacitância superiores à média na parte superior direita do tubo, isso deve-se a um possível posicionamento deslocado da esfera, para a parte superior direita do cano, uma vez que esse apresentou, sensível à mudanças do meio.

## 5 CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS

Um sistema completo de tomografia capacitiva é bastante complexo e de extrema importância para diversos processos industriais, tanto para garantir sua eficiência quanto para garantir a segurança do processo, uma vez que pode alertar um mau funcionamento, um escoamento ineficiente ou até mesmo detectar corpos estranhos ao sistema. O sistema proposto neste trabalho pode ser dividido em 3 módulos principais, os sensores, o *hardware* de aquisição de dados e o *software* para análise de dados.

O desenvolvimento do *hardware*, foi feito em duas etapas, durante a primeira etapa, foi proposto e estudado um sistema de leitura de capacitância através de um circuito oscilador de relaxação; esse circuito apresentou resultados satisfatórios para mudanças grandes de permissividade elétrica do meio, porém para detecção de variações pequenas seu funcionamento não foi adequado. Na segunda etapa do desenvolvimento *hardware* buscou-se uma solução para a baixa sensibilidade do sistema e implementou-se um circuito ativo baseado em um amplificador de transimpedância e um gerador de sinais senoidais. esse método se mostrou mais sensível e preciso que o primeiro, porém de complexidade de execução superior.

O módulo de interface homem-máquina compreendido pela comunicação USB e o *software* desenvolvido em *Labview* funcionou corretamente, realizando a transmissão de dados em tempo real para o computador e armazenando os dados para futuro processamento.

O módulo de análise de dados, desenvolvido em *MATLAB*, se mostrou eficiente, proporcionando a conversão dos dados adquiridos em valores de capacitância real, assim como gerando imagens simples, porém muito úteis para o entendimento do funcionamento do equipamento e das condições internas do tubo de acrílico. Dessa forma, pode-se dizer que o módulo de análise de dados funcionou de maneira correta, atendendo as expectativas.

Os principais pontos a serem estudados para um posterior aprimoramento do trabalho são: uma montagem com número maior de placas, para obter-se uma melhor definição do objeto ou de fase no interior do tubo; analisar e projetar circuitos que apresentem uma maior sensibilidade tensão-capacitância (V/pF) e utilizar componentes mais robustos à interferência e utilizar blindagem completa do *Hardware*; buscar outras técnicas para reconstrução de imagens e desenvolver o *software* em uma linguagem mais eficiente.

## REFERÊNCIAS

- 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.
- FERREIRA, A. J. M. **MATLAB Codes for Finite Element Analysis**. [S.l.]: Springer, 2009.
- FILHO, A. C. d. A. **Desenvolvimento de um sistema de tomografia capacitiva para processos multifasicos**. 2002. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) — Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, 2002.
- HAYAT, J. W. H.; BUCK, J. A. **Eletromagnetismo**. [S.l.]: Editora LTC, 2003.
- INSTRUMENTS, N. **PIC Labview**. 2019. Acesso em 20 jan. 2018. Disponível em: <<http://www.ni.com/pt-br/shop/labview.html>>.
- MICROCHIP. **PIC micro**. 2018. Acesso em 21 nov. 2018. Disponível em: <<https://ww1.microchip.com/downloads/en/devicedoc/39632c.pdf>>.
- RISSARDI, G. **Estudos preliminares para determinação de concentração em sistemas de mistura de herbicidas via sensor capacitivo**. 2009 — Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 2009.
- SOARES, M. B. Estudo de um tomógrafo capacitivo elétrico paralelo aplicado ao processo adsorptivo. **Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, 2009.**, 2009.

## **Apêndices**

## APÊNDICE A – PROGRAMAÇÃO DO MICROCONTROLADOR PIC PARA AQUISIÇÃO E TRANSMISSÃO DE DADOS DO CIRCUITO OSCILADOR

```

//Codigo por Gabriel C. Antonini 8670628
// --- Variáveis Globais ---
char flag0 = 0x00;
int t1=0, aux=1;
unsigned long time1, time2; //declaração variáveis
unsigned long freq1, freq2; //declaração variáveis
char txt1[12], txt2[12]; //declaração variáveis
unsigned char leitura[64] absolute 0x500;
unsigned char envio[64] absolute 0x540;

// --- Rotina de Interrupção ---

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

    //Interrupcao do contador
    //captura de dados via CCP
    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;
    }

}

}

// --- Função 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 seleção dos sensores
    TRISC      = 0x04; // Leitura Módulo CCP e trans. 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 valor
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){                    // seleciona sensores
aux++;
if(aux==5 || aux==10 || aux==15){
aux++;
}
PORTA=aux;
t1=0;
CCP1IF_bit = 0x00;

}
}
else{
PORTA=0x01;
aux=1;
}
}
}
```

## APÊNDICE B – PROGRAMAÇÃO DO MICROCONTROLADOR PIC PARA AQUISIÇÃO E TRANSMISSÃO DE DADOS DO CIRCUITO ATIVO

```

//Codigo por Gabriel C. Antonini 8670628
// --- Variáveis Globais ---
char flag0 = 0x00;
int t1=0, aux=1;
unsigned long time1, time2;
unsigned long freq1, freq2 ;
unsigned long V1;
unsigned long V2;
char V1_str[8], V2_str[8], AUX_str[8];
char txt1[32], txt2[32];
unsigned char leitura[64] absolute 0x500;//Buffer de leitura
unsigned char envio[64] absolute 0x540; //Buffer de escrita

// --- Rotina de Interrupção ---

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

// --- Função Principal ---
void main()
{
    CMCON      = 0x07;        //desabilita comparadores
    ADCON1     = 0x00;
    T1CON      = 0x01;        // habilita timer 1
    GIE_bit    = 0x01;
    PEIE_bit   = 0x01;

```

---

```
TRISA      = 0x00;      //Faz a seleção dos sensores
TRISC      = 0x04;      // Leitura Módulo CCP e trans. 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

ADC_Init();

while(1)
{
    if(aux<=0x0E){

        V1=ADC_Get_Sample(10);
        V2=ADC_Get_Sample(12);

        IntToStr(aux,AUX_str);      //converte dados em string
        IntToStr(V1,V1_str);
        IntToStr(V2,V2_str);      //converte dados em string
        strcat(AUX_str,V1_str);
        strcat(AUX_str,V2_str);
        strcpy(envio,AUX_str);

        while(!HID_Write(&envio,64));
        delay_ms(100);

        aux++;

        //pula sensores não existentes
        if(aux==5 || aux==10 || aux==15){
            aux++;
        }

        PORTA=aux;      //atribui valor do sensore selecionado
        delay_ms(150);
```

---

```
        //t1=0;
        // CCP1IF_bit = 0x00;

        // }
    }
    else{
    PORTA=0x01;    // zera porta de seleção dos sensores
    delay_ms(150);
    aux=1;
    }
}
}
```

## APÊNDICE C – PROGRAMAÇÃO EM MATLAB PARA ANÁLISE DOS DADOS E CONSTRUÇÃO DA TOMOGRAFIA, OBTIDOS PELO CIRCUITO OSCILADOR

```
%Gabriel Coelho Antonini 8670628
```

```
%%limpeza
```

```
clc;
```

```
close all;
```

```
clear all;
```

```
%Seta variáveis globais
```

```
Ra=1000;
```

```
Rb=10000;
```

```
Dist=0.03;
```

```
Dist_2=0.0120000;
```

```
Area=0.00075000;
```

```
freq_cal=102000;
```

```
C=[0 , 1];
```

```
val_max=102000;
```

```
val_min=70000;
```

```
max1=0;
```

```
min1=0;
```

```
aux=0;
```

```
m1=0;
```

```
m2=0;
```

```
m3=0;
```

```
m4=0;
```

```
m5=0;
```

```
m6=0;
```

```
M1=0;
```

```
M2=0;
```

```
M3=0;
```

```
M4=0;
```

```
M5=0;
```

```
M6=0;
```

```
a=0;
```

```
b=0;
```

```
c=0;
```

```
d=0;
e=0;
f=0;
ctrl=0;

%%Matrizes de Sensibilidade
%%Cada MATRIZ representa um par de sensores

S1=[ 0 0 1 0 0
      0 0 1 1 0
      0 0 0 1 1
      0 0 0 0 0
      0 0 0 0 0 ];

S2=[0 0 1 0 0
      0 0 1 0 0
      0 0 1 0 0
      0 0 1 0 0
      0 0 1 0 0 ];

SD=[NaN NaN 0 NaN NaN
      NaN 0 0 0 NaN
      0 0 0 0 0
      NaN 0 0 0 NaN
      NaN NaN 0 NaN NaN];

%% Sensores conjugados

S3=fliplr(S1);
S4=fliplr(S1');
S5=S2';
S6=S1';

%% Soma dos valores de todos os sensores
ST=2*(S1+S2+S3+S4+S5+S6)+SD;

%%Leitura e processamento dos dados
AMT=9;
```

---

```

TABELA=readtable("E:\GABRIEL\TCC\Dados_Labview\05ml.csv");
[m,n]=size(TABELA);
TABELA=TABELA{:,:};
k=median(TABELA)
ctrl=TABELA(1,1)
%%Retirada dos valores de erro
for t=1:m
    if(TABELA(t,2)>val_max || TABELA(t,2)<val_min)
        TABELA(t,2)=k(1,2);
    end
    % CAP(t) = (1/((TABELA(t,2)*(Ra+2*Rb))/sqrt(2)))*10^12-500;
    % if TABELA(t,1)==2||7||8||13
    % PERM(t) = (CAP(1,t)*(Dist/Area))*10^-12;
    % else
    % PERM(t) = (CAP(1,t)*(Dist_2/Area))*10^-12;
    % end
end
max1=max(TABELA); %% determina maximo da tab.
min1=min(TABELA); %% determina minimo da tab.

%%escolhe os valores de máximo e minimo da tabela
C=[(min1(1,2)/freq_cal)-0.01 (max1(1,2)/freq_cal)]

%% atribui aos sensores os valores
for s=1:m

    if TABELA(s,1)==ctrl
        ctrl=ctrl+1;
        aux=aux+1;
        if ctrl>14
            ctrl=1;
        end
        if ctrl==5 || ctrl==10 || ctrl==0
            ctrl=ctrl+1;
        end
        switch TABELA(s,1)
            case {1,4}
                m1=m1+TABELA(s,2);
                M1=M1+TABELA(s,2);
        end
    end
end

```

```
a=a+1;
case {2,8}
m2=m2+TABELA(s,2);
M2=M2+TABELA(s,2);
b=b+1;
case {3,12}
m3=m3+TABELA(s,2);
M3=M3+TABELA(s,2);
c=c+1;
case {6,9}
m4=m4+TABELA(s,2);
M4=M4+TABELA(s,2);
d=d+1;
case {7,13}
m5=m5+TABELA(s,2);
M5=M5+TABELA(s,2);
e=e+1;
case {11,14}
m6=m6+TABELA(s,2);
M6=M6+TABELA(s,2);
f=f+1;
end

end

%% Gera imagens com x nmr de AMosTras
if aux==12*AMT
    SP=((m1/AMT)*S1+(m2/AMT)*S2+(m3/AMT)*S3+
        (m4/AMT)*S4+(m5/AMT)*S5+(m6/AMT)*S6)/freq_cal)+SD;

    I=SP./ST
    figure (1)
    title("Imagens internas do tubo")
    imagesc(I,C)
    clb=colorbar;
    title(clb,'freq. norm. ');
    drawnow;
    pause (5);
    aux=0;
```

m1=0;

m2=0;

m3=0;

m4=0;

m5=0;

m6=0;

end

end

M1=M1/a

M2=M2/b

M3=M3/c

M4=M4/d

M5=M5/e

M6=M6/f

## APÊNDICE D – PROGRAMAÇÃO EM MATLAB PARA ANÁLISE DOS DADOS E CONSTRUÇÃO DA TOMOGRAFIA, OBTIDOS PELO CIRCUITO ATIVO

```
%Gabriel Coelho Antonini 8670628

%%limpeza
clc;
close all;
clear all;

%%Definição dos Ganhos
G2=10;
C1=100e-12;
CX=0;
k=0;
ctrl=0;
max=0;
min=0;
aux=0;
m1=0;
m2=0;
m3=0;
m4=0;
m5=0;
m6=0;
M1=0;
M2=0;
M3=0;
M4=0;
M5=0;
M6=0;
a=0;
b=0;
c=0;
d=0;
e=0;
f=0;
```

```
%Matrizes
S1=[ 0 0 1 0 0
     0 0 1 1 0
     0 0 0 1 1
     0 0 0 0 0
     0 0 0 0 0 ];

S2=[0 0 1 0 0
     0 0 1 0 0
     0 0 1 0 0
     0 0 1 0 0
     0 0 1 0 0 ];

SD=[NaN NaN 0 NaN NaN
     NaN 0 0 0 NaN
     0 0 0 0 0
     NaN 0 0 0 NaN
     NaN NaN 0 NaN NaN];

S3=fliplr(S1);
S4=fliplr(S1');
S5=S2';
S6=S1';

ST=2*(S1+S2+S3+S4+S5+S6)+SD;

%%Leitura de dados
TAB=readtable("E:\GABRIEL\TCC\Dados_Labview\");
[m,n]=size(TAB);
TAB=TAB{:, :};

ctrl=TAB(1,1);
%max1=max(TAB);
%min1=min(TAB);

for t=1:m
    TAB(t,2)=(0.7+(TAB(t,2)/1024)*5);
    TAB(t,3)=(0.7+(TAB(t,3)/1024)*5);
end
```

---

```
for h=1:m
    CX(h,1)=TAB(h,1);
    CX(h,2)=( (TAB(h,2)/TAB(h,3)) * (C1/10) ) * 10^12
end

C=[0 30]
%C=[(min1(1,2)/freq_cal)-0.01 (max1(1,2)/freq_cal)]
AMT=1;
for s=1:m

    if CX(s,1)==ctrl
        ctrl=ctrl+1;
        aux=aux+1;
        if ctrl>14
            ctrl=1;
        end
        if ctrl==5 || ctrl==10 || ctrl==0
            ctrl=ctrl+1;
        end
        switch CX(s,1)
            case {1,4}
                m1=m1+CX(s,2);
                M1=M1+CX(s,2);
                a=a+1;
            case {2,8}
                m2=m2+CX(s,2);
                M2=M2+CX(s,2);
                b=b+1;
            case {3,12}
                m3=m3+CX(s,2);
                M3=M3+CX(s,2);
                c=c+1;
            case {6,9}
                m4=m4+CX(s,2);
                M4=M4+CX(s,2);
                d=d+1;
            case {7,13}
                m5=m5+CX(s,2);
```

---

```
        M5=M5+CX(s,2);
        e=e+1;
        case {11,14}
        m6=m6+CX(s,2);
        M6=M6+CX(s,2);
        f=f+1;
    end

end

end

if aux==12*AMT
    SP=((m1/AMT)*S1+(m2/AMT)*S2 + (m3/AMT)*S3+
        (m4/AMT)*S4+(m5/AMT)*S5 + (m6/AMT)*S6))+SD;
    I=SP./ST
    figure (1)
    title("Imagens internas do tubo")
    imagesc(I,C);
    clb=colorbar;
    title(clb,'nF');
    drawnow;
    %%pause(0.5);
    aux=0;
    m1=0;
    m2=0;
    m3=0;
    m4=0;
    m5=0;
    m6=0;
end
end
```