

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE INFORMÁTICA
DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE ELETRÔNICA
ENGENHARIA DE COMPUTAÇÃO

LEANDRO ALVES DOS SANTOS

PLATAFORMA PARA GERENCIAMENTO DE DADOS DO SENSOR
***WIRE-MESH* APLICADOS A ESCOAMENTOS MULTIFÁSICOS**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO - TCC

CURITIBA

2017

LEANDRO ALVES DOS SANTOS

**PLATAFORMA PARA GERENCIAMENTO DE DADOS DO SENSOR
WIRE-MESH APLICADOS A ESCOAMENTOS MULTIFÁSICOS**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentada como requisito à obtenção do título de Bacharel, em engenharia de computação, do Departamento acadêmico de Informática e Departamento acadêmico de eletrônica, da Universidade Tecnológica Federal do Paraná Campus Curitiba.

Orientador: Prof. Dr. Eduardo Nunes dos Santos

CURITIBA

2017

Dedico este trabalho à Idalina Zambote dos Santos, minha mãe. É a pessoa que mais apoiou e acreditou em mim.

AGRADECIMENTOS

Agradeço ao meu orientador Prof. Dr. Eduardo Nunes do Santos, pela dedicação que se dispôs para me guiar no desenvolvimento desse trabalho.

Gostaria de deixar registrado a importância do Plano Nacional de Assistência Estudantil – Pnaes instituído pelo Decreto nº 7.234, de 19 de julho de 2010. Apesar de todas as limitações esse programa tem sido uma política pública de inclusão e democratização do ensino superior fundamental para a construção de uma universidade pública mais justa, plural e que contribui efetivamente para superação da pobreza. O PNAES foi fundamental do primeiro ao último dia para minha permanência na universidade sem o qual não seria possível a conclusão desse curso superior. Sendo que a UTFPR possui uma das menores relação de técnicos-administrativos por discente, sinto-me na necessidade de agradecer aos técnicos-administrativo do Núcleo de Acompanhamento Psicopedagógico e Assistência Estudantil – NUAPE que são os responsáveis, com todas as dificuldades, pela execução do PNAES na UTFPR. Manifesto o meu desejo de ver esse programa ampliado de forma a atender a totalidade dos estudantes que a ele recorrerem e aperfeiçoado como por exemplo pela construção da casa do estudante.

Enfim, a todos e todas, professores, estudante e amigos que de alguma forma contribuíram para a realização deste trabalho e para a conclusão deste curso.

RESUMO

SANTOS, Leandro Alves. **Plataforma para gerenciamento de dados do sensor *Wire-mesh* aplicados a escoamentos multifásicos**. 2017. 66. Trabalho de Conclusão de Curso Bacharelado em Engenharia de Computação - Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2017.

Escoamentos multifásicos estão presentes na natureza e em diversas atividades industriais, dentre elas a indústria do petróleo como escoamento bifásico gás-líquido onde óleo e gás estão presentes no interior das tubulações. A eficiência das operações e segurança das plantas e equipamentos estão diretamente relacionados com o entendimento dos fenômenos envolvidos nesse escoamento. Por meio de estudos experimentais, busca-se extrair parâmetros e características bem como identificar padrões de escoamento dentro de um conjunto de regimes que podem ser bolhas dispersas, golfadas, estratificado, anular e variantes destes padrões. O sensor *Wire-mesh* tem sido muito utilizado nos últimos anos para a monitoração de escoamento bifásico. Essa é uma técnica simples e custo reduzido comparado a outras técnicas baseadas em sensores tomográficos e câmeras de alta velocidade. É uma técnica intrusiva que permite analisar o escoamento com alta resolução temporal e espacial cujo o princípio de funcionamento é baseado em medir as propriedades elétricas tais como, condutividade ou permissividade das diferentes fases no fluido. A necessidade do desenvolvimento e melhorias de hardware de medição eletrônica é acompanhada da necessidade de desenvolvimento de softwares e algoritmos eficientes para visualização e processamentos dos dados que permitem extrair as característica, identificar e validar os parâmetros do escoamento. Nesse sentido este trabalho tem como objetivo desenvolver uma plataforma de software para gerenciamento e aplicação de métodos computacionais para a extração de parâmetros em escoamentos bifásicos gás líquido. Foi desenvolvida uma plataforma para processar dados experimentais coletados com a técnica *wire-mesh* e recriar a imagem do escoamento em duas e três dimensões permitindo a pesquisadores analisar o fenômeno. A plataforma foi testada com dados para vários tipos de sensor e vários padrões de escoamento obtendo resultados satisfatórios e gerando imagens com boa resolução para identificar o comportamento das interfaces entre as fases do escoamento. A principal contribuição portanto consiste em disponibilizar um sistema de software para gerenciamento de dados visualização, dando suporte a técnicos e pesquisadores relacionados a área de estudos de escoamentos multifásicos que auxilie tanto na pesquisa quanto no ensino.

Palavras-chave: *Wire-mesh*; Escoamento Bifásico; Escoamento multifásico.

ABSTRACT

SANTOS, Leandro Alves. **Plataforma para gerenciamento de dados do sensor *Wire-mesh* aplicados a escoamentos multifásicos**. 2017. 66. Trabalho de Conclusão de Curso Bacharelado em Engenharia de Computação - Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2017.

Multiphase flows are present in nature and in several industrial activities, among them an oil industry as a two-phase gas-liquid flow where oil and gas are present inside the pipes. The accuracy of operations and safety of plants and equipment are related to the understanding of the phenomena involved in this flow. By means of experimental studies, it is sought to extract parameters and characteristics as well as to identify flow patterns within a set of regimes that can be dispersed bubbles, gaps, stratified, annular and variants of these patterns. The technique of Wire-mesh has been widely used in recent years for a monitoring of the multiphase flow. This is a simple and lower cost technique compared to other techniques based on tomographic sensors and high-speed cameras. An intrusive technique allows analyzing the flow with high temporal and spatial resolution whose principle of operation is based on measuring of electrical properties of conductivity or permittiveness of the different phases in the fluid. The need for technological development of software and efficient algorithms for visualization and data processing that allow extracting as a characteristic, to identify and validate the flow parameters, accompany the need for development and improvement of hardware of electronic measurement. In this sense, this work aims to develop a software platform for the management and application of computational methods for a control extraction in gas-liquid biphasic flows. A platform was developed to process experimental data collected with a Wire-mesh technique and to recreate a 2D and 3D flow image in order to allow researchers to analyze the phenomenon. The platform was evaluated with data for various sensor Wire-mesh configurations and various flow patterns. The results were satisfactory results for generating images with good sensitivity and good resolution to identify the behavior of the interfaces between phases of the biphasic flow. The main contribution is therefore to provide a data management software giving support to technicians and researchers related to the study area of multiphase flows that helps both research and teaching.

Keywords: *Wire-mesh*; Two-phase flow; multiphase flow.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1: Padrões de escoamento em dutos verticais.....	18
Figura 2: Padrões de escoamento em dutos horizontais	19
Figura 3: Mapa de fluxo para escoamento em dutos horizontais (Mandhane, 1974).	20
Figura 4: Princípio do sensor <i>wire-mech</i> 8x8 eletrodos (HZDR).....	26
Figura 5: Sensor <i>WM</i> 16x16. (HZDR)	26
Figura 6: Diagrama do sistema com sensor <i>wire-mesh</i> condutivo.	27
Figura 7: Diagrama do sistema com sensor <i>wire-mesh</i> capacitivo. (a) esquema elétrico, (b) esquema de ativação e amostragem quando ocorre o pulso de sincronia S/H.	28
Figura 8: Diagrama funcional geral da plataforma.....	31
Figura 9: Diagrama de caso de uso da plataforma.....	32
Figura 10: Diagrama de atividades para a função visualizar 2D.	36
Figura 11: Diagrama de atividades para a função visualizar 3D.	36
Figura 12: Diagrama de sequência para o caso de uso visualizar 2D.....	38
Figura 13: Diagrama de sequência para o caso de uso visualizar 3D.....	38
Figura 14: Aplicativo GUIDE para desenvolvimento de interface gráfica.	39
Figura 15: (a) estrutura interna do arquivo ".v"; (b) imagem gerada pela leitura do arquivo.	40
Figura 16: (a) representação vetorial do arquivo .v; (b) representação da espacial do arquivo .v na matriz $M(i,j,k)$	41
Figura 17: Função <i>read_v_file</i> MatLab.....	41
Figura 18: Matriz de coeficientes para a correção de fração de vazios.....	42
Figura 19: Ilustração do campo de medida pelo sensor <i>wire-mesh</i>	42
Figura 20: (a) Paleta de cores; (b) imagem de uma bolha em um corte axial; (c) corte transversal do escoamento.	44
Figura 21: <i>Frame</i> através da seção transversal da tubulação.....	45
Figura 22: Interface de visualização 2D da sequência temporal de 600 frame para visão com corte lateral e superior e o mapa de vazio com o intervalo de tempo dos frames visualizados.....	46
Figura 23: Sequência temporal e mapa de para visualização de 2330 frames.	46
Figura 24: Mapa de fluxo para dados referente a escoamento bifásico vertical.....	47
Figura 25: Padrão de escoamento em golfadas.....	49
Figura 26: Padrão de escoamento agitado.	49
Figura 27: Padrão de escoamento bolhas.....	50
Figura 28: Padrão de escoamento bolhas dispersa.	50
Figura 29: técnica <i>slice</i> de visualização 3D.....	51
Figura 30: técnica <i>isosurface</i> de visualização 3D.....	52
Figura 31: dois níveis de <i>isosurface</i>	53

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: descrição formal do caso de uso manipular visualização 2D.	32
Tabela 2: descrição formal do caso de uso manipular visualização 3D.	34
Tabela 3: Característica de $M(i, j, k)$ para cada configuração de malha de eletrodos do sensor wire-mesh.	43
Tabela 4: Visualização lateral e superior do escoamento horizontal em golfada al variando os índice espaciais de sensor 8x8.	60

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	13
1.1 MOTIVAÇÃO E JUSTIFICATIVA	13
1.2 OBJETIVOS.....	14
1.2.1 Objetivo Geral.....	14
1.2.2 Objetivo Específico	14
1.3 APRESENTAÇÃO DO DOCUMENTO.....	14
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	16
2.1 ESCOAMENTO BIFÁSICO GÁS-LÍQUIDO	16
2.1.1 Padrões de escoamento	17
2.1.1.1 Escoamento em dutos verticais	17
2.1.1.2 Escoamento em dutos horizontais	18
2.1.2 Mapa de fluxo	19
2.1.3 Parâmetros	20
2.1.3.1 Fração de vazio.....	20
2.1.3.2 Velocidade superficial e velocidade da mistura	21
2.2 TÉCNICAS PARA ANÁLISE DE ESCOAMENTO BIFÁSICO	22
2.2.1 Técnicas tomográficas	22
2.2.1.1 Tomografia por raios-X e gama.....	22
2.2.1.2 Tomografia por impedância elétrica.....	23
2.2.2 Câmera de alta velocidade	24
2.2.3 Sondas de impedância	24
2.3 SENSOR WIRE-MESH.....	25
2.3.1 Processamento de dados	28
3 DESENVOLVIMENTO.....	30
3.1 ENGENHARIA DE SOFTWARE	30
3.1.1 Diagrama de caso de uso	31
3.1.2 Diagrama de atividades	35
3.1.3 Diagrama de sequência	37
3.2 SOFTWARE.....	38
3.2.1 Dados do Sensor <i>Wire-Mesh</i>	39
3.2.2 Fração de vazio	41
4 TESTES E RESULTADOS.....	43
4.1 LEITURA DOS DADOS	43
4.2 VIZUALIZAÇÃO 2D.....	44
4.2.1 Escoamento Horizontal.....	44
4.2.1.1 Extração de parâmetros	44
4.2.2 Escoamento Vertical	47
4.3 VISUALIZAÇÃO 3D	51

4.3.1 Slice	51
4.3.2 Isurface	51
5 COSIDERAÇÕES FINAIS E CONCLUSÃO	54
4.4 TRABALHOS FUTUROS	55
REFERÊNCIAS.....	56
ANEXO A - Escoamento horizontal para sensor <i>Wire-mesh</i>.....	60
ANEXO B - Manual de operação	63
ANEXO C - Aquisição de arquivos de dados.....	66

1 INTRODUÇÃO

1.1 MOTIVAÇÃO E JUSTIFICATIVA

Escoamento multifásico pode ser encontrado em diversas aplicações de engenharia, como por exemplo, produção de energia nuclear e produção de petróleo. São mais complexos que escoamento onde ocorre somente uma fase, pois a distribuição espacial das fases muitas vezes é desconhecida dificultando a medição de parâmetros quantitativos. A monitoração do fenômeno que envolve escoamento multifásico tem grande importância tendo em vista controle e modelagem de processos, otimização dos processos envolvidos, segurança da planta e projeto de equipamentos, bem como para fins científico-teóricos no entendimento de fenômenos físicos envolvidos (Shoham, 2005).

O tipo de escoamento mais comum encontrado em aplicações industriais é o escoamento do tipo bifásico gás-líquido, onde as fases gás e líquida escoam simultaneamente em dutos (Falcone, 2009). Fatores como a geometria e inclinação dos dutos, propriedade dos fluidos e vazão de cada uma das fases determinam alguns padrões ou regimes de escoamento bifásico gás-líquido. Para a configuração de dutos verticais os padrões são bolhas (*bubble*), golfadas (*slug*), agitado (*churn*), anular (*annular*) e bolhas dispersas (*dispersed*). Em dutos horizontais: estratificado (*bubble*), golfada (*slug*), anular (*annular*) e bolhas dispersas (*dispersed*). É importante ressaltar que na literatura existem diferenças quanto à descrição dos arranjos de fases dos escoamentos bifásicos, como, por exemplo, agrupamentos em sub-classes de padrões de escoamento e padrões nomeados de outras formas (Lin, 2005).

Muitas técnicas baseadas no imageamento do escoamento foram desenvolvidas nas últimas décadas com a finalidade de identificar regimes de escoamento. Algumas destas técnicas envolvem tomografia computadorizada e câmara de alta velocidade. É importante salientar que devido às limitações, nenhuma técnica é aplicada de forma universal, mas em condições específicas onde cada técnica se encaixa melhor (Wrasse, 2015).

O sensor *wirre-mesh* constitui uma técnica intrusiva de imageamento do escoamento. O sensor é composto de duas malhas de fios espaçados por uma distância normalmente de 2 mm e dispostos perpendicularmente entre si de forma que

cada ponto de cruzamento constituem um eletrodo. O princípio de funcionamento explora a diferença na condutividade ou permissividade elétrica das diferentes fases envolvidas. Os dados amostrados possuem resolução temporal e espacial ideal para gerar imagem do escoamento, permitindo identificar a distribuição das fases no interior da tubulação e a extração de parâmetros de interesse para o estudo (Shaban, 2014).

Tendo em vista a necessidade de algoritmos de processamento de dados experimentais de escoamento bifásico gás-líquido, este trabalho de conclusão de curso tem por motivação desenvolver uma plataforma de *software*, utilizando ambiente de desenvolvimento *MatLab* para produzir imagens em 2D e 3D além de poder obter a fração de vazio para esse tipo de escoamento a partir de dados coletados pelo sensor *wire-mesh*.

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Objetivo Geral

Este trabalho tem como objetivo desenvolver uma plataforma para visualização e extração de parâmetro de fração de vazio de escoamento bifásico tipo gás-líquido a partir de dados coletados com o sensor *wire-mesh*.

1.2.2 Objetivo Específico

1. Desenvolver uma interface onde o usuário poderá interagir e visualizar o escoamento bifásico tendo em vista identificar as configurações das interfaces entre as substâncias envolvidas.
2. Desenvolver um algoritmo para processamento dos dados e levantar o de parâmetro de fração de vazio do escoamento.

1.3 APRESENTAÇÃO DO DOCUMENTO

A estrutura deste trabalho está dividida em 5 capítulos.

O capítulo 1 contém uma introdução com a motivação e justificativa do trabalho a partir de uma descrição geral sobre escoamento bifásico, os fenômenos relacionados e os objetivos geral e específico.

O capítulo 2 traz a revisão bibliográfica sobre algumas das variáveis e parâmetros que envolve os conceitos teóricos básicos acerca de escoamento bifásico, tais como padrões de escoamento e velocidade superficial das substâncias. Além disso, uma revisão sobre a técnica de medição *wire-mesh* é apresentada.

O capítulo 3 é dedicado ao desenvolvimento e traz o levantamento de requisitos através dos principais diagramas que descrevem o fluxo de comunicação entre os elementos que compõem a plataforma bem como quais as ferramentas e técnicas computacionais foram empregadas.

O capítulo 4 dedica-se a comentar os testes e resultados da plataforma desenvolvida para dados coletados de diversos experimentos acerca de vários padrões de escoamento em dutos horizontais e verticais.

O capítulo 5 por fim traz as conclusões sobre o trabalho e sugestões para trabalhos futuros.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo, em 2.1, são descritos os principais conceitos que envolve escoamento bifásico gás-líquido, os fenômenos relacionados com este campo de estudo e a importância de boas técnicas de análise e aquisição de parâmetros adequadas para garantir segurança e promover inovação tecnológica.

Na seção 2.2 são descritas algumas das técnicas disponíveis para análise de escoamentos bifásicos.

Na seção 2.3 são apresentados alguns dos modelos matemáticos que descrevem a aquisição de dados através do sensor *wire-mesh*.

2.1 ESCOAMENTO BIFÁSICO GÁS-LÍQUIDO

Define-se escoamento multifásico a partir da presença de duas ou mais substâncias imiscíveis que fluem simultaneamente através de algum meio, podendo ser tubulações e dutos, equipamentos, meios porosos e outros. Escoamentos multifásicos são mais complexos que aqueles onde escoam somente uma fase, pois a distribuição espacial das fases é desconhecida e difícil de ser especificada de forma quantitativa (Shoham, 2005).

As fases presentes em escoamento multifásico são compostas por:

- Sólido: essa fase é incompressível e tem uma interface não deformável cercada por fluidos.
- Líquido: que também é incompressível, mas apresenta uma interface com outras fases deformáveis.
- Gases: onde a fase é compressível e deformável.

Escoamento bifásico gás-líquido basicamente consiste no escoamento simultâneo de gás e líquido. É provavelmente o tipo de escoamento mais importante em escoamento multifásico sendo encontrado em uma larga variedade de aplicações industriais (Falcone, 2009). Exemplos de onde ocorrem escoamentos bifásicos são indústria química, nuclear e produção de petróleo e gás.

2.1.1 Padrões de escoamento

Escoamento bifásico gás-líquido apresenta padrões ou regimes de escoamento. Cada padrão de escoamento difere um do outro pela distribuição espacial das interfaces, resultando em diferentes características de escoamento, tais como velocidade e *hold-up* de líquido. *Hold-up* de líquido é definido como sendo a taxa volumétrica de líquido em um segmento do duto com relação ao volume total do duto (Lin, 2005).

Entre os fatores que estão relacionados com a configuração espacial das fases e que determinam o surgimento de padrões de escoamento pode-se citar:

- Propriedade das fases, fração de gás e velocidade.
- Temperatura e pressão.
- Das características geométricas e propriedades do duto: Forma, diâmetro, inclinação e rugosidade.
- Tipos de fluxos: estacionário, pseudo-estacionário ou transiente.

Determinação dos padrões de escoamento é um problema central para análise de escoamento bifásico. Muitas das variáveis de escoamento, tais como queda de pressão, acúmulo de líquido, coeficiente de transferência de massa e calor e taxa de reação química, estão fortemente associadas com a existência de padrões de escoamento (Shoham, 2005).

2.1.1.1 Escoamento em dutos verticais

A Figura 1 mostra os padrões mais comuns observados para escoamento em dutos verticais: bolhas, golfadas, agitado I e II e disperso. A direção do escoamento é de baixo para cima e a vazão de gás no escoamento aumenta da esquerda para a direita (Shoham, 2005).

- Bolhas (*Bubble flow*): A fase gasosa é dispersa em pequenas bolhas com diferentes tamanhos e formas que ficam distribuídas homogeneamente em um meio contínuo de líquido no escoamento e fazem movimento zig-zag complexo. A fração volumétrica de gás é pequena.

- Golfada (*Slug Flow*): Ocorre quando o fluxo de gás atinge o ponto onde as bolhas colidem e produzem bolhas grandes de gás (*slug*) também conhecidas como

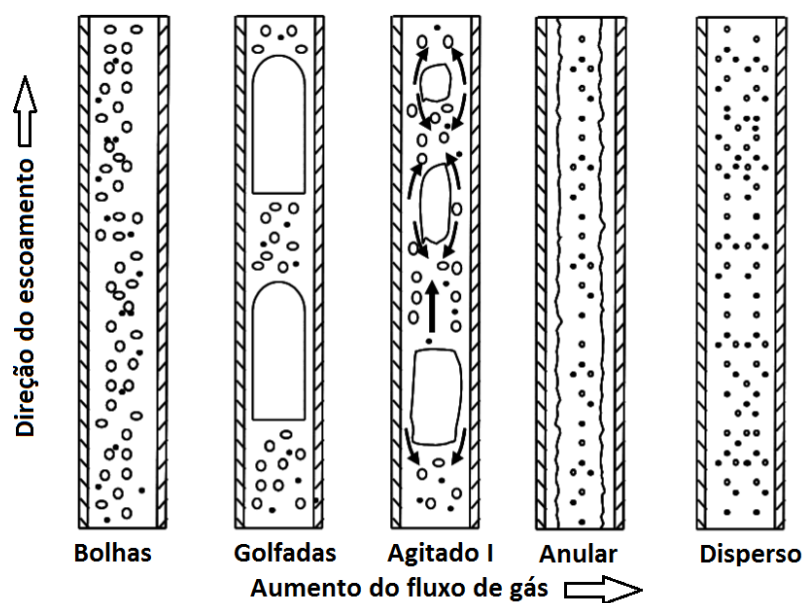
bolhas de Taylor (Davies e Taylor, 1950). As bolhas se movimentam de forma helicoidal e ocupam toda a seção transversal do duto.

- Agitado (*Churn flow*): Este regime é formado a partir da quebra das bolhas de Taylor provocado pelo aumento na vazão de gás no escoamento, apresentando um movimento mais caótico e configuração de bolhas distorcidas.

- Anular (*Annular flow*): Ocorre quando a vazão de gás atinge uma taxa muito elevada. O escoamento de gás se concentra na região mais interna do duto, enquanto a fase líquida se acumula nas paredes e forma um fio de líquido com pequenas ondulações na interface.

- Disperso (*Dispersed bubble flow*): Ocorre em condições de alta taxa de fluxo de líquido nas quais as fase gasosa se tornam dispersas em discretas bolhas dentro da fase contínua de líquido.

Figura 1: Padrões de escoamento em dutos verticais



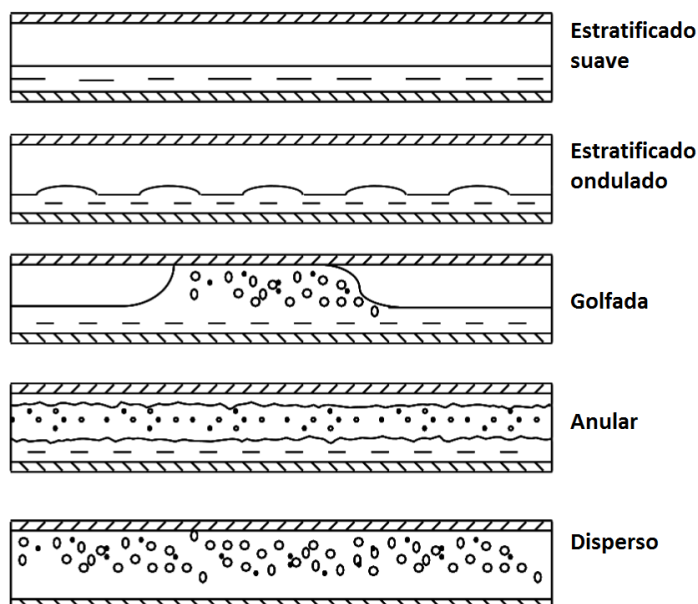
Fonte: Adaptado de Lin (2005)

2.1.1.2 Escoamento em dutos horizontais

Diferentemente do escoamento vertical, o escoamento horizontal é fortemente afetado pela gravidade. A fase de gás menos densa que a fase líquida, se concentra na parte superior da tubulação. Os padrões identificados e mais comuns em escoamento horizontal estão demonstrados na Figura 2 e podem ser classificados em: estratificado (suave e ondulado), golfadas, anular e disperso (Shoham, 2005).

- Estratificado (*Bubble flow*): As fases gasosa e líquida estão separadas uma da outra, muito em função da ação da força da gravidade. Este regime ocorre em escoamento com baixa vazão de gás e líquido. Um pequeno aumento em uma das fases gás/líquido ou nas duas fases gera ondas na interface entre as fases.
- Golfadas ou intermitente (*Slug flow e Plug flow*): Ocorre em escoamento com baixa vazão de gás ($JG < 1$ m/s) e também em elevada vazão de gás ($JG > 1$ m/s). Caracteriza-se pelo aumento das ondas na interface entre as fases. Algumas ondas são grandes o suficiente para tocar a parte superior do duto e provocar bolhas de gás.
- Anular (*Annular flow*): Apresenta vazão de gás mais elevada, a fase líquida passa a formar uma fina camada na parede do duto e o gás acumula na região central do duto.
- Disperso (*Dispersed bubble flow*): Ocorre em escoamento com baixa vazão de gás e alta vazão de líquido. O gás forma bolhas discretas no interior da fase líquida contínua. O aumento da vazão de gás torna esse regime mais homogêneo.

Figura 2: Padrões de escoamento em dutos horizontais



Fonte: Adaptado de Lin (2005)

2.1.2 Mapa de fluxo

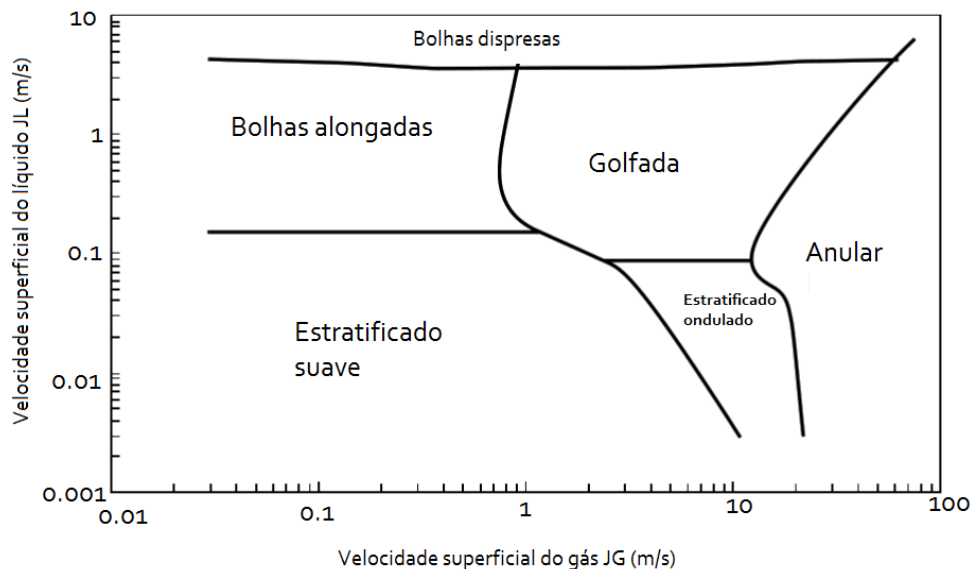
A identificação de um regime baseado em observações individuais é muito subjetiva e imprecisa. Até o momento não há um consenso sobre os padrões de

escoamentos por possuírem uma transição entre um regime e outro de forma gradual. Na literatura vários mapas de fluxos foram propostos para facilitar a classificação dos regimes de escoamento.

Mandhane *et al.* (1974) desenvolveram um mapa de regime de fluxo a partir das coordenadas de velocidade superficial do gás e do líquido. Os dados foram coletados a partir de mais de 6000 experimentos em dutos com diâmetros variando entre 1.27 cm e 16.5 cm. Esse modelo está limitado a determinadas condições de fluxo, tais como pressão, temperatura e geometria dos dutos. A Figura 3 mostra um exemplo desse tipo de mapa de regime para escoamento horizontal desenvolvido por Mandhane *et al.* (1974).

Taitel e Dukler (1976) desenvolveram um mapa de regime baseado em modelo mecânico, que dispensa a inserção de dados experimentais para identificar as transições.

Figura 3: Mapa de fluxo para escoamento em dutos horizontais (Mandhane, 1974).



Fonte: adaptado de Mandhane (1974)

2.1.3 Parâmetros

2.1.3.1 Fração de vazio

É um parâmetro muito importante para a análise experimental de escoamento gás-líquido. É calculado pela razão entre a área transversal ocupada pelo gás A_{gas} e

área transversal total do duto A_{total} conforme Equação 2.1-1. Da mesma forma para a fase líquida conforme Equação 2.1-2.

$$\alpha_G = \frac{A_{gas}}{A_{total}} \quad 2.1-1$$

$$\alpha_L = \frac{A_{liquido}}{A_{total}} \quad 2.1-2$$

$$A_{total} = A_{gas} + A_{liquido} \quad 2.1-3$$

Considerando valor unitário a área total da seção transversal do duto, então a Equação 2.1-4 pode ser utilizada para determinar uma ou outra variável.

$$\alpha_L + \alpha_G = 1 \quad 2.1-4$$

2.1.3.2 Velocidade superficial e velocidade da mistura

As Equações 2.1-5 e 2.1-6 referem-se ao cálculo das velocidades superficiais. Para o cálculo desta variável considera-se que escoar somente uma fase através da seção transversal do duto. A velocidade superficial é representada por j (m/s) sendo uma relação direta entre a vazão volumétrica Q dividida pela área total da seção transversal do duto A_{total} .

$$J_G = \frac{Q_{gas}}{A_{total}} \quad 2.1-5$$

$$J_L = \frac{Q_{liquido}}{A_{total}} \quad 2.1-6$$

A velocidade da mistura é definida como sendo a soma das velocidades superficiais de cada fase ou o fluxo volumétrico total por unidade de área conforme as Equações 2.1-7 e 2.1-8 respectivamente.

$$j = j_L + J_G \quad 2.1-7$$

$$j = \frac{Q_{total}}{A_{total}} \quad 2.1-8$$

2.2 TÉCNICAS PARA ANÁLISE DE ESCOAMENTO BIFÁSICO

Dada a importância da compreensão dos fenômenos envolvendo escoamento multifásico, o levantamento de parâmetros quantitativos e qualitativos são altamente desejáveis tanto nas áreas industriais quanto no campo da pesquisa. Para a indústria tem a função de contribuir para projetar plantas de produção, fabricação de tubulações, equipamentos, eficiência e seguranças das plantas industriais que utilizam desses equipamentos. No campo da pesquisa os estudos experimentais auxiliam no desenvolvimento de modelos teórico e validação de predições realizadas por simulações.

Uma grande variedade de técnicas estão disponíveis para o estudo experimental de escoamento bifásico. Dependendo do objetivo do estudo, determina a técnica pode ser aplicada. Fatores como tubulações opacas e/ou metálicas bem como condições extremas de operação envolvendo alta pressão e temperatura implicam em dificuldades na utilização destas técnicas.

A seguir, algumas técnicas de imageamento serão abordadas descrevendo algumas de suas principais características e limitações. Serão abordadas as técnicas por tomografia, câmera de alta velocidade e sondas de impedância.

2.2.1 Técnicas tomográficas

Processos por tomografia fornecem a distribuição espacial das interfaces entre as várias fases do escoamento multifásico e permitem identificar os padrões de escoamento presentes. As técnicas tomográficas abordadas são as técnicas nucleares por raio-X e raios gama e tomografia por impedância elétrica. Outras técnicas envolvem tomografia nuclear por ressonância magnética, tomografia ótica, e tomografia por ultrassom (Dyakowski, 1996).

2.2.1.1 Tomografia por raios-X e gama

Também conhecida como tomografia computacional, é uma tecnologia de escaneamento que utiliza uma fonte emissora para criar um conjunto de dados

tomográficos. Existe um variado número de formas para aplicar tomografia computacional com diferentes resoluções e aplicações, porém todas compartilham o princípio baseado em uma fonte de raio-X e uso de detectores para capturar a projeção de um objeto a partir de múltiplos ângulos. A captura pode ocorrer pela rotação do objeto ou pela utilização de várias fontes emissoras e detectores. Radiação nuclear como raio-X e raio gama são altamente penetrante devido ao comprimento de onda extremamente pequeno comparado as partículas dos objetos práticos. Os raios emitidos pela fonte atravessam os objetos sem sofrerem reflexão, porém a intensidade de sua radiação são atenuadas. O grau de atenuação depende da composição do material e tamanho do objeto, sendo diretamente proporcional à densidade do meio através do qual a radiação é transmitida. Amplamente utilizada na medicina para diagnóstico de tumores e tratamento de câncer, esta técnica também pode ser aplicada para análise de escoamento bifásico (Dyakowski, 1996) e recriar a imagem da distribuição espacial das interfaces entre as várias fases no interior do duto.

2.2.1.2 Tomografia por impedância elétrica

Tomografia elétrica (*Electrical Impedance Tomography* – EIT) tem como princípio explorar a interação do campo elétrico com o meio e tem atraído muita atenção como método não invasivo para mapear escoamento multifásico.

O objetivo principal de EIT consiste em determinar a permissividade ou condutividade que estão relacionada diretamente com a distribuição das fases do sistema. A técnica está subdividida em duas modalidades: tomografia por resistência elétrica (*electrical resistance tomography* – ERT) e tomografia por capacitância elétrica (*electrical capacitance tomography* – ECT). (CAO *et al.*, 2007) e (MARASHDEH *et al.*, 2007).

Em EIT os eletrodos são distribuídos igualmente ao redor do tubo. ECT é amplamente empregada para análise de fração de vazão em escoamento gás-líquido com líquidos não condutores como óleo e gás. A variação da capacitância capturada pelos eletrodos é proporcional a fração de gás e líquido que compõem a mistura dentro da tubulação. As fases da mistura devem necessariamente possuir permissividades diferentes. ERT é utilizado em aplicações envolvendo misturas de substâncias condutivas e são medidas a diferença de potencial pela aplicação de corrente

(CROWE, 2006). Os princípios de funcionamento de ambas as modalidades são semelhantes. Eletrodos transmissores são excitados alternadamente e sequencialmente enquanto eletrodos receptores captam o sinal. Algoritmos de reconstrução são empregados para processar os dados e gerar as imagens que serão analisadas. Tomografia elétrica tem muitas vantagens, tais como rapidez e alta taxa de captura de imagens, baixo custo e simples de operar. A desvantagem mais forte se dá pela resolução espacial moderada. Dyakowski (1996) traz maiores detalhes sobre medição por modalidades elétricas.

2.2.2 Câmera de alta velocidade

A aplicação de técnicas por câmera de alta velocidade em estudos de escoamento bifásico torna-se atrativa devido a algumas características vantajosas, tais como por ser uma técnica não invasiva, inovação tecnológica no desenvolvimento de novas instrumentações e algoritmos de processamento de sinal. A câmera de alta velocidade realiza aquisição de imagens em alta frequência que permitem obter os parâmetros de interesse no estudo de escoamento bifásico. Tendo em vista ser uma técnica de medição óptica é necessário alguns cuidados em tornar o ambiente adequado para realizar o experimento tais como, iluminação e dutos transparentes. Técnicas de processamento de imagem são aplicadas as imagens obtidas. Entre os estudos recentes desenvolvidos na área pode-se citar Mayour *et. All* (2008) que utilizou algoritmos de segmentação chamado *watershed* para processar as imagens e obter as bordas das bolhas e assim determinar as coordenadas espaciais i, j do objeto.

2.2.3 Sondas de impedância

Esta técnica utiliza sondas do tipo agulha para identificar as fases presentes no escoamento. A técnica explora a diferença de condutividade ou permissividade elétrica das substâncias. O funcionamento da técnica consiste de um eletrodo interno de excitação que é submetido a uma corrente alternada ou continua e outro eletrodo externo. Se a substância que entra em contato com a ponta da agulha for um bom condutor fecha o contato entre os dois eletrodos e cria uma circulação de corrente

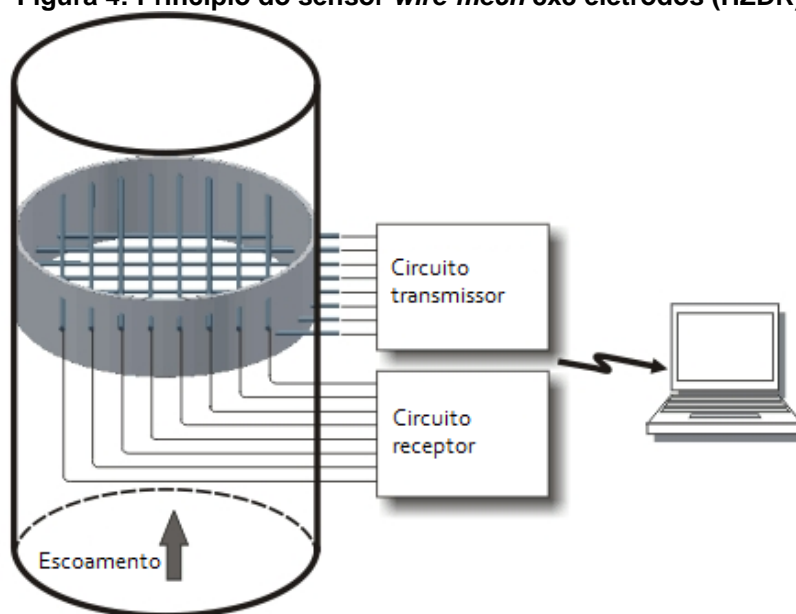
elétrica, caso contrário não há circulação de corrente. A corrente elétrica é convertida em um sinal de tensão proporcional e um valor limiar de ativação é definido para digitalizar os valores de tensão amostrados. Por exemplo, caso o valor de tensão medido seja maior que 1,9 V então o valor binário será 1 (um), caso contrário será 0 (zero). O valor binário representa a fase presente na ponta da agulha. A técnica depende de movimentação mecânica para obter melhor resolução espacial, que pode tornar sua aplicação lenta. Sondas não intrusivas baseadas na diferença de permissividade ou condutividade foram proposto por Cecci e George (1996) apresentam como principal vantagem alta taxa de aquisição, baixo custo e facilidade de manuseio.

2.3 SENSOR WIRE-MESH

O uso do sensor *wire-mesh*, ou malha de eletrodos foi proposto para visualização de escoamento bifásico primeiramente por Prasser *et al.* (1998). O sensor fornece boa resolução espacial e temporal do escoamento dentro do duto. O sensor é composto por duas malhas de fios paralelos mutuamente perpendiculares e totalmente separadas uma malha da outra por uma distância de 2 mm. Uma malha atua como receptor e a outra malha atua com emissor. Esse dispositivo mede a condutividade ou permissividade instantânea da mistura que flui dentro de um campo de medição em torno de cada nó nos pontos de cruzamento entre fios de cada malha. Um circuito de controle aplica sequencialmente pulsos de tensão na malha transmissora. A corrente que flui através de cada fio receptor é convertida em uma tensão proporcional à permissividade elétrica do fluido, o qual é gravado por um sistema computacional de aquisição.

A Figura 4 é um diagrama demonstrativo da disposição do sensor no interior da tubulação e a captação dos dados por um computador e a Figura 5 mostra um sensor com 16x16 eletrodos, 52 mm de diâmetro, 0.125 mm de diâmetro do fio e 2 mm de separação dos planos receptores e transmissores.

Figura 4: Princípio do sensor *wire-mech* 8x8 eletrodos (HZDR).



Fonte: <https://www.hzdr.de/>

Figura 5: Sensor *WM* 16x16. (HZDR)



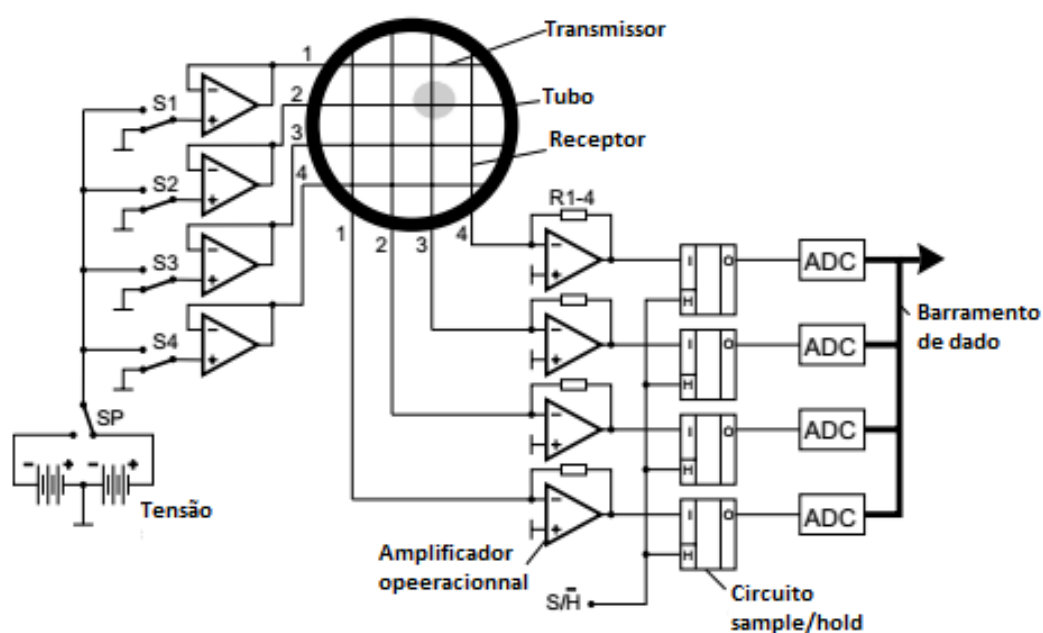
Fonte: <https://www.hzdr.de/>

Sensores *wire-mesh* podem ser do tipo condutivo e do tipo capacitivo conforme exibidos na Figura 6 e Figura 7 respectivamente. Para o sensor condutivo duas fontes de tensão são utilizadas e uma onda quadrada é gerada através das chaves S1- S4. Uma onda contínua provocaria eletrólise nos eletrodos. Um amplificador operacional transforma a corrente que chega no fio receptor em tensão. Esta corrente é proporcional a condutividade do sistema. O valor da tensão é então amostrado por um circuito *sample/hold* e em seguida passa por um conversor analógico/digital para ser

armazenado e processados por um computador. O procedimento se repete para cada eletrodo transmissor. Quando um eletrodo transmissor está ativo todos os outros são mantidos em potencial zero para evitar que os fios paralelos causem interferência um no outro e deteriore a medida. Desta forma a condutividade elétrica na seção transversal é obtida linha por linha. Após o último eletrodo transmissor ser ativado uma matriz com as medidas proporcionais da condutividade do sistema está disponível.

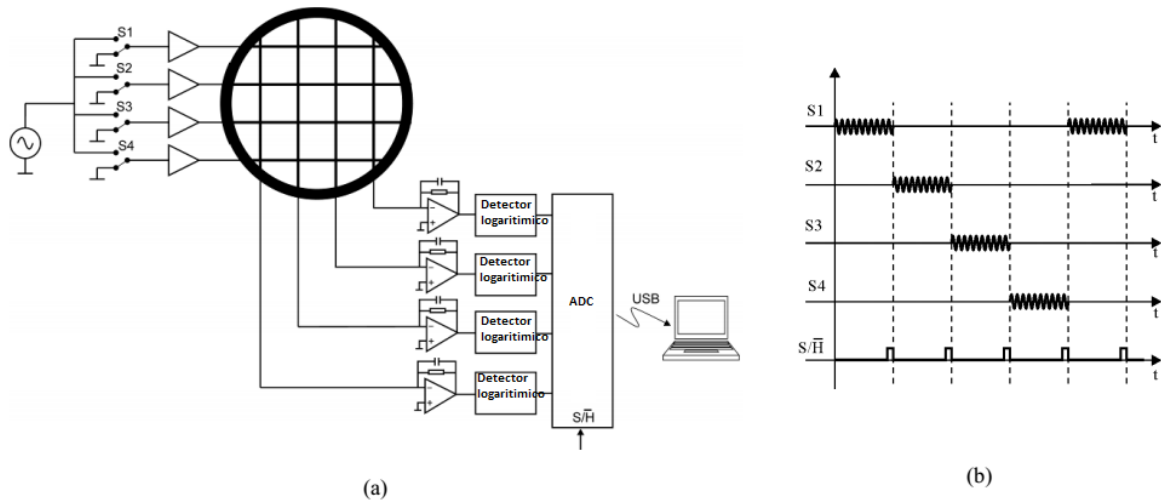
Em sensor do tipo capacitivo o processo de ativação dos eletrodos transmissores e aquisição dos dados é semelhante ao processo descrito anteriormente para o tipo condutivo. A tensão de excitação, no entanto é um sinal senoidal. Portanto é necessário um detector de sinal que atua como conversor de tensão AC para uma tensão proporcional DC no lado do circuito receptor.

Figura 6: Diagrama do sistema com sensor *wire-mesh* condutivo.



Fonte: adaptado de PRASSER et al., 1998

Figura 7: Diagrama do sistema com sensor *wire-mesh* capacitivo. (a) esquema elétrico, (b) esquema de ativação e amostragem quando ocorre o pulso de sincronia S/H.



Fonte: adaptado de DA SILVA et al., 2009

2.3.1 Processamento de dados

Os dados obtidos através do sensor *wire-mesh* são mapeados em uma matriz tridimensional $\alpha(i, j, k)$ com valores proporcionais a fração da fase. Os índices i e j representam a dimensão espacial da seção transversal do duto e denotam os fios do sensor. O índice k representa a dimensão temporal do escoamento (DA SILVA et al., 2009).

O circuito eletrônico gera uma tensão proporcional V a permissividade relativa ϵ_r do fluido que atravessa o ponto de cruzamento conforme a Equação 2.3-1 para cada campo de medição da matriz de malha do sensor.

$$V = a * \ln(\epsilon_r) + b \quad 2.3-1$$

onde a e b são constantes que englobam os parâmetros específicos do circuito eletrônico. Em um modelo de malha aberta a função logarítmica garante uma resposta rápida do sistema para uma larga faixa de permissividade sem a necessidade de ajustes. As constantes nesta equação serão diferentes para cada ponto de cruzamento (i, j) .

Para uma leitura confiável no circuito de saída do sistema é necessária uma rotina de calibração do sensor. Primeiramente a seção transversal do duto deve ser totalmente preenchida com uma substância de baixa permissividade ϵ_r^L e nesta situação obter a matriz $V^L(i, j)$. O passo seguinte consiste em preencher toda a seção

transversal do duto com outra substância de alta permissividade ε_r^H e obter uma segunda matriz $V^H(i, j)$. Desta forma ambas as constantes a e b podem ser obtidas pela Equação 2.3-1 e Equação 2.3-2 respectivamente.

$$a(i, j) = \frac{V^H(i, j) - V^L(j, j)}{\ln(\varepsilon_r^H) - \ln(\varepsilon_r^L)} \quad 2.3-1$$

$$b(i, j) = \frac{V^L(i, j) \ln(\varepsilon_r^H) - V^H(j, j) \ln(\varepsilon_r^L)}{\ln(\varepsilon_r^H) - \ln(\varepsilon_r^L)} \quad 2.3-2$$

Manipulando as equações obtém-se a Equação 2.3-3 que permite calcular a permissividade relativa para cada ponto de cruzamento do sensor

$$\varepsilon_r(i, j, k) = \exp\left(\frac{V - b(i, j)}{a(i, j)}\right) \quad 2.3-3$$

Conforme proposto por DA SILVA *et al.*, 2009 uma aproximação para a fração de vazio $\alpha(i, j)$ para cada cruzamento da malha do sensor a partir das permissividades calculadas pode ser obtida através da Equação 2.3-4.

$$\alpha(i, j, k) = \frac{\varepsilon_r^H - \varepsilon_r(i, j, k)}{\varepsilon_r^H - \varepsilon_r^L} \quad 2.3-4$$

Uma vez obtido os dados, algoritmos computacionais e processamento de imagem podem recriar o escoamento e permitir a identificação de bolhas e outras características do escoamento.

3 DESENVOLVIMENTO

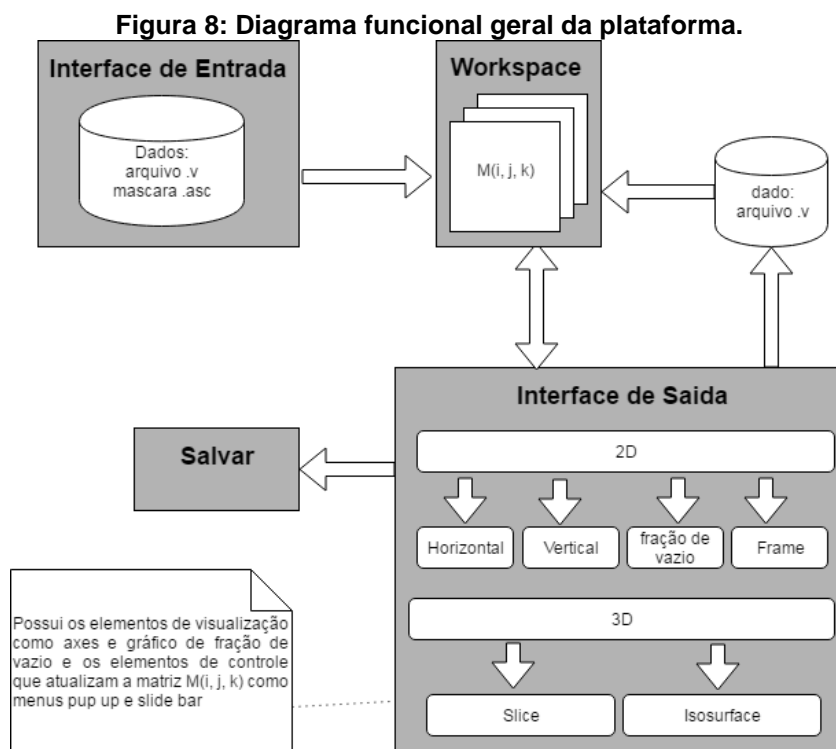
Nesse capítulo, em 3.1 são apresentados alguns dos principais diagramas propostos pela engenharia de software no levantamento de requisitos úteis para guiar e facilitar o desenvolvimento de software.

Na seção 3.2 descreve-se a ferramenta utilizada para desenvolvimento da plataforma, a técnica para leitura dos dados e o cálculo do parâmetro de fração de vazio.

3.1 ENGENHARIA DE SOFTWARE

Para descrever as principais funções e fluxos de execução do software foram elaborados o diagrama funcional, um diagrama de caso de uso, os diagramas de atividades e diagramas de sequência. Os diagramas não descrevem todas as funcionalidades do sistema ou ações que devem ser executadas, mas buscou-se criar uma representação aproximada para o fluxo dos principais procedimentos e atividades.

A Figura 8 mostra o fluxo de comunicação de dados entre os principais componentes da plataforma. Uma vez lidos os dados do disco rígido do computador por uma interface de entrada, uma matriz que representa o escoamento é alocada no conjunto de variáveis do MatLab, conhecido como *workspace*. Os dados são manipulados para recriarem a imagem do escoamento em 2D e 3D que serão exibidas em uma interface de saída. Se necessário o usuário pode salvar as imagens como figuras no disco rígido do computador.



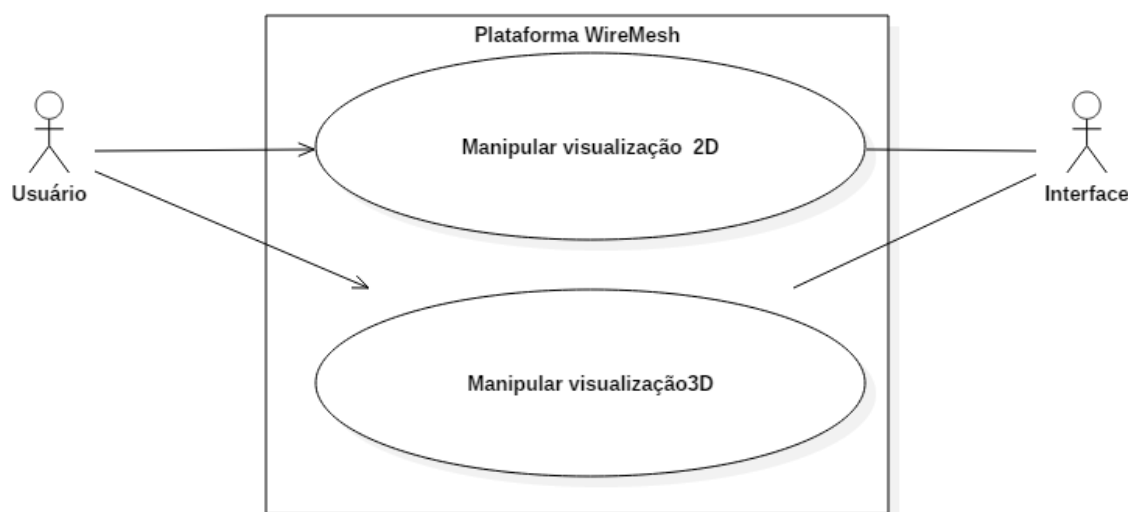
Fonte: autoria própria

3.1.1 Diagrama de caso de uso

A Figura 9 exibe uma representação esquemática da plataforma através de um diagrama de casos de uso. Um diagrama de casos de uso define como um ator ou conjunto de atores utilizam um sistema computacional para obter alguma informação ou atingir algum objetivo. Atores são definidos como sendo as pessoas ou dispositivos quaisquer que utiliza o sistema. Cada caso de uso é identificado por um círculo e as setas direcionadas indicam a navegabilidade (Pressman, 2011).

Foram definidos dois casos de uso principais: manipular a visualização 2D e manipular a visualização 3D. A Tabela 1 e Tabela 2 exibem as descrições formais para cada caso de uso. O campo *Objetivo no contexto* refere-se ao escopo geral do caso de uso. A *Precondição* descreve as condições que devem ser satisfeitas para o caso de uso se iniciado. O *Disparador* descreve o evento que inicia o caso de uso. O *Cenário* enumera as sequências de ações tomadas pelo ator e as respostas do sistema para cada ação. As *Exceções* identificam os motivos que podem gerar erros ou falhas de execução (Pressman, 2011).

Figura 9: Diagrama de caso de uso da plataforma.



Fonte: Autoria Própria.

Tabela 1: descrição formal do caso de uso manipular visualização 2D.

Plataforma <i>wire-mesh</i>	
Manipular visualização 2D	
Ator primário	Usuário
Ator secundário:	Interface
Objetivo no contexto:	Visualizar representação em 2D do escoamento identificando as fases gasosas e líquidas no interior do duto. O usuário deverá visualizar o escoamento através da seção transversal do duto e também a dimensão temporal.
Precondições:	Devem ser inseridos o arquivo binário com os dados do escoamento coletado experimentalmente e o arquivo de máscara contendo a matriz dos coeficientes do sensor <i>wire-mesh</i> , ambos arquivos são descritos em 3.2.1 e em 3.2.2 respectivamente; devem ser informados a frequência de aquisição de dados e configuração de malha do sensor.
Disparador:	O usuário (pesquisadores/estudantes) precisam fazer análise dos dados coletado experimentalmente.
Cenário:	<ol style="list-style-type: none"> 1. O usuário insere o arquivo de dados amostrados pelo sensor. 2. O usuário insere o arquivo com a máscara para a configuração de sensor utilizado no experimento. Cada sensor tem um arquivo de máscara específico adequando a quantidade de

eletrodos e as dimensões do campo de medição em torno de cada eletrodo.

3. O usuário insere a frequência de aquisição
4. O usuário insere a configuração de malha do sensor.
5. A interface exibe as imagens lateral e superior de dois sensores simultaneamente.
6. A interface exibe as imagens da seção transversal do duto de dois sensores simultaneamente
7. A interface exibe os gráficos da série temporal da fração de vazão de cada sensor.
8. O usuário seleciona entre as abas de escoamento vertical ou escoamento horizontal.
9. O usuário pode ajustar uma outra configuração ou passar ao passo 11:
 - Quantidade de *frames* para visualizar (aumentar/diminuir).
 - Selecionar outro eletrodo para visualizar imagem lateral ou superior.
10. A interface exibe nova imagem do escoamento.
11. O usuário seleciona um dos sensores.
12. O usuário pode deslizar o escoamento manipulando ferramentas de interação como barras de rolagem de forma a percorrer toda a dimensão temporal do escoamento.
13. O usuário pode salvar imagem do escoamento em formato PNG.

Exceções:

1. Não foi possível ler o arquivo binário com dados do escoamento.
 2. Usuário informou um índice inexistente para visualização lateral ou superior.
 3. O usuário inseriu arquivo de máscara com a matriz de coeficiente de ajuste incorreta e que não corresponde com a configuração de malha do sensor utilizado no experimento.
 4. O usuário inseriu informação errada ou inválida para a configuração de malha do sensor.
-

Tabela 2: descrição formal do caso de uso manipular visualização 3D.

Plataforma <i>wire-mesh</i>	
Manipular visualização 3D	
Ator primário	Usuário
Ator secundário:	Interface
Objetivo no contexto:	Visualizar representação em 3D do escoamento através das funções <i>slice</i> e <i>isosurface</i> nativas da ferramenta MatLab. O funcionamento destas técnicas são explicadas em detalhes na documentação do MatLab com exemplos práticos fáceis de serem implementados. A documentação está disponível na internet ou no <i>help</i> do ambiente. Para acessar basta usar o comando <i>help slice/isosurface</i> .
Precondições:	Deve ser informado o arquivo binário com os dados do escoamento coletado experimentalmente; deve ser informado configuração de malha do sensor.
Disparador:	O usuário (pesquisadores/estudantes) precisa fazer análise dos dados coletados experimentalmente.
Cenário:	<ol style="list-style-type: none"> 1. O usuário identifica através da interface 2D uma bolha e o <i>frame</i> de início e <i>frame</i> de fim em que a bolha está localizada. 2. O usuário seleciona aba de visualização 3D. 3. O usuário seleciona o arquivo de dados. 4. O usuário informa os <i>frames</i> de início e fim para visualizar. 5. O usuário ajusta entre escoamento vertical ou horizontal 6. A interface exibe as imagens 3D utilizando as funções <i>slice</i> e <i>isusurface</i> simultaneamente. 7. A interface exibe as ferramentas de interação como barras de rolagem e botões. 8. O usuário pode apertar o botão <i>rotate</i> para pode girar as imagens 3D. 9. O usuário pode salvar as imagens 3D em formato PNG.
Exceções:	O usuário informou um intervalo de <i>frames</i> invalido.

3.1.2 Diagrama de atividades

Os diagramas descritos anteriormente representam modelos estáticos do modelo de requisitos. Um modelo comportamental dinâmico do sistema descreve como o sistema reage a estímulos ou eventos externos em função do tempo e eventos específicos. Um evento pode ser definido como a troca de informação entre os atores que interagem e objetos que compõem o sistema (Pfleeger, 2004).

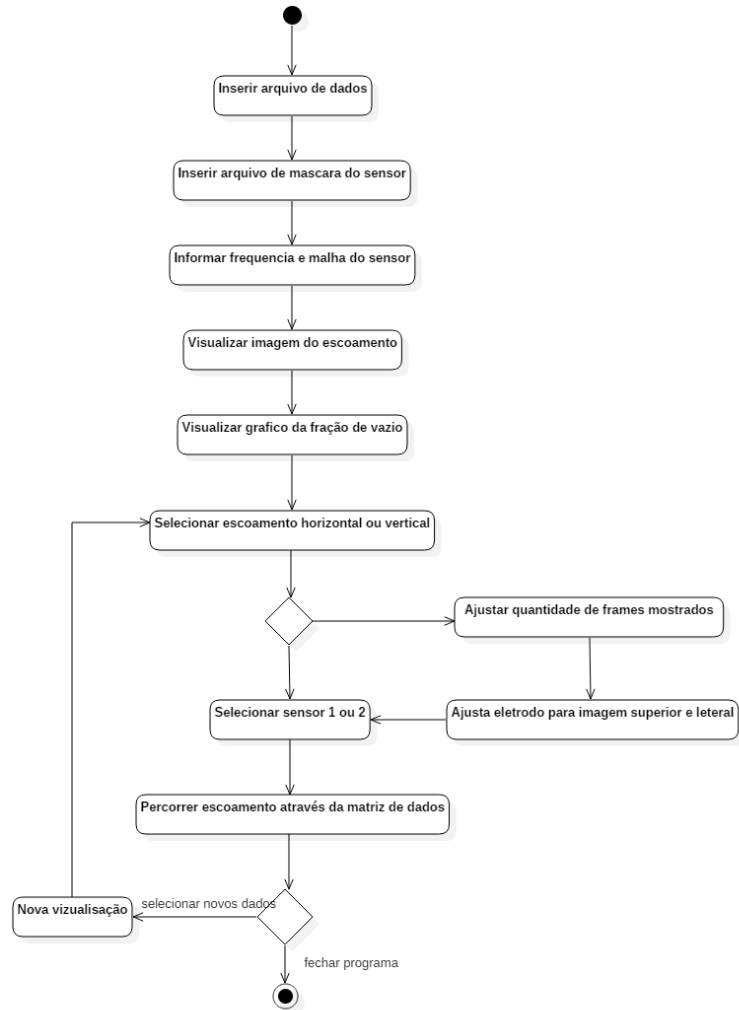
Um diagrama de atividade é uma representação gráfica do fluxo de atividades em um cenário particular sendo útil para complementar o caso de uso pois acrescenta detalhes que geralmente não são mencionados no caso de uso. Pontos pretos preenchidos representam o início da atividade e pontos pretos preenchido dentro de um ponto branco indicam o final. As funções do sistema são representadas por retângulos com cantos arredondados e as setas direcionadas representa a transição de um estado para outro. Losangos representam tomada de decisão onde cada seta que sai do losango é identificada (Pressman, 2011).

Os diagramas de atividade dos casos de uso manipular visualização 2D e manipular visualização 3D são exibidos na Figura 10 e Figura 11 respectivamente.

No diagrama de atividades na Figura 10 após o usuário abrir a janela de aquisição de dados, o sistema aguardará que todos os dados e informações sejam inseridos. No passo seguinte o usuário deverá selecionar entre escoamento em dutos horizontais ou verticais. Então poderá ou fazer ajustes nas quantidades de frames visualizado e alterar as imagens lateral e superior exibidas ou então escolher qual sensor interagir.

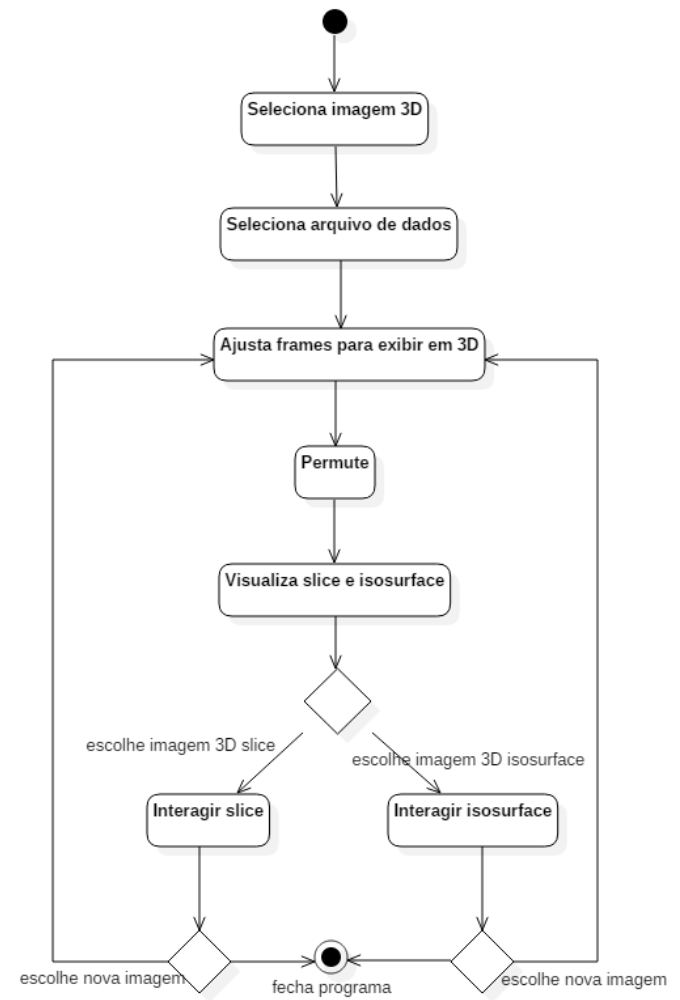
No diagrama de atividades exibido na Figura 11 o usuário primeiramente deverá selecionar a aba de exibição 3D e então escolher o arquivo de dados. Após ajustar o intervalo de frames que contém a bolhas de gás e permutar a matriz de dados para ajustar entre escoamento horizontal ou vertical será exibido a imagem em 3D do escoamento construídas através das funções *slice* e *isosurface*. O usuário então seleciona qual das imagens interagir

Figura 10: Diagrama de atividades para a função visualizar 2D.



Fonte: Autoria própria

Figura 11: Diagrama de atividades para a função visualizar 3D.



Fonte: Autoria própria

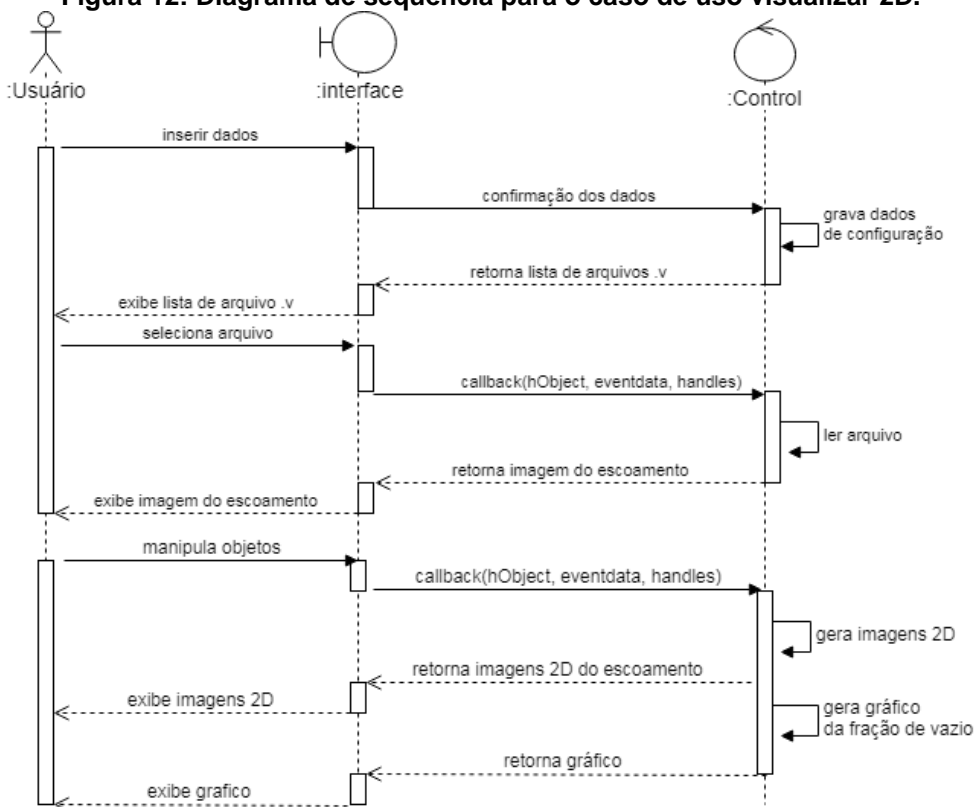
3.1.3 Diagrama de sequência

Um diagrama de sequência é um tipo de representação comportamental do sistema em função do tempo. Neste diagrama estão identificados os principais objetos do sistema e como os eventos provocam transições de objeto para objeto. O tempo é representado verticalmente por linhas tracejadas sentido de cima para baixo conhecida como linha da vida. Símbolos no topo desta linha representam os objetos e os retângulos na vertical junto a linha da vida representam o tempo de processamento de uma atividade. As setas entre duas linhas da vida representam uma mensagem entre dois objetos e quando as setas voltam para o mesmo objeto significa que o objeto está enviando uma mensagem para si próprio (Pressman, 2011).

A Figura 12 e a Figura 13 exibem os diagramas de sequência para os casos de uso visualizar 2D e visualizar 3D respectivamente. São identificados três objetos principais: usuário, interface e controle.

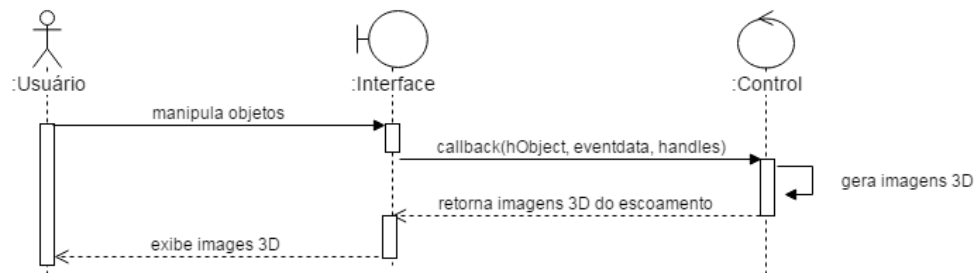
Na Figura 12 ao inserir os dados um evento de confirmação dos dados é enviado ao controle que grava as configurações de dados e retorna uma mensagem com a lista de arquivos de dados do escoamento. Ao selecionar um arquivo a interface ativa uma função de *callback* para ler o arquivo e retornar a imagem do escoamento que será então exibida ao usuário. Após esse processo de inserção de dados, ao identificar que o usuário manipulou alguma ferramenta de interação a interface ativa a função de *callback* correspondente. Para a visualização 2D o controle gera a imagens 2D e gráfico temporal da fração de vazio que são então retornadas a interface e exibida ao usuário sequencialmente. Para visualização 3D apenas as imagens 3D são retornadas e exibidas ao usuário (Figura 13).

Figura 12: Diagrama de seqüência para o caso de uso visualizar 2D.



Fonte: Autoria própria

Figura 13: Diagrama de seqüência para o caso de uso visualizar 3D.



Fonte: Autoria própria

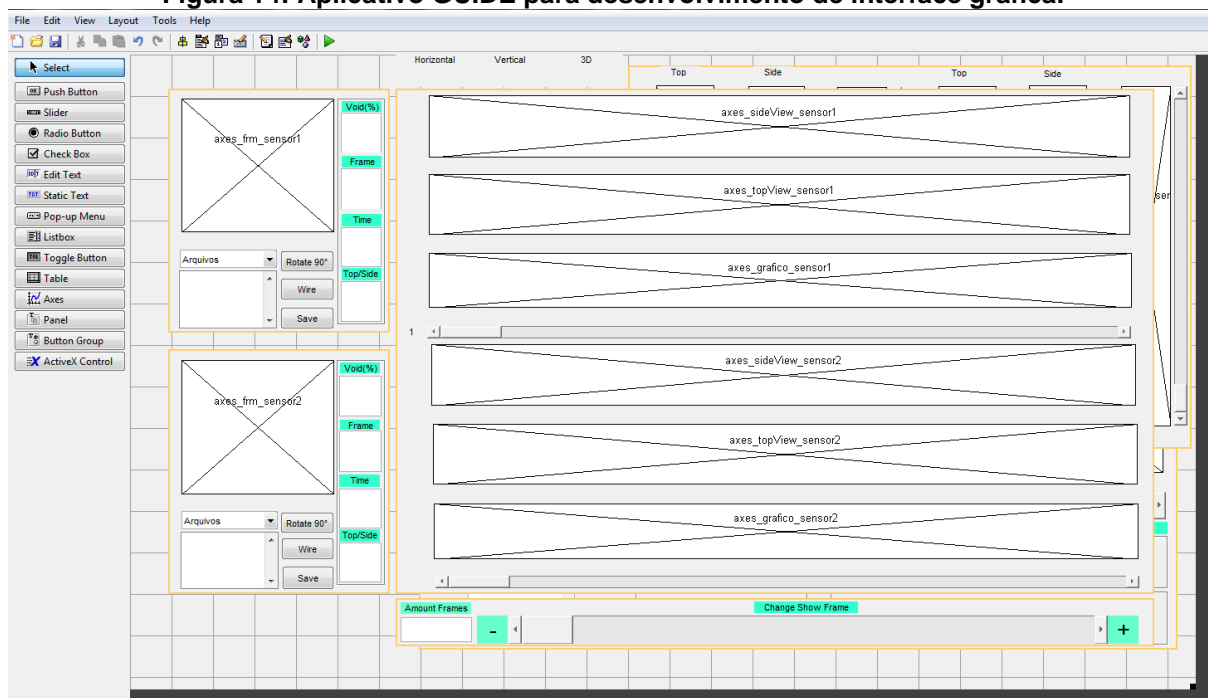
3.2 SOFTWARE

O software foi desenvolvido em linguagem MatLab através do ambiente de desenvolvimento MatLab 2014a. Este ambiente de desenvolvimento possui um aplicativo interativo chamado GUIDE (*Graphical User Interfaces Development Environment*) para auxiliar o desenvolvimento de aplicativos MatLab com interfaces gráficas. Este aplicativo contém elementos como menus, barras de tarefas, botões,

sliders, *axes*, e outros que podem ser facilmente adicionados à interface gráfica. A Figura 14 mostra a janela de desenvolvimento do GUIDE. Com o editor GUIDE o código da interface de usuário é gerado automaticamente e o desenvolvedor pode então programar o comportamento do aplicativo.

A máquina utilizada para o desenvolvimento foi um computador HP *Compac* com processador Intel Dual Core T4300, 3 GB de memória RAM e 300 GB de HD e sistema operacional Windows 7 32 bits.

Figura 14: Aplicativo GUIDE para desenvolvimento de interface gráfica.



Fonte: Autoria própria

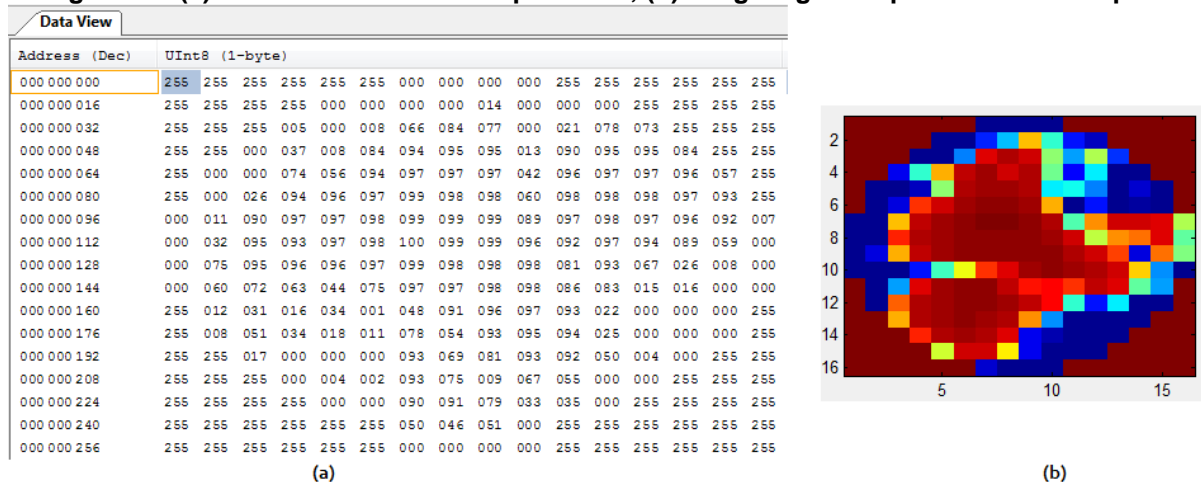
3.2.1 Dados do Sensor *Wire-Mesh*

As amostras do sensor *wire-mesh* são armazenadas em arquivo binário “.v”. A partir da leitura deste arquivo é montada uma matriz com esses valores lidos. Cada valor na matriz é representado por 8 bits e corresponda a fração de vazío do campo de leitura em cada cruzamento da malha de eletrodos.

A estrutura interna do arquivo é muito simples, composta apenas dos valores medido pelos eletrodos que são proposicionais a fração de fase de cada substância. A Figura 15 exhibe uma pequena parte da estrutura interna de um arquivo “.v” produzido por um sensor de malha de eletrodos 16X16 fios e a imagem da seção transversal do

frame correspondente produzida pela leitura do arquivo. Os dados são exibidos em decimal para facilitar a visualização. As velocidades superficiais de líquido e de gás são $JL = 0,25$ m/s e $JG = 0,81$ m/s respectivamente. A fase líquida corresponde ao valor zero no arquivo e cor azul na imagem e fase gasosa corresponde ao valor 100 e cor vermelha na imagem. Os Campos de medição (Figura 19) fora do duto são representados pelo valor 255 no arquivo. A variação de tonalidade entre os tons de azul e vermelho ocorre devido ao preenchimento parcial do campo de medição, mais comum próximo a interface entre as fases.

Figura 15: (a) estrutura interna do arquivo ".v"; (b) imagem gerada pela leitura do arquivo.

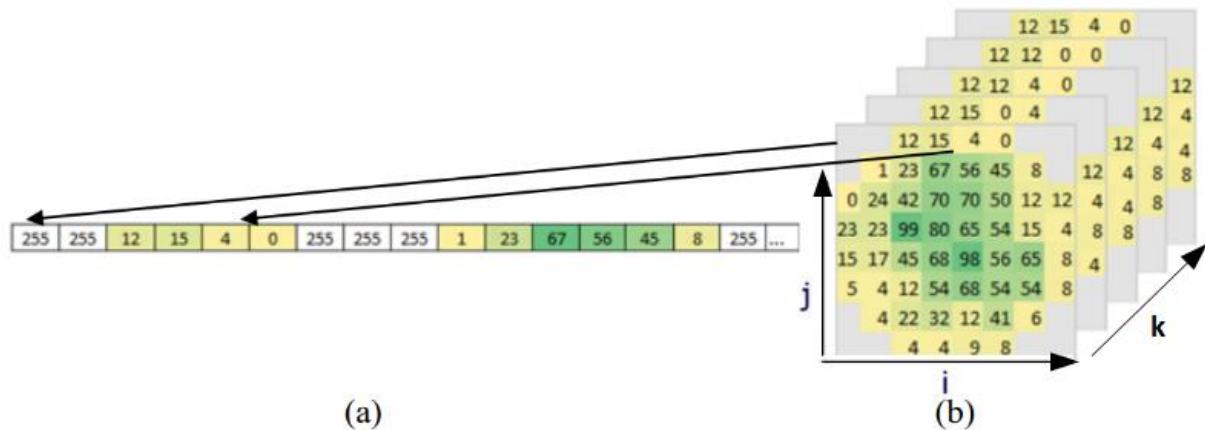


Fonte: autoria própria.

A função `read_v_file` que (Figura 17) faz a leitura do arquivo `.v` gerado a partir dos dados coletados pelo sensor `wire-mesh`. A função nativa `fread` devolve na variável `data_wms` uma matriz de dados 2D de w linhas por n colunas. A função nativa `reshape` remodelar a matriz `data_wms` em uma matriz de dados 3D $M(i, j, k)$ de dimensões w por w por n_{frm} . Uma vez feita a leitura dos dados, a matriz 3D $M(i, j, k)$ é alocada no `workspace` do `MatLab`. Os parâmetros i e j representam o índice espaciais do sensor e o parâmetro k representa o índice temporal. A função necessita de quatro argumentos de entrada que representam a identificação do arquivo `.v`, a configuração de malha do sensor, a quantidade de dados que dever ser lido e o ponto de início de leitura respectivamente. O argumento `st` se omitido assume o valor zero significando que a leitura deve ser feita a partir do início do arquivo. O argumento `fr` é importante para evitar estouro de memória.

Uma representação vetorial e espacial do arquivo `.v` e da matriz de dados gerada é exibida na Figura 16.

Figura 16: (a) representação vetorial do arquivo .v; (b) representação da espacial do arquivo .v na matriz $M(i,j,k)$



Fonte: SANTOS. 2011

Figura 17: Função `read_v_file` MatLab.

```

%%
%function read v file
%%
function [data_wms, n_frm] = read_v_file(file, w, st, fr)
    if nargin < 3
        st = 0;
    elseif nargin > 4
        error(message('MATLAB:narginchk:tooManyInputs'));
    end
    fp = fopen(file, 'r');
    fseek(fp, st*w*w, 'cof');
    [data_wms, c] = fread(fp, [w, fr], '*uint8');
    n_frm = c/w/w;
    data_wms = reshape(data_wms, w, w, n_frm);
    fclose(fp);
end

```

Fonte: Autoria própria

3.2.2 Fração de vazio

O valores médios da fração de vazio podem ser calculados com base na série temporal integrando os valores da fração de vazio da seção transversal conforme a Equação 3.2-2.

$$\alpha(k) = \sum_{j=1}^n \sum_{i=1}^n A_{i,j} \cdot \alpha(i, j, k) \quad 3.2-1$$

Onde n é o número de eletrodos para a configuração e $A_{i,j}$ representa o coeficiente de contribuição para cada cruzamento na malha de eletrodos do sensor.

Os coeficientes de contribuição são valores das frações das áreas dos campos de medição em relação a área total da seção de escoamento que é tomada para cada

ponto de cruzamento entre os eletrodos transmissores e receptores, de acordo com a Equação 3.2-3.

$$\alpha_{i,j} = \frac{4A_{campo}}{\pi d^2} \quad 3.2-2$$

A matriz de coeficiente $A_{i,j}$ tem a função de remover os pontos de medição muito próximos a parede da tubulação e compensar pequenas áreas que nenhum campo de medição alcança (Figura 19). Essa matriz é única e específica para cada geometria, sendo que suas dimensões correspondem as dimensões do sensor.

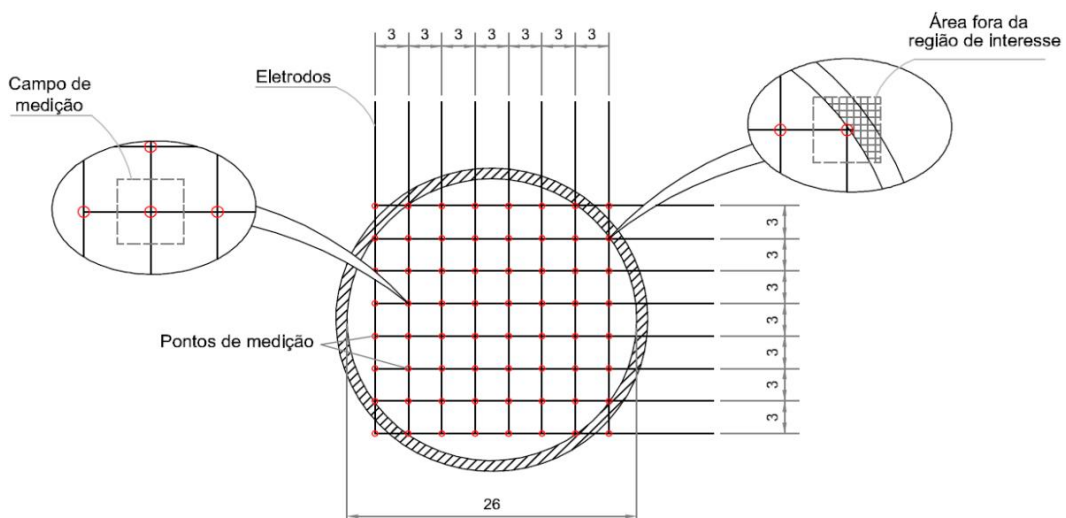
Para o sensor de configuração de malha 8x8 a matriz de coeficiente exibida na Figura 18 o valor 0,016951 mais comum corresponde à área de 9 mm² dos campos quadrados na região interna da tubulação. Os valores mais externos na matriz são diferentes para ser possível fazer as correções necessárias nas regiões próximas a parede. Medições fora da tubulação são anulados pelos zeros na extremidade da matriz.

Figura 18: Matriz de coeficientes para a correção de fração de vazios.

$$A_{i,j} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0.022318 & 0.021945 & 0.021945 & 0.022318 & 0 & 0 \\ 0 & 0.025863 & 0.016951 & 0.016951 & 0.016951 & 0.016951 & 0.025863 & 0.022318 \\ 0.022318 & 0.016951 & 0.016951 & 0.016951 & 0.016951 & 0.016951 & 0.016951 & 0.021945 \\ 0.021945 & 0.016951 & 0.016951 & 0.016951 & 0.016951 & 0.016951 & 0.016951 & 0.021945 \\ 0.021945 & 0.016951 & 0.016951 & 0.016951 & 0.016951 & 0.016951 & 0.016951 & 0.021945 \\ 0.022318 & 0.016951 & 0.016951 & 0.016951 & 0.016951 & 0.016951 & 0.016951 & 0.022318 \\ 0 & 0.025863 & 0.016951 & 0.016951 & 0.016951 & 0.016951 & 0.025863 & 0 \\ 0 & 0 & 0.022318 & 0.022318 & 0.022318 & 0.022318 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

Fonte: Autoria própria

Figura 19: Ilustração do campo de medida pelo sensor *wire-mesh*.



Fonte: SANTOS, 2011

4 TESTES E RESULTADOS

Este capítulo dedica-se a mostrar os resultados obtidos a partir de dados para escoamento vertical e horizontal para diferentes padrões de escoamento e diferentes configurações de malha de sensor *wire-mesh*.

Em 4.1 são mostrados os resultados referentes a leitura dos dados do sensor *wire-mesh*.

Em 4.2 são mostrados os resultados para a visualização 2D. Também é mostrado nesta seção os parâmetros e as informações do escoamento obtidos pela plataformas. A subseção 4.2.2 está focada em discutir as características visuais dos padrões de escoamento apresentadas na imagem.

Em 4.3 são mostrados as representações em três dimensões do escoamento tanto aplicando as técnicas *slice* e *isosurface*.

4.1 LEITURA DOS DADOS

Para as configurações da máquina utilizada foi possível ler $32 \cdot 10^6$ caracteres binários do arquivo “.v”. Portanto para ler todo o arquivo “.v” são feitas leituras em blocos de dados por vez, sendo que o próximo bloco que será lido tem início a partir do final do último bloco lido. A Tabela 3 apresenta as características da matriz de dados $M(i, j, k)$ alocada no *workspace* do ambiente matLab para dados de cada configuração de malha de eletrodos do sensor *wire-mesh*.

Tabela 3: Característica de $M(i, j, k)$ para cada configuração de malha de eletrodos do sensor *wire-mesh*.

Caracteres	Malha	Nº frames	M (i, j, k)	Frequência (Hz)	Tempo (s)	Arquivo .v (Kb)
380,531.2	8	59458	8X8X59458	500	118	3,5
32,000.000	16	125000	16x16x125000	5000	25	150
32,002.048	64	7813	64x64x7813	5000	1,5626	100

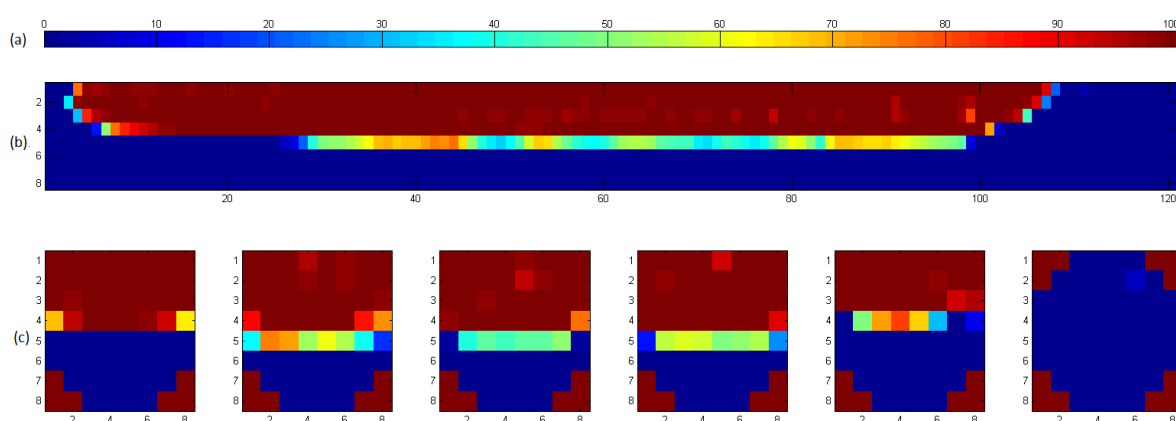
Fonte: Autoria Própria

4.2 VIZUALIZAÇÃO 2D

4.2.1 Escoamento Horizontal

Os dados de teste para escoamento horizontal foram coletados a partir de planta experimental instalada no NUEM, equipado para reproduzir escoamento gás-líquido em uma tubulação de 26 mm de diâmetro e 9,2 m de comprimento. São dados coletados por um sensor *wire-mesh* de configuração de malha de eletrodos 8x8 e 500 Hz de frequência de amostragem. As velocidades superficiais JL e JG obtidas para este escoamento foram ambas iguais a 0,5 m/s que classifica este escoamento dentro do padrão golfadas. Uma vez inserido o arquivo dos dados, o escoamento pode ser imageado em sua dimensão axial (Figura 20-c) que representa a seção transversal do duto. Combinando várias sequências de quadros pode-se imagear também no domínio do tempo e criar uma visão do eixo z a partir da matriz 3D (Figura 20-b) que representa uma visualização lateralmente do escoamento no interior da tubulação. A Figura 20-a, mostra a paleta de cores onde azul representa fase líquida e vermelho representa a fração de vazio contendo apenas a fase de gás.

Figura 20: (a) Paleta de cores; (b) imagem de uma bolha em um corte axial; (c) corte transversal do escoamento.



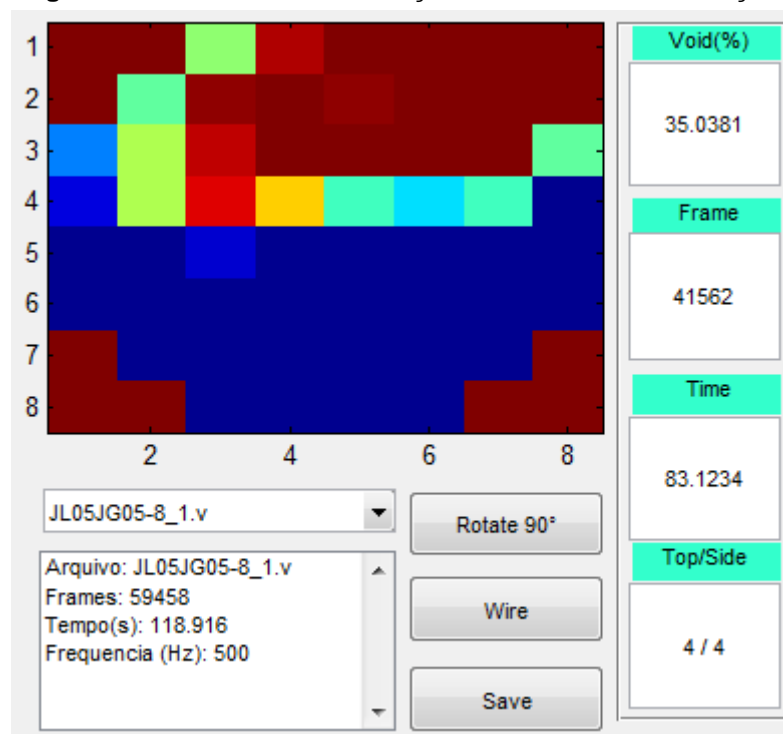
Fonte: Autoria própria

4.2.1.1 Extração de parâmetros

A Figura 21 mostra o *frame* que atravessa toda a seção transversal do sensor. O *frame* que está sendo amostrado é exibido no campo *frame* e as respectivas fração de vazio e tempo em segundos nos campos *void (%)* e *Time(s)*. O campo *top/side*

mostra os índices da malha de fios do sensor que está sendo amostrado para criar a representação lateral e superior do escoamento. Informações referentes ao nome do arquivo “.v” que contém os dados, a quantidade de frames, tempo gasto para amostrar essa quantidade e a frequência de amostragem são exibidos na caixa de texto.

Figura 21: Frame através da seção transversal da tubulação.



Fonte: Autoria própria

A Figura 22 e Figura 23 apresentam visualização 2D do escoamento para uma largura de visualização ajustado para mostrar de 610 *frames* e 2330 *frames* respectivamente. São exibidos uma vista lateral(*side*) e superior(*top*) junto ao mapa da fração de vazio do escoamento que flui no interior da tubulação. Janelas de visualização muito larga provoca lentidão na plataforma devido a expressivo aumento da quantidade de dados para ser processados. O mapa de fração de vazio traz a faixa de intervalo de tempo em segundos correspondente ao tempo que foi amostrado aquela largura de frame que está sendo visualizado. Na Figura 22 o tempo de amostra foi de 1,2 segundo. Na Figura 23 o tempo varia de 83 segundos a 88 segundos.

O anexo A - apresenta as visualizações laterais e superiores do escoamento variando os índices da malha dos eletrodos do sensor.

Figura 22: Interface de visualização 2D da sequência temporal de 600 frame para visão com corte lateral e superior e o mapa de vazios com o intervalo de tempo dos frames visualizados.

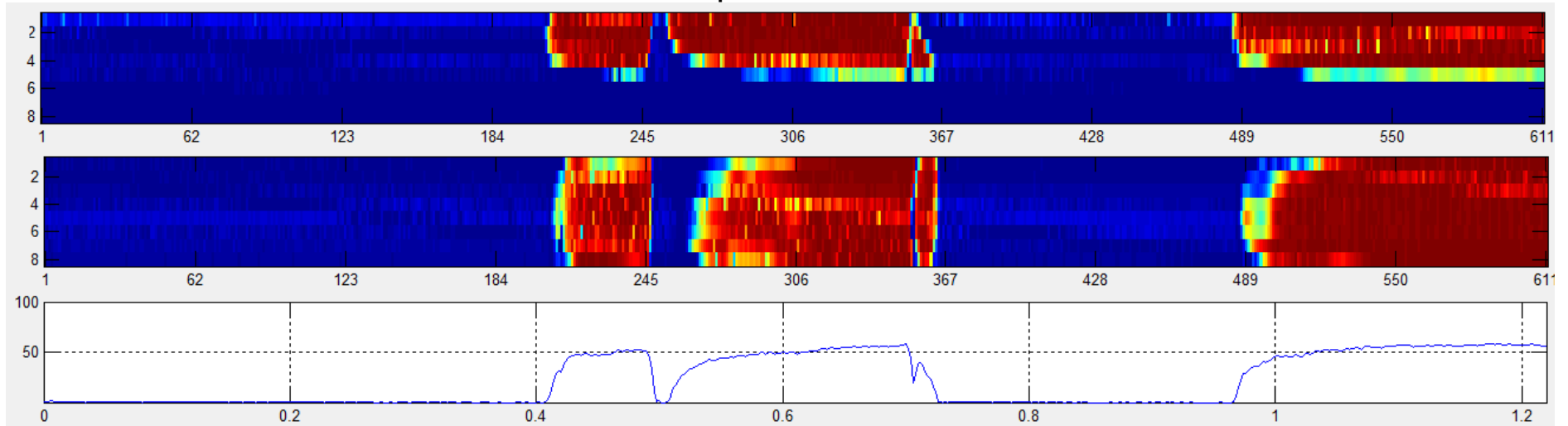
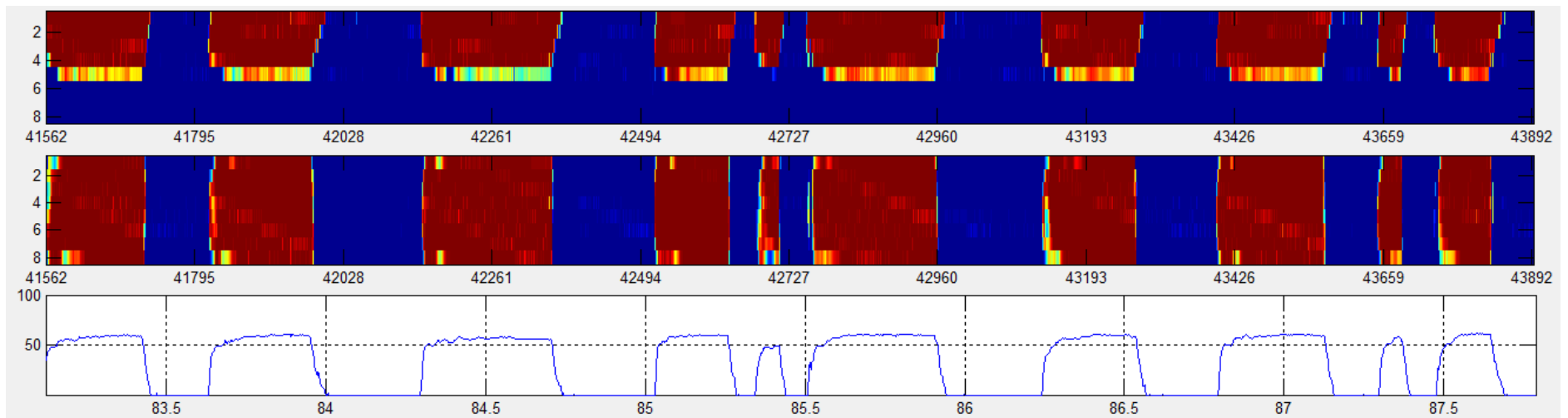


Figura 23: Sequência temporal e mapa de para visualização de 2330 frames.

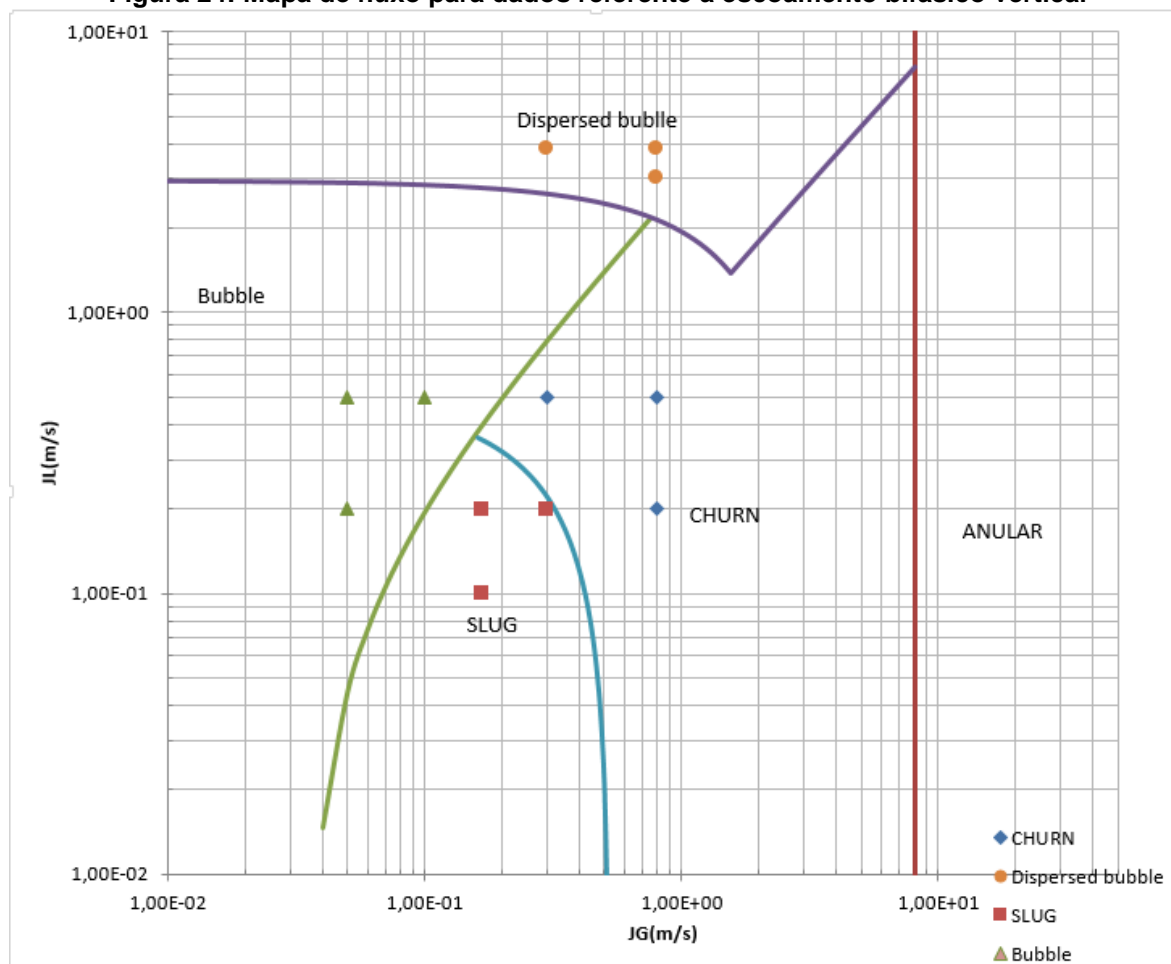


4.2.2 Escoamento Vertical

Os dados de testes para escoamento vertical foram fornecidos pelo Núcleo Escoamento Multifásico (NUEM) da UTFPR. São dados coletados com sensor *wire-mesh* de configuração de malha 16x16 eletrodos e a frequência de aquisição foi de 5000 Hz.

A Figura 24 mostra o mapa de fluxo para três diferentes combinações de valores de velocidade superficial do líquido J_L em m/s e velocidade superficial do gás J_G em m/s . Foram classificados os padrões de escoamento Golfadas ou intermitente (*slug*), Bolhas (*bubble*), Agitado (*churn*) e Disperso (*Dispersed bubble*) de acordo com o mapa de fluxo para padrões de escoamento vertical proposto por TAITEL *et al.* (1980), segundo o qual o escoamento apresentará sempre esse mesmo aspecto independentemente da combinação de fluido e do estado termodinâmico dos mesmos.

Figura 24: Mapa de fluxo para dados referente a escoamento bifásico vertical



A imagem do escoamento para os padrões golfada, agitado, bolhas e disperso são exibidas junto ao gráfico da fração de vazão tomada para três configuração de velocidades superficiais com JL constante e alterando JG e vice-versa JL alterando e JG constante.

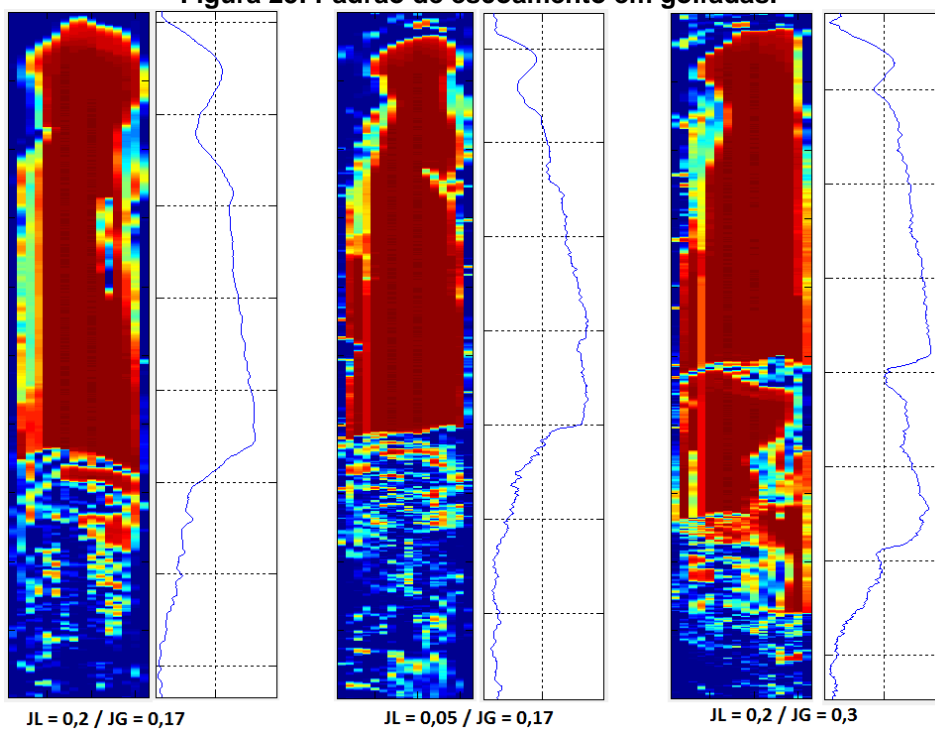
Para esses vários padrões de escoamento as imagens são eficazes em fornecer informações qualitativas sobre o escoamento. Pela análise das imagens observa-se que as funções utilizadas para criar a visualização do escoamento apresenta uma boa resolução sendo possível perceber semelhança dos padrões de bolha visualizado com a descrição de cada padrão proposto na literatura. Portanto é possível validar as técnicas de visualização, leitura e tratamento dos dados.

Para os padrões golfada na Figura 25 e agitado na Figura 26 observa-se bolhas bastante alongadas e que preenchem quase a totalidade da seção transversal do sensor com bordas arredondadas no início ou nariz da bolha e achatadas no final ou calda da bolha. Apesar de parecer similar os padrões golfadas e agitado, este último é mais caótico e a interface entre as duas fases é mais confusa. A diferença entre os dois padrões pode ser melhor percebida olhando o mapa de fração de vazão. No padrão golfada a linha do gráfico apresenta contornos mais suaves comparadas com a linha do padrão agitado.

A menor definição nas pequenas bolhas para o padrão de escoamento disperso na Figura 28 ou que acompanham bolhas de Taylor podem ser explicada pela limitação na resolução espacial. Sensor com maior resolução implica distancia menor entre os eletrodos e conseqüentemente maior resistência ao escoamento. Contudo, uma sensor com maior resolução dispõe de um maior grau de intrusividade ao escoamento.

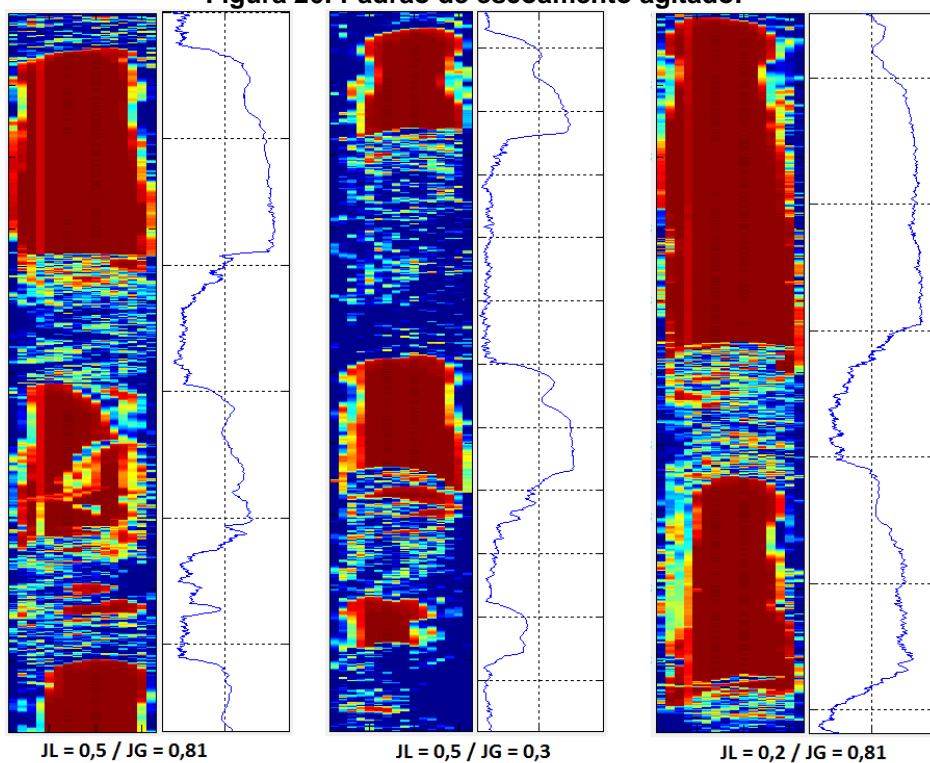
Para o padrão bolhas exibido na Figura 27, as bolhas estão dispersas em um meio contínuo de líquido e apresentam baixa fração volumétrica. Observa-se que maior concentração de bolhas com o aumento na velocidade superficial JG do gás.

Figura 25: Padrão de escoamento em golfadas.



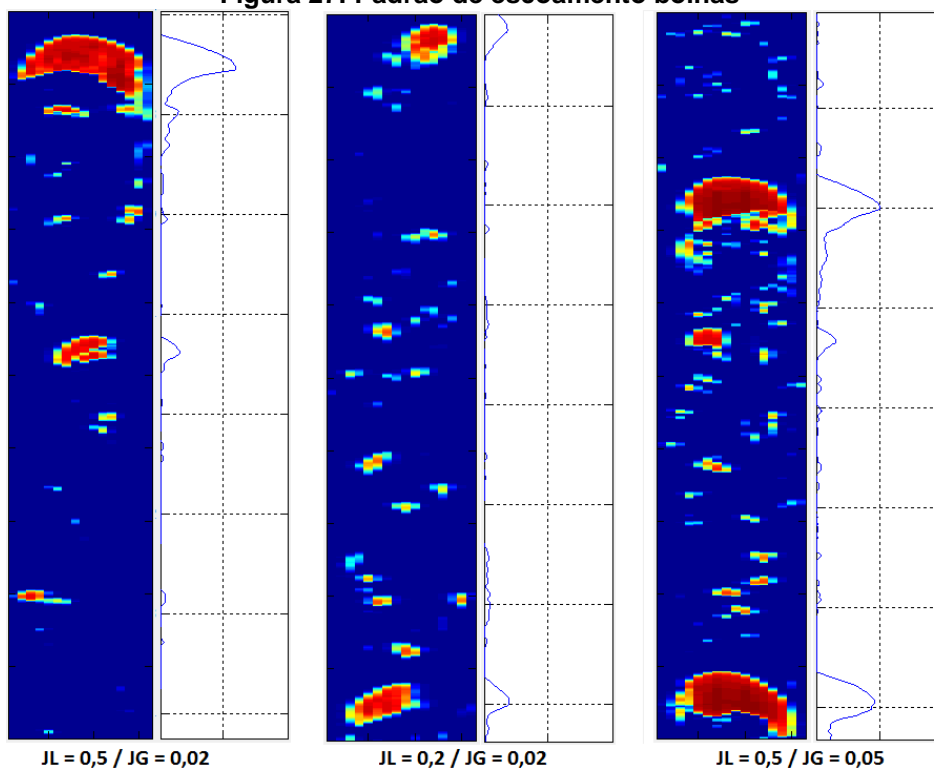
Fonte: Autoria própria

Figura 26: Padrão de escoamento agitado.



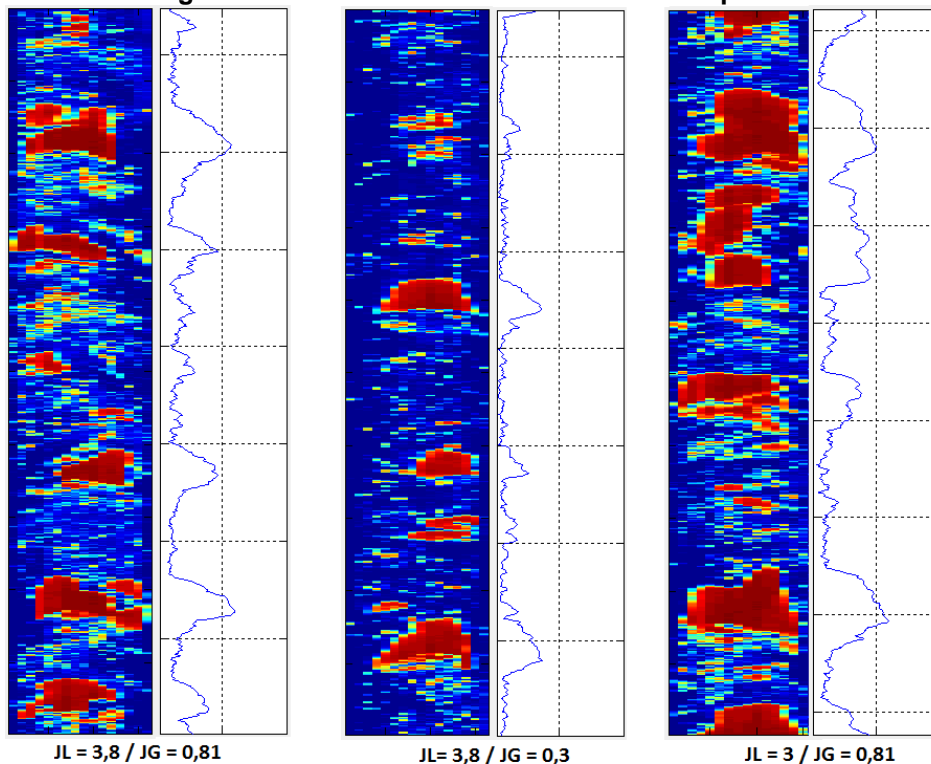
Fonte: Autoria própria

Figura 27: Padrão de escoamento bolhas



Fonte: Autoria própria

Figura 28: Padrão de escoamento bolhas dispersa.



Fonte: Autoria própria

4.3 VISUALIZAÇÃO 3D

4.3.1 Slice

A técnica de visualização de dados volumétrico através da tecnica *slice* é útil para encontrar regiões de interesse onde é importante uma análise mais detalhada.

A Figura 29 mostra aplicação da técnica. Após selecionar uma bolha e identificar o intervalo de *frames* em que a bolha está localizada, para visualizar a bolha em escoamento vertical com configuração de malha de sensor 16X16. A esquerda mostra a bolha em 2D e a direita a visualização da mesma bolha aplicando um *slice* em cada eixo da matriz de dados, sendo que cada *slice* pode ser movimentado independentemente e deslizado ao longo da dimensões espacial e dimensão temporal.

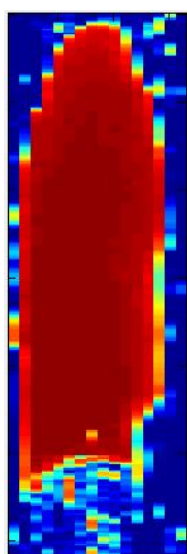
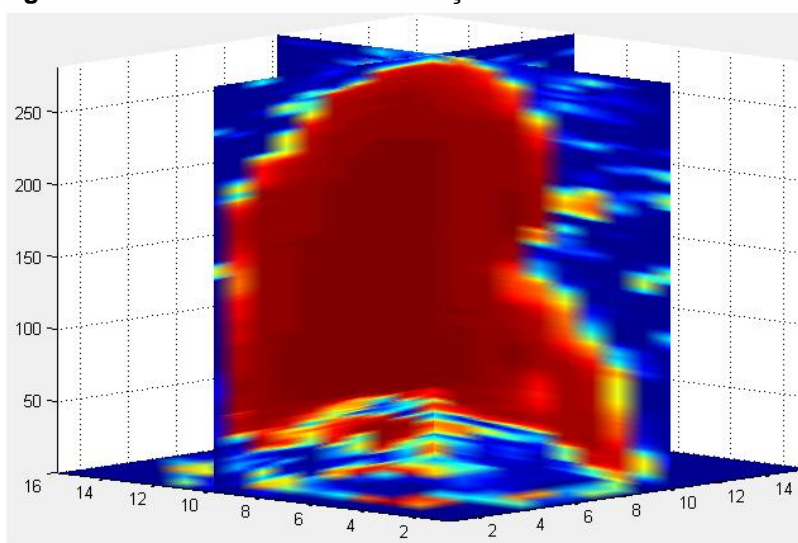


Figura 29: técnica *slice* de visualização 3D.



Fonte: Autoria própria

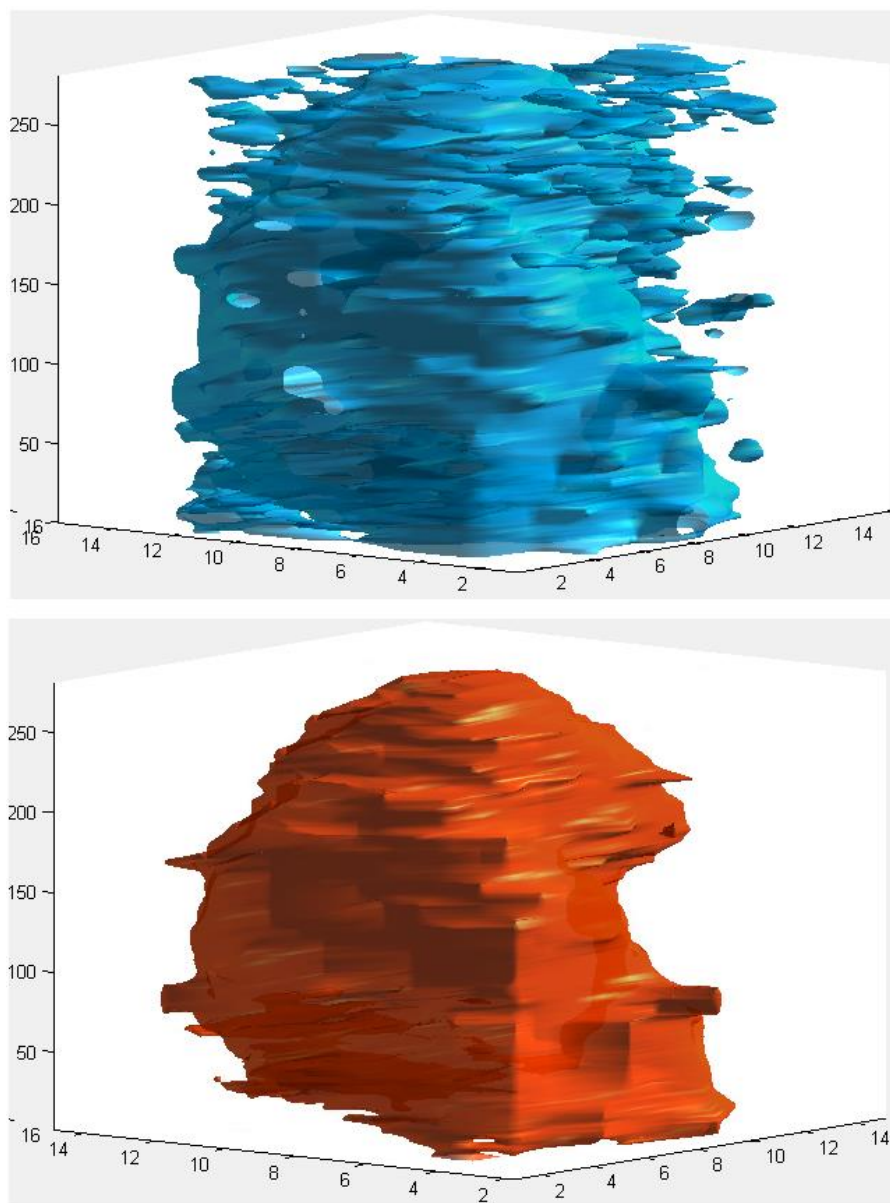
4.3.2 Isosurface

A técnica de isosuperfície permite reconstruir o escoamento no interior da tubulação e identificar como se comporta as interfaces entre as fases gás e líquido.

Na Figura 30 a aplicação dos *isosurface* podem ser comparada com a visualização 2D da mesma bolha na Figura 29. Com níveis de *iso* mais baixo(azul) visualiza-se pequenas bolhas de gás que acompanha a bolha grande alongada e no

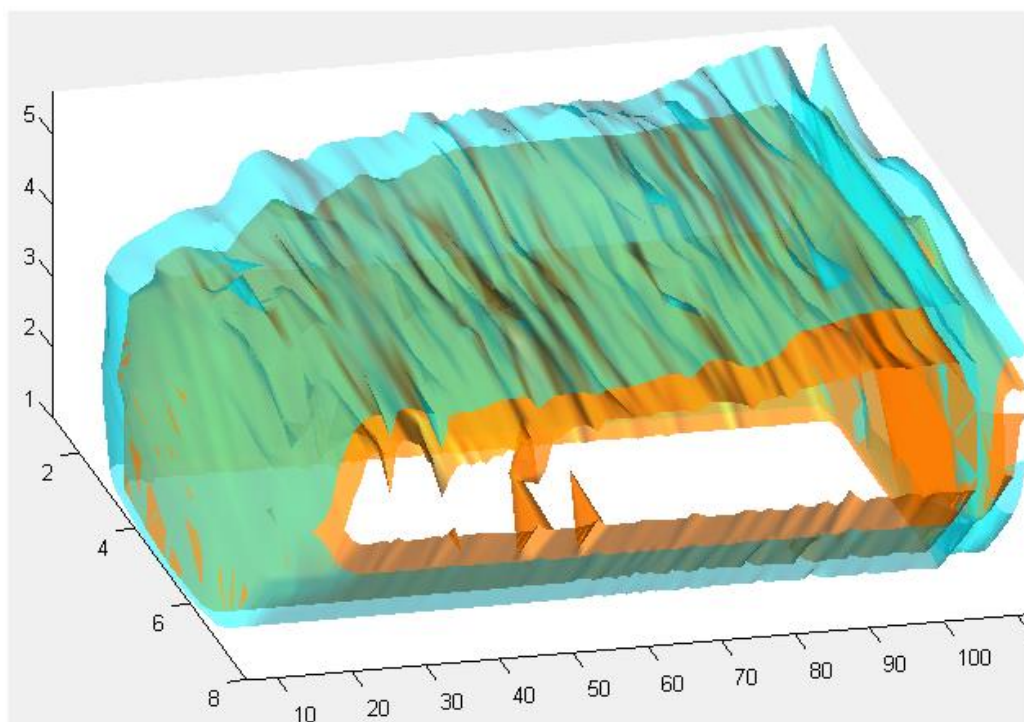
nível mais auto(vermelho) visualiza-se apenas a bolha grande com maior detalhe nos contornos da interface. Opcionalmente poderá ser aplicado dois níveis de *isosurface* simultaneamente representando as duas fases presentes.

Figura 30: técnica *isosurface* de visualização 3D



Fonte: Autoria própria

Figura 31: dois níveis de *isosurface*.



Fonte: Autoria própria

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS E CONCLUSÃO

Escoamentos bifásico gás-líquido é um tipo de escoamento muito comum em aplicações industriais. Devido à sua importância é muito investigado em experimentos laboratoriais que visa compreender seus fenômenos e promover inovações tecnológicas em segurança e otimização de plantas industriais. Muitas técnicas de análise são empregadas nos estudos experimentais utilizando câmeras de alta velocidade, tomografias por raios gama e raios-x e variados tipos de sensores como do tipo agulha (*needle probe*). Algoritmos eficientes para controle e tratamento dos dados de experimentos laboratoriais são necessários para extrair os parâmetros do escoamento.

Neste trabalho foram utilizados dados de escoamento bifásico gás-líquido coletados através de experimentos em tubulações horizontal e vertical para vários padrões de escoamento. Os dados foram coletados através da técnica baseada em sensor de malha de eletrodos *Wire-mesh*. O princípio de funcionamento do sensor se fundamenta pelas diferenças de permissividade elétrica existente em cada substância. É uma técnica intrusiva com alta resolução temporal e espacial que permite reconstruir o escoamento com eficiência e visualizar a distribuição das fases com maior grau de precisão mesmo em misturas com elevada fração volumétrica de gás acima de 50%.

Apresentou-se o desenvolvimento de um software utilizando a ferramenta MatLab capaz de fazer a leitura dos dados do sensor *wire-mesh* e disponibilizar em uma matriz 3D que representa as dimensões espaciais para a configuração de malha do sensor nos eixos x e y e a dimensão temporal que representa a quantidade de frames lido no eixo z. A partir destes dados foi possível extrair o parâmetro de fração de vazio ou quantidade de gás no escoamento e visualizar o escoamento e o gráfico para a variação temporal de gás. O software possibilitou uma boa visualização das distribuições de fase e um conjunto de ferramentas permite ao usuário manipular os dados e ajustar a visualização do escoamento conforme a necessidade de análise.

O escoamento pode ser reconstruído e visualizado em 2D através da função *imagesc* e em 3D através das funções *slice* e *isosurface*. Portanto este trabalho apresenta uma importante contribuição para estudo experimental de escoamento bifásico utilizando sensor *Wire-mesh* que poderá ser utilizada por alunos e professores da instituição em estudos na graduação e pós-graduação, auxiliando no aprendizado e também no ensino.

A linguagem MatLab se mostrou prática e eficiente para ler os dados do sensor *wirw-mesh*, tratar esses dados e imagear o escoamento com alta percepção das distribuições de fases. No entanto, alguns pontos devem ser apontados. Para processar grande quantidade de dados a linguagem funciona melhor com um hardware potente de alto processamento e memória RAM. Placa de vídeo dedicada e sistema 64 bits contribui ainda mais para o bom desempenho do algoritmo. Como a máquina utilizada no desenvolvimento e nos testes não apresentava estas características, apesar dos bons resultados a plataforma aprestou lentidão para processar e visualizar faixa muito grande de frames acima de 2000 frames. Para arquivos de dados de sensores com maiores resolução de configuração de malha foi preciso controlar a quantidade de frames a ser alocados na memória.

4.4 TRABALHOS FUTUROS

Como considerações para trabalhos futuros pode ser considerado incluir na plataforma módulos para extração de outros parâmetros do escoamento como velocidade das bolhas e técnicas para melhorar a qualidade da imagem como por exemplo suavização por *smoothing-splines*. Outra possibilidade é a inclusão de um algoritmo classificador ou de reconhecimento de padrões como pro exemplo redes neurais.

REFERÊNCIAS

DA SILVA, M. J. Impedance Sensors for Fast Multiphase flow, 2008. Technical University of Dresden, Alemanha.

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. IOP PUBLISHING LTD.

GONZALEZ, R. C.; WOODS, R. E. *Digital image processing*. Addison-Wesley, 1993.

PRASSER, H.-M.; BOTTGER, A.; ZSCHAU, J. **A new electrode-mestomograph for gás-liquid flows**. *Flow Measurement and Instrumentation*, v. 9, p. 119-119, jun 1998.

DA SILVA, M. J.; SCHLEICHER, E.; HAMPEL, U.; THIELE, S. **Wire-mesh sensor for high-resolution gás-liquid multiphase flow visualization**. 2009.

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. Elsevier Science SA.

CHAOUK, J. LARACHI, F. DUDUKOCI'Ç, M. P. Noninvasive Tomographic and Velocimetric Monitoring of Multiphase Flows" vol. 36, pp. 4476 – 4503, Nov. 1997.

COZIN, C.; ARRUDA, L. V. R. ; DOS SANTOS, E. N. ; MORALES, R. E. M. . Identificação dos Padrões de Escoamento Bifásico Utilizando Dados Teóricos e Experimentais e Redes Neurais Artificiais. In: 3o. Encontro Brasileiro sobre Ebulição, Condensação e Escoamento Multifásico, 2012, Curitiba. *Proceedings of 3rd EBECM*, 2012. v. X. p. PO7.

CROWE, C. T. **Multiphase flow Handbook**. Boca Raton, FL: Taylor & Francis, 2006.

DAVIES, R M.; TAYLOR, G. (1950). **The mechanics of larges bubbles rising through extend liquids and through liquids in tube**. *Processing of the Royal Society of London*, 200A:375-390.

DYAKOWSKI T. Process tomography applied to multi-phase flow measurement. IOP Science, 1996.

FALCONE, G. HEWITT, G. F. ALIMONTI, *Multiphase flow Metering Principles and Applications – Developments in Petroleum Science*. Elsevier Science, 2009

HAMPEL, U. BIEBERLE, A. HOPPE, D. et al. High resolution gamma ray tomography scanner for flow measurement and non-destructive testing applications. **Review os Scientific Instruments**, v. 78, 2007.

HEINDEL, T. J. GRAY, J. N.; JENSEN, T. C. An X-ray system visualizing fluid flows. **Flow Measurement and Instrumentation**, v. 19, p. 67-68, 2008.

HORI, K. FUJIMOTO, T.; JAWANISI, K. Development of ultra-fast X-ray computed tomography scanner system. **IEEE Transaction on Nuclear Science**, v. 45, p. 2089-2094. 1998.

HZDR. **Wire-mesh Sensor**. Disponível em:
<<https://www.hzdr.de/db/Cms?pOid=25191&pNid=3018> >. Acesso em: 15 de Março de 2017.

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

LIN, T. R.; BOYUN, G.; SHANHONG, S. D. *Offshore Pipelines : Design, Installation and Operations*, p. 235-262, 2005.

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

PRESSMAN, R. S. *Engenharia de Software: Uma abordagem profissional*. 7 .ed Bookman, 2011

PFLEEGER, S. L. *Engenharia de Software: teoria e prática*. 2. Ed. Prentice Hall, 2004.

RAHIMAN, M. H. F. RAHIM, R. A.; TAJJUDIN, M. Ultrasonic transmission-mode tomography imaging for liquid/gás two-phase flow. **IEEE Sensors Journal**, v. 6, p. 1706-1715, 2006.

SANTOS, EDUARDO N.; PIPA, D. R. ; MORALES, R. E. M. ; DA SILVA, M. J. . Bubble shape estimation in gás-liquid slug flow using Wire-mesh sensor and advanced data processing. In: 2014 IEEE International Conference on Imaging Systems and Techniques (IST), 2014, Santorini Island. v. 14. p. 308-311.

SANTOS, EDUARDO N.; MORALES, R. E. M.; DA SILVA, M. J. . Advanced image processing of Wire-mesh sensor data for two-phase flow investigation. *Revista IEEE América Latina*, v. 13, p. 2269-2277, 2015.

SUPARDAN, M. D. MASUDA, Y. MAEZAWA, A.; UCHIDA, S. The investigation of gás holdup distribution in a two-phase bubble column using ultrasonic computed tomography. **Chemical Engineering Journal**, V. 130, P. 125-133, 2007.

SANTOS, E. N. *Técnicas para extração de parâmetros de escoamento bifásico em regime intermitente utilizando o sensor Wire-mesh*. 2011. 120p. Dissertação (Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica e Informática Industrial) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná. 2011.

SANTOS, EDUARDO N.; DO AMARAL, C. E. F.; DA SILVA, M. J. Bubble identification for Wire-mesh sensor data: algorithm and validation. In: XXIV Sibgrapi - Brazilian Symposium on Computer Graphics and Image Processing, 2011, Maceió AL. Workshops of Sibgrapi 2011 - Interactive Graphics and Visualization for Industry-Driven Applied and Exploratory Research. Maceió: SBC, 2011. p. 26-32.

SANTOS, EDUARDO N.; DA SILVA, M. J.; ARRUDA, L. V. R. . Reconhecimento de Padrões e Classificação de Imagens de Escoamentos Bifásicos Utilizando Redes Neurais. In: X Simpósio Brasileiro de Automação Inteligente (SBAI), 2011, São João del-rei. v. 10. p. 427-431.

SANTOS, EDUARDO N.; VENDRUSCOLO, T. P. ; COZIN, C. ; ARRUDA, L. V. R. ; DA SILVA, M. J. . Sistema de Inferência para Velocidades Superficiais Jg e Jl em Escoamento no Padrão Golfadas Utilizando Redes Neurais Artificiais. In: CBA - Congresso Brasileiro de Automática, 2012, Campina Grande - PB. Congresso Brasileiro de Automática, 2012.

SHABAN, H.; TAVOULARIS, S.; The Wire-mesh sensor as a two-phase flow meter, **Measurement Science and Technology**, 2014

SHOHAM O. *Mechanistic modeling of gás-liquid two phase flow in pipe*. SPC, 2005

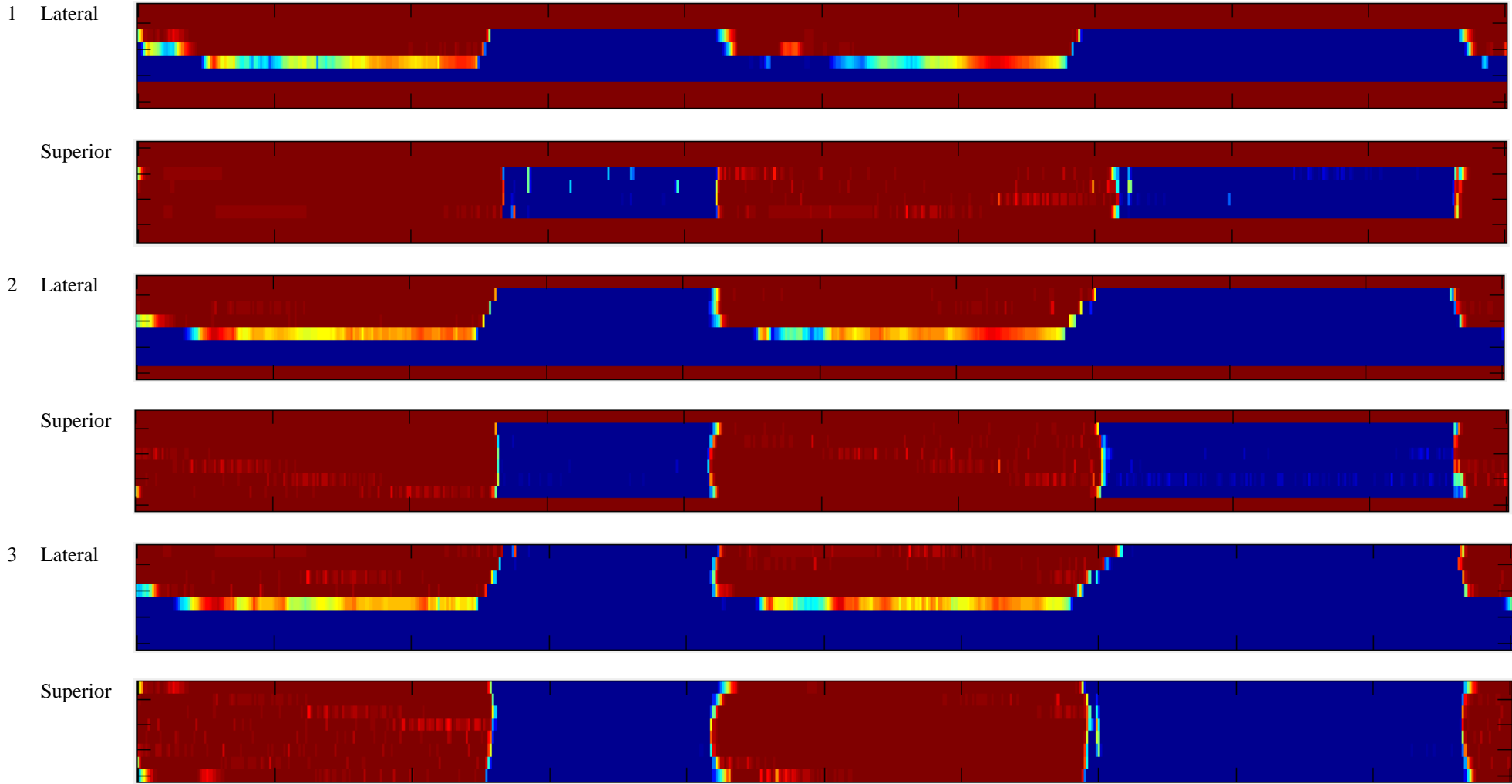
TAITEL, Y.; BARNEA, D.; DUKLER, A.E. **Modeling Flow Pattern Transition for Steady Upward Gás-Liquid Flow in Vertical Tubes**. AICHE JOURNAL, v.26, p.345-354, 1980.

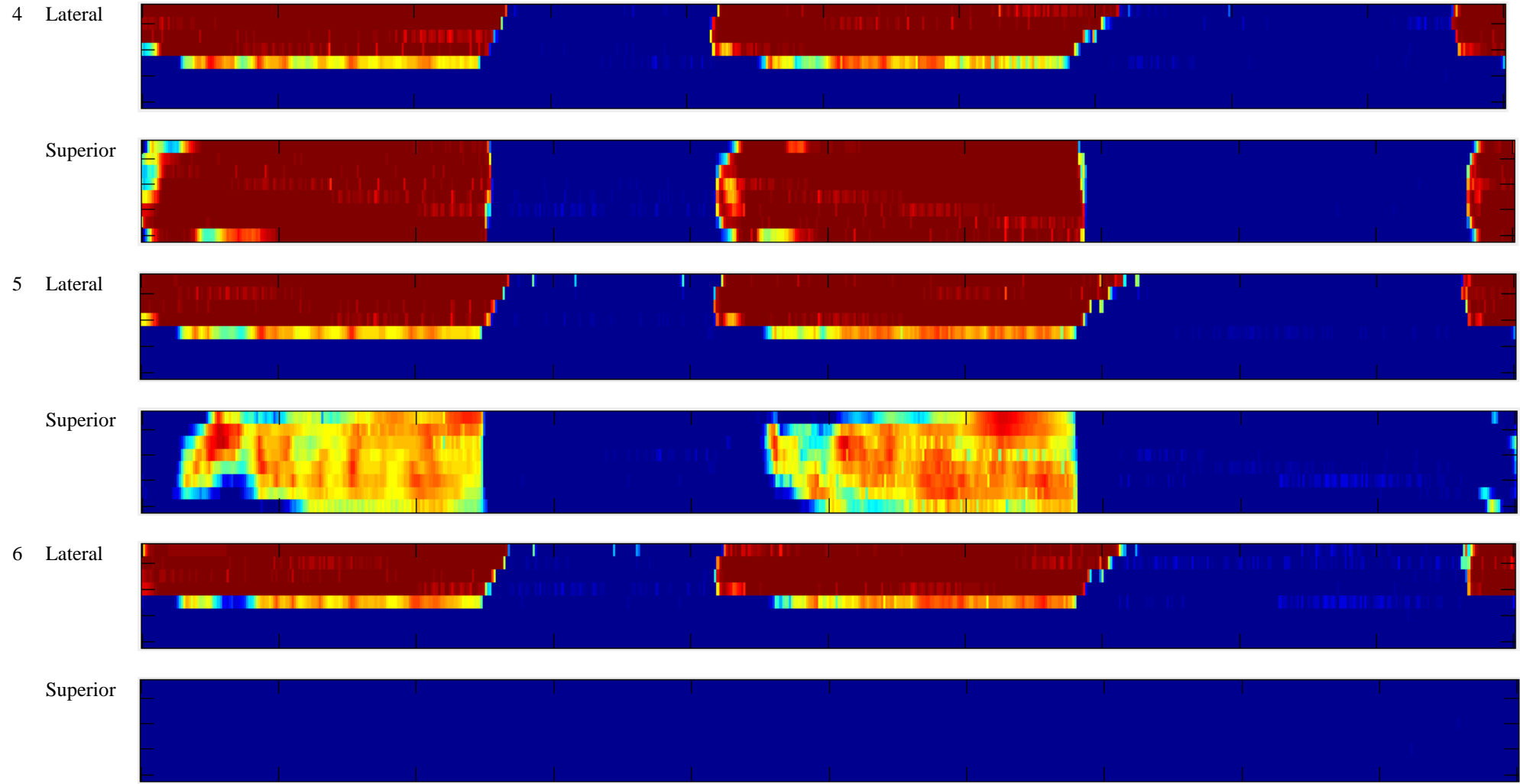
WRASE, A. N. *Capacitive Sensor for Direct Imaging of Two-Phase flows*. 81p. Dissertação – Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica e informática Industrial, Universidade tecnológica federal do Paraná, Curitiba, 2015.

YANG, W. Q.; PENG, L. Image reconstruction algorithms for electrical capacitance tomography. **Measurement Science and Technology**, v. 14, p. R1-R13, 2013

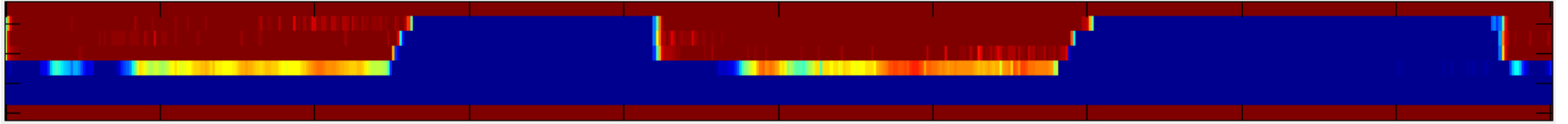
ANEXO A - Escoamento horizontal para sensor *Wire-mesh*

Tabela 4: Visualização lateral e superior do escoamento horizontal em golfada al variando os índice espaciais de sensor 8x8.

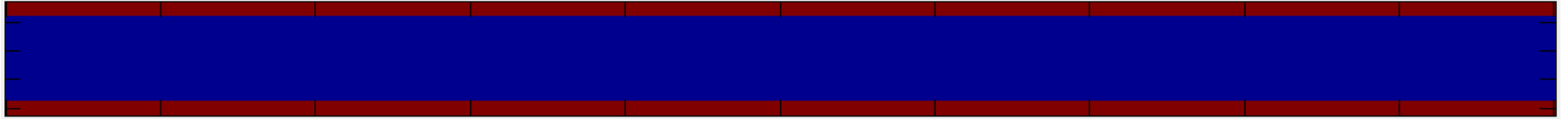




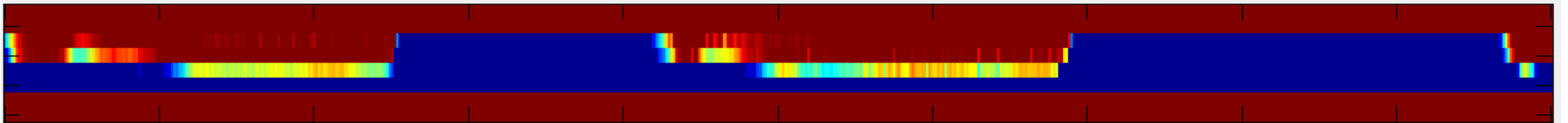
7 Lateral



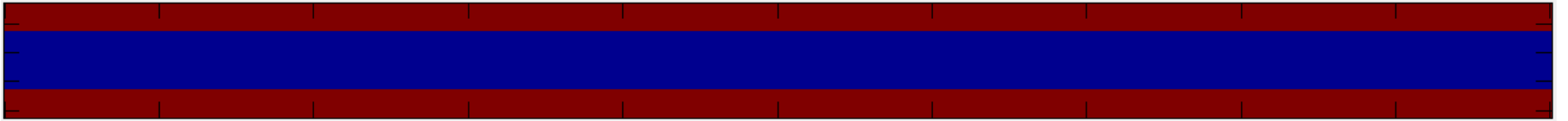
Superior



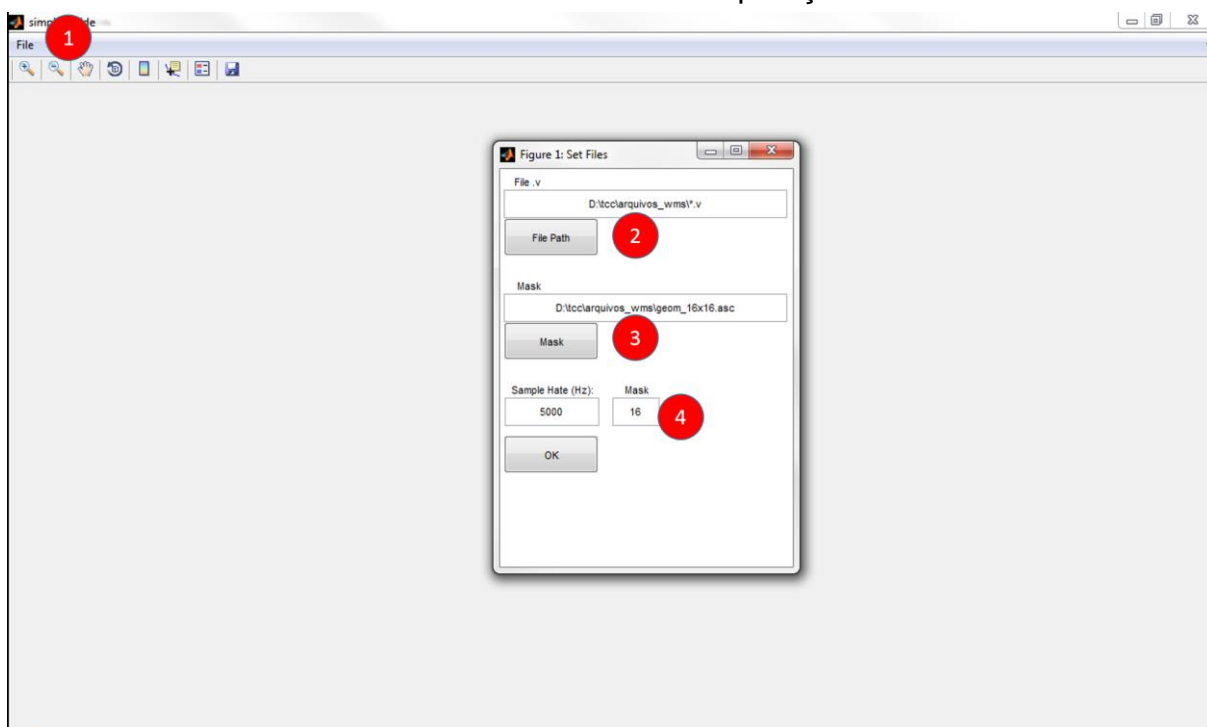
8 Lateral



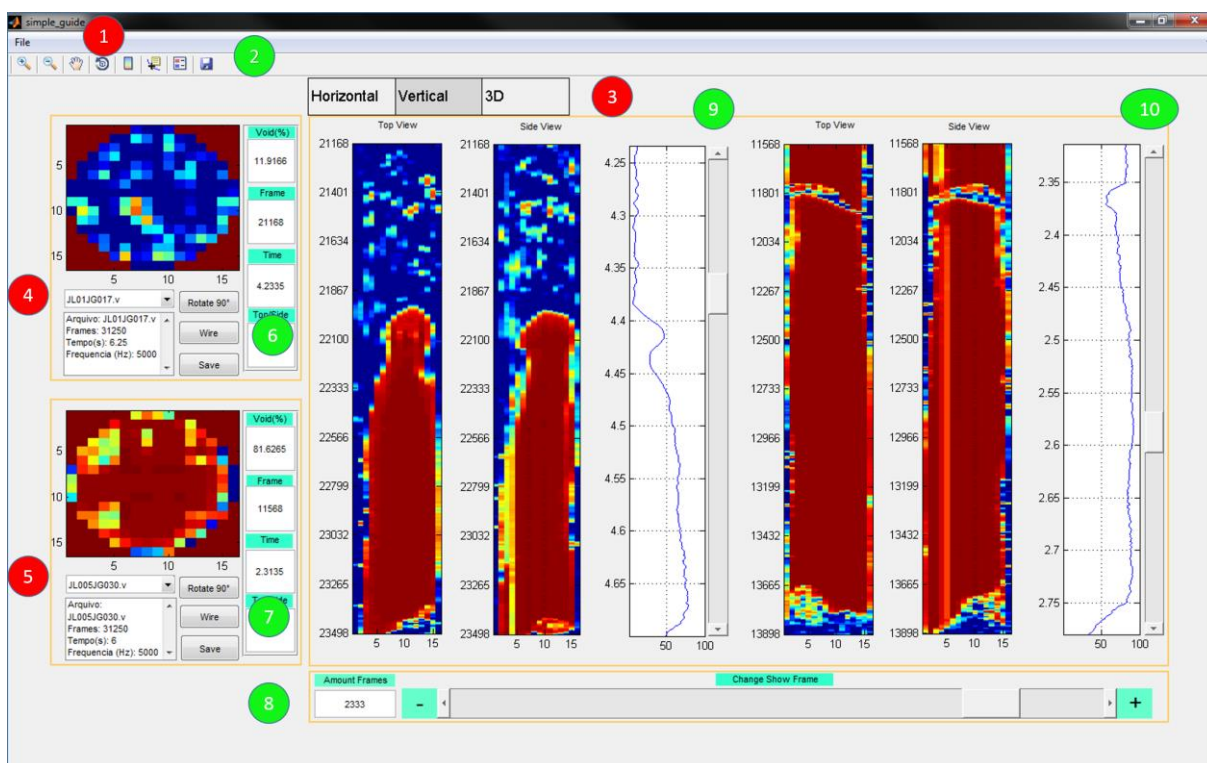
Superior



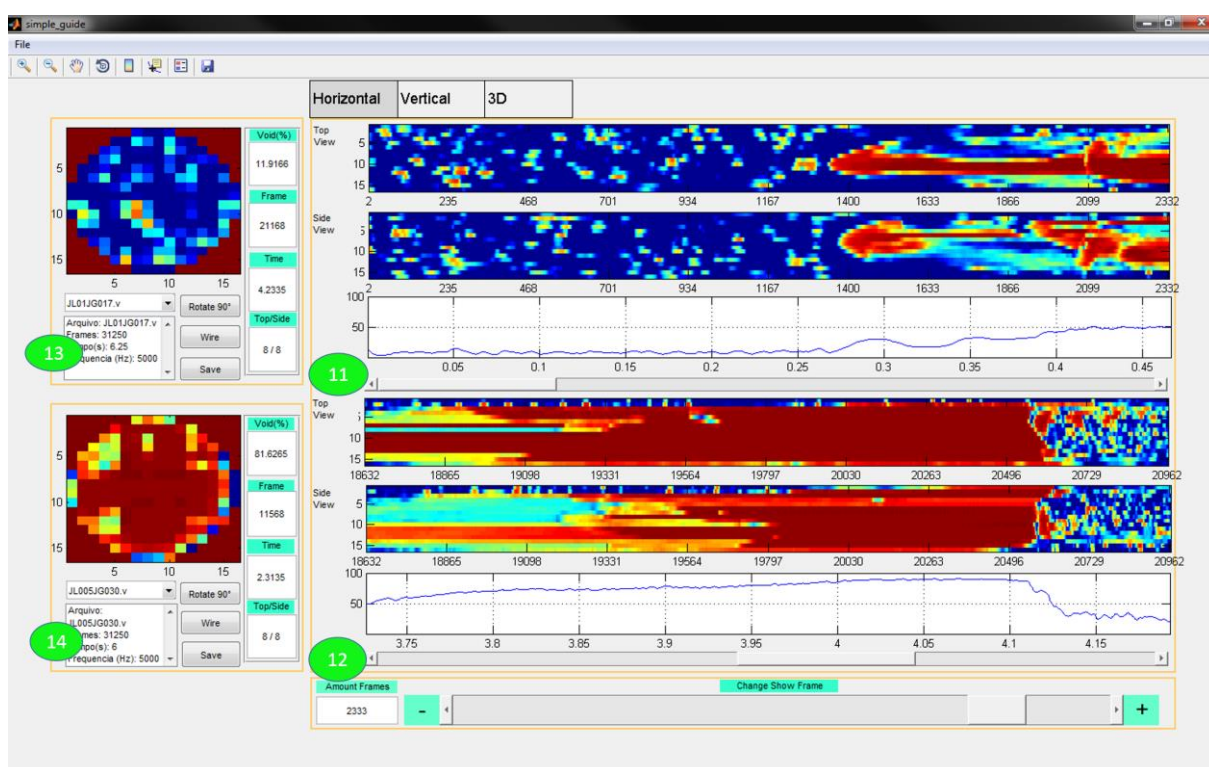
ANEXO B - Manual de operação



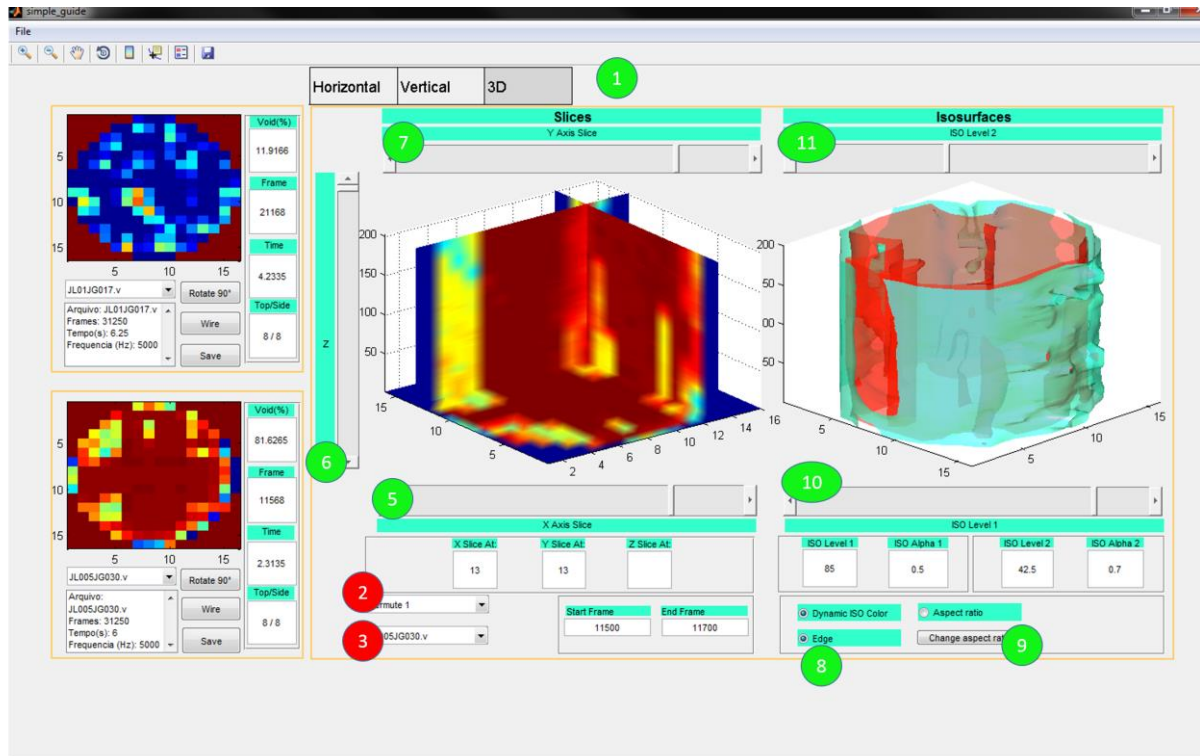
- 1 – Barra de menu para acessar o painel para inserir os arquivos
- 2 – Informar caminho da pasta que contém os arquivos .v
- 3 – Inserir o arquivo de máscara do sensor .asc
- 4 – Informar frequência de aquisição e configuração de malha do sensor



- 1 – Barra de menus
- 2 – Barra de ferramentas
- 3 – Abas de seleção para visualização horizontal, vertical e 3D
- 4 – Menu de arquivos para sensor 1
- 5 – Menu de arquivos para sensor 2
- 6 – Painel de controle do sensor 1 para as funções rotacionar 90°, configurar qual fio da malha de eletrodos imagear e salvar imagem
- 7 - Painel de controle do sensor 2 para as funções rotacionar 90°, configurar qual fio da malha de eletrodos imagear e salvar imagem
- 8 – Barra para ajustar quantidade de frames visualizados
- 9 – Barra para percorrer escoamento vertical do sensor 1
- 10 – Barra para percorrer escoamento vertical do sensor 2



- 11 – Barra para percorrer escoamento horizontal do sensor 1
- 13 – Barra para percorrer escoamento horizontal do sensor 2

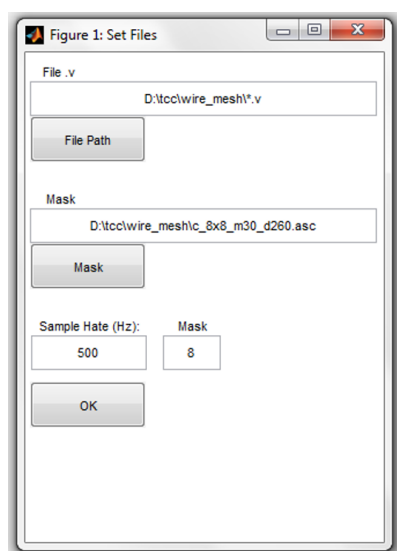


- 1 – Selecciona aba 3D
- 2 – Selecciona tipo vertical ou horizontal
- 3 – Selecciona arquivo .v para visualizar
- 5 – Barra para percorrer slice eixo x
- 6 – Barra para percorrer slice eixo z
- 7 – Barra para percorrer slice eixo y
- 8 – Selecciona as opções *edge* para isosurface e slice e *iso dinâmico* para isosurface
- 9 – Selecciona a opção *aspect ratio* para isosurface e acessa o painel para ajustar as proporções dos eixos x, y e z.
- 10 – Barra para percorrer nível de isosurface nível 1
- 11 – Barra para percorrer nível de isosurface nível 2

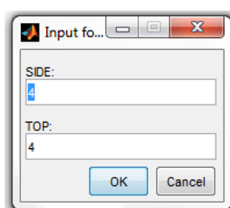
ANEXO C - Aquisição de arquivos de dados

São necessários basicamente dois tipos de arquivos. Os dados coletados pelo sensor *wire-mesh* guardados em arquivos binários extensão “.v” e o arquivo que contém a matriz de coeficientes para a correção de fração de vazios para cada configuração de malha do sensor guardada em arquivos de extensão “.asc”. O usuário deve informar o caminho para a pasta onde estão armazenados os arquivos “.v”, a frequência de aquisição e a configuração de malha do sensor.

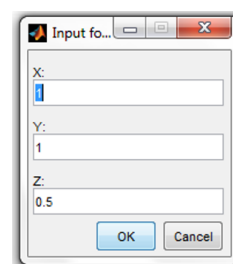
Para a visualização 2D deve ser informado ainda quais eletrodos devem ser mostrados para visualização lateral e superior do escoamento. Na visualização 3D, para a configurar manualmente a proporção dos eixos do *isosurface 3D* os valores proporcionais de cada eixo devem ser inseridos. A **Erro! Fonte de referência não encontrada.** seguinte mostra as interfaces para entrada destes tipos de dados nas sequências (a), (b) e (c) respectivamente.



(a)



(b)



(c)

Fonte: Autoria própria