

**UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA E  
INFORMÁTICA INDUSTRIAL – CPGEI**

**TIAGO PIOVESAN VENDRUSCOLO**

**SENSOR *WIRE-MESH* DE IMPEDÂNCIA PARA INVESTIGAÇÃO DE  
ESCOAMENTOS MULTIFÁSICOS**

**DISSERTAÇÃO**

**CURITIBA  
2012**

**TIAGO PIOVESAN VENDRUSCOLO**

**SENSOR *WIRE-MESH* DE IMPEDÂNCIA PARA INVESTIGAÇÃO DE  
ESCOAMENTOS MULTIFÁSICOS**

Dissertação de mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica e Informática Industrial da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, como requisito parcial para obtenção do grau de “Mestre em Ciências” – Área de concentração: Engenharia de Automação e Sistemas.

Orientador: Prof. Marco José da Silva, Dr.

CURITIBA  
2012

---

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação

---

V453 Vendruscolo, Tiago Piovesan  
Sensor *wire-mesh* de impedância para investigação de escoamentos multifásicos / Tiago Piovesan Vendruscolo. – 2012.  
74 f. : il. ; 30 cm

Orientador: Marco José da Silva.  
Dissertação (Mestrado) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica e Informática Industrial. Curitiba, 2012.  
Bibliografia: f. 68-69.

1. Escoamento multifásico – Medição. 2. Gás – Escoamento. 3. Detectores. 4. Impedância (Eletricidade). 5. Malha de eletrodos. 6. Processamento de imagens. 7. Software – Desenvolvimento. 8. Simulação (Computadores). 9. Engenharia elétrica – Dissertações. I. Silva, Marco José da, orient. II. Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica e Informática Industrial. III. Título.

CDD (22. ed.) 621.3

---

Título da Dissertação Nº 600

## “Sensor Wire-Mesh de Impedância para Investigação de Escoamentos Multifásicos”

por

### Tiago Piovesan Vendruscolo

Esta dissertação foi apresentada como requisito parcial à obtenção do grau de MESTRE EM CIÊNCIAS – Área de Concentração: Engenharia de Automação e Sistemas, pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica e Informática Industrial – CPGEI – da Universidade Tecnológica Federal do Paraná – UTFPR – Câmpus Curitiba, às 14h do dia 03 de julho de 2012. O trabalho foi aprovado pela Banca Examinadora, composta pelos professores:

Prof. Marco Jose da Silva, Dr.  
(Presidente)

Prof. Daniel Discini Silveira, Dr.  
(UFJF)

Prof. Flávio Neves Junior, Dr.  
(UTFPR – CT)

Visto da coordenação:

Prof. Ricardo Lüders, Dr.  
(Coordenador do CPGEI)

## **DEDICATÓRIA**

Aos meus pais, Abeloni e Angela;  
E a toda minha família.

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço inicialmente ao meu orientador Prof. Dr. Marco José da Silva, pela orientação, por sua competência, dedicação e amizade que foram importantes para o êxito do meu trabalho.

Aos meus pais, Abeloni e Angela, pelo incentivo e apoio em todos os momentos de minha vida.

A minha irmã, Franciele, por todo apoio e companheirismo.

Aos amigos e colegas de Laboratório de Ciências Térmicas pela ajuda direta ou indireta na realização deste trabalho e pela amizade: Eduardo Nunes dos Santos, Reinaldo Sérgio G. Justiniano, Nikolas Libert, Leonardo Lipinski, Carlos Ferrante do Amaral, Fernando E. V. Castillo, Ernani Maieski Kopp e Eduardo Drosczaka.

Agradeço a empresa BG – Brasil e ao Instituto Brasileiro de Petróleo, Gás e Biocombustíveis, pela bolsa concedida durante o desenvolvimento deste trabalho.

A todos que de alguma maneira contribuíram para a conclusão deste trabalho.

## RESUMO

VENDRUSCOLO, T. P. Sensor *wire-mesh* de impedância para investigação de escoamentos multifásicos. 2012. 74p. Dissertação (Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica e Informática Industrial da Universidade Tecnológica Federal do Paraná). Curitiba, 2012.

Escoamentos multifásicos estão presentes em diversas atividades industriais como na exploração, produção e transporte de petróleo e gás, onde é comum encontrar escoando por dutos uma mistura de óleo, gás e água. Em muitos casos, o tipo de escoamento determina a eficiência e segurança dos processos e equipamentos onde ocorrem. Com isso, investigações experimentais de escoamento multifásicos são de grande importância no auxílio do desenvolvimento de modelos teóricos e na validação de previsões realizadas por simulações, ampliando o entendimento do fenômeno. No passado algumas técnicas para investigação de escoamentos multifásicos foram propostas e aplicadas. Contudo, estas técnicas, na sua maioria, estão limitadas a investigação de escoamentos envolvendo apenas duas fases.

Neste trabalho, foi proposta uma nova eletrônica para operar um sensor de malha de eletrodos (*Wire-Mesh Sensor*) que é capaz de investigar escoamentos contendo até três fases. Inicialmente proposto para visualização de escoamentos bifásicos, o sensor *wire-mesh* realiza o imageamento da distribuição de fases de uma seção transversal. Com a passagem do escoamento através do sensor, o mapeamento das fases é realizado de forma intrusiva com alta resolução temporal e espacial. Para possibilitar seu uso em escoamentos trifásicos, neste trabalho foi desenvolvida uma nova eletrônica capaz de medir simultaneamente a permissividade elétrica e a condutividade elétrica do fluido presente entre os eletrodos do sensor. O princípio básico do funcionamento é baseado na excitação com duas frequências distintas. Além do *hardware* foi também desenvolvido um *software*, onde é possível salvar os dados adquiridos em uma base de dados para futuros estudos. O desempenho da nova eletrônica foi verificado através de medições em componentes (rede RC) com valores de referência. O sistema completo foi utilizado para gerar imagens de uma mistura trifásica ar-óleo-água em condições estáticas e dinâmicas, apresentando bons resultados. Desta forma, a principal contribuição deste trabalho é a disponibilização de uma nova ferramenta para análise de escoamentos multifásicos.

**Palavras-chave:** Escoamento multifásico. Sensor de impedância. Sensor *wire-mesh*. Permissividade. Condutividade.

## ABSTRACT

VENDRUSCOLO, T. P. Impedance wire-mesh sensor for investigation of multiphase flows. 2012. 74p. Dissertação (Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica e Informática Industrial da Universidade Tecnológica Federal do Paraná). Curitiba, 2012.

Multiphase flows are present in many industrial activities such as in exploration, production and transportation of oil and gas, in which is common to find a mixture of oil, gas and water flowing inside pipes. In many cases this type of flow determines the efficiency and safety of the processes and equipment where they occur. In this way, experimental investigations of multiphase flow are of great value to develop new theoretical models and to validate predictions made by computer simulations, hence increasing the understanding of the flow phenomena.

In this work, a new measuring electronics to operate a wire-mesh sensor (WMS) is introduced. Initially proposed for visualization of two-phase flow, the WMS performs the imaging of the phase distribution of a cross section based on the multiplexed measurement of an electrical property of the fluid in contact with the mesh grid of the sensor. With the passage of flow through the sensor, the phase mapping is realized by intrusive electrodes at high temporal and spatial resolution. To allow its use in multiphase flows, the new electronics developed in this work simultaneously measures the electrical permittivity and electrical conductivity of the media in the mesh grid. The basic idea is to activate the electrodes with a signal composed of two distinct frequencies. Besides the development of the electronics' hardware, a software was also implemented, by which data can be acquired and for future investigation. The performance of the new instrument has been verified by use of components (RC network) with reference values. The developed system was used to generate images of a multiphase mixture of air-oil-water in static and dynamic conditions, showing good results. Thus, the main contribution of this work is to make available a new tool for the investigation of multiphase flows.

**Keywords:** Multiphase flow. Impedance sensor. Wire-mesh sensor. Permittivity. Conductivity.



## LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1: Padrões de escoamentos trifásicos gás-óleo-água (adaptado de SPEDDING <i>et al.</i> , 2005) .....	17
Figura 2.2: Arranjo típico de eletrodos em sistemas de: (a) ECT, com 12 eletrodos. (b) ERT/EIT, com 16 eletrodos .....	20
Figura 2.3: Sistema de raios-X (adaptado de HU <i>et al.</i> , 2005).....	22
Figura 2.4: Disco de filtragem de raios-X (adaptado de HU <i>et al.</i> , 2005).....	22
Figura 2.5: Fatores de transmissão para vários materiais entre a fonte de raios-X e a matriz receptora (adaptado de HU <i>et al.</i> , 2005) .....	23
Figura 2.6: Geometria da seção utilizada para gerar dados para fração de fase apresentados na figura 2.7 (adaptado de HU <i>et al.</i> , 2005) .....	23
Figura 2.7: Dados da fração de fase experimental processadas dos feixes horizontais (a-c) e verticais (d-f), (a) e (d) dados de fração de fases medidos; (b) e (e) dados de fração de fase ideal; (c) e (f) dados de fração de fases medidos, após processamento e filtragem (adaptado de HU <i>et al.</i> , 2005) .....	24
Figura 2.8: (a) Imagem obtida pela técnica em um escoamento estratificado e (b) esquema de cores utilizado para o escoamento trifásico (HU, B. <i>et al.</i> , 2007).....	24
Figura 2.9: Sensor do tipo agulha (adaptado de DA SILVA <i>et al.</i> , 2007a).....	25
Figura 2.10: Esquemático do sistema implementado (adaptado de DA SILVA <i>et al.</i> , 2007a).....	26
Figura 2.11: Resultados encontrados para condutividade e permissividade elétrica, com as linhas pontilhadas mostrando um desvio de 7% em relação a referência (adaptado de DA SILVA <i>et al.</i> , 2007a).....	26
Figura 2.12: Imagem detalhando planos transmissores e receptores e os pontos de cruzamentos (eletrodos) .....	27
Figura 2.13: Imagem mostrando a separação entre os planos .....	28
Figura 2.14: Diagrama do sistema com sensor <i>wire-mesh</i> condutivo (adaptado de PRASSER <i>et al.</i> , 1998) .....	29
Figura 2.15: Sequência de frames capturados em um escoamento vertical do tipo plug. Utilizando um sensor <i>wire-mesh</i> 16x16, com $JL=1$ m/s, $JG=1,3$ m/s, resolução temporal de 1024 FPS (adaptado de PRASSER <i>et al.</i> , 1998).....	30
Figura 2.16: Esquema simplificado do sistema <i>wire-mesh</i> capacitivo (adaptado de DA SILVA <i>et al.</i> , 2007).....	31
Figura 2.17: Esquema de ativação e sincronia dos canais transmissores do sensor <i>wire-mesh</i> com a placa de aquisição de dados, para um sistema com quatro canais (DA SILVA <i>et al.</i> , 2007).....	31
Figura 2.18: Imagens da seção cruzada de uma bolha de ar em meio a óleo de silicone, em diferentes estágios de processamentos de imagens: (a) Dados da imagem em raw, (b) imagem com dados calibrados e (C) imagem binarizada (DA SILVA <i>et al.</i> , 2007).....	32
Figura 2.19: Esquema demonstrando o elemento sensor de medição e o conversor de corrente em tensão.....	33
Figura 2.20: Resposta em frequência simulada para componentes com valores $C_f = 10$ pF, $G_f = 10 \mu S$ (100 k $\Omega$ ), $C_x$ e $G_x$ ( $R_x$ ) estão indicados no gráfico.....	34
Figura 2.21: Diagrama de Bode simplificado da resposta em frequência do circuito para medição de impedância usando um amplificador operacional não ideal .....	35

Figura 2.22: Sinal amostrado adequadamente e subamostrado (adaptado de CERNA; HARVEY, 2000).....	38
Figura 2.23: Processo de subamostragem .....	39
Figura 2.24: Espectro com sinais amostrados e subamostrados (adaptado de CERNA; HARVEY, 2000).....	39
Figura 3.1: Placa eletrônica desenvolvida .....	41
Figura 3.2: Diagrama de blocos do <i>hardware</i> desenvolvido.....	41
Figura 3.3: Filtro passa-baixa ou filtro pi.....	43
Figura 3.4: Circuito somador inversor.....	43
Figura 3.5: Esquema simplificado da ativação dos canais transmissores para o sistema de oito canais projetado.....	44
Figura 3.6: Placa de aquisição PCIe-7841R .....	45
Figura 3.7: Fluxograma do software compilado na FPGA.....	47
Figura 3.8: Espectro encontrado a partir da FFT calculada pelo LabView.....	49
Figura 3.9: Representação do espectro encontrado pelo cálculo da FFT com subamostragem.....	49
Figura 3.10: Interface do <i>software</i> responsável pela gravação dos DDS e configuração da gravação .....	51
Figura 3.11: interface do <i>software</i> responsável pelo cálculo da FFT .....	52
Figura 3.12: Fluxograma para identificação da amplitude das frequências .....	52
Figura 3.13: Interface do <i>software</i> responsável pelo acompanhamento do processamento e visualização .....	53
Figura 3.14: Interface do <i>software</i> para configurar a tabela de cores.....	53
Figura 3.15: Interface do <i>software</i> para criação do arquivo de calibração.....	54
Figura 3.16: Identificação de cada ponto no frame ao longo do tempo .....	55
Figura 3.17: Interface do <i>software</i> utilizada para escolher os arquivos de calibração e demais configurações da visualização.....	56
Figura 4.1: Resposta em frequência para componentes com valores $C_f = 10\text{pF}$ , $G_f = 10\mu\text{S}$ (100 k $\Omega$ ), $C_x$ e $G_x$ (Rx) estão indicados no gráfico .....	57
Figura 4.2: Resposta ao degrau do circuito para uma frequência de repetição de 50 kHz.....	58
Figura 4.3: Diagonal medida pelo LabView a partir das placas PCI. ....	59
Figura 4.4: Placas eletrônicas confeccionadas para o teste de acurácia. ....	59
Figura 4.5: Gráficos apresentando os erros nas medidas de capacitância (gráfico de cima) e da condutância (gráfico de baixo) .....	60
Figura 4.6: Montagem utilizada para o teste estático .....	61
Figura 4.7: Interface do <i>software</i> mostrando a imagem medida de uma seção transversal e a visualização horizontal ao longo do tempo .....	62
Figura 4.8: Foto do sensor <i>wire-mesh</i> , gráfico para a permissividade relativa e para a condutividade elétrica, respectivamente .....	62
Figura 4.9: Gráficos com os valores encontrados para a condutividade e permissividade elétrica, respectivamente .....	63
Figura 4.10: Montagem utilizada para simular o escoamento trifásico.....	64
Figura 4.11: Resultado da medida em escoamento .....	64

## LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1: Padrões de escoamentos trifásicos gás-óleo-água (adaptado de SPEDDING <i>et al.</i> , 2005).....	18
Tabela 4.1: Características elétricas das substâncias.....	61

## LISTA DE SÍMBOLOS

$F$	Faraday
$\Omega$	Ohm
$Z$	Impedância
$\varepsilon$	Permissividade elétrica
$k$	Condutividade
$\omega$	Frequência angular
$f$	Frequência
$I$	Corrente
$V$	Tensão
$\theta$	Ângulo de fase
$t$	Tempo
$j$	Número imaginário
$C_x$	Capacitância desconhecida
$G_x$	Condutância desconhecida
$C_f$	Capacitância da malha de realimentação
$R_f$	Resistência da malha de realimentação
$G_f$	Condutância da malha de realimentação
$C_{s1}, C_{s2}$	Capacitâncias parasitas
$V_o$	Tensão de saída
$V_i$	Tensão de entrada
$S$	Samples (amostras)
$f_o$	Frequência utilizada
$FS$	Frequência de amostragem
$F'$	Frequência subamostrada
$f_{MCLK}$	Frequência de clock
$f_{OUT}$	Frequência de saída
$V^H$	Dados da calibração alta
$V^L$	Dados da calibração baixa
$V_{cal}^L$	Arquivo de calibração baixa
$V_{cal}^H$	Arquivo de calibração alta
$V_{o\_cal}$	Arquivo final calibrado

## LISTA DE ACRÔNIMOS

AC	Corrente alternada
DAQ	Data acquisition card (Placa de aquisição de dados)
DC	Corrente contínua
DDS	Direct Digital Synthesizer
DMA	Direct Memory Access (Acesso direto à memória)
ECT	Electric Capacitance Tomography (Tomografia por capacitância elétrica)
EIT	Electric Impedance Tomography (Tomografia por impedância elétrica)
ERT	Electric Resistance Tomography (Tomografia por resistência elétrica)
FFT	Transformada rápida de Fourier
FPS	Frames por segundo (Quadros por segundos)
FPGA	Field-programmable gate array
Hz	Hertz
keV	Quilo elétron volt
LPF	Filtro passa-baixa
RPM	Rotações por minuto
SPI	Serial Peripheral Interface Bus

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO.....</b>	<b>14</b>
1.1 MOTIVAÇÃO.....	14
1.2 OBJETIVOS.....	15
<b>2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....</b>	<b>16</b>
2.1 ESCOAMENTO MULTIFÁSICO.....	16
2.1.1 Definições.....	16
2.1.2 Padrões de escoamento.....	16
2.2 TÉCNICAS PARA MEDIÇÃO DE ESCOAMENTOS BIFÁSICOS.....	19
2.2.1 Tomografia por raios-X e raios Gama.....	19
2.2.2 Tomografia por impedância elétrica.....	20
2.2.3 Outras técnicas.....	21
2.3 TÉCNICAS PARA MEDIÇÃO DE ESCOAMENTOS TRIFÁSICOS .....	21
2.3.1 Tomografia por raios-X.....	21
2.3.2 Sensor do tipo agulha.....	25
2.4 SENSOR WIRE-MESH.....	27
2.4.1 Técnica Condutiva.....	28
2.4.2 Técnica Capacitiva.....	30
2.5 MEDIDA DE IMPEDÂNCIA.....	32
2.5.1 Análise do circuito.....	33
2.5.2 Cálculo dos parâmetros dos fluidos.....	36
2.6 ANÁLISE ESPECTRAL COM FFT (FAST FOURIER TRANSFORM) .....	38
<b>3 DESENVOLVIMENTO.....</b>	<b>40</b>
3.1 HARDWARE.....	40
3.1.1 Transmissor.....	42
3.1.2 Receptor.....	44
3.1.3 Placa de aquisição de dados (DAQ).....	45
3.2 FIRMWARE.....	46
3.2.1 LabView.....	46
3.2.2 Fluxograma.....	46
3.2.3 Aquisição de dados.....	48
3.2.4 Controle dos canais.....	49
3.2.5 Controle das portas digitais.....	50
3.3 SOFTWARE.....	51
3.3.1 Programação dos DDS e a amostragem do sinal.....	51
3.3.2 Cálculo da FFT e identificação das amplitudes.....	52
3.3.3 Calibração do sistema e geração de imagens.....	54
<b>4 RESULTADOS E DISCUSSÕES.....</b>	<b>57</b>
4.1 RESPOSTA EM FREQUÊNCIA.....	57
4.2 RESPOSTA AO DEGRAU.....	58
4.3 INCERTEZA NA MEDIÇÃO.....	59
4.4 TESTES COM MISTURAS TRIFÁSICAS.....	60
4.4.1 Estático.....	61
4.4.2 Dinâmico.....	63
<b>5 CONCLUSÃO.....</b>	<b>66</b>
<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>68</b>
<b>APÊNDICE A – CIRCUITO ELETRÔNICO DESENVOLVIDO .....</b>	<b>70</b>
<b>APÊNDICE B – INTERFACE DO SOFTWARE .....</b>	<b>73</b>

# 1 INTRODUÇÃO

## 1.1 MOTIVAÇÃO

Escoamentos multifásicos estão presentes em diversos processos da natureza bem como em atividades industriais como na exploração, produção e transporte de petróleo e gás.

Na produção de petróleo, é comum encontrar-se escoando pelos dutos uma mistura de óleo, gás e água, assumindo diversos padrões de escoamentos com configurações espaciais distintas. Em muitos casos o tipo de escoamento determina a eficiência e segurança dos processos e equipamentos onde ocorrem. Em função disso, o desenvolvimento de técnicas capazes de realizar a medição experimental de parâmetros de escoamentos como o padrão de escoamento ou vazões, juntamente com a monitoração em tempo real, são de grande importância para o controle e otimização de processos e projeto de equipamentos.

Atualmente, existem alguns modelos teóricos para escoamentos bifásicos, mas menos informação quando se trata de escoamentos multifásicos. Por isso, investigações experimentais de escoamento multifásicos são de grande valia no auxílio do desenvolvimento de modelos teóricos e na validação de predições realizadas por simulações, ampliando o entendimento do fenômeno.

Algumas técnicas experimentais já foram desenvolvidas no passado, como tomógrafos baseados em raios-x e sensores capacitivos ou condutivos. No caso de tomógrafos de raios-x, sua grande limitação é a resolução temporal, devido às partes móveis envolvidas, além de seu alto custo, entretanto é uma técnica interessante por ser não invasiva. Sensores capacitivos ou condutivos ainda estão sendo desenvolvidos, tendo atualmente sua principal aplicação em escoamentos bifásicos, onde são utilizados para medição da fração volumétrica de gás.

Neste trabalho, optou-se por utilizar o sensor de malha de eletrodos (*Wire-Mesh Sensor*), uma técnica intrusiva, mas que tem sido bastante utilizada na monitoração de escoamentos. Inicialmente proposto para visualização de escoamentos bifásicos, o sensor realiza o imageamento das distribuições de fases da seção transversal a partir de uma malha de fios. Com a passagem do escoamento através do sensor, o mapeamento das fases é realizado de forma intrusiva com alta resolução temporal e espacial. Seu princípio de funcionamento consiste em captar diferenças de permissividade elétrica e/ou a condutividade elétrica existentes em cada substância.

Para realizar medições em escoamentos multifásicos, é introduzido neste trabalho um novo sistema para operar o sensor *wire-mesh*, que mede simultaneamente a permissividade elétrica (capacitância) e a condutividade elétrica (condutância). A implementação desse sistema consiste no desenvolvimento de *hardware* e *software*, necessários para executar esta tarefa.

## 1.2 OBJETIVOS

O objetivo do presente trabalho é o desenvolvimento de um sistema para medição de escoamentos multifásicos, mais especificamente, óleo, ar e água, que é comum na área petrolífera. Esse sistema baseia-se em uma técnica de medição da impedância elétrica em suas duas componentes real e imaginária dos fluídos escoando nos dutos, de forma a poder caracterizá-lo através de duas componentes: resistência e capacitância. O sistema consiste de um *hardware* desenvolvido para trabalhar em conjunto com o sensor *wire-mesh*. Este *hardware* consistirá de uma parte transmissora, onde os sinais serão gerados e transmitidos para o sensor, e uma parte receptora, que fará o tratamento do sinal proveniente do sensor. Esse sistema será controlado pelo computador usando um *software* desenvolvido em LabView, que permitira fazer toda a configuração do sistema, usando uma placa uma de aquisição de dados como interface entre o computador e a placa eletrônica, e também possibilitará a visualização da medida realizada.

O desenvolvimento desse trabalho é de acordo com as seguintes tarefas:

- Desenvolvimento de *hardware* para uso com o sensor *wire-mesh* 8x8 (8 canais transmissores e 8 canais receptores),
- Desenvolvimento de *firmware* e *software* em LabView, para o controle do sistema,
- Realização de testes de desempenho do sistema completo, tanto estáticos quanto dinâmicos,
- Realização de testes com misturas trifásicas ar-óleo-água.



## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 ESCOAMENTO MULTIFÁSICO

#### 2.1.1 Definições

Escoamentos multifásicos tem como definição geral o escoamento de duas ou mais substâncias em um meio, que podem ser em dutos, equipamentos, meios porosos, entre outros.

As fases podem ser de três tipos, classificadas abaixo:

- **Sólida:** Composta normalmente por partículas relativamente pequenas. Essa fase é incompressível e suas interfaces com outras fases não são deformáveis. Uma substância que ocorre com frequência nessa fase na indústria petrolífera é a areia,
- **Líquida:** Essa fase é relativamente não compressível, suas interfaces com outras fases são deformáveis. Exemplos comuns dessa fase são água e óleos em geral,
- **Gasosa:** Composta por substâncias compressíveis e deformáveis.

Este trabalho irá focar escoamentos multifásicos gás-líquido-líquido, escoando em dutos, cenário comum na indústria petrolífera.

#### 2.1.2 Padrões de escoamento

Diferente do que ocorre em um escoamento bifásico, onde é consenso possuir apenas cinco padrões de escoamentos (TAITEL; DUKLER, 1976), em um escoamento trifásico gás-óleo-água ainda não existe consenso sobre a divisão de padrões. Um exemplo sobre padrões de escoamentos trifásicos é apresentado por SPEDDING *et al.*, (2005), onde são definidos 22 padrões de escoamentos. Esses padrões são divididos em três grupos, de acordo com o elemento de dominância, ou seja, água dominante, óleo dominante e transição.

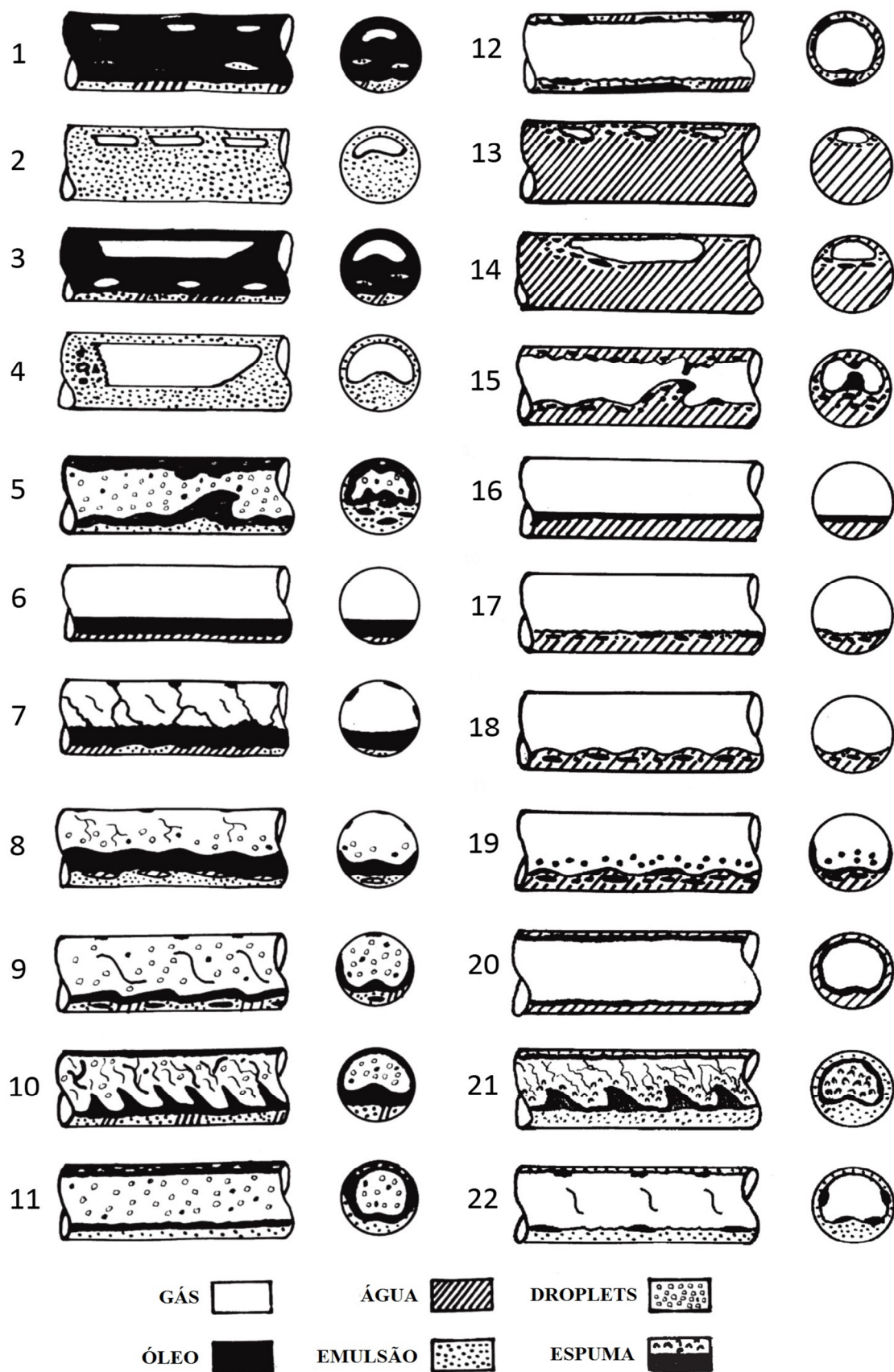


Figura 2.1: Padrões de escoamentos trifásicos gás-óleo-água (adaptado de SPEDDING *et al.*, 2005)

Abaixo, tem-se uma tabela com a classificação de cada padrão:

**Tabela 2.1: Padrões de escoamentos trifásicos gás-óleo-água (adaptado de SPEDDING *et al.*, 2005)**

Óleo dominante	1	Plug separado
	2	Plug disperso
	3	Golfada separada
	4	Golfada dispersa
	5	Golfada aerada
	6	Estratificado liso separado
	7	Estratificado ondulado separado
	8	Estratificado ondulado disperso
	9	Estratificado ondulado disperso com droplets*
	10	Anular separado
	11	Anular disperso
Inversão	12	Interface partida
Água dominante	13	Plug disperso
	14	Golfada dispersa
	15	Golfada aerada
	16	Estratificado liso separado
	17	Estratificado enrugado disperso
	18	Estratificado ondulado disperso
	19	Estratificado ondulado com droplets*
	20	Anel de água com óleo anular
	21	Anular com espuma
	22	Anular disperso

Na indústria petrolífera, os padrões mais comuns em longas linhas de transmissão são os do tipo golfada (14 e 15) e estratificados separados (6, 7 e 16). Em função disso, o desenvolvimento de técnicas capazes de realizar a medição experimental de parâmetros de escoamentos como o comportamento das fases e suas velocidades, juntamente com a monitoração em tempo real, são de grande importância para o controle e otimização de processos assim como o projeto de novos equipamentos.

\* Este termo utilizado pelo autor, se aproxima basicamente na literatura clássica do escoamento estratificado ondulado, as “droplets” são pequenas gotículas que se desprendem das cristas das ondas devido ao alto fluxo de gás.

## 2.2 TÉCNICAS PARA MEDIÇÃO DE ESCOAMENTOS BIFÁSICOS

Devido à grande importância em entender o comportamento de escoamentos multifásicos, com o tempo foram surgindo algumas técnicas que tem por objetivo detalhá-lo de alguma forma. Atualmente a grande maioria dessas técnicas só é capaz de investigar escoamentos bifásicos. Cada técnica possui características bem distintas, podendo ser classificadas de acordo com vários parâmetros, tais como: resolução espacial e temporal, tipo de material onde podem ou devem ser utilizados, e se a sonda é intrusiva ou não. Devido a essas características, deve-se salientar que cada técnica não pode ser utilizada de forma universal, sendo que cada uma delas possuem parâmetros que podem ser importantes para uma aplicação, mas que pode acabar inviabilizando seu uso em outra.

Podemos listar as seguintes técnicas que serão comentadas:

- Tomografia por raios-X e raios Gama,
- Tomografia por impedância elétrica,
- Outras técnicas.

### 2.2.1 Tomografia por raios-X e raios Gama

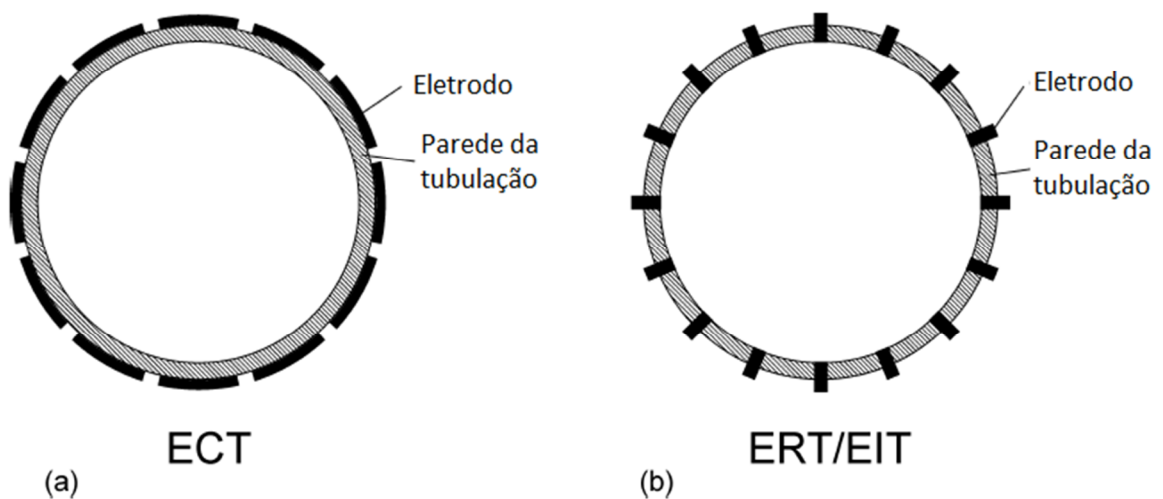
Tomografia por raios-X e raios Gama vem sendo utilizada ao longo dos anos em diversas áreas, como na área médica (somente raios-X), mas também é amplamente aplicada no estudo de escoamentos.

Estas técnicas tomográficas não invasivas apresentam alta resolução espacial, mas a maioria ainda possui baixa resolução temporal, devido a movimentação mecânica das partes do tomógrafo ao redor da tubulação. HEINDEL *et al.*, (2008) descreve o uso de tomografia por raios-X, assim como HAMPEL, U. *et al.*, (2007) o uso de raios gama. JOHANSEN, (2005) avalia a otimização desta técnica incorporando um número maior de fontes atuando diretamente a receptores, de forma a substituir as fontes móveis, reduzindo o tempo de aquisição de dados. Soluções de imageamento rápido por raios-X, *fast X-ray imaging* e *ultra-fast X-ray imaging*, utilizam o meio eletrônico ao invés do mecânico, alcançando taxas de 2000 fps (HORI *et al.*, 1998) até 7000 fps (HAMPEL, U.; FISCHER, 2008). Outra técnica é capaz de realizar o mapeamento 2D com taxa de 10000 fps, ou escaneamento 3D com taxa de 1000 fps, descrita por STÜRZEL *et al.*, (2011). Estas técnicas de raios-X e gama são de grande importância em situações em que são utilizadas paredes metálicas, por exemplo, onde a utilização de outras técnicas se tornam inviáveis, no entanto, essas soluções ainda são relativamente complexas e de custos elevados.

### 2.2.2 Tomografia por impedância elétrica

Quando um campo elétrico é aplicado em uma determinada matéria, suas características elétricas provocarão uma deformação nesse campo elétrico. Com isso, através de técnicas de medições apropriadas, pode-se descobrir a impedância da matéria, que é dividida em capacitância, relativa à sua permissividade elétrica, e condutividade, relativa à condutância da matéria. A partir disso, técnicas de EIT (*Electric Impedance Tomography*) foram desenvolvidas, as quais são divididas em ERT (*Electric Resistance Tomography*) e ECT (*Electric Capacitance Tomography*) (MARASHDEH *et al.*, 2007) e (CAO *et al.*, 2007).

Em EIT, vários eletrodos são dispostos igualmente espaçados em torno de um duto não condutor. A técnica ECT é amplamente utilizada para detecção de fração de vazio em misturas gás-líquido com líquidos não condutores, como exemplo, gás e óleo. Os sensores se localizam na parte externa da tubulação, como pode ser visto na figura 2.2 (a), onde os sinais de excitação gerados e medidos utilizam a diferença de potencial. A variação de capacitância medida pelos eletrodos que realizam a medição é proporcional à permissividade elétrica da mistura, ou seja, proporcional à fração de gás e líquido dentro da tubulação. Essa técnica funciona apenas para misturas com fases de diferentes permissividades, onde se pode prever a concentração média da mistura (CROWE, 2006).



**Figura 2.2:** Arranjo típico de eletrodos em sistemas de: (a) ECT, com 12 eletrodos. (b) ERT/EIT, com 16 eletrodos

Na ERT, os sensores penetram na tubulação, pois precisam estar em contato com os fluídos de medição, como pode ser visto na figura 2.2 (b), porém são considerados não intrusivos devido ao seu baixo grau de intrusão. Normalmente são aplicados no mapeamento de distribuições de concentração em suspensões e misturas fracas e devem ser utilizados com fluídos que possuem condutâncias diferentes. Correntes são aplicadas e diferenças de

potencial são medidas. Em ambas as técnicas, os eletrodos transmissores são excitados um de cada vez, enquanto os outros sensores captam o sinal. O sinal resultante passa por um algoritmo de reconstrução e gera imagens que serão analisadas posteriormente. A resolução espacial da tomografia por impedância elétrica é baixa, porém sua resolução temporal é alta e possui um baixo custo. Para maiores detalhes sobre a medição com base em modalidades elétrica, ver (XIE *et al.*, 1995), (DYAKOWSKI, 2000), (YORK, 2001), (TAPP *et al.*, 2003), (YANG; PENG, 2003) e (AHMED; ISMAIL, 2008).

### **2.2.3 Outras técnicas**

A técnica de ultrassom é outra técnica utilizada na investigação de escoamentos bifásicos (HOYLE, 1996). Esse sistema detecta mudanças na resposta de um sinal acústico entre as interfaces das fases líquida e gasosa com transdutores dispostos ao redor do duto. Esta técnica possui resolução temporal moderada e pode ser utilizada em tubulações opacas, porém essa técnica é aplicada apenas para escoamentos com baixa fração de vazio, pois a onda mecânica é espalhada nas interfaces e os detectores não recebem sinal suficiente.

Outra técnica utilizada é a câmera de alta velocidade, que a partir da gravação do escoamento, pode-se utilizar as imagens instantâneas aplicando-se diversos processamentos para calcular a velocidade do escoamento, o tamanho das bolhas (LAGE; ESPOSITO, 1999), entre outros. No entanto essa técnica só pode ser utilizada com tubulações e fluídos transparentes.

## **2.3 TÉCNICAS PARA MEDIÇÃO DE ESCOAMENTOS TRIFÁSICOS**

Nesta seção, serão apresentadas técnicas utilizadas para a investigação de escoamentos trifásicos, como:

- Tomografia por raios-X,
- Sensor do tipo agulha.

### **2.3.1 Tomografia por raios-X**

Uma técnica de tomografia por raios-X foi desenvolvida para a investigação de escoamentos trifásicos ar-óleo-água utilizando raios-X com dois espectros de energia distintos (HU, BIN *et al.*, 2005). Esse sistema consiste em uma câmara blindada com dois feixes de raios-X e duas placas com 256 sensores receptores, como pode ser visto na figura 2.3.

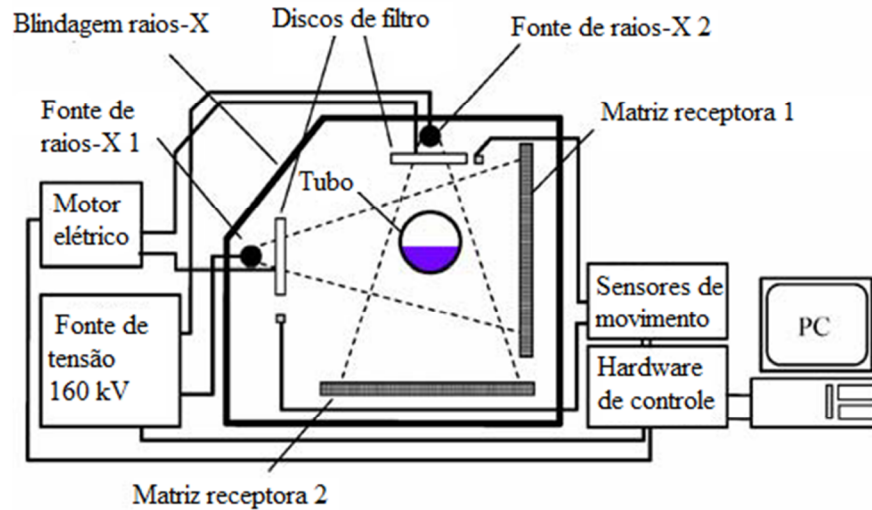


Figura 2.3: Sistema de raios-X (adaptado de HU et al., 2005)

Os feixes de raios-X usam uma tensão de 160 kV, onde através de um disco usado como filtro, gera dois sinais com energias diferentes. Uma parte do disco (figura 2.4) com um segmento de  $60^\circ$  é aberto. Um segundo segmento, de  $120^\circ$  é composto por uma camada de 2 mm de cobre, que faz reduzir a intensidade dos raios-X. O terceiro segmento, de  $180^\circ$  é composto por uma camada de 8 mm de chumbo, que bloqueia completamente os raios-X. Esses discos giram com diferença de fase de  $180^\circ$  a fim de incidir apenas um feixe de cada vez na matéria exposta a medição.

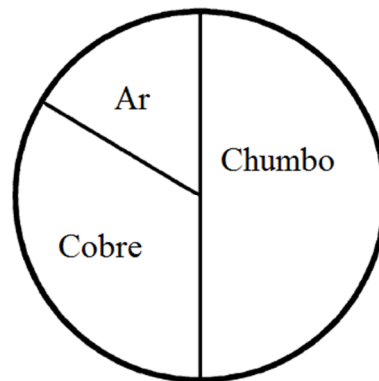


Figura 2.4: Disco de filtragem de raios-X (adaptado de HU et al., 2005)

O disco gira a uma frequência de 4,6Hz (275 RPM). Como a frequência de aquisição é diretamente proporcional à frequência de rotação do disco, a frequência das imagens tomográficas é de 4,6 Hz para cada vista reconstruída.

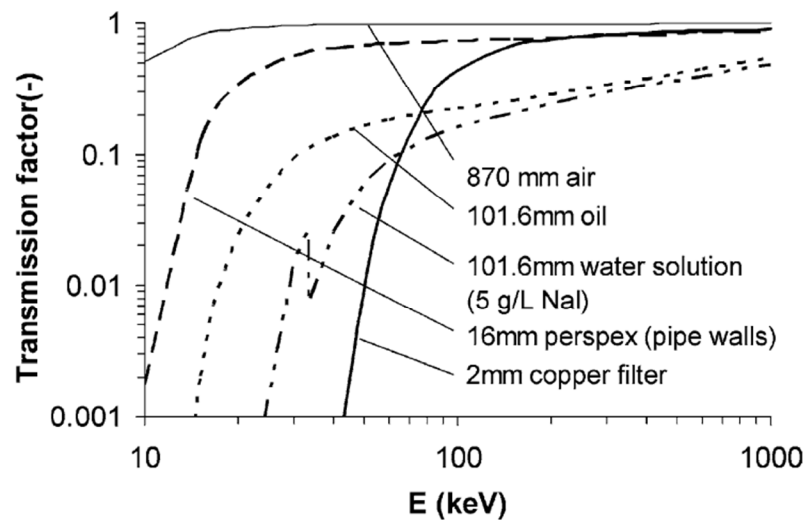


Figura 2.5: Fatores de transmissão para vários materiais entre a fonte de raios-X e a matriz receptora (adaptado de HU et al., 2005)

Na figura 2.5 temos a atenuação medida em diversas energias dos raios-X. Percebe-se que com baixa energia óleo e água são bem distintos, porém possuem quase a mesma atenuação em altas energias de raios-X.

Sabendo o comportamento das substâncias, fez-se a calibração de cada substância, tomando os valores encontrados na baixa e alta intensidade, usando o disco de filtro.

Usou-se o padrão estratificado como mostrado na figura 2.6 para testar o sistema.

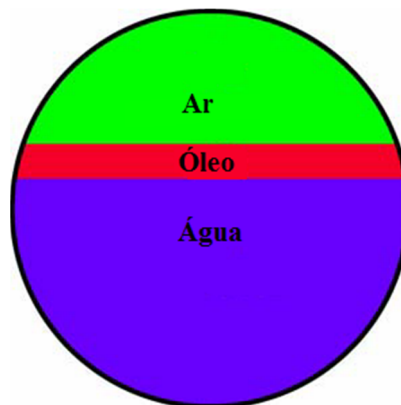
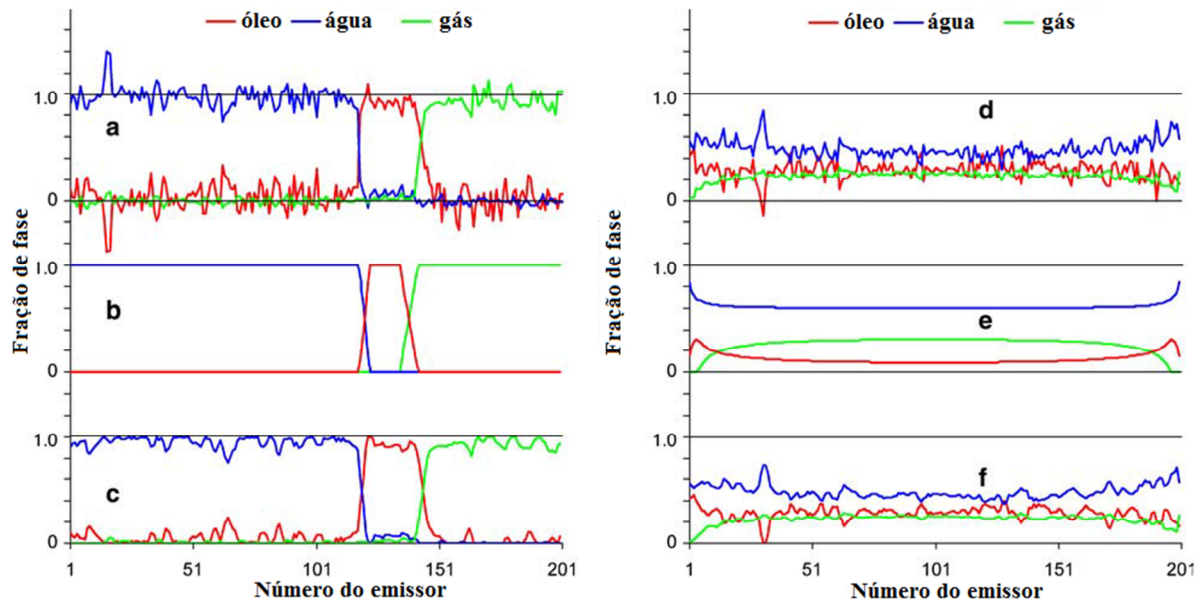


Figura 2.6: Geometria da seção utilizada para gerar dados para fração de fase apresentados na figura 2.7 (adaptado de HU et al., 2005)

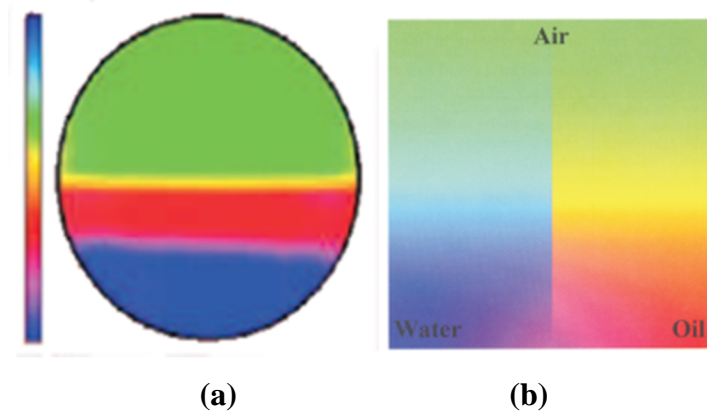
Após os dados adquiridos serem calibrados e processados, encontro-se os gráficos abaixo, com as frações de fases.





**Figura 2.7:** Dados da fração de fase experimental processadas dos feixes horizontais (a-c) e verticais (d-f), (a) e (d) dados de fração de fases medidos; (b) e (e) dados de fração de fase ideal; (c) e (f) dados de fração de fases medidos, após processamento e filtragem (adaptado de HU et al., 2005)

Como observado, essa técnica apresenta um bom resultado. Posteriormente essa técnica foi aprimorada, onde testes foram realizados em escoamentos trifásicos água-óleo-ar, apresentando como resultado a figura 2.8.

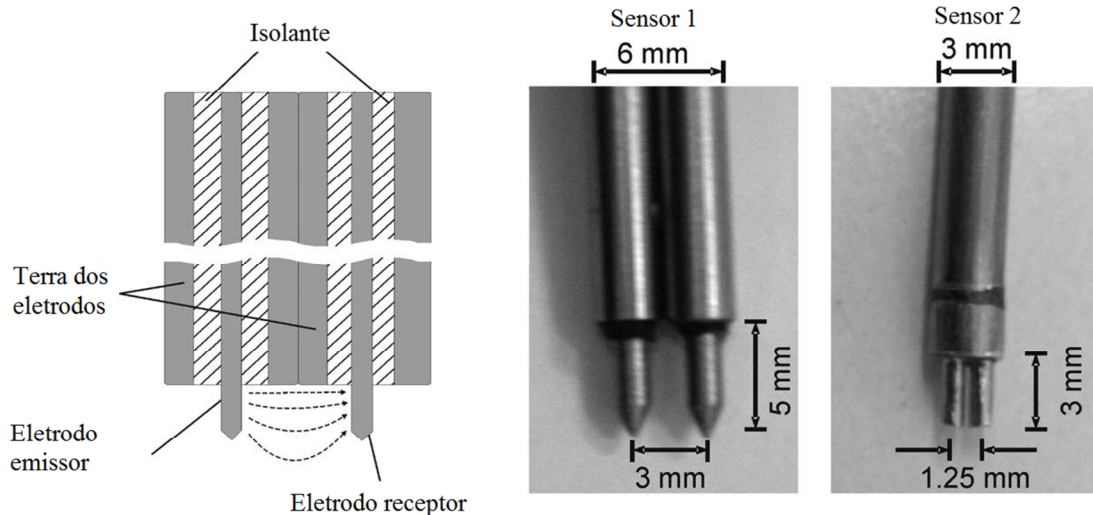


**Figura 2.8:** (a) Imagem obtida pela técnica em um escoamento estratificado e (b) esquema de cores utilizado para o escoamento trifásico (HU, B. et al., 2007).

Porém essa técnica continuou com sua principal limitação que é a baixa resolução temporal, devido as suas partes móveis, tais como o disco de filtragem, onde, nesse caso tem-se uma frequência de aquisição de 100 Hz para imagens unidimensionais e de 10 Hz para imagens bidimensionais. Com isso, torna-se inviável investigar escoamentos com médias e altas velocidades.

### 2.3.2 Sensor do tipo agulha

Uma sonda do tipo agulha foi desenvolvida por DA SILVA *et al.*, (2007a). Essa sonda é constituída mecanicamente como sendo dois cabos coaxiais lado a lado, onde um é o eletrodo emissor e o outro o eletrodo receptor, como mostrado na figura 2.9.



**Figura 2.9: Sensor do tipo agulha (adaptado de DA SILVA *et al.*, 2007a)**

Esse sistema, como pode ser visto na figura 2.10, é composto por um gerador de sinal (DDS) que gera uma tensão com uma frequência programada pelo usuário. Essa tensão é então enviada ao eletrodo emissor, onde dependendo da substância presente entre os eletrodos desse sensor, uma corrente é induzida no eletrodo receptor. Essa corrente então é convertida em tensão através de um conversor de corrente-tensão, também conhecido como amplificador de transimpedância. Essa tensão é analisada por um detector de amplitude e fase, onde através de um sinal de referência, mede a amplitude e o deslocamento de fase do sinal original. O DDS deslocado em fase é usado para melhorar a precisão do detector.

Na saída desse detector é ligada uma placa de aquisição de dados, onde, através desses dados medidos, é calculada a permissividade e a condutividade elétrica das substâncias.

Foram então construídos dois sensores com espaçamento diferente entre eletrodos, e para um teste de acurácia foram utilizados valores de resistores entre 100 k $\Omega$  e 1 M $\Omega$ , e até 15 pF para capacitores, sendo usados 6 valores. Pode-se ver na figura 2.11 o resultado desse teste. As linhas pontilhadas mostram um desvio de 7% em relação à referência.

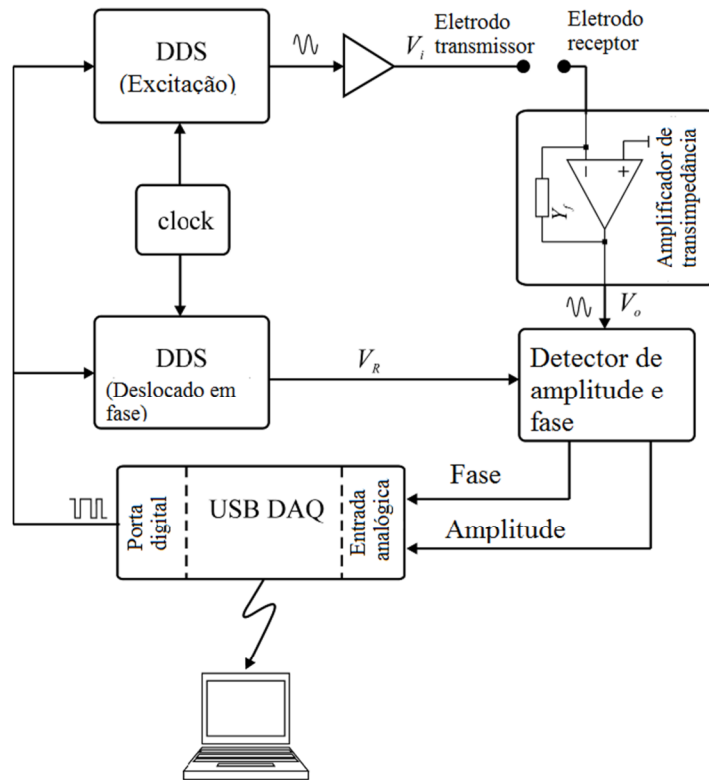


Figura 2.10: Esquemático do sistema implementado (adaptado de DA SILVA et al., 2007a)

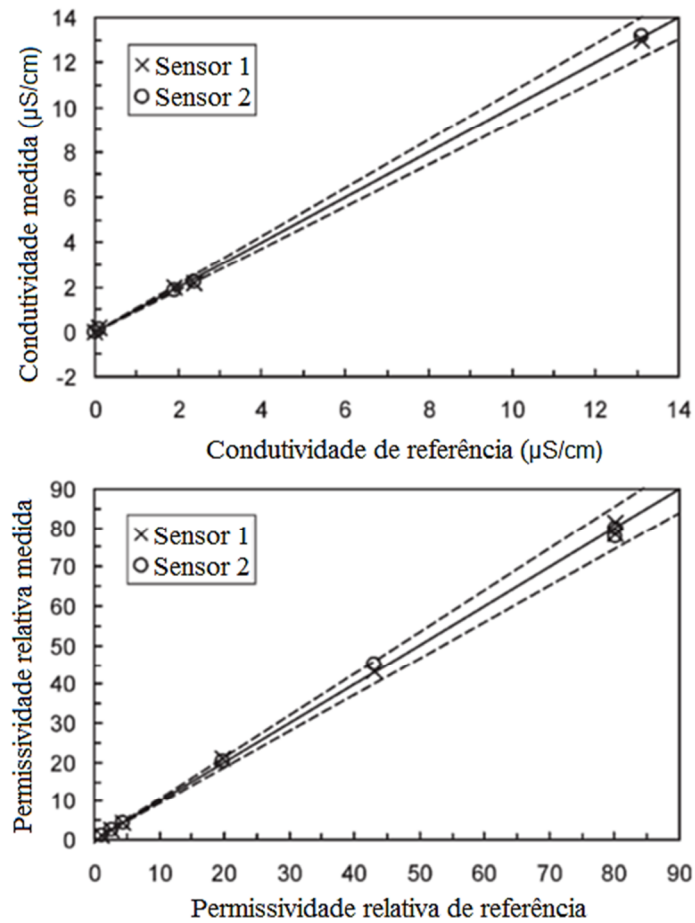


Figura 2.11: Resultados encontrados para condutividade e permissividade elétrica, com as linhas pontilhadas mostrando um desvio de 7% em relação a referência (adaptado de DA SILVA et al., 2007a)

Pode-se ver pelo resultado que essa técnica tem boa acurácia na identificação da condutividade e permissividade elétrica de substâncias, mas tem como limitante a falta de resolução espacial. Assim, pode-se fazer apenas medições locais do escoamento, não sendo possível extrair todos os detalhes do escoamento.

## 2.4 SENSOR WIRE-MESH

O sensor *wire-mesh*, ou malha de eletrodos, como também é conhecido, consiste de um sensor intrusivo utilizado para fazer o imageamento das fases de uma seção transversal do escoamento. Esse sensor foi inicialmente proposto por PRASSER *et al.*, (1998) para ser utilizado na investigação de escoamentos bifásicos gás-líquido.

Suas principais características são sua alta resolução temporal e espacial, proporcionando uma grande precisão na extração de parâmetros através das imagens geradas pelo sensor.

Este sensor é constituído por dois planos de fios esticados (fios de aço inoxidável) que formam um eletrodo em cada um dos cruzamentos. Esses fios possuem 0,125 mm de diâmetro que se estendem em uma seção perpendicular à direção do fluxo que escoar na tubulação.

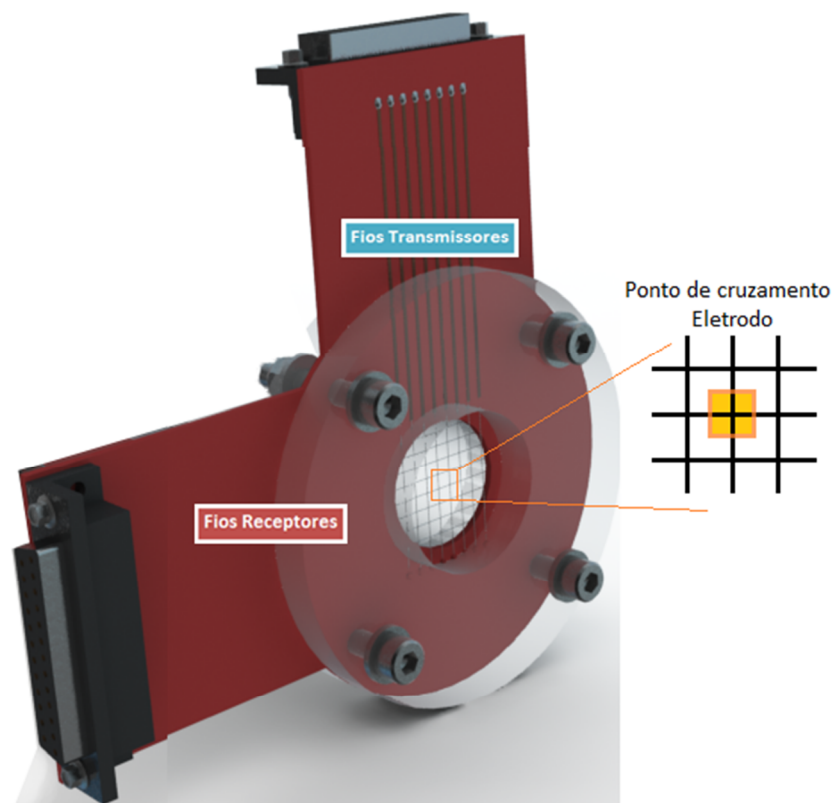
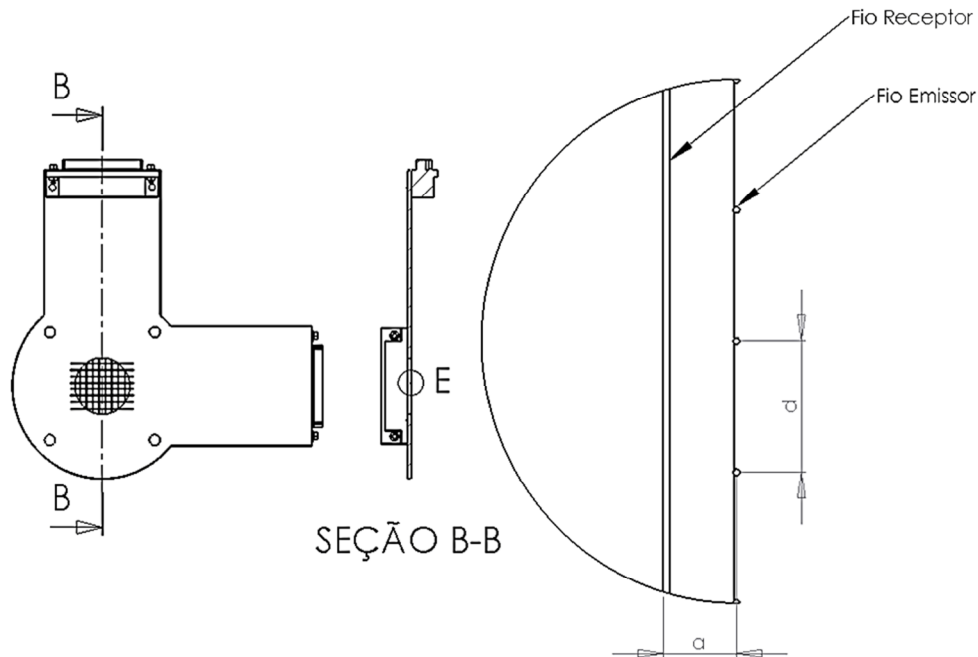


Figura 2.12: Imagem detalhando planos transmissores e receptores e os pontos de cruzamentos (eletrodos)

Um desses planos é transmissor e o outro é receptor, eles são montados com um ângulo de  $90^\circ$  e são separados por uma distância axial ( $a$ ) de 1,5 mm, de acordo com a figura 2.13, formando uma grade de eletrodos. O sensor utilizado nesse trabalho possui a configuração 8x8, ou seja, 8 canais transmissores e 8 canais receptores.



**Figura 2.13: Imagem mostrando a separação entre os planos**

Inicialmente, os sensores *wire-mesh* eram capazes de realizar medições em fluídos através da condutividade elétrica (PRASSER *et al.*, 1998) onde era possível distinguir duas substâncias através da condutividade elétrica. Posteriormente uma nova técnica foi apresentada por DA SILVA *et al.*, (2007), onde até duas substâncias eram identificadas através da permissividade elétrica. Uma terceira técnica, desenvolvida por DA SILVA *et al.*, (2009) faz tomografia do escoamento utilizando a temperatura das substâncias que estão escoando pelos dutos. As duas primeiras técnicas serão detalhadas a seguir.

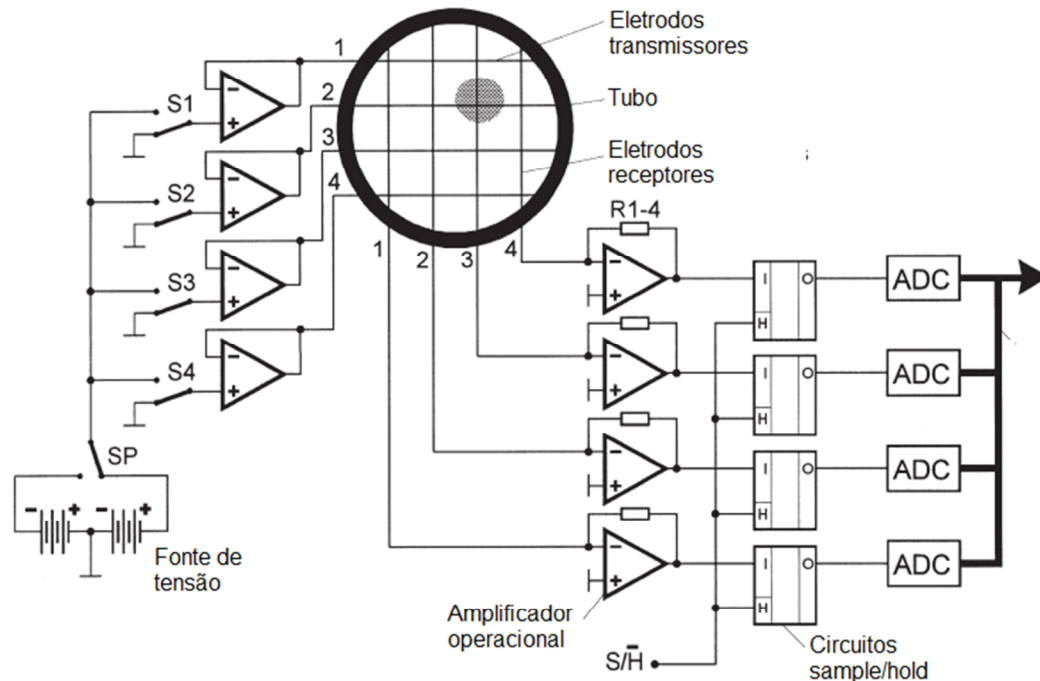
#### 2.4.1 Técnica Condutiva

Essa técnica, criada por PRASSER *et al.*, (1998), utilizou-se do princípio da condutividade para distinguir duas substâncias, de forma que se torna uma ótima técnica para identificar e separar substâncias isolantes de não isolantes, por exemplo, água e gás.

Todas as técnicas *wire-mesh* citadas nesse trabalho utilizam o mesmo princípio no *hardware* de controle do sensor. Cada linha do plano transmissor é acionada de forma

sequencial, e todas as linhas receptoras são medidas simultaneamente, sendo necessário fazer aquisição de todas as linhas transmissoras para formar um frame completo.

Na figura 2.14 tem-se um diagrama simplificado do sistema proposto pela técnica.

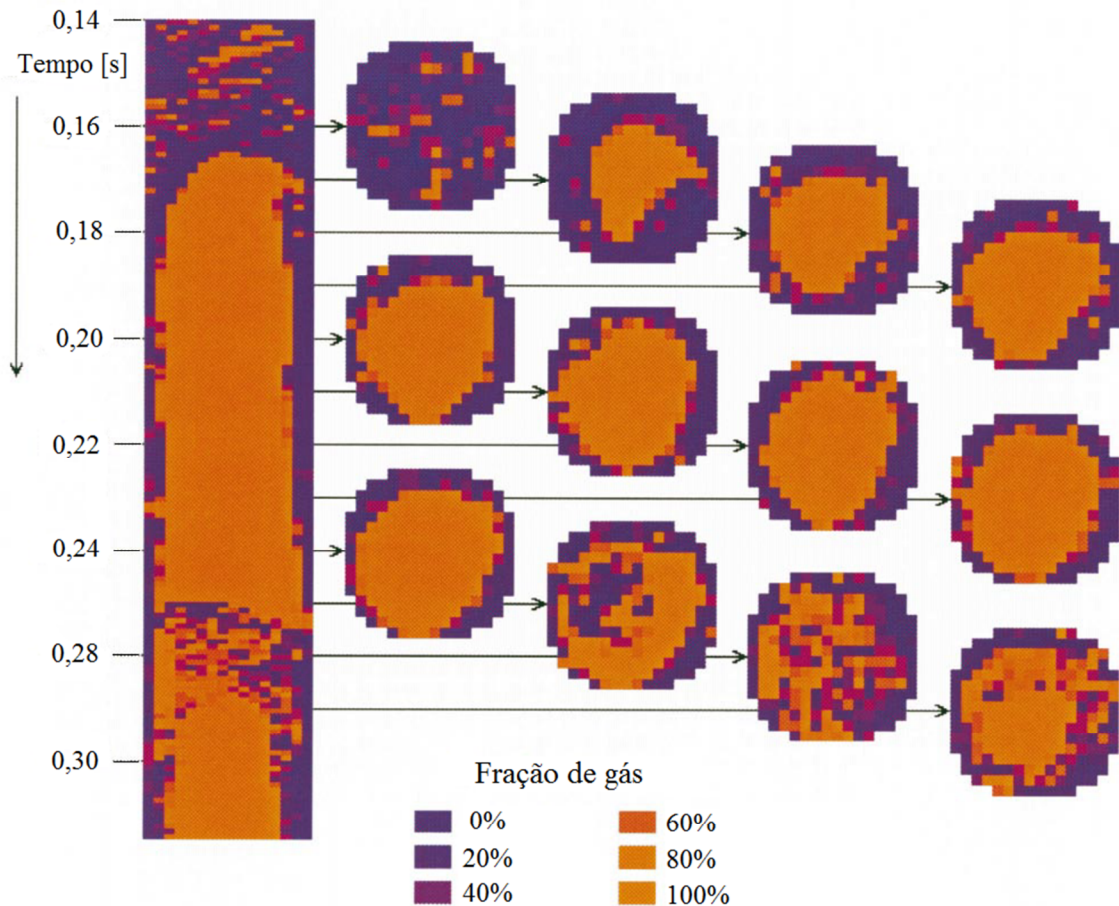


**Figura 2.14: Diagrama do sistema com sensor *wire-mesh* condutivo (adaptado de PRASSER et al., 1998)**

Esse sistema possui duas fontes de tensão contínua, onde através da chave SP é gerada uma onda quadrada. O motivo pelo qual não pode ser utilizada uma tensão contínua é que ocorreria eletrólise nos eletrodos, o que prejudicaria as medições com o sensor.

Proporcionalmente à condutividade da substância presente entre o eletrodo, uma corrente é medida na parte receptora do sistema. Essa corrente é então convertida em tensão, e após ser amostrada por um circuito sample/hold passa por conversores analógicos/digitais, que deixa os dados prontos para serem processados pelo computador. Com esses dados, após fazer a calibração do sistema, pode-se fazer a reconstrução do escoamento, bem como calcular a condutividade da substância sendo medida.

Na figura 2.15, pode-se ver uma reconstrução do escoamento processada através dos dados obtidos com essa técnica.



**Figura 2.15:** Sequência de frames capturados em um escoamento vertical do tipo plug. Utilizando um sensor *wire-mesh* 16x16, com  $JL=1$  m/s,  $JG=1,3$  m/s, resolução temporal de 1024 FPS (adaptado de PRASSER et al., 1998)

Pode-se perceber pelo resultado, que esta é uma boa técnica para um escoamento bifásico ar-água, possuindo boa resolução temporal e espacial, no entanto essa técnica não consegue distinguir escoamentos bifásicos com substâncias isolantes, como ar e óleo, por exemplo, pois o princípio de funcionamento é baseado em resistência elétrica.

#### 2.4.2 Técnica Capacitiva

Posterior a criação da técnica baseada na condutividade, DA SILVA *et al.*, 2007 desenvolveram outra técnica, onde é utilizada a permissividade elétrica (capacitância) das substâncias para distingui-las. Na figura 2.16 temos um esquema simplificado de como foi desenvolvido esse sistema.

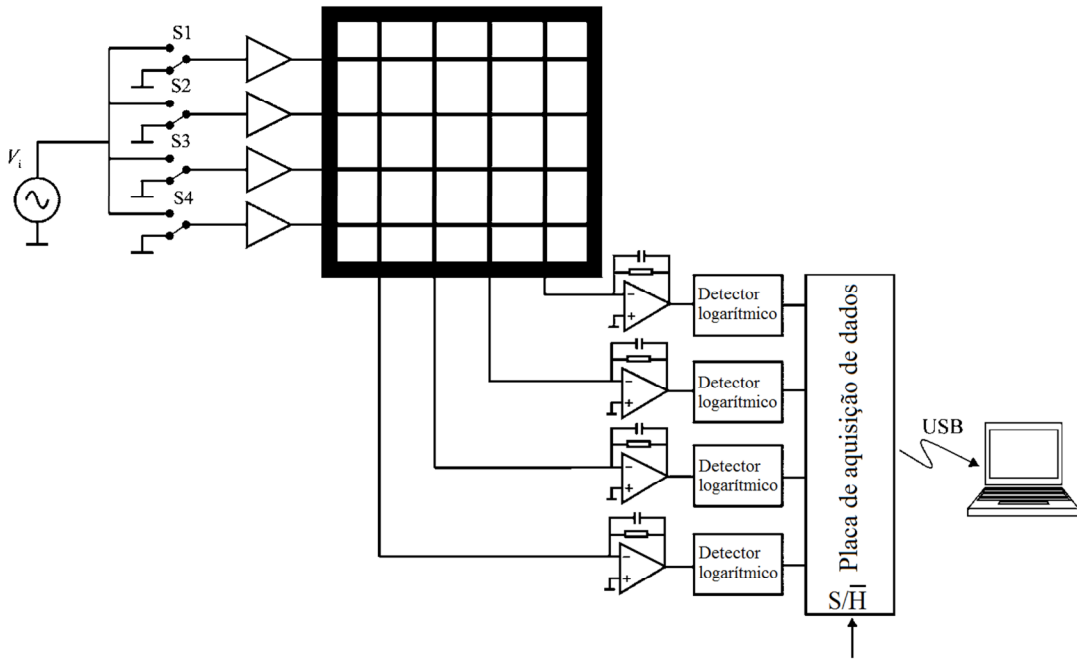


Figura 2.16: Esquema simplificado do sistema *wire-mesh* capacitivo (adaptado de DA SILVA *et al.*, 2007)

Esse sistema utiliza um DDS para gerar uma onda senoidal com uma frequência escolhida pelo usuário. Em seguida, o sinal passa por chaves que fazem o controle dos canais transmissores do sensor, conforme pode-se ver na figura 2.17, onde um canal é ativado por vez, e após ser dado um pulso de sincronia S/H, os canais receptores são amostrados simultaneamente.

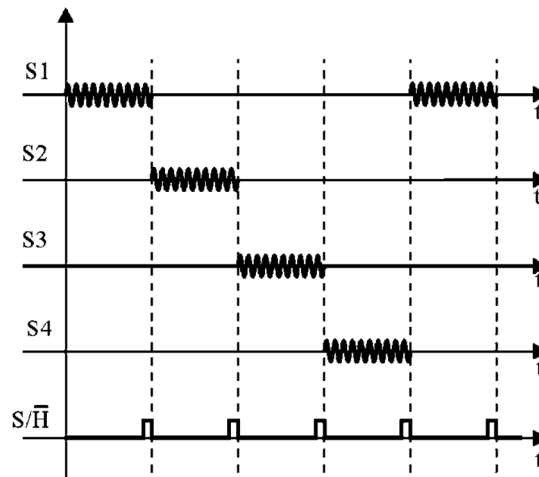


Figura 2.17: Esquema de ativação e sincronia dos canais transmissores do sensor *wire-mesh* com a placa de aquisição de dados, para um sistema com quatro canais (DA SILVA *et al.*, 2007)

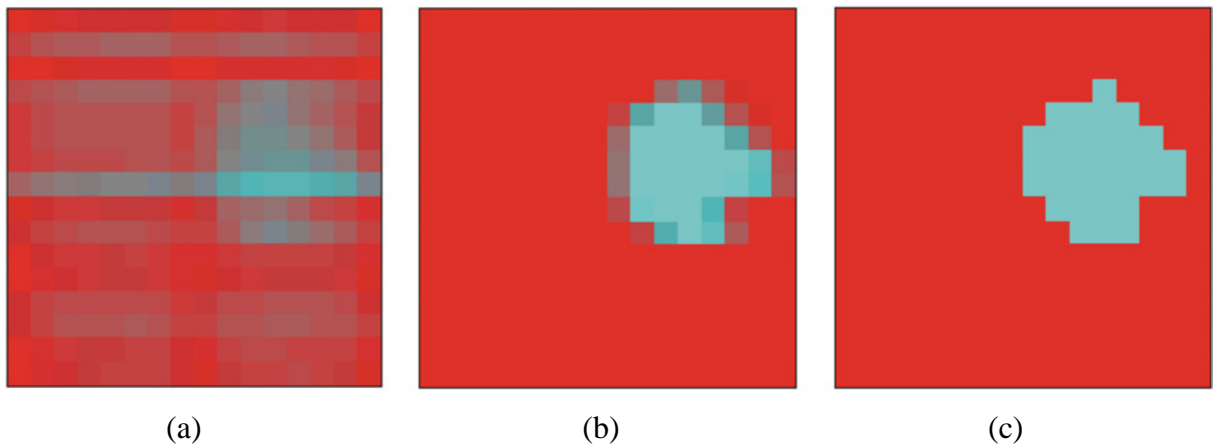
Nos eletrodos do sensor *wire-mesh*, através da tensão aplicada no canal transmissor, uma corrente é induzida no canal receptor. Essa corrente é proporcional à permissividade elétrica da substância que se encontra no cruzamento entre esses canais. Na parte receptora do sistema, encontram-se amplificadores de transimpedância que convertem o sinal de corrente



em sinal de tensão. Em seguida, o sinal passa por detectores logarítmicos, que transformam o sinal AC em um sinal DC de amplitude proporcional, para então ser amostrado por uma placa de aquisição de dados processado no computador.

Com esses dados, pode-se fazer a reconstrução do escoamento, após fazer a calibração do sistema, bem como calcular a permissividade elétrica (capacitância) da substância sendo medida.

Na figura 2.18, pode-se ver uma imagem obtida através dessa técnica.



**Figura 2.18:** Imagens da seção cruzada de uma bolha de ar em meio a óleo de silicone, em diferentes estágios de processamentos de imagens: (a) Dados da imagem em raw, (b) imagem com dados calibrados e (C) imagem binarizada (DA SILVA *et al.*, 2007)

Esta técnica mostrou-se muito boa na caracterização de escoamentos bifásicos, tendo boa resolução espacial para dutos de pequeno diâmetro, já que possui resolução de 16x16 e boa resolução temporal (nesse caso, de no máximo 625 FPS), conseguindo contornar a limitação da técnica anterior de não distinguir ar e óleo por serem isolantes. No entanto, nenhuma dessas técnicas teria um bom resultado para escoamentos multifásicos.

## 2.5 MEDIDA DE IMPEDÂNCIA

Impedância elétrica de um material ou circuito é a relação entre a tensão e a corrente que circula por ele. Aplicando uma corrente alternada (AC) senoidal  $v(t) = V \cdot \cos(\omega t + q_v)$  com frequência angular  $\omega = 2\pi \cdot f$  resulta uma corrente elétrica  $i(t) = I \cdot \cos(\omega t + q_i)$ . A impedância  $Z$  é calculada pela lei de Ohm na notação complexa:

$$\bar{Z} = \frac{\bar{V}}{\bar{I}} \quad (2.1)$$

onde  $V = V.e^{(jq_v)}$  é a tensão complexa,  $I = I.e^{(jq_t)}$  é a corrente complexa e  $j = \sqrt{-1}$ . Dessa forma, é possível calcular-se a impedância, que é diretamente proporcional à resistência e capacitância do material em questão, que é o que o trabalho se propõe a medir. Utilizando esse princípio foi desenvolvida a técnica detalhada a seguir.

### 2.5.1 Análise do circuito

Fluídos em geral, podem ser classificados de acordo com suas propriedades eletromagnéticas. Embora alguns fluidos tais como ferrofluidos possuem propriedades magnéticas, a maioria deles são não-magnéticos. Por outro lado, todos os fluidos possuem propriedades elétricas, capazes de gerar mudanças nos campos elétricos aplicados, devido a sua impedância elétrica que depende da condutância e da permissividade elétrica do material. Dessa forma, pode-se fazer a representação de um fluido através de uma associação de um resistor em paralelo com um capacitor (DA SILVA, M. J., 2008).

Analisando o sensor *wire-mesh*, podemos perceber que cada cruzamento entre os fios do sensor cria um arranjo de medição, representado por  $Z_x$ . Quando uma tensão AC é aplicada no fio transmissor, uma corrente é induzida no fio receptor. Essa corrente que fluirá pelo elemento sensor, é proporcional à sua impedância.

Levando em consideração que normalmente a melhor forma de medir essa variação é através da tensão, faz-se necessário o uso de um conversor de corrente em tensão. Com isso, foi utilizado um amplificador de transimpedância que também é conhecido como conversor de corrente em tensão ou de ponte auto-balanceável, mostrado na figura 2.19.

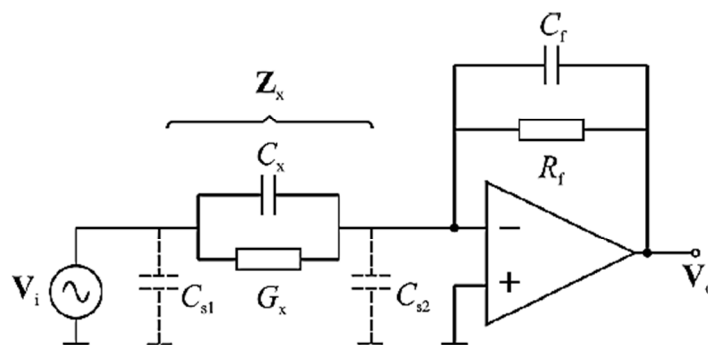


Figura 2.19: Esquema demonstrando o elemento sensor de medição e o conversor de corrente em tensão

Nessa figura, têm-se como variáveis desconhecidas os valores de  $C_x$  e  $G_x$  que são a capacitância e a condutância do fluido, respectivamente.  $C_f$  e  $R_f$  são, respectivamente, o capacitor e resistor da malha de realimentação do amplificador operacional,  $C_{s1}$  e  $C_{s2}$  são

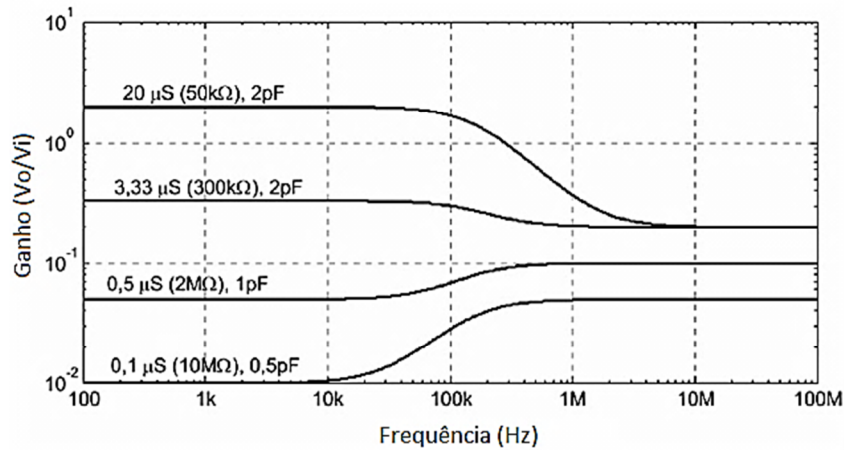
capacitâncias parasitas, geradas pelos cabos que são usados para conectar o circuito ao sensor. A princípio essas capacitâncias parasitas não influem no circuito, pois  $C_{s1}$  é anulada pela fonte transmissora e  $C_{s2}$  é virtualmente aterrada pelo amplificador operacional.

A impedância  $Z_x$  pode ser encontrada medindo a tensão de saída do amplificador operacional. Assumindo que o amplificador operacional é ideal, o valor complexo da tensão  $V_o$  é dado por:

$$V_o = -V_i \left( \frac{G_x + j\omega C_x}{G_f + j\omega C_f} \right) \quad (2.2)$$

onde  $f$  é a frequência do sinal senoidal de excitação.

Fazendo uma varredura em frequência, encontra-se o gráfico da resposta em frequência mostrado na figura 2.20, usando os valores para capacitores e resistores mostrados no gráfico, os quais representam uma faixa de valores que se encontram próximos aos valores reais para água, óleo e ar.

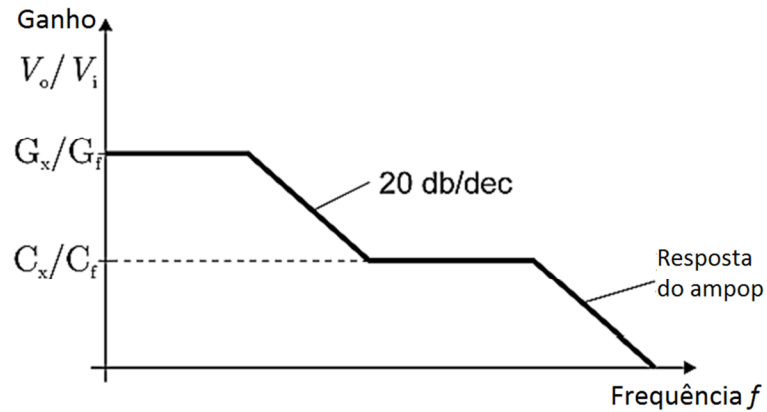


**Figura 2.20: Resposta em frequência simulada para componentes com valores  $C_f = 10$  pF,  $G_f = 10$   $\mu$ S (100 k $\Omega$ ),  $C_x$  e  $G_x$  ( $R_x$ ) estão indicados no gráfico**

O Diagrama de Bode assintótico para a amplitude da equação (2.2) é mostrado na figura 2.21. Dois platôs podem ser claramente identificados, um em altas frequências e outro em baixas frequências. A limitação na frequência máxima em relação à largura de banda do amplificador operacional também é levada em consideração no diagrama simplificado.

Fazendo análise de circuitos, pode-se perceber que quanto mais baixa for a frequência, menor é a influência do capacitor, tendo em vista que o mesmo funciona como um circuito

aberto em corrente contínua, ou seja, podemos utilizar o plano em baixa frequência para encontrarmos a condutividade do elemento sensor de medição, por outro lado, quanto mais alta a frequência menor é a influência da parte resistiva e maior a influência da parte capacitiva, portanto podemos utilizar esse plano para encontrarmos a capacitância do elemento sensor de medição.



**Figura 2.21: Diagrama de Bode simplificado da resposta em frequência do circuito para medição de impedância usando um amplificador operacional não ideal**

A amplitude de cada plano é dada pelo quociente de  $G_x/G_f$  e  $C_x/C_f$  que são obtidos fazendo o limite para  $f \rightarrow 0$  e  $f \rightarrow \infty$  do módulo da equação (2.2) na forma:

$$\left| \frac{V_o}{V_i} \right| = \frac{\sqrt{G_x^2 + (2pf)^2 C_x^2}}{\sqrt{G_f^2 + (2pf)^2 C_f^2}} \quad (2.3)$$

Utilizando a fórmula acima, pode-se utilizar qualquer frequência para encontrar a condutância e capacitância, mas, para simplificar os cálculos, é preferível que se use valores que se encontrem dentro da faixa de cada plano, dessa forma, esses dois parâmetros desconhecidos podem ser calculados conforme as equações a seguir:

$$G_x = G_f \left| \frac{V_o}{V_i} \right|_{f=f_{\text{low}}} \quad (2.4)$$

$$C_x = C_f \left| \frac{V_o}{V_i} \right|_{f=f_{\text{high}}} \quad (2.5)$$

### 2.5.2 Cálculo dos parâmetros dos fluidos

Como a resistência  $R_x$  é diretamente proporcional à condutividade do material, e a capacitância  $C_x$  é diretamente proporcional à permissividade elétrica do material, a partir das equações (2.4) e (2.5) é possível mostrar que a amplitude da tensão medida em cada platô é proporcional às propriedades elétricas dos fluídos nos pontos de cruzamentos (eletrodo) do sensor *wire-mesh*. Será definido  $V_k$  como a tensão em baixa frequência e  $V_e$ , como sendo a tensão em alta frequência. A tensão de saída medida  $V_k$  corresponde ao valor de condutividade  $k$  no ponto de cruzamento de acordo com

$$V_k = K.k \quad (2.6)$$

onde  $K$  é o fator de proporcionalidade que depende das constantes do circuito eletrônico e do sensor. Com isso, é realizada a calibração usando água como referência  $k_{H_2O}$ , logo

$$K = \frac{V_k}{k_{H_2O}}.k_{H_2O} \quad (2.7)$$

Dessa forma, a fase presente no ponto de cruzamento pode ser identificado através da tensão de saída  $V_k$  e então um fluído condutor pode ser distinguido de um fluído não-condutor. No entanto, para distinguir dois fluidos não-condutores como ar e óleo, a capacitância ou a permissividade elétrica precisa ser encontrada. A tensão  $V_e$  é proporcional à permissividade relativa  $e_r$  do fluído presente no ponto de cruzamento de acordo com

$$V_e = a.e_x + b \quad (2.8)$$

onde  $a$  e  $b$  são constantes do ponto de medição, devido ao circuito e à geometria do sensor.

Desta forma, os valores de tensão  $V_e$  medidos pelo sensor *wire-mesh* são proporcionais à capacitância que também é proporcional permissividade elétrica. Para se obter a permissividade elétrica é necessário uma normalização dos valores, onde duas referências de tensão são medidas: tubo cheio  $V_H$  e tubo vazio  $V_L$  obtendo-se os valores que serão utilizados como referência, medindo uma fase de cada vez. A média dos valores de tensão para um determinado ponto ( $i, j$ ) em relação ao número de *frames*  $N$  para a leitura do ar atmosférico é dada por

$$V_L(i, j) = \frac{1}{N_i} \sum_{k=0}^{N_i-1} V_e(i, j, k) \quad (2.9)$$

onde  $V_e(i, j, k)$  corresponde à matriz de valores de tensão, assim  $V_L(i, j)$  pode ser definido como o valor médio lido no ponto dado pelos índices espaciais.

Para a água, obtêm-se essa média da mesma forma:

$$V_H(i, j) = \frac{1}{N_i} \sum_{k=0}^{N_i-1} V_e(i, j, k) \quad (2.10)$$

A partir dos valores de referência medidos é possível estabelecer um sistema entre as duas fases:

$$\begin{cases} V_L(i, j) = a(i, j) \cdot e_L + b(i, j) \\ V_H(i, j) = a(i, j) \cdot e_H + b(i, j) \end{cases} \quad (2.11)$$

Resolvendo este sistema, obtêm-se os valores de  $a(i, j)$  e  $b(i, j)$  com as equações:

$$a(i, j) = \frac{V_H(i, j) - V_L(i, j)}{e_H - e_L} \quad (2.12)$$

$$b(i, j) = \frac{V_L(i, j) \cdot e_H - V_H(i, j) \cdot e_L}{e_H - e_L} \quad (2.13)$$

A partir desses resultados é possível calcular a permissividade para o escoamento em investigação

$$e(i, j, k) = \frac{V_e(i, j, k) - b(i, j)}{a(i, j)} \quad (2.14)$$

Dessa forma encontra-se a permissividade relativa do material presente nos pontos de cruzamentos.

## 2.6 ANÁLISE ESPECTRAL COM FFT (FAST FOURIER TRANSFORM)

Considerando o embasamento teórico anterior para o desenvolvimento desse projeto, optou-se pela criação de um sistema capaz de gerar duas frequências simultaneamente, necessárias para encontrar os dois parâmetros desconhecidos (capacitância  $C_x$  e condutância  $G_x$ ) do material. Esse sistema também deve ser capaz de separar as duas frequências e medir suas amplitudes. Para isso, será necessário processar o sinal fazendo o uso de algoritmos de FFT.

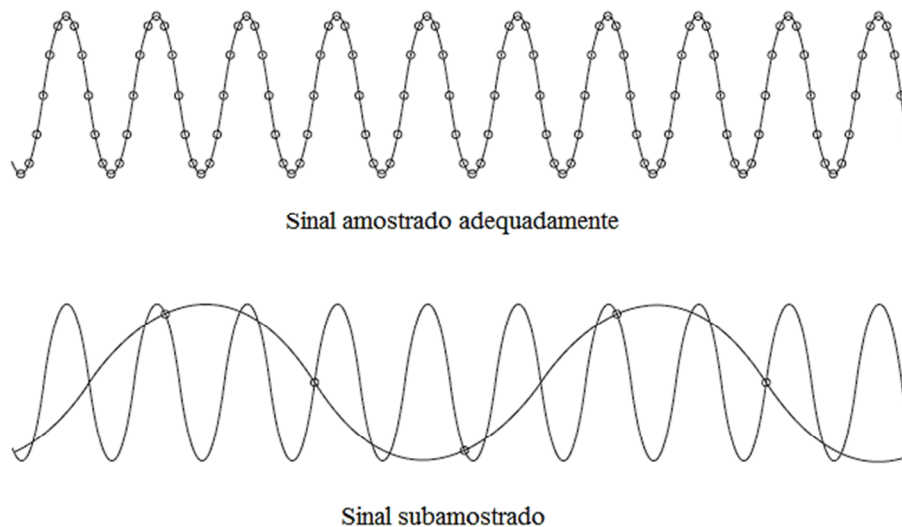
A transformada rápida de Fourier ou FFT, é uma excelente ferramenta computacional quando possuímos uma quantidade  $N$  de amostras no domínio do tempo e precisamos convertê-las para o domínio da frequência, dessa forma, consegue-se identificar todas as frequências presente no sinal e separá-las, se necessário. Essas amostras são adquiridas do sinal analógico, amostrando-o através de conversores analógicos-digitais.

Quando se utiliza conversores analógicos-digitais, é necessário estar atento a frequência de amostragem desses conversores, pois para o sinal ser adequadamente amostrado, a frequência medida deverá respeitar o critério de Nyquist, que nos mostra que o sinal a ser amostrado precisa ser menor que a metade da frequência de amostragem,

$$f_0 < \frac{Fs}{2} \quad (2.15)$$

onde  $f_0$  é a frequência medida e  $Fs$  a frequência de amostragem.

Caso o sinal esteja fora dessa faixa, ele será subamostrado, conforme mostrado na figura 2.22.



**Figura 2.22: Sinal amostrado adequadamente e subamostrado (adaptado de CERNA; HARVEY, 2000)**

Sinais subamostrados também podem ser medidos com confiabilidade, desde que sigam as condições mostradas a seguir.

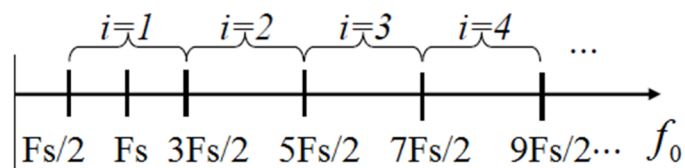
Quando a frequência fica na faixa de  $\frac{F_s}{2} < f_0 < F_s$ , ela aparecerá espelhada seguindo a equação:

$$F' = F_s - f_0 \quad (2.16)$$

Em outra situação, em que a frequência medida é maior que a frequência de amostragem  $f_0 > F_s$ , a frequência é espelhada seguindo a equação abaixo:

$$F' = |f_0 - i.F_s| \quad (2.17)$$

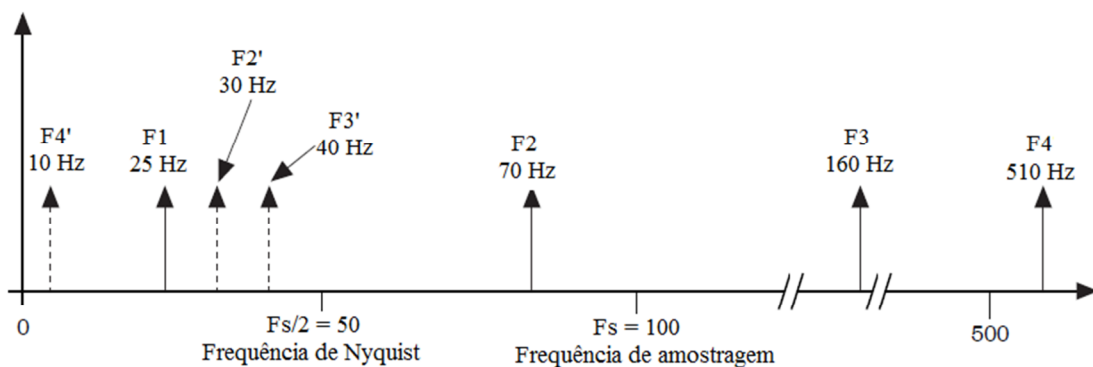
Onde  $i$  é um número inteiro  $\geq 1$  de acordo com o valor original da frequência  $f_0$ , como é exemplificado na figura 2.23.



**Figura 2.23: Processo de subamostragem**

Com isso, o valor de  $i$  é encontrado através do número do intervalo correspondente ao valor da frequência que se quer medir.

A figura 2.24, tem-se um exemplo de um espectro mostrando frequências amostradas e subamostradas.



**Figura 2.24: Espectro com sinais amostrados e subamostrados (adaptado de CERNA; HARVEY, 2000)**

Seguindo as premissas apresentadas neste capítulo, passou-se então ao desenvolvimento do projeto, apresentado nos capítulos seguintes.



### 3 DESENVOLVIMENTO

De acordo com o objetivo do projeto e com o embasamento teórico anterior, foi necessário desenvolver um sistema com uma eletrônica responsável por fazer a geração e multiplexação em 8 canais do sinal com duas frequências, uma eletrônica responsável por fazer a aquisição dos sinais provenientes do sensor e a conversão corrente em tensão, e um *software* para fazer o controle dessas placas e a aquisição dos sinais, através de uma placa de aquisição de dados, também controlada por esse *software*.

Dessa forma, o sistema desenvolvido nesse projeto é dividido em três partes:

- *Hardware*: Composto por uma placa eletrônica desenvolvida para esse projeto, e uma placa de aquisição de dados, responsável pelo interfaceamento entre a placa eletrônica e o computador.
- *Firmware*: programa desenvolvido para ser compilado na FPGA que integra a placa de aquisição de dados.
- *Software*: Programa desenvolvido para fazer a aquisição de dados e pós-processamento de dados no computador.

Cada uma dessas partes será detalhada a seguir.

#### 3.1 HARDWARE

O *hardware* do sensor *wire-mesh* é constituído por uma placa eletrônica, desenvolvida ao longo desse trabalho, e por uma placa de aquisição de dados, que faz o interfaceamento entre o sensor *wire-mesh* e a placa eletrônica. A placa eletrônica é responsável pela geração e transmissão dos sinais em sua parte transmissora, e também pelo condicionamento dos sinais provenientes do sensor em sua parte receptora. O circuito eletrônico final desenvolvido pode ser visto no Apêndice A e as placas de circuito impresso no Apêndice B.

Na figura 3.1, vê-se uma foto da placa eletrônica desenvolvida, e, na figura 3.2 é mostrado o diagrama de blocos, que terá seus componentes explicados detalhadamente nos tópicos a seguir.

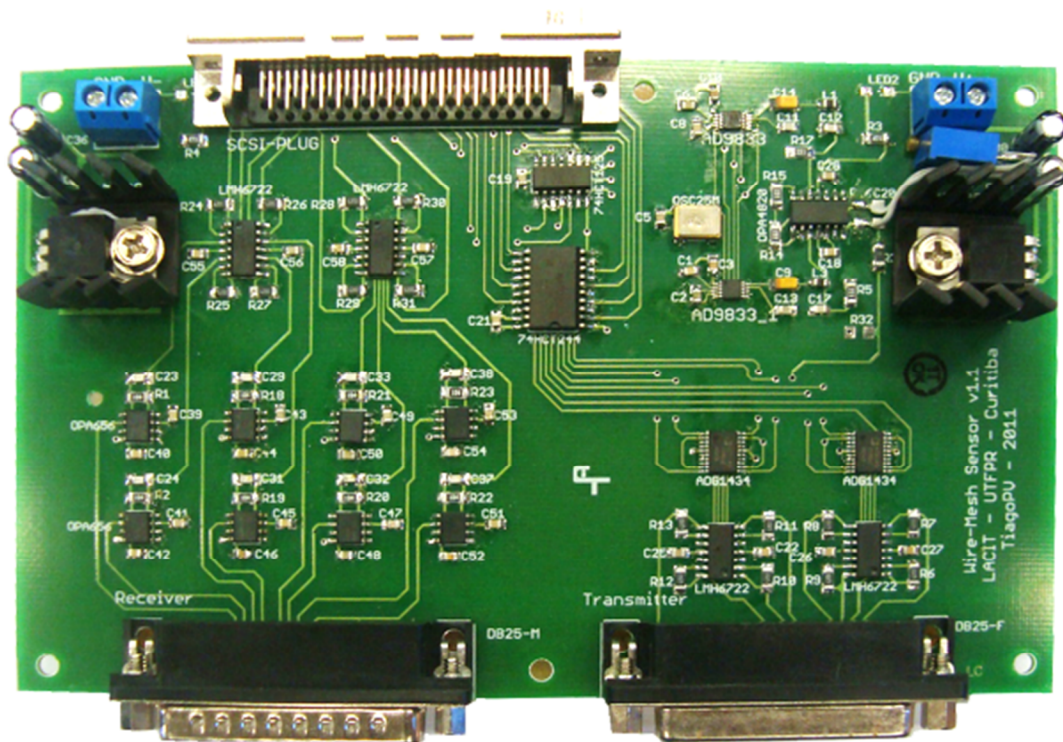


Figura 3.1: Placa eletrônica desenvolvida

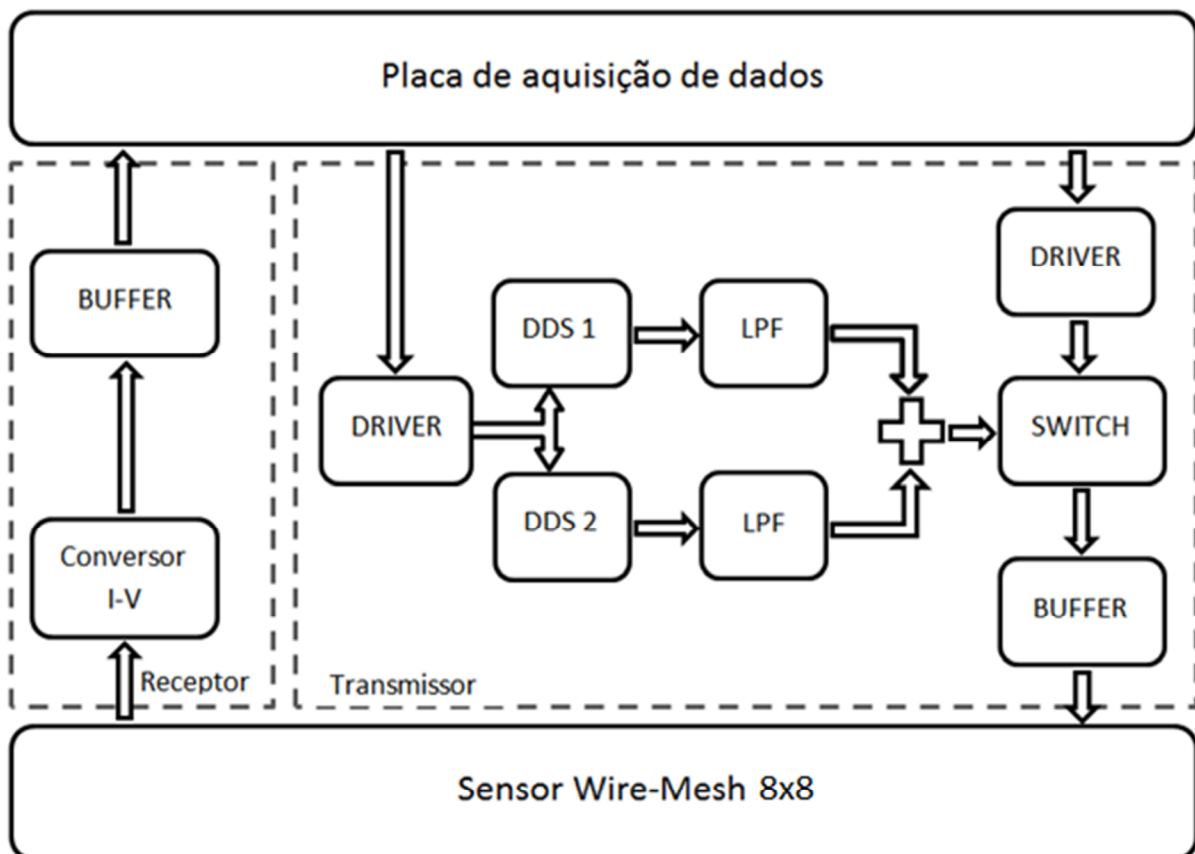


Figura 3.2: Diagrama de blocos do hardware desenvolvido

### 3.1.1 Transmissor

Esta parte do sistema, responsável pela geração e multiplexação dos sinais que são transmitidos para o sensor, é composta pelos seguintes componentes: DDS (Direct Digital Synthesizer), driver, filtro passa-baixa (LPF), circuito somador, switch e buffer.

#### a) DDS

DDS (Direct Digital Synthesizer) é um circuito integrado utilizado para gerar um sinal de onda de acordo com as especificações do usuário. Nesse trabalho foi utilizado o modelo AD9833 fabricado pela Analog Devices. Esse modelo possui frequência de saída de 0 a 12,5 MHz com resolução de 28 bits, o que nos dá uma resolução de 0,1 Hz usando um clock de referência de 25 MHz. A onda gerada pode ser senoidal, triangular ou quadrada, e a programação é feita por meio do protocolo SPI.

A geração do código para programar a frequência do DDS é mostrada abaixo:

$$\text{Código}_{\text{frequência}} = \frac{f_{OUT} \times 2^{28}}{f_{MCLK}} \quad (3.1)$$

Onde  $f_{MCLK}$  é a frequência de clock, onde que foi utilizado 25 MHz e  $f_{OUT}$  é a frequência que se deseja programar. Com isso, se obtém um número decimal ( $\text{Código}_{\text{frequência}}$ ), que deve ser convertido para binário, e, após a inserção de cabeçalhos específicos de cada modelo de DDS, é então transmitido para o DDS através do protocolo SPI, utilizando a placa de aquisição de dados no interfaceamento entre o computador e placa eletrônica.

Esse DDS pode ser programado com duas frequências, sendo que apenas uma pode ser utilizada por vez, e também pode-se escolher a fase que o sinal inicia. Neste caso, como é necessária a geração de duas frequências simultâneas, foram utilizado dois DDS, cada um gerando uma frequência, no caso, 75 kHz e 1,825 MHz, e a fase é iniciada em zero.

#### b) Driver

Os sinais provenientes da placa de aquisição possuem amplitude de 3.3 volts, embora a programação dos DDS e o controle dos switches são feitos com amplitudes de 3.3 ou 5 volts, foram utilizados drivers para amplificar os sinais de 3.3 para 5 volts, para evitar que algum transiente ou ruído pudesse prejudicar a transmissão de dados, além de que esse drive

também funciona como buffer, amplificando a corrente e protegendo a placa de aquisição de dados de qualquer sobrecarga.

Neste trabalho foram utilizados dois drivers, o modelo 74HCT244D que possui oito canais e é utilizado no interfaceamento dos oito switches, e o modelo 74HCT125D, que possui quatro canais e é utilizado no interfaceamento com os dois DDS, ambos são fabricados pela NXP.

### c) Filtro passa-baixa

Este filtro passa-baixa ou filtro-pi é colocado na saída de cada DDS para eliminar as harmônicas, que são geradas devido as frequências múltiplas do oscilador. O filtro calculado é do tipo Butterworth com três pólos e largura de banda de 6 MHz com frequência central de 2,2 MHz, o que é mais do que suficiente para este trabalho, em que o máximo que se pretende utilizar é 2 MHz. Com isso, tivemos como resultado o filtro mostrado na figura 3.3:

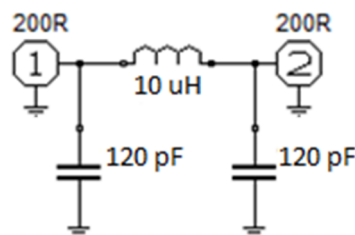


Figura 3.3: Filtro passa-baixa ou filtro pi

Esse filtro, teve o valor de seus componentes calculados através do programa RFSim99. A primeira impedância, de 200  $\Omega$ , é interna do DDS, com isso, coloca-se outra igual na saída do filtro. Os valores comerciais usados para esse filtro foram 10  $\mu\text{H}$  para o indutor e 120 pF para os capacitores.

### d) Circuito somador

Após os sinais passarem pelos filtros, eles são somados usando um circuito somador inversor, como visto na figura 3.4.

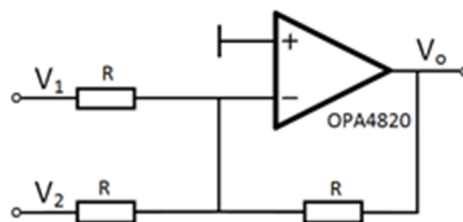
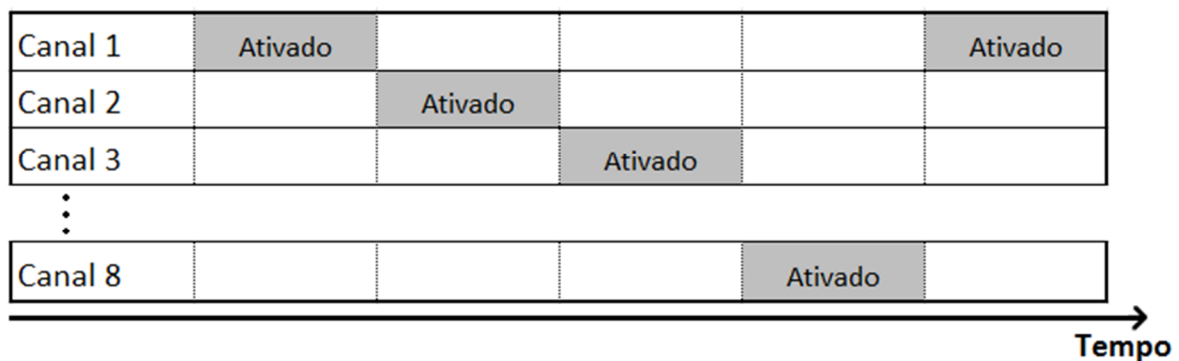


Figura 3.4: Circuito somador inversor

Foi utilizado o amplificador operacional OPA4820 fabricado pela Texas Instruments devido a sua ampla largura de banda (220 MHz com ganho = 2) e ao baixo nível de ruído.

### e) Switches e Buffers

Os oito canais transmissores devem ser ativados um de cada vez, como pode ser visto na figura 3.5, com isso foi escolhido utilizar switches analógicos devido à possibilidade de manter os canais que estão desativados aterrados e com isso diminuir ruídos ou alguma interferência indesejada, como a interferência co-canal. Essa interferência acontece quando o campo elétrico fica livre dentro do duto, interferindo na medição local. Estes switches são controlados pela placa de aquisição, através dos drivers para proteção da placa de aquisição e amplificar a tensão de controle em 5V. Foram utilizados switches analógicos ADG1434 fabricados pela Analog Devices.



**Figura 3.5: Esquema simplificado da ativação dos canais transmissores para o sistema de oito canais projetado**

Em série com os switches analógicos, são ligados buffers que servem para assegurar que os sinais tenham baixa impedância. Foram utilizados buffers LMH6722 fabricados pela National Semiconductors por possuírem ampla largura de banda (250 MHz -3dB).

### 3.1.2 Receptor

Na parte receptora é onde são tratados simultaneamente os oito canais provenientes do sensor *wire-mesh*. Essa placa é composta por amplificadores de transimpedância, também conhecidos como conversores de corrente-tensão ou ponte auto balanceável, conforme descrito na seção (2.5.1) e buffers, conforme descrito anteriormente.

Essa parte é conectada nas entradas analógicas da placa de aquisição de dados, onde são amostrados e processados.

### 3.1.3 Placa de aquisição de dados (DAQ)

Utilizou-se neste projeto a placa de aquisição de dados PCIe-7841R, fabricada pela National Instruments. Esta placa tem como principais características:

- 8 entradas analógicas, com taxas de amostragem independentes de 200kHz com 16 bits de resolução, com variação de  $\pm 10$  V,
- 8 saídas analógicas, com taxa de atualização independente de 1MHz, com 16 bits de resolução, com variação de  $\pm 10$  V,
- 96 linhas digitais que podem ser configuradas como entradas ou saídas com taxas de atualização de até 40 MHz,
- Utiliza a FPGA Virtex-5 LX30,
- Três canais DMA (Direct Memory Access) para a transmissão de dados em alta velocidade.



**Figura 3.6: Placa de aquisição PCIe-7841R**

Conforme será mostrado na seção 3.3, esta placa de aquisição de dados é responsável pelo controle da placa eletrônica, utilizando como parâmetros configuráveis pelo usuário a taxa de amostragem ( $F_s$ ), a taxa de frames por segundos (FPS), e controle das portas digitais para a programação dos DDS.

## 3.2 FIRMWARE

### 3.2.1 LabView

O *firmware* e o *software* desenvolvido para esse trabalho foram implementados utilizando linguagem de programação gráfica, chamada de linguagem G, que é a linguagem de programação utilizada pelo programa LabView, desenvolvido pela National Instruments. Essa linguagem tem como principal característica o uso de blocos gráficos, que representam funções específicas de programação, ao invés de linhas de comandos.

O LabView tem como principais campos de aplicação a área de automação, no desenvolvimento de sistemas supervisórios em tempo real e também na área de aquisição de dados provenientes de sensores, com interfaceamento através de placas proprietárias. Com isso, o LabView tem sido amplamente utilizado devido a sua fácil integração com equipamentos desenvolvidos pela National Instruments e também por outros fabricantes, fazendo com que aplicações simples possam ser desenvolvidas em pouco tempo com alto grau de confiabilidade.

O *software* desenvolvido nesse trabalho é dividido em duas partes. A primeira parte é um *firmware* compilado na FPGA que faz o interfaceamento entre a placa eletrônica desenvolvida e o computador. A outra parte é um *software* que faz a aquisição dos dados provenientes da placa de aquisição e realiza os processamentos necessários, tais como a FFT e a visualização dos dados, que será detalhado na seção 3.3.

### 3.2.2 Fluxograma

O *firmware* compilado na FPGA, tem como função fazer o controle de ativação de cada canal transmissor do sensor, a aquisição dos dados provenientes do sensor, e o controle das portas digitais da placa PCIe-7841R utilizadas pelo *software* executado no computador, que realiza a programação dos geradores de sinais (DDS).

Na figura 3.7 pode-se ver o fluxograma que detalha resumidamente o funcionamento do *firmware* compilado na FPGA, que faz a aquisição dos dados provenientes do sensor *wire-mesh* e o controle dos canais transmissores.

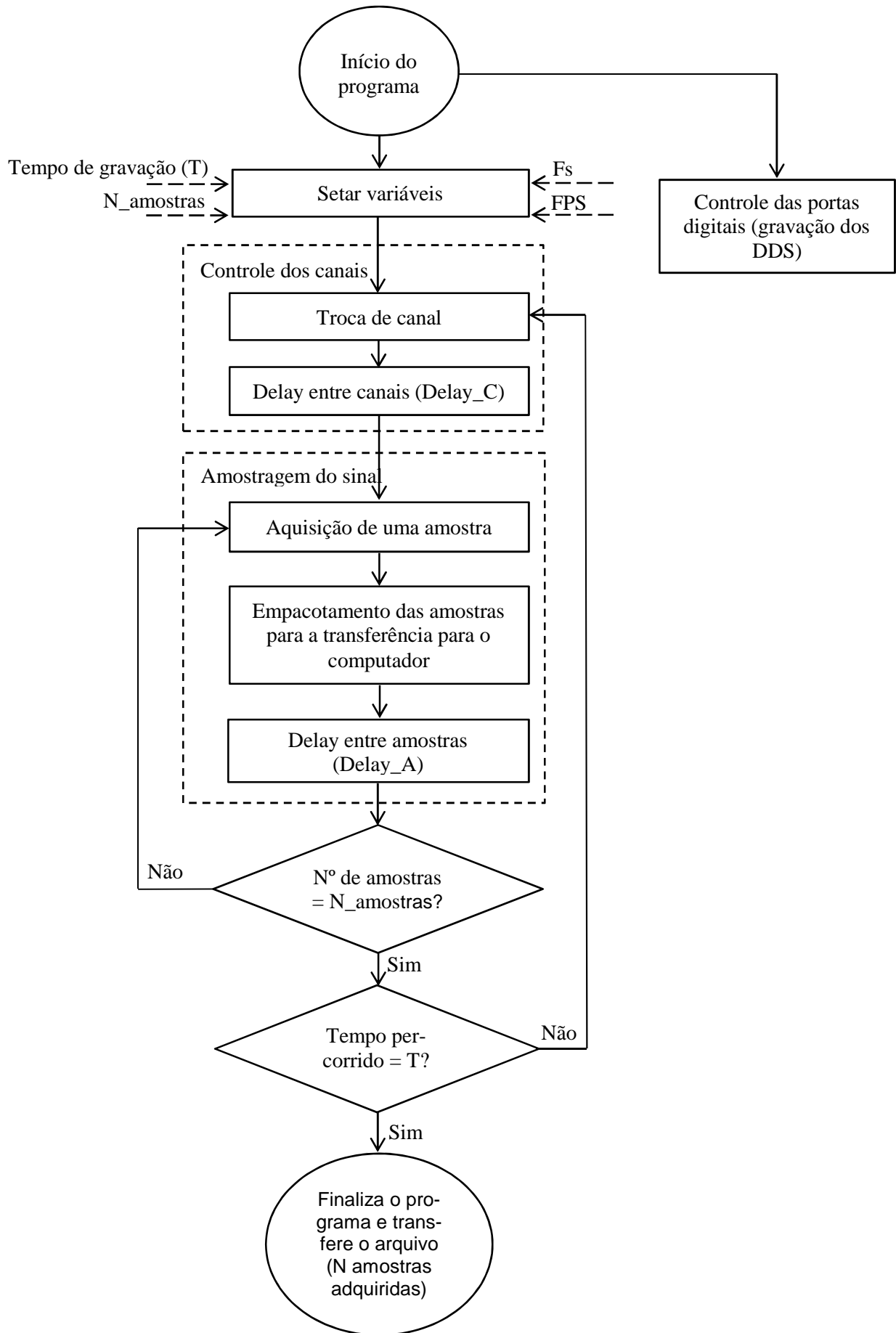


Figura 3.7: Fluxograma do software compilado na FPGA



### 3.2.3 Aquisição de dados

A aquisição das amostras é feita nos oito canais receptores simultaneamente. O bloco de controle do tempo “*Delay\_A*” (figura 3.7) usa um tempo calculado que é responsável por fazer a aquisição com a taxa de amostragem ( $F_s$ ) especificada pelo usuário, onde o máximo permitido pela placa de aquisição de dados é 200 kHz. O cálculo é feito utilizando a equação inicial abaixo:

$$Tempo(s) = \frac{1}{F_s} \quad (3.2)$$

Esta equação nos fornece o tempo em segundos que a placa possui para fazer a aquisição de cada amostra. Para maior precisão é utilizada a unidade “Ticks” que é o tempo necessário para a FPGA executar um ciclo de clock. A FPGA utilizada possui um processador com um clock de 40 MHz, então a conta utilizada para usar no bloco “*Delay\_A*” é:

$$Delay\_A = \frac{\frac{1}{F_s}}{\frac{1}{clock}} \quad (3.3)$$

Nessa parte do programa também é feita a contagem das amostras que se deseja adquirir em cada ponto de medida, que é especificada pelo usuário.

A transferência dos dados da placa de aquisição para o computador é realizada utilizando dois canais DMA (Direct Memory Access). Cada canal analógico possui um conversor analógico/digital de 16 bits, então quatro canais são empacotados em um canal de 64 bits e transferidos através de um canal DMA para o computador onde são desempacotados.

Nesse trabalho foram utilizadas duas frequências, uma alta de 1,825 MHz e uma baixa de 75 kHz. Estes sinais foram escolhidos por se localizarem próximos aos platôs definidos na figura 2.20. Como a placa PCIe-7841R possui uma largura de banda de -3 dB a 1 MHz, o sinal de 1,825 MHz foi atenuado em -6,45 dB, no entanto, esse sinal ainda é facilmente detectado pela placa de aquisição.

Como foi utilizada uma frequência de amostragem de 200 kHz (máximo possível da placa de aquisição), tem-se uma taxa de Nyquist de 100 kHz, com isso, o sinal de 1,825 MHz é subamostrado, conforme descrito na seção 2.6, aparecendo como se fosse um sinal de

25 kHz no espectro calculado pela FFT, como pode ser visto na figura 3.8. A remoção dos ruídos presentes no espectro, e a seleção das duas frequências de interesse serão apresentadas na seção 3.3.2.

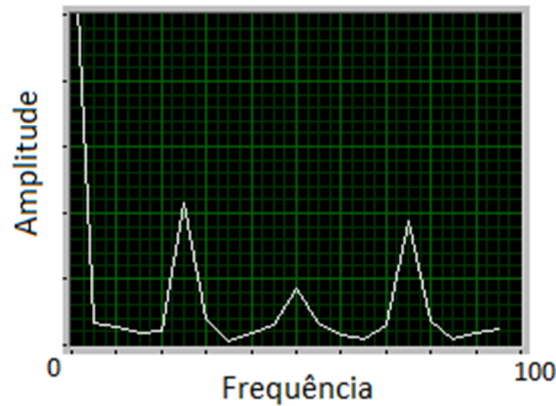


Figura 3.8: Espectro encontrado a partir da FFT calculada pelo LabView

Na figura 3.9, vê-se o processo de subamostragem feito a partir dos sinais medidos.

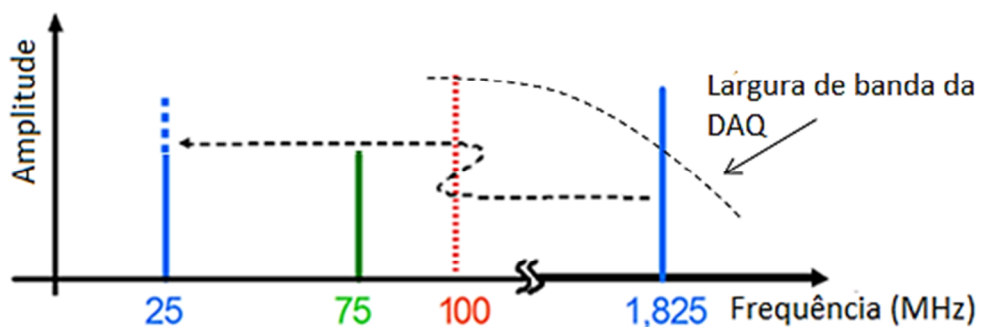


Figura 3.9: Representação do espectro encontrado pelo cálculo da FFT com subamostragem

### 3.2.4 Controle dos canais

Os canais de transmissão são ativados um por vez, de forma sequencial, sendo que os canais que não estão ativados fiquem aterrados, conforme mostrado na figura 3.5.

O bloco “*Delay\_C*” é o responsável por fazer o atraso necessário entre as trocas de cada canal, seu tempo depende do número de frames por segundo (*FPS*) que se deseja. Como cada frame é composto por oito linhas, seu cálculo de tempo para a troca de canal é feito da seguinte forma:

$$Delay\_C = \frac{1}{FPS \times Canais} \quad (3.4)$$

Isso fornece o tempo em que cada canal precisa ficar ativado, mas, como já temos um tempo percorrido enquanto as amostras são adquiridas, o cálculo do  $Delay\_C$  é feito como mostrado abaixo:

$$Delay\_C = \underbrace{Delay\_A \times \frac{Fs}{FPS \times Canais}}_{(a)} - \underbrace{Delay\_A \times N\_amostras}_{(b)} \quad (3.5)$$

Na parte (a) tem o  $Delay\_A$ , que é o tempo utilizado para fazer a aquisição de uma amostra, vezes o número máximo de amostras que pode ser feito levando em consideração o número de canais, a velocidade ( $FPS$ ) e a frequência de amostragem selecionada, o que resulta no tempo total que o canal ficará ativado. Na parte (b) tem o  $Delay\_A$  vezes o número de amostras que se deseja adquirir ( $N\_amostras$ ), ou seja, o tempo total necessário para a aquisição do número de amostras desejadas. Subtraindo a parte (b) da parte (a), encontra-se o tempo de atraso necessário para completar o tempo total em que o canal deve ficar ativado ( $Delay\_C$ ). Substituindo o  $Delay\_A$  pela sua forma na equação 3.3, tem-se:

$$Delay\_C = \frac{\frac{1}{Fs}}{\frac{1}{clock}} \times \frac{Fs}{FPS \times Canais} - \frac{\frac{1}{Fs}}{\frac{1}{clock}} \times N\_amostras \quad (3.6)$$

### 3.2.5 Controle das portas digitais

Para fazer a programação dos DDS, conforme mostrado na seção (3.1.1.a), é utilizado o protocolo SPI na comunicação do computador com o DDS. Esse protocolo utiliza três canais digitais da FPGA para um DDS, e quatro canais digitais para os dois DDS, já que três canais são idênticos para os dois DDS, mudando apenas o canal de dados. A FPGA é controlada pelo seu *firmware* compilado que faz o interfaceamento com o *software* no computador.

### 3.3 SOFTWARE

O *software* no computador é dividido em três partes:

- Executada em tempo real, onde é feita a programação dos DDS e a amostragem do sinal;
- Executada após a medição: cálculo da FFT do sinal e geração de imagens para visualização;
- Executada após a medição: criação dos arquivos de calibração.

#### 3.3.1 Programação dos DDS e a amostragem do sinal

Nesta parte do programa, inicialmente é realizada a programação dos DDS, onde são escolhidas as duas frequências. Através da placa de aquisição, os DDS são gravados usando protocolo SPI.

Após, são ajustados os parâmetros referentes a gravação, tais como:

- Taxa de frames por segundo (FPS);
- Tempo total de gravação;
- Número de amostras em cada ponto de medição;
- Número de canais do sensor, sendo oito o número máximo;
- Frequência de amostragem, sendo 200 kSa a frequência máxima suportada pela placa de aquisição;
- Nome e local do arquivo a ser gravado.

Na figura 3.10, pode-se ver uma imagem da interface:

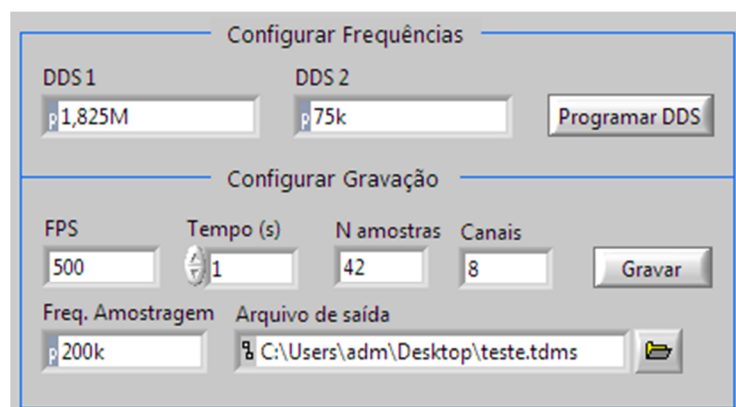
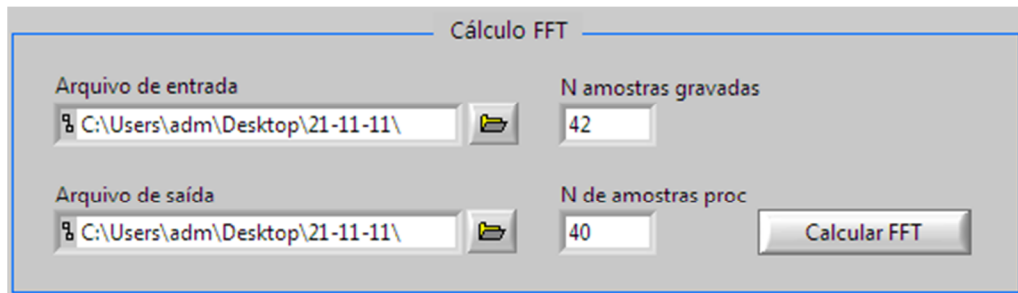


Figura 3.10: Interface do *software* responsável pela gravação dos DDS e configuração da gravação

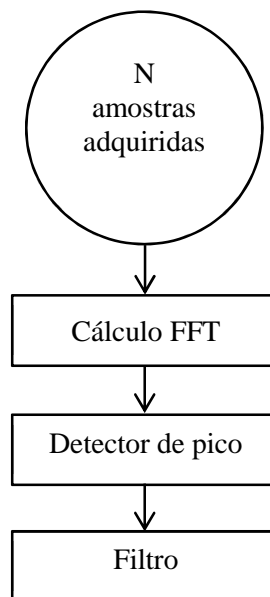
### 3.3.2 Cálculo da FFT e identificação das amplitudes

Nesta parte faz-se a configuração para o cálculo da FFT. Primeiro seleciona-se o arquivo gravado anteriormente que se quer calcular e, após, o arquivo de saída, onde constará os resultados da FFT. No espaço “N amostras gravadas” coloca-se o valor setado na gravação do arquivo em que foram feitas as aquisições dos dados, e em “N de amostras proc” é o número de amostras que será usada no cálculo da FFT.



**Figura 3.11: interface do *software* responsável pelo cálculo da FFT**

Na figura 3.12, temos um fluxograma de como a FFT e a identificação da amplitude de cada frequência é feita.

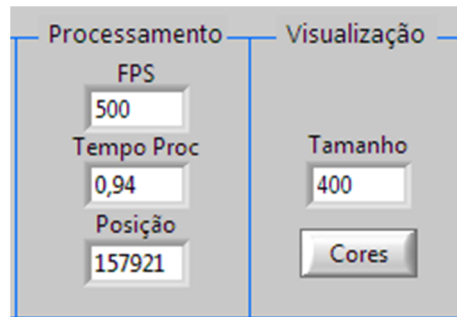


**Figura 3.12: Fluxograma para identificação da amplitude das frequências**

O cálculo da FFT (Fast Fourier Transform) é executado pelo LabView usando o número de amostras escolhido pelo usuário através da interface do *software*. O espectro do sinal passa por um detector de pico que mede as amplitudes das frequências encontradas, usando um limiar. Na saída desse bloco pode ocorrer o aparecimento de diversas amplitudes de diferentes frequências não desejadas devido a ruídos durante a aquisição dos dados

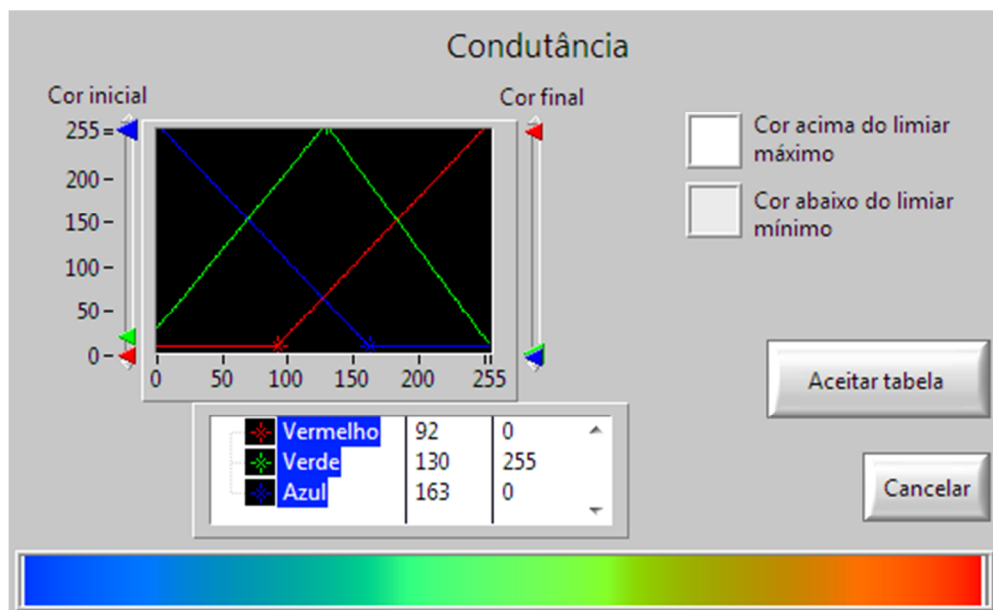
(figura 3.8). Esses ruídos então são eliminados ao passar o sinal por um filtro que seleciona apenas as duas frequências de interesse, nesse caso, de 75 kHz e 1,825 MHz.

Para a geração das imagens, tem-se a interface mostrada na figura 3.13, onde na parte do processamento, inclui-se em quantos FPS o arquivo de aquisição foi gravado. A partir disso, tem-se disponível o tempo total processado do arquivo e a posição instantânea da amostra que está sendo calculada.



**Figura 3.13:** Interface do *software* responsável pelo acompanhamento do processamento e visualização

Na parte da visualização, escolhe-se a quantidade de frames que se quer visualizar horizontalmente e configura-se a palheta de cores. Clicando no botão “cores”, abrirá uma nova janela, como pode-se ver na figura 3.14.



**Figura 3.14:** Interface do *software* para configurar a tabela de cores

A configuração das cores vermelho, verde e azul, é feita escolhendo os valores iniciais e finais através dos cursores e os pontos centrais através da tabela que fica abaixo da janela de cores, onde escolhe-se os valores para x e y, variando de 0 a 255. Também são selecionadas as cores usadas para quando os valores ficarem fora da escala.

### 3.3.3 Calibração do sistema e geração de imagens

A calibração do sistema é importante devido as mudanças que podem ocorrer no ambiente tais como temperatura e pressão e também as mudanças que podem ocorrer na eletrônica e no próprio sensor. Com isso, mede-se a escoamento com o tubo cheio de água, que nos fornece a calibração alta  $V^H$ , ou seja, os valores máximos que os dados poderão ter, e também com o tubo vazio, que nos fornecerá a calibração baixa  $V^L$ .

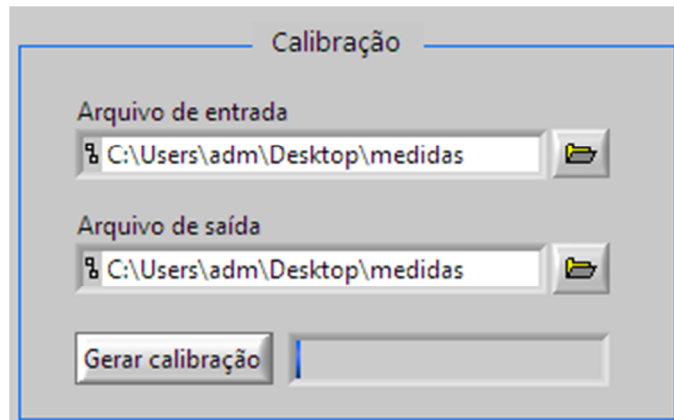


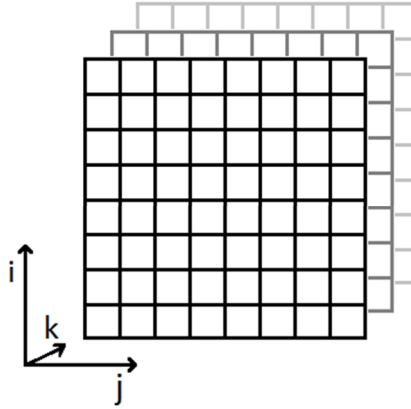
Figura 3.15: Interface do *software* para criação do arquivo de calibração

Para a criação do arquivo de calibração  $V_{cal}^x$ , onde  $x$  é a calibração alta ( $H$ ) ou baixa ( $L$ ), é usado como entrada o arquivo medido de calibração alta, no caso, com tubo cheio de água, ou de calibração baixa, com o tubo cheio de ar, já com sua FFT calculada. Para cada ponto é realizada a soma de todas as amostras e dividido pelo número total de amostras, como pode-se ver na equação:

$$V_{cal}^x(i, j) = \sum_{k=0}^n \frac{V_{cal}^x(i, j, k)}{n-1} \quad (3.7)$$

Onde  $i$  e  $j$  são as linhas e colunas da matriz, e  $k$  é o tempo. Como pode-se ver na figura 3.16.

Com isso, o arquivo de calibração é calculado de forma independente para cada um dos 64 pontos que formam o frame, gerando o arquivo de calibração em duas dimensões  $(i, j)$ .



**Figura 3.16:** Identificação de cada ponto no frame ao longo do tempo

O arquivo final, em que mediu-se o escoamento, é calibrado usando a equação a seguir:

$$V_{o\_cal}(i, j, k) = \frac{V_o(i, j, k) - V_{cal}^L(i, j)}{V_{cal}^H(i, j) - V_{cal}^L(i, j)} \quad (3.8)$$

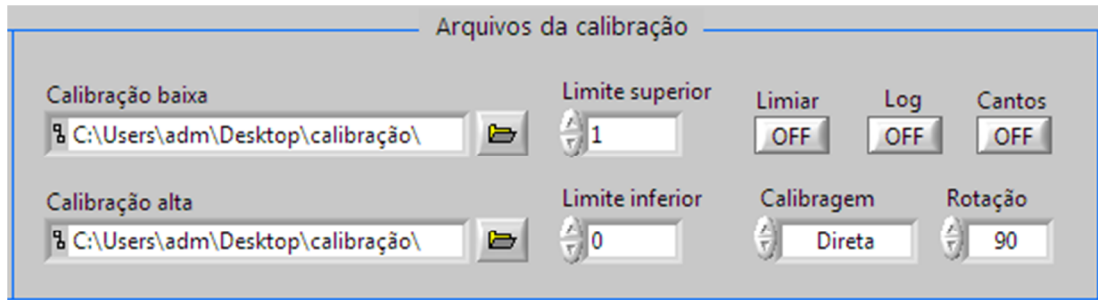
São criados dois arquivos de calibração, um referente a calibração para a condutividade (baixa frequência) e outro arquivo para a calibração da capacitância (alta frequência).

Com isso, os valores calibrados devem variar entre 0 e 1, mas em alguns casos, como o arquivo de calibração é a média dos valores medidos, podem ocorrer valores que fiquem fora dessa faixa de calibração. Para corrigir isso é utilizado o sistema abaixo para manter todos os valores dentro desse limiar.

$$\bar{V}_{o\_cal}(i, j, k) = \begin{cases} 0 & \text{se } V_{o\_cal}(i, j, k) < 0 \\ V_{o\_cal}(i, j, k) & \text{se } 0 \leq V_{o\_cal}(i, j, k) \leq 1 \\ 1 & \text{se } V_{o\_cal}(i, j, k) > 1 \end{cases} \quad (3.9)$$

Na figura 3.17, temos a parte do *software* onde são configurados os controles da calibração, tais como a escolha dos arquivos de calibração alta e baixa e os valores do limite superior e inferior, que usualmente variam entre 0 e 1.





**Figura 3.17: Interface do *software* utilizada para escolher os arquivos de calibração e demais configurações da visualização**

Pode-se também escolher se os dados serão apresentados na forma linear ou logarítmica, e, no caso da medida ter sido realizada em um tubo, pode-se anular os cantos, de forma que a imagem fique redonda. O botão limiar, faz com que os valores fora de escala ganhem os valores zero ou 1, de acordo com a equação (3.9). A interface completa do programa pode ser vista no Apêndice B.

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Com a conclusão inicial do *hardware* e *software*, realizaram-se testes no sistema para avaliar sua resposta em frequência e resposta ao degrau. Após, realizaram-se testes de acurácia utilizando diversas combinações de resistores e capacitores para calcular a incerteza na medição. Com a obtenção de bons resultados, passou-se para os testes com fluídos, sendo feito o teste estático e dinâmico.

### 4.1 RESPOSTA EM FREQUÊNCIA

Um sinal de tensão senoidal variando em frequência de 2 kHz a 20 MHz foi utilizado para testar a resposta em frequência do circuito de transimpedância (figura 2.19). O sinal foi aplicado na entrada de um circuito RC paralelo conhecido, que foi conectado no circuito de transimpedância. A saída do sinal do módulo receptor foi medida com um osciloscópio. Foram utilizados valores próximos ao usados na figura 2.20, com o intuito de comparar as medidas com a teoria.

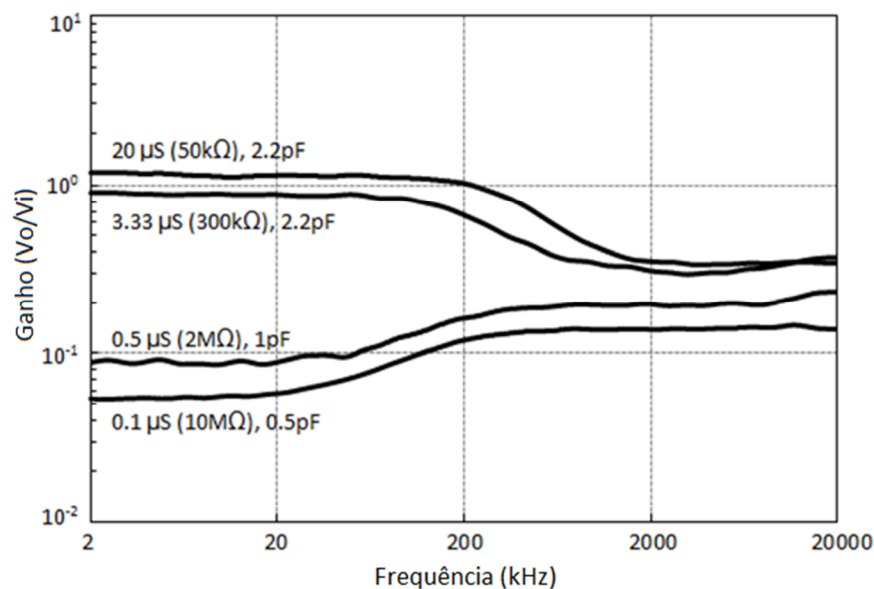


Figura 4.1: Resposta em frequência para componentes com valores  $C_f = 10\text{pF}$ ,  $G_f = 10\mu\text{S}$  ( $100\text{ k}\Omega$ ),  $C_x$  e  $G_x$  ( $R_x$ ) estão indicados no gráfico

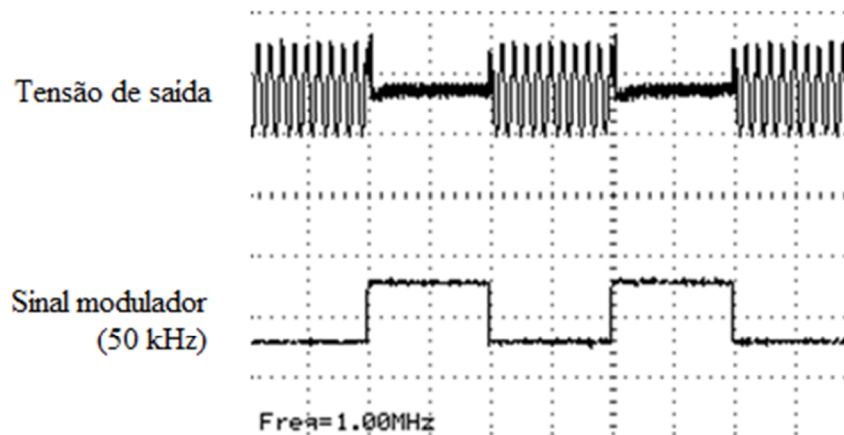
O comportamento obtido como resposta, mostra claramente que os dois platôs, bem como a forma das curvas, é muito semelhante com o seu equivalente teórico (figura 2.20), o que demonstra que o circuito está se comportando conforme o esperado. Pequenas alterações

podem ser explicadas pela tolerância dos componentes utilizados e pelos valores das capacitâncias altas não serem iguais (2 pF no teórico, 2,2 pF no prático).

## 4.2 RESPOSTA AO DEGRAU

A fim de observar a taxa máxima de repetição possível para o sistema em multicanais, foi realizado um teste de resposta ao degrau com o sistema. O circuito foi construído com a intenção de funcionar em 500 FPS, que é considerado uma boa resolução temporal, o que faz necessário que o circuito tenha uma boa resposta ao degrau a pelo menos 4 kHz, que é a frequência final de chaveamento levando em consideração a velocidade (FPS) e os 8 canais multiplexados. Usando um gerador de onda (Agilent 3322A), um sinal de onda senoidal de 1 MHz foi modulado usando um sinal de onda quadrado de 50 kHz para testar a resposta ao degrau do circuito, o que produz um valor muito mais alto do que o necessário para o funcionamento pretendido. A onda resultante foi analisada utilizando um osciloscópio ligado na saída do circuito, o que resultou na figura 4.2.

Neste experimento um circuito RC paralelo foi utilizado usando valores de 2.2 pF e 1 M $\Omega$ .



**Figura 4.2: Resposta ao degrau do circuito para uma frequência de repetição de 50 kHz**

Conforme mostrado na figura, o tempo de resposta da onda modulada de 1 MHz é quase instantânea para a escala de tempo usada, com isso, o sistema pode ser perfeitamente utilizado para a frequência de repetição de 4 kHz sem nenhuma perda na acurácia das medidas.

### 4.3 INCERTEZA NA MEDIÇÃO

Para encontrar-se a incerteza na medição, foram conectados componentes de referência aos pares Tx – Rx, ou seja, resistores e capacitores de valores conhecidos. Para tanto, foram confeccionadas 16 placas PCI, como as mostradas na figura 4.4 de tal forma que pudessem simular o sensor *wire-mesh* na configuração 8x8, testando cada par transmissor-receptor de forma independente. O resultado dessa medição são duas matrizes de valores diagonais com as tensões relativas às frequências alta e baixa. Uma dessas matrizes é mostrada na figura 4.3.

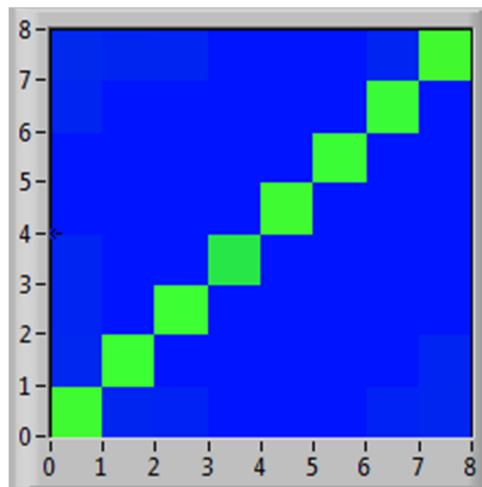


Figura 4.3: Diagonal medida pelo LabView a partir das placas PCI.

Uma matriz é o resultado em função da condutividade e a outra matriz é em função da capacitância.

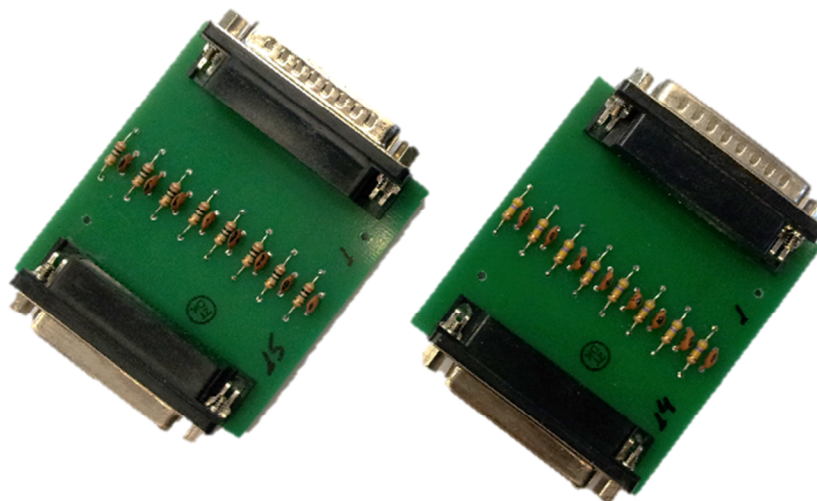
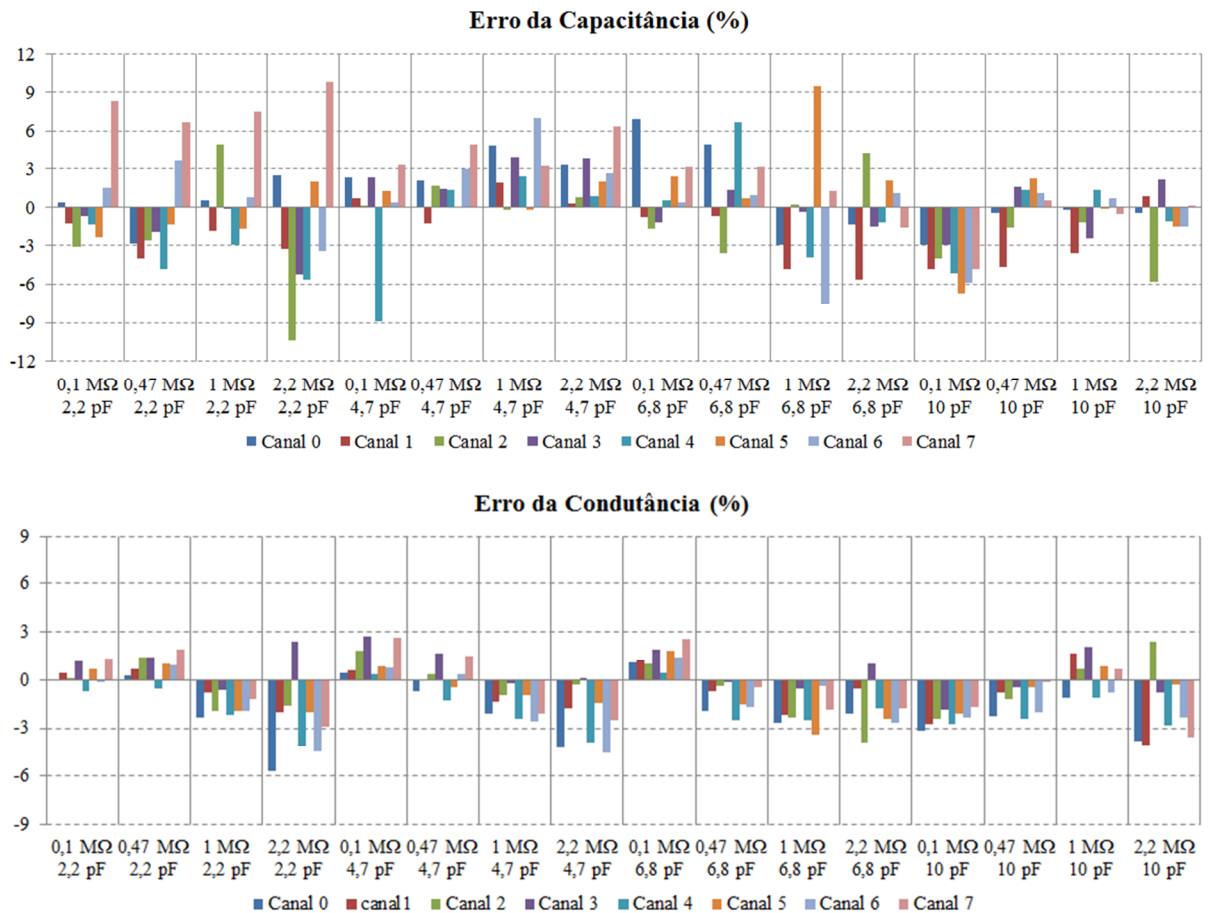


Figura 4.4: Placas eletrônicas confeccionadas para o teste de acurácia.

Os valores de resistência utilizados são de 100 k $\Omega$ , 470 k $\Omega$ , 1 M $\Omega$  e 2,2 M $\Omega$ . Para capacitores são de 2,2 pF, 4,7 pF, 6,8 pF e 10 pF, resultando em 16 combinações.

Na figura 4.5, tem-se os gráficos mostrando a incerteza nas medições para cada par de resistores e capacitores, apresentando os canais de forma independente.



**Figura 4.5:** Gráficos apresentando os erros nas medidas de capacitância (gráfico de cima) e da condutância (gráfico de baixo)

Pela análise dos gráficos, percebe-se que as incertezas de medição para a capacitância são, em sua maioria, menores que 10 % e, para a condutância, menores que 5 %, o que representa um bom resultado. Os valores da condutância e capacitância foram calculados de acordo com a teoria apresentada na seção 2.5.2.

#### 4.4 TESTES COM MISTURAS TRIFÁSICAS

Com o sistema apresentando bons resultados de incerteza, testou-se então seu desempenho utilizando misturas trifásicas, fazendo inicialmente testes estáticos e, posteriormente testes dinâmicos, como mostrados a seguir.

#### 4.4.1 Estático

Os primeiros testes feitos utilizando fluídos foram realizados utilizando um cuba de acrílico, onde se utilizou água com corante vermelho, óleo de silicone e ar. Colocou-se corante na água com o intuito de se fazer a identificação visual das fases. De acordo com suas densidades, as substâncias ficaram posicionadas com a água embaixo, óleo na parte do meio e o ar em cima. Para fazer a identificação dos fluídos foi utilizado o sensor *wire-mesh* 8x8.

Na figura 4.6, tem-se uma foto da cuba com os fluídos formando uma solução trifásica.

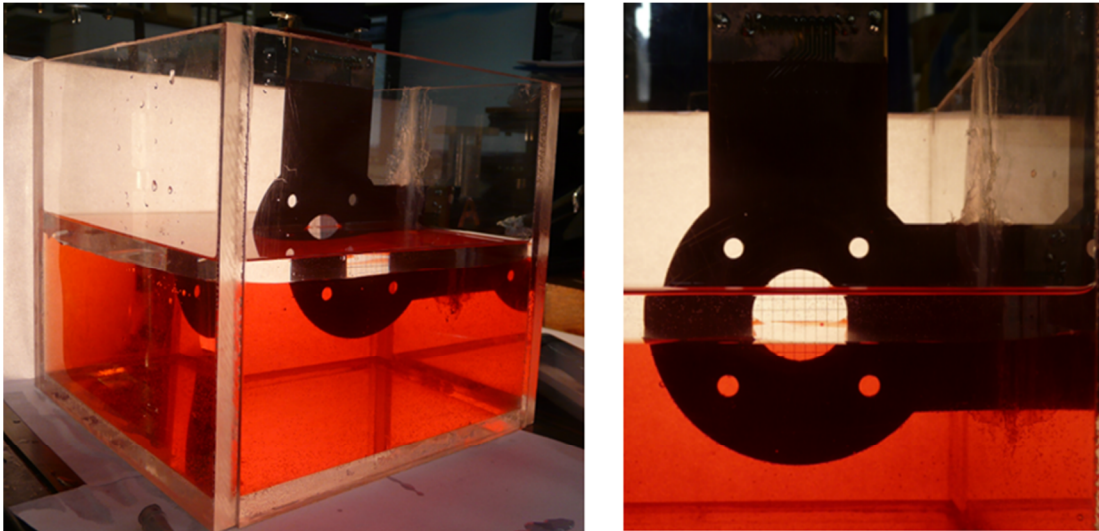


Figura 4.6: Montagem utilizada para o teste estático

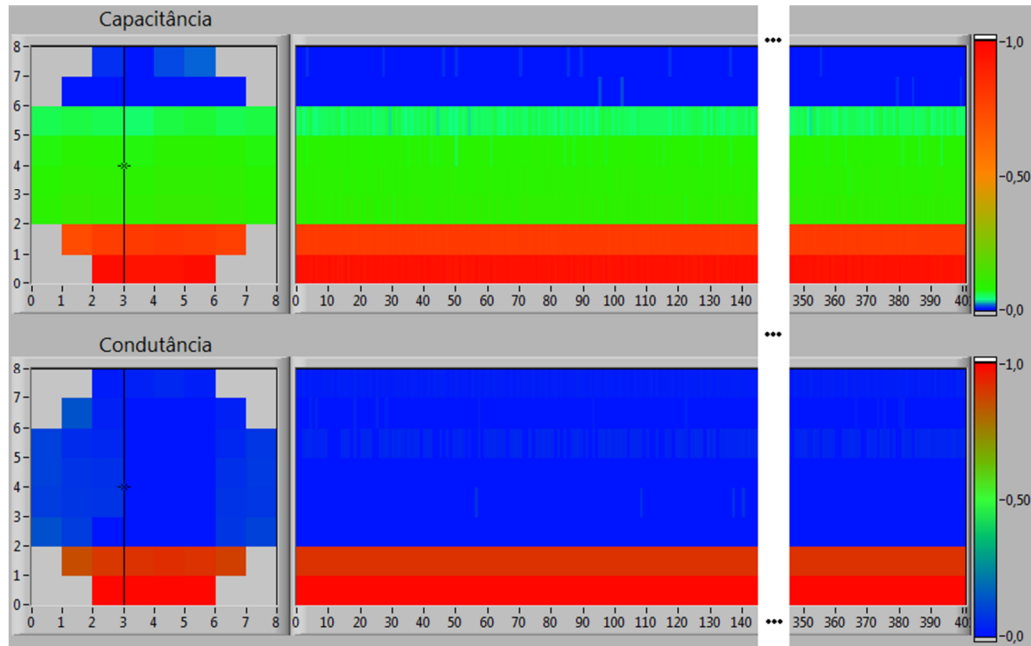
As substâncias utilizadas possuem os seguintes parâmetros mostrados abaixo:

Tabela 4.1: Características elétricas das substâncias

Substância	Condutividade ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ )	Permissividade relativa
Água	398	80
Óleo	$\approx 0$	2,8
Ar	$\approx 0$	1

Inicialmente, foram realizadas medidas de calibração deixando o sensor *wire-mesh* totalmente submerso na água para a calibração alta e totalmente seco para a calibração baixa.

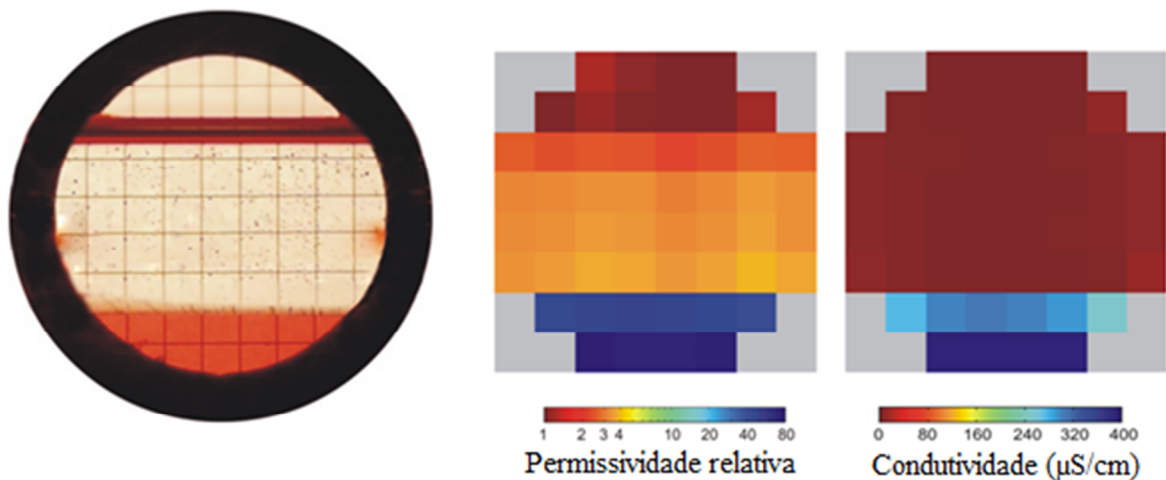
As medidas foram realizadas utilizando uma taxa de aquisição de 500 FPS com frequências de 75 kHz e 1,825 MHz. O resultado preliminar contendo os dados com a FFT calculada, calibrada e normalizada, conforme discutido na seção 3.3.3, é mostrado na figura 4.7, com a visualização de uma seção transversal e também a visualização horizontal ao longo do tempo. Essa visualização ao longo do tempo é a vista da linha vertical escolhida em preto, na imagem que pode-se ver na visualização da seção transversal.



**Figura 4.7:** Interface do *software* mostrando a imagem medida de uma seção transversal e a visualização horizontal ao longo do tempo

Com os dados obtidos com a medição, foram realizados processamentos posteriores no MatLab, conforme a seção 2.5.2, onde calculou-se a condutividade e a permissividade elétrica dos fluídos.

Na figura 4.8, fez-se a média de 100 frames e então calculou-se os parâmetros de cada substância. Para a permissividade relativa, utilizou-se escala logarítmica de cores e linear para a condutividade, para tornar mais fácil a visualização da diferença entre fases.



**Figura 4.8:** Foto do sensor *wire-mesh*, gráfico para a permissividade relativa e para a condutividade elétrica, respectivamente

Observa-se que as três fases podem ser claramente identificadas pela permissividade elétrica, enquanto no gráfico para a condutividade só identificamos duas fases, uma condutora

e outra não condutora, o que era esperado. Com isso conseguiu-se atingir o objetivo proposto pelo trabalho, que era fazer a investigação de escoamentos trifásicos.

Outro processamento também foi realizado utilizando a média dos canais 4 e 5, que representam a parte central do *wire-mesh*, onde pode-se analisar os resultados de forma quantitativa. Ambas as escalas para a permissividade elétrica e condutividade estão de forma logarítmica, para melhor visualização, como apresentado na figura 4.9.

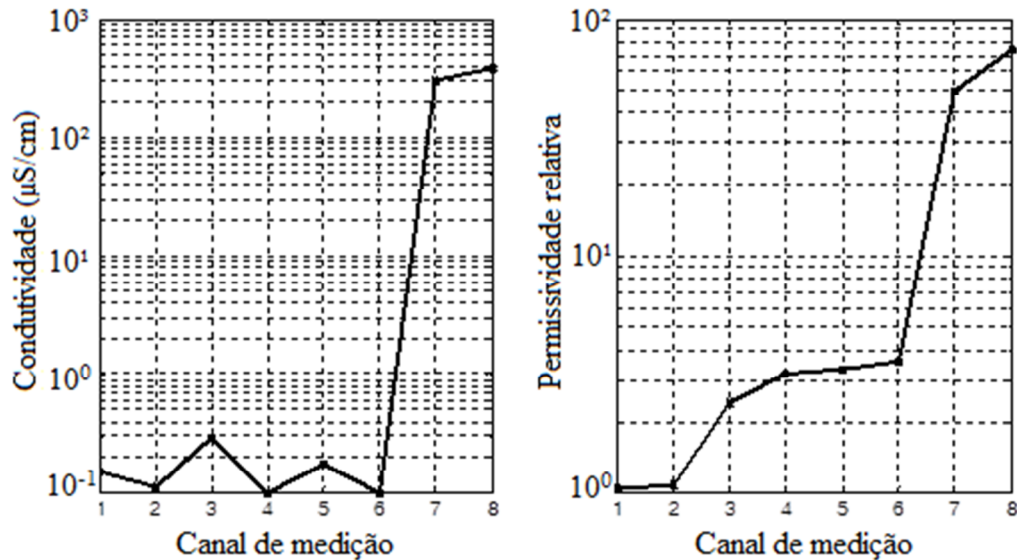


Figura 4.9: Gráficos com os valores encontrados para a condutividade e permissividade elétrica, respectivamente

Como se pode ver nos gráficos, para a condutividade, encontrou-se um valor em torno de zero para o ar e o óleo, e em torno de 400  $\mu\text{S}/\text{cm}$  para a água. Na medida da permissividade elétrica, encontrou-se um bom resultado em relação às referências para o ar e água, para o óleo encontrou-se um valor em torno de 3,5, apesar de o valor de referência ser 2,8. Uma possível explicação para essa discrepância é o fato do óleo usado possivelmente estar contaminado com água, elevando assim o valor efetivo da permissividade desta mistura.

#### 4.4.2 Dinâmico

Para realizar o teste dinâmico, simulou-se um escoamento utilizando um segmento de tubo de acrílico onde foi colocado o sensor *wire-mesh*, como mostra-se na figura 4.10.

Dentro do tubo, colocou-se água, óleo e ar, formando uma estrutura estratificada, após, o segmento de tubo com o sensor foi agitado manualmente por 15 segundos, a fim de simular um escoamento. O resultado da medida pode ser visto na figura 4.11.



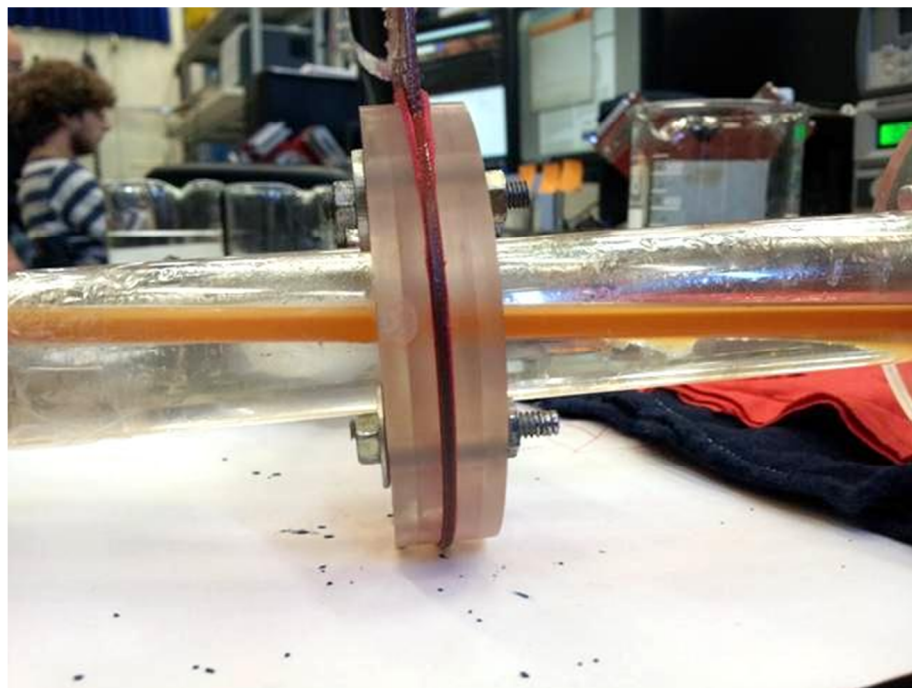


Figura 4.10: Montagem utilizada para simular o escoamento trifásico

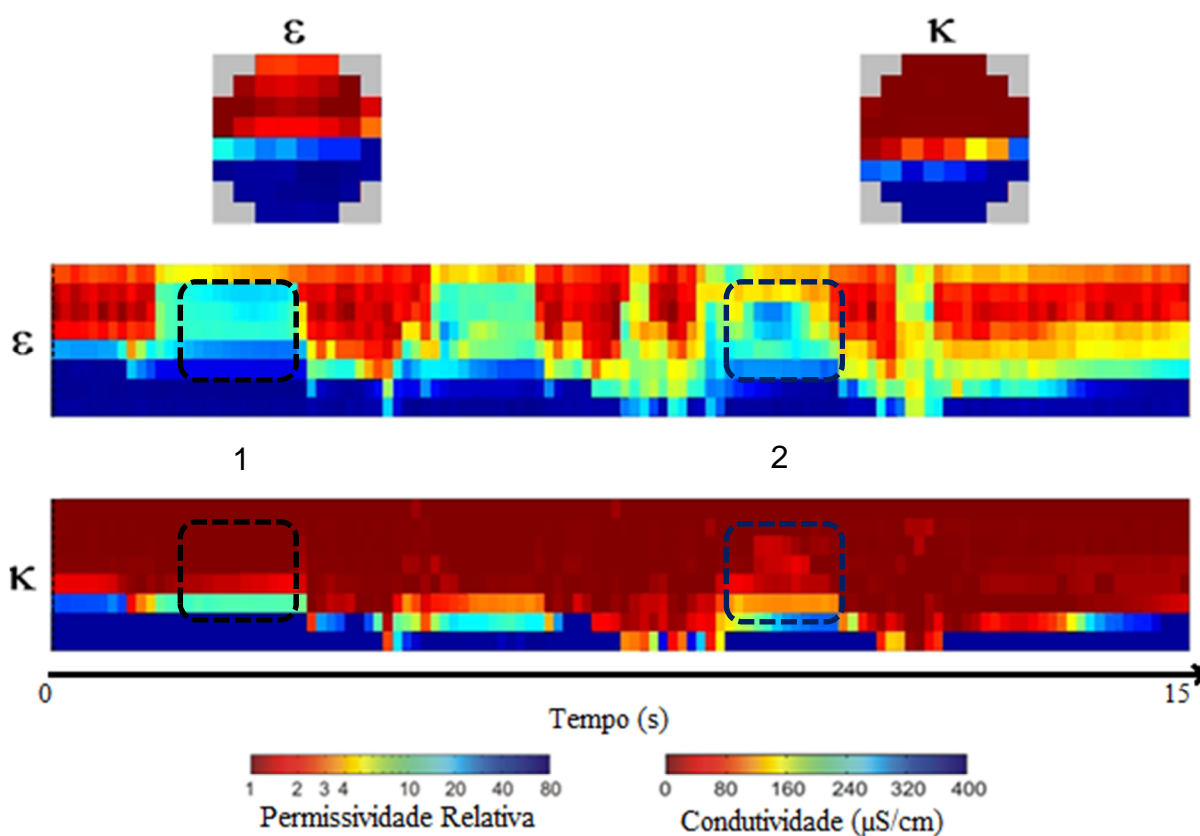


Figura 4.11: Resultado da medida em escoamento

As substâncias podem ser identificadas pela permissividade elétrica. O óleo aparece com permissividade em torno de 20, devido ao balanço das substâncias, que fez a formação de

emulsão de óleo com água. Pela condutividade, consegue-se identificar a diferença entre a fase condutora (água) e a não condutora (ar e óleo).

Um comportamento que se pode perceber pela figura 4.11 é em relação às regiões identificadas em (1) e (2). Em (1) ocorre uma emulsão com predominância de óleo, embora a permissividade relativa fique com valor em torno de 20, a condutividade permanece próxima a zero, no entanto, na região (2) ocorre uma emulsão onde a água começa ter predominância sobre o óleo, fazendo com que a emulsão comece se tornar condutora, em torno de 100  $\mu\text{S}/\text{cm}$ .

Essa imagem foi gerada a partir do *software* MatLab, fazendo somente a calibração dos dados. Esse resultado pode ser melhorado futuramente, desenvolvendo rotinas que façam a fusão desses dados, com uma melhor análise nas regiões de emulsão.

## 5 CONCLUSÃO

Escoamento multifásico é um fenômeno muito comum que ocorre no setor industrial, sendo importante seu estudo para a otimização dos sistemas empregados e aumento da segurança em plantas industriais. Para escoamentos bifásicos, já existem vários modelos teóricos e técnicas de medição, porém, escoamentos multifásicos ainda carecem de estudos e desenvolvimento de novas técnicas de medição. Neste trabalho escolheu-se o sensor *wire-mesh*, devido as suas características de boa resolução temporal e espacial, sendo uma excelente ferramenta para a monitoração de escoamentos multifásicos.

Este trabalho foi focado no desenvolvimento de uma nova técnica de medição de escoamentos trifásicos utilizando o sensor *wire-mesh*. Esta técnica é a continuação de dois estudos anteriormente conhecidos, onde se media apenas um parâmetro das substâncias, como a condutividade ou capacitância para medidas de escoamentos bifásicos.

O sistema desenvolvido consiste de uma nova eletrônica e seu *software*, desenvolvido em LabView para o controle da placa eletrônica e da placa de aquisição de dados. A técnica desenvolvida utiliza um sinal com duas frequências senoidais distintas, sendo possível medir a capacitância e a condutividade das substâncias simultaneamente. Dessa forma, essa técnica pode ser utilizada em medições de escoamentos trifásicos água - óleo - gás, que foi o foco deste trabalho.

Para a validação do sistema desenvolvido foram realizadas medições estáticas, utilizando resistores e capacitores de valores conhecidos, obtendo desvios menores de 10%. Em seguida, foram feitas medições utilizando os fluidos: água, óleo e ar. Inicialmente foi realizada uma medida estática, onde foram identificadas as substâncias com bom grau de acurácia. Após, foram realizadas medidas dinâmicas, onde um segmento de tubo com o sensor e as substâncias foi agitado para simular uma medição em escoamento, obtendo um resultado muito bom, que possibilitará um estudo detalhado de escoamentos trifásicos.

Alguns pontos desse trabalho que podem ser desenvolvidos futuramente:

- Desenvolvimento de um *software* que faça a fusão de dados, para a extração de parâmetros de interesse.
- Análise do comportamento da emulsão para correção das rotinas de calibração.
- Uso extensivo do sistema para análise dos escoamentos, para possíveis correções do sistema.

- Análise do software para determinar qual a velocidade máxima que o sistema consegue operar em tempo real.

A principal contribuição deste trabalho é disponibilizar um sistema de medição para análise de escoamentos multifásicos, que permitirá o desenvolvimento de novos modelos teóricos e a validação de outras técnicas para medição de escoamentos multifásicos.

## REFERÊNCIAS

- AHMED, W. H.; ISMAIL, I. B. **Innovative Techniques for Two-Phase Flow Measurements**. Recent Patents on Electrical Engineering, v. 1, n. 1, 2008.
- CAO, Z.; WANG, H. X.; YANG, W Q; YAN, Y. **A calculable sensor for electrical impedance tomography**. Sensors and Actuators A: Physical, v. 140, n. 2, p. 156-161, 2007.
- CERNA, M.; HARVEY, A. F. **The Fundamentals of FFT-Based Signal Analysis and Measurement**. n. July, p. 1-20, 2000.
- CROWE, C. T. **Multiphase Flow Handbook**. Boca Raton, FL: Taylor & Francis, 2006.
- DA SILVA, MARCO JOSÉ. **Impedance Sensors for Fast Multiphase Flow Measurement and Imaging Impedance Sensors for Fast Multiphase Flow Measurement and Imaging**. [S.l.]: Technische Universität Dresden, 2008.
- DA SILVA, M. J.; SCHLEICHER, E.; HAMPEL, U. **A Novel Needle Probe Based on High-Speed Complex Permittivity Measurements for Investigation of Dynamic Fluid Flows**. Instrumentation, v. 56, n. 4, p. 1249-1256, 2007.
- DA SILVA, M. J.; SCHLEICHER, E.; HAMPEL, U. **Advanced wire-mesh sensor technology for fast flow imaging**. Time, 2009.
- DA SILVA, M. J.; SCHLEICHER, E.; HAMPEL, U. **Capacitance wire-mesh sensor for fast measurement of phase fraction distributions**. Measurement Science and Technology, v. 18, n. 7, p. 2245-2251, 2007.
- DYAKOWSKI, T. **Applications of electrical tomography for gas–solids and liquid–solids flows — a review**. Powder Technology, v. 112, n. 3, p. 174-192, 2000.
- HAMPEL, U.; BIEBERLE, A.; HOPPE, D. *et al.* **High resolution gamma ray tomography scanner for flow measurement and non-destructive testing applications**. Review of Scientific Instruments, v. 78, 2007.
- HAMPEL, U.; FISCHER, F. **Ultra Fast Electron Beam X-Ray Tomography and its Application to Multiphase Flow Measurement**. IEEE Nuclear Science Symposium Conference Record. p. 565-569, 2008.
- HEINDEL, T. J.; GRAY, J. N.; JENSEN, T. C. **An X-ray system for visualizing fluid flows**. Flow Measurement and Instrumentation, v. 19, p. 67-78, 2008.
- HORI, K.; FUJIMOTO, T.; KAWANISHI, K. **Development of ultra-fast X-ray computed tomography scanner system**. IEEE Transactions on Nuclear Science, v. 45, p. 2089-2094, 1998.
- HOYLE, B. S. **Process tomography using ultrasonic sensors**. Measurement Science and Technology, v. 7, p. 272-280, 1996.

HU, B.; HALE, C. P.; HEWITT, G. F.; RICHARDSON, S. M.; WONG, W. L. **Gammas and X-ray tomography of liquid-liquid and gas-liquid-liquid flows**. *Multiphase Science and Technology*, v. 19, n. 3, p. 241-267, 2007.

HU, BIN; STEWART, C.; HALE, COLIN P. *et al.* **Development of an X-ray computed tomography (CT) system with sparse sources: application to three-phase pipe flow visualization**. *Experiments in Fluids*, v. 39, n. 4, p. 667-678, 24 jun 2005.

JOHANSEN, G. A. **Nuclear tomography methods in industry**. *Nuclear Physics*, v. 752, p. 696c-705c, 2005.

LAGE, P. L. C.; ESPOSITO, R. O. **Experimental determination of bubble size distributions in bubble columns : prediction of mean bubble diameter and gas hold up**. *Powder Technology* 101. p. 142-150, 1999.

MARASHDEH, Q.; WARSITO, W.; FAN, L. S.; TEIXEIRA, F. L. **A Multimodal Tomography System Based on ECT Sensors**. *IEEE Sensors Journal*, v. 7, p. 426-433, 2007.

PRASSER, H.-M.; BOTTGER, A.; ZSCHAU, J. **A new electrode-mesh tomograph for gas-liquid flows**. *Flow Measurement and Instrumentation*, v. 9, n. 2, p. 111-119, jun 1998.

SPEEDING, P.; DONNELLY, G.; COLE, J. **Three Phase Oil-Water-Gas Horizontal Co-Current FlowI. Experimental and Regime Map**. *Chemical Engineering Research and Design*, v. 83, n. 4, p. 401-411, abr 2005.

STÜRZEL, T.; BIEBERLE, M.; LAURIEN, E. *et al.* **Experimental facility for two- and three-dimensional ultrafast electron beam x-ray computed tomography**. *The Review of scientific instruments*, v. 82, n. 2, p. 023702, fev 2011.

TAITEL, Y.; DUKLER, A. E. **A model for predicting flow regime transitions in horizontal and near horizontal gas-liquid flow**. *AIChE Journal*, v. 22, n. 1, p. 47-55, jan 1976.

TAPP, H. S.; PEYTON, A. J.; KEMSLEY, E. K.; WILSON, R. H. **Chemical engineering applications of electrical process tomography**. *Sensors and Actuators*, v. B 92, p. 17-24, 2003.

XIE, C. G.; REINECKE, N.; BECK, M. S.; MEWES, D.; WILLIAMS, R. A. **Electrical Tomography Techniques for Process Engineering Applications**. *The Chemical Engineering Journal*, v. 56, p. 127-133, 1995.

YANG, W. Q.; PENG, L. **Image reconstruction algorithms for electrical capacitance tomography**. *Measurement Science and Technology*, v. 14, p. R1-R13, 2003.

YORK, T. A. **Status of electrical tomography in industrial applications**. *Journal of Electronic Imaging*, v. 10, p. 698-619, 2001.

## APÊNDICE A – CIRCUITO ELETRÔNICO DESENVOLVIDO

### CIRCUITO RECEPTOR:

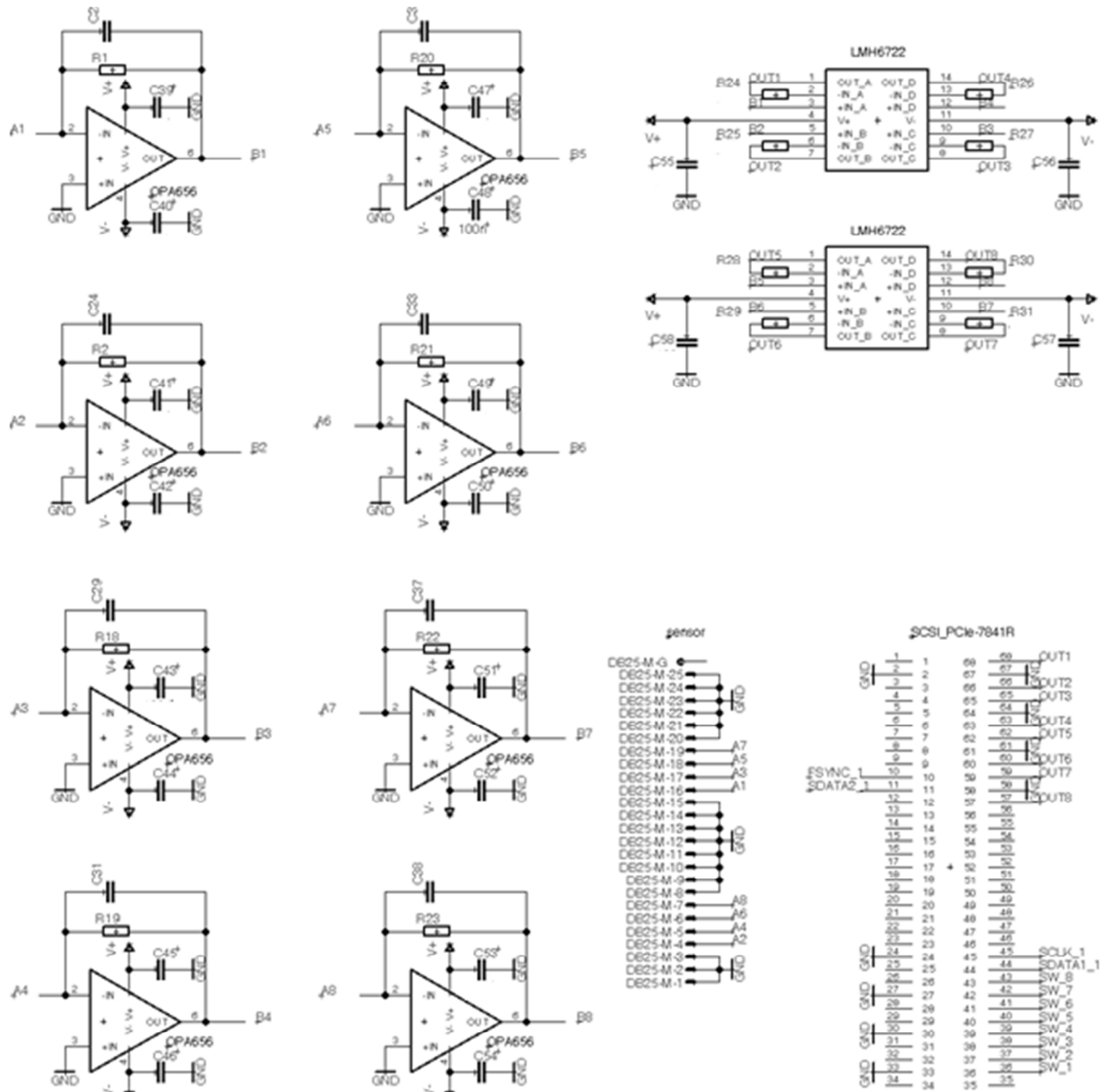


Figura A1: Circuito eletrônico desenvolvido referente à parte receptora

## CIRCUITO TRANSMISSOR:

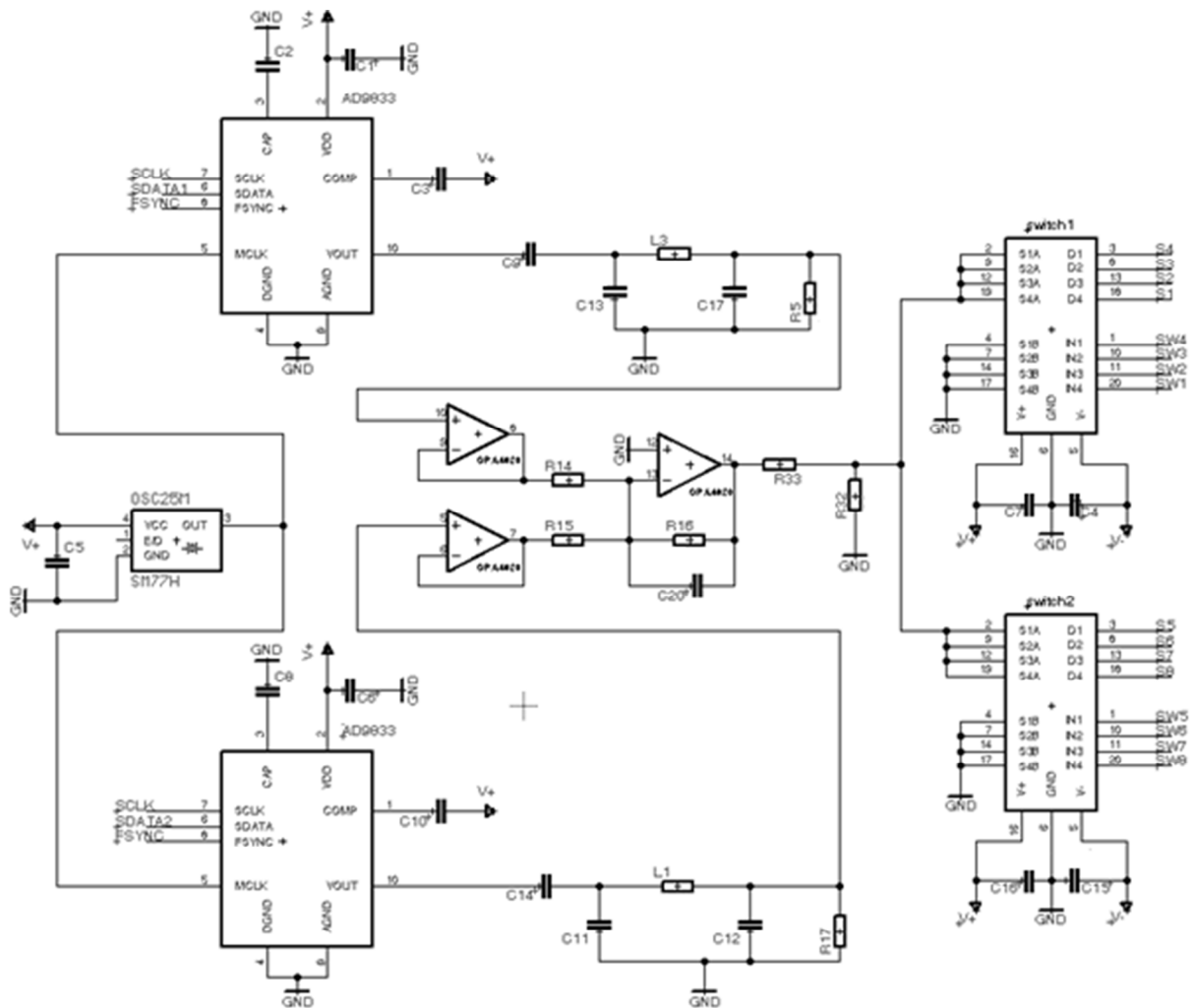


Figura A2: Circuito eletrônico desenvolvido referente à parte transmissora, com a parte geradora de sinal e switches



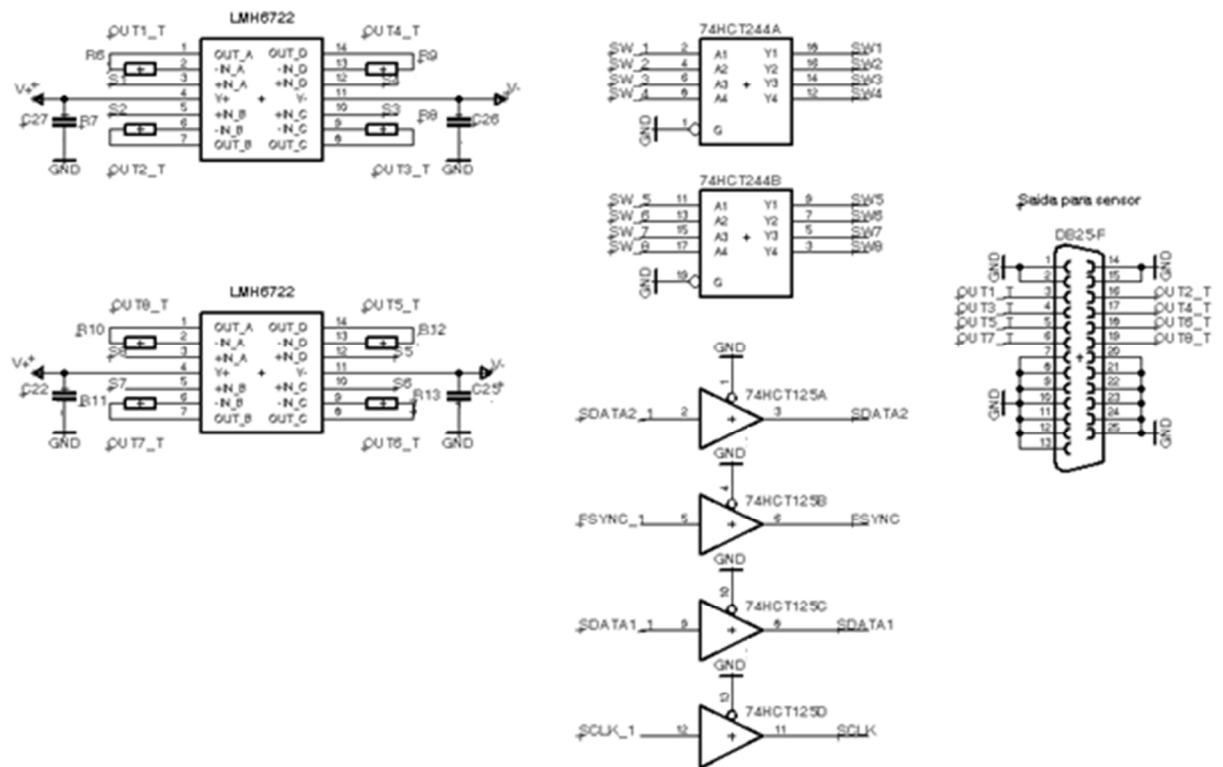


Figura A3: Circuito eletrônico desenvolvido referente à parte transmissora com buffers e drivers

### FONTE DE ALIMENTAÇÃO:

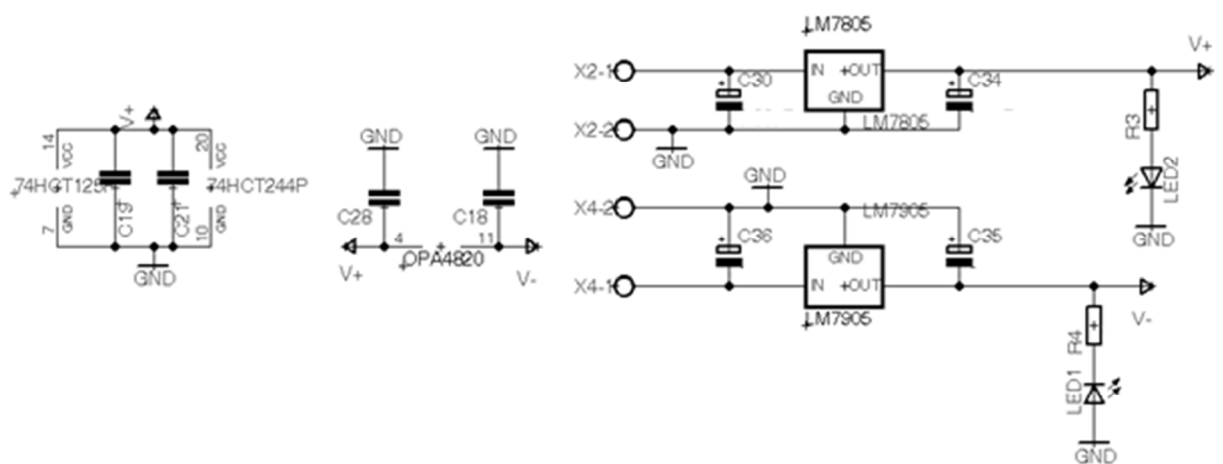


Figura A4: Circuito eletrônico desenvolvido referente à fonte de alimentação

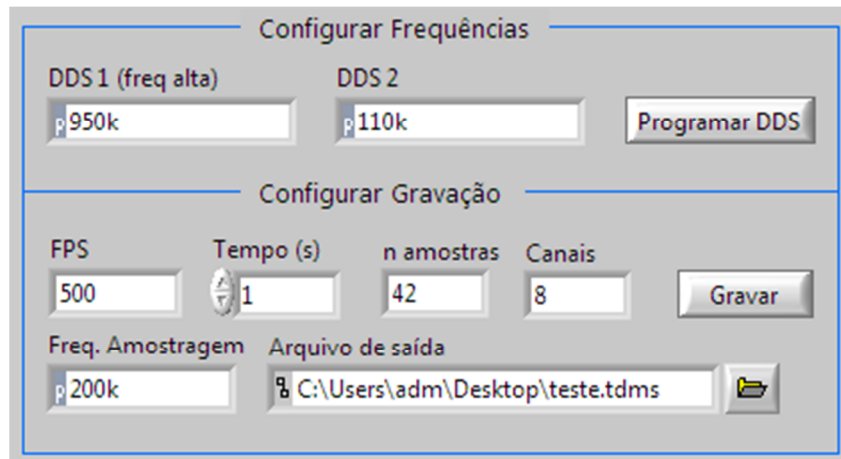
## APÊNDICE B – INTERFACE DO SOFTWARE

### VISUALIZAÇÃO



Figura B1: Interface de visualização da medição realizada

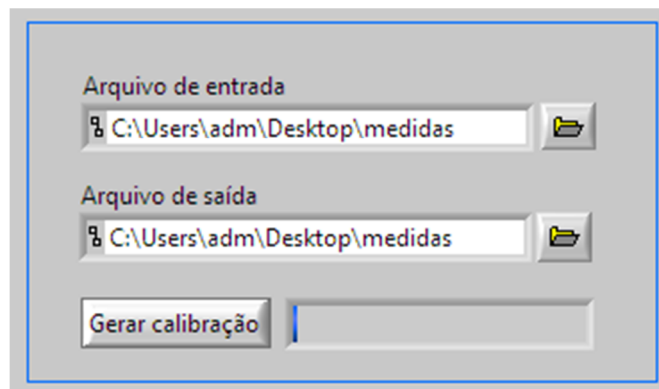
## CONFIGURAÇÃO DOS DDS E DA MEDIÇÃO



The image shows two stacked dialog boxes for configuration. The top dialog, titled 'Configurar Frequências', has two input fields: 'DDS 1 (freq alta)' with the value '950k' and 'DDS 2' with the value '110k'. A 'Programar DDS' button is to the right. The bottom dialog, titled 'Configurar Gravação', has four input fields: 'FPS' with '500', 'Tempo (s)' with '1', 'n amostras' with '42', and 'Canais' with '8'. A 'Gravar' button is to the right. Below these are two more fields: 'Freq. Amostragem' with '200k' and 'Arquivo de saída' with the path 'C:\Users\adm\Desktop\teste.tdms'. A folder icon button is to the right of the output file path.

Figura B2: Interface da configuração dos DDS e da medição

## GERAÇÃO DO ARQUIVO DE CALIBRAÇÃO



The image shows a dialog box for generating calibration files. It has two input fields for file paths: 'Arquivo de entrada' and 'Arquivo de saída', both containing the path 'C:\Users\adm\Desktop\medidas'. Each field has a folder icon button to its right. At the bottom, there is a 'Gerar calibração' button and an empty input field.

Figura B3: Interface da geração dos arquivos de calibração