

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
CENTRO TECNOLÓGICO DE JOINVILLE
CURSO DE ENGENHARIA NAVAL

RAFAEL RANGHETTI

CARACTERIZAÇÃO DE ESCOAMENTOS BIFÁSICOS ATRAVÉS DE
TOMOGRAFIA DE CAPACITÂNCIA ELÉTRICA

Joinville

2016

RAFAEL RANGHETTI

CARACTERIZAÇÃO DE ESCOAMENTOS BIFÁSICOS ATRAVÉS DE
TOMOGRAFIA DE CAPACITÂNCIA ELÉTRICA

Trabalho de conclusão de curso apresentado como requisito parcial para obtenção do título de bacharel em Engenharia Naval, curso de Engenharia Naval, Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico de Joinville.

Orientador: Prof. Jorge Luiz Goes Oliveira, PhD.

Joinville

2016

AGRADECIMENTOS

São muitas pessoas a agradecer, vou tentar organizar nesta parte algumas das pessoas que mais contribuíram neste trabalho.

Primeiramente agradeço a minha família, pelo suporte dado durante toda a minha vida e em especial durante o período da faculdade. Obrigado pai, mãe e Fabi.

A Le por sempre me motivar a ser alguém melhor, ajudando a me dedicar nos estudos e em minhas atividades.

Ao grupo da pesquisa Jim, Ramon e Professor Jorge pelos gratificantes momentos de pesquisa, aprendendo muita coisa.

A todos os professores que conseguiram me motivar ao longo do curso, mostrando o poder de transformação que a educação possui. Um agradecimento em especial para os professores Pontin, Emerich, Cristiano e Sachelli, pela energia que me passaram cada um com um jeito distinto.

A quem me ensinou o quanto a matemática pode ser fascinante: professor Pedro e professora Ivana, sempre me incentivando a entender melhor os números.

Aos amigos que fiz durante esse curso Jonas, Fuinha, Leonel, Hartmann, Jonathan e Henrique por estarem juntos praticamente durante todo o curso, me ensinando muita coisa e aproveitando momentos juntos.

Ao meu amigo e coordenador de estágio Evandro, com o qual realizamos diversos projetos juntos, e me possibilitou a experiência na prática do ramo naval através do estágio.

Aos colegas de trabalho que me inspiraram: Zé, Fabiano, Elimar, Fábio, Camilo e Carla, servindo como guia de conduta no trabalho e como referência nas questões técnicas.

A diversos outros amigos e colegas que me incentivaram de alguma forma durante essa jornada, um sincero obrigado.

RESUMO

Escoamentos multifásicos estão presentes em diversos processos industriais, e são de difícil caracterização por seu complexo comportamento. O objetivo deste trabalho é a caracterização experimental de escoamentos bifásicos do tipo líquido-gás característicos da indústria de petróleo e gás. Uma bancada de testes será projetada e edificada para este fim, identificando-se e selecionando-se os componentes necessários para o seu funcionamento. Este estudo abrange a calibração e a aferição de um tomógrafo por capacitância elétrica que mede fração de vazio, velocidade e vazão locais e globais de escoamentos bifásicos. O tipo de medição proposto permitirá analisar parâmetros como perda de carga e transferência de calor em circuitos multifásicos, que são função da concentração e dos perfis de velocidade. O pós-processamento de dados obtidos pelo tomógrafo permitirá a visualização tridimensional de escoamentos complexos, permitindo profunda análise das macroestruturas do escoamento, em particular da região de interface entre fluidos.

Palavras-chave: Indústria de óleo e gás; Petróleo; Tomógrafo; Escoamento bifásico; Bancada; Reconstrução tridimensional.

ABSTRACT

Multiphase flows are present in many processes in industry. Neat evaluation is complex owing to their inherent turbulent and instable behavior. The objective of this work is the experimental characterization of two-phase flows with liquid and gas phases, as commonly observed in the oil and gas industry. An experimental setup will be designed and built to this purpose, identifying and selecting the required equipment. Focus of this work is dedicated to the calibration of an electrical capacitance tomography sensor, allowing void fraction, velocity and flow rate measurements. These types of measurements assist the analysis of fundamental flow dynamic issues such as pressure drop and heat transfer in multiphase flow circuits. By post-processing tomography results, the analysis of tridimensional two-phase flow macrostructures will be possible.

Keywords: Oil and gas Industry; Oil; Tomography; Multiphase flow; Experimental Setup; 3D Reconstruction.

LISTA DE SÍMBOLOS

- α – Fração de vazio.
- A – Área total da região de análise. (m^2)
- A_g – Área da fase gasosa. (m^2)
- A_i – Área da zona i . (m^2)
- A_l – Área da fase líquida. (m^2)
- C_h – Capacitância do material de alta permissividade. (F)
- C_i – Concentração na zona i .
- C_l – Capacitância do material de alta permissividade. (F)
- D_e – Diâmetro da esfera hipotética. (m)
- D_f – Diâmetro do tubo. (m)
- D_s – Diâmetro da disposição dos eletrodos. (m)
- ε – Permissividade do material. (F/m).
- ε_0 – Permissividade no vácuo. (F/m).
- ε_r – Permissividade relativa do material.
- E – Número de eletrodos.
- f – Fração de volume do material de maior permissividade.
- G_g – Fluxo mássico da fase gasosa. ($kg/s \cdot m^2$)
- G_l – Fluxo mássico da fase líquida. ($kg/s \cdot m^2$)
- j_g – Velocidade da fase gasosa. (m/s)
- j_l – Velocidade da fase líquida. (m/s)
- K_e – Permissividade efetiva da mistura. (F/m)
- K_{en} – Permissividade normalizada da mistura. (F/m)
- K_l – Permissividade do material menos permissivo. (F/m)
- K_h – Permissividade do material mais permissivo. (F/m)
- [K] – Matriz de permissividades.
- l – Comprimento do sensor. (m)
- L_t – Comprimento do plano de medição. (m)
- L_e – Comprimento da película de aterramento. (m)

L_m – Comprimento do eletrodo de medição. (m)
 L_g – Comprimento do eletrodo de proteção. (m)
 L_s – Distância entre sensores. (m)
 m – Massa total do escoamento. (kg)
 m_g – Massa da parte gasosa. (kg)
 m_l – Massa da parte líquida. (kg)
 \dot{m}_g – Vazão volumétrica da fase gasosa. (kg/s)
 \dot{m}_l – Vazão volumétrica da fase líquida. (kg/s)
 m – Massa que escoou. (kg)
 ρ_g – Massa específica (densidade) da fase gasosa. (kg/m³)
 ρ_l – Massa específica (densidade) da fase líquida. (kg/m³)
 Q_g – Vazão volumétrica da fase gasosa. (m³/s)
 Q_l – Vazão volumétrica da fase líquida. (m³/s)
[Q] – Matriz inversa aproximada de [S].
 q_i – Vazão volumétrica na zona i. (m³/s)
 q – Vazão volumétrica local. (m³/s)
 Q – Volume total de fluxo. (m³)
 $R_{xy,i}$ – Correlação cruzada no plano xy na área i.
S – Fator de escorregamento.
[S] – Matriz de sensibilidade do sensor.
[S'] – Transposta da matriz de sensibilidade [S].
 τ – Tempo de trânsito. (s)
V - volume total escoado. (m³)
 v – Velocidade das estruturas do fluxo. (m/s)
 v_i – Velocidade na zona i. (m/s)
x – Título.
 X^2 - Parâmetro de Lockhart-Martinelli.
 λ – Capacitância normalizada.

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ECT – Tomografia por capacitância elétrica (Do inglês Electric Capacitance Tomography).

VFR – Válvula de fechamento rápido.

PIV – Particle Image Velocimetry (Velocimetria por imagem de partículas).

PVC – Policloreto de Vinila.

LBP – Linear Back Projection.

LISTA DE TABELAS E GRÁFICOS

Quadro 1 - Exemplos de constante dielétrica..... 26

Tabela 2 - Concentração média da zona. 56

LISTA DE FIGURAS

Figura 1- Padrões de escoamento bifásico na direção vertical.	19
Figura 2– Padrões de escoamento bifásico na direção horizontal.	20
Figura 3 – Mapa de padrões de escoamento água e ar para um tubo vertical de 3,2cm de diâmetro.....	22
Figura 4 – Mapa de padrões de escoamento água e ar para um tubo horizontal de 5,1cm de diâmetro.....	22
Figura 5 – Princípios de medição do Tomoflow.....	24
Figura 6 – Exemplo de arranjo de eletrodos na tubulação.	25
Figura 7 – Exemplo de sensor ECT existente.	25
Figura 8–Exemplos de mapas de zonas.	29
Figura 9 - Efeito da janela de correlação sobre o resultado medido.	31
Figura 10 - Exemplo de correlograma.....	31
Figura 11–Exemplo de funções de apodização.....	32
Figura 12 – Componentes da bancada de testes para geração de escoamentos ar-óleo.....	33
Figura 13 - Sistema de análise de escoamentos Tomoflow.....	34
Figura 14 - Elementos do sensor de capacitância.....	35
Figura 15 - Disposição dos eletrodos do sensor utilizado.	37
Figura 16 - Conexão dos equipamentos do <i>Tomoflow</i> ECT.....	38
Figura 17 - Janela de configurações da calibração.....	39
Figura 18- Janelas de configuração com sensor vazio e com o sensor cheio.	39
Figura 19 - Processo de medição de fração de volume.	40
Figura 20 – Exemplo de medição obtida pelo <i>Tomoflow</i> ECT.....	41
Figura 21 - Concentração ao longo do tempo nos os planos 1 (verde) e 2 (vermelho).	42
Figura 22 - Configurações de correlação utilizadas para cálculo do campo de velocidades.	44

Figura 23 – Comparação dos perfis velocidade para diferentes regiões da seção transversal do tubo.....	44
Figura 24 – Exemplo da vazão volumétrica total em função do tempo.	45
Figura 25 - Massa total que escoou num experimento aleatório.....	46
Figura 26 - Configurações para a seleção do período no qual ocorrerá reconstrução tridimensional.....	46
Figura 27 - Reconstrução tridimensional preliminar.	47
Figura 28 - Reconstrução tridimensional com superfície ISO	47
Figura 29 - Reconstrução tridimensional em seções transversais igualmente espaçadas.....	48
Figura 30 - Visualização de uma seção do escoamento em três tempos diferentes.	49
Figura 31– Padrões possíveis do escoamento bifásico óleo-ar na direção horizontal.....	50
Figura 32 - Configuração de correlação utilizada.	51
Figura 33 - Mapas de zona utilizados para a análise.	52
Figura 34 - Comparação dos modelos de reconstrução no fundo do tubo.	53
Figura 35 - Histograma da vazão volumétrica global.	54
Figura 36 - Mapa de zonas com regiões analisadas para perímetro molhado.	55
Figura 37 - Representação por figuras de vídeo gerado de escoamento.....	57
Figura 38 - Representação em perspectiva da bancada de análise de escoamentos multifásicos.	61

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	13
2	REFERENCIAL TEÓRICO	16
2.1	Escoamentos bifásicos	16
2.2	Definições básicas	16
2.3	Padrões de escoamento	18
2.3.1	Padrões em escoamentos verticais	19
2.3.2	Padrão de escoamentos bifásicos na direção horizontal	20
2.4	Mapas de Padrões	21
2.5	Medição de fração de vazio	23
2.5.1	Medição por tomografia de capacitância elétrica (<i>ECT</i>)	23
2.5.2	Equipamento de tomografia por capacitância elétrica	25
2.6	Propriedades elétricas de fluidos	26
2.7	Reconstrução de capacitância	27
2.7.1	Modelo de reconstrução em paralelo	27
2.7.2	Modelo de reconstrução em série	28
2.7.3	Modelo de reconstrução de Maxwell	28
2.8	Correlação cruzada	29
2.8.1	Zonas de análise	29
2.8.2	Formulação matemática	29
2.8.3	Efeito da janela do tempo sobre a correlação	30
2.8.4	Curva de Correlação (<i>Correlogram</i>)	31
3	METODOLOGIA	33
3.1	Bancada de testes	33

3.2	Sistema de medição Tomoflow R100	34
3.3	Sensor de medição por capacitância elétrica	35
3.3.1	Resolução de medição	36
3.3.2	Sensor utilizado	36
3.4	Calibração do tomógrafo.....	37
3.5	Medição de fração de volume	40
3.6	Histogramas de concentração	41
3.7	Medições de velocidade	42
3.8	Medições de vazão	44
3.9	Reconstrução tridimensional do escoamento	46
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	49
4.1	Padrão de escoamento gerado.....	49
4.2	Influência das configurações de correlação	50
4.3	Comparação de mapas.....	51
4.4	Influência do modelo de reconstrução	52
4.5	Vazão volumétrica global	54
4.6	Vazão mássica total.....	54
4.7	Perímetro molhado	55
4.8	Representação tridimensional através de vídeo	56
4.9	Aplicabilidade em fenômenos de transporte	57
4.10	Medição de vazão em tempo real	58
5	CONCLUSÕES.....	59
5.1	Sugestões para trabalhos futuros	59
6	REFERÊNCIAS	62

1 INTRODUÇÃO

Devido à alta complexidade na produção de petróleo e gás natural, a indústria de óleo e gás exige constante aperfeiçoamento das técnicas e equipamentos envolvidos nas etapas de produção. Os equipamentos e sistemas relacionados com a produção *offshore* precisam ser robustos e confiáveis, pois a condição ambiental é severa e o risco de acidentes deve ser minimizado (MORAIS, 2013). Por se tratar de grandes vazões volumétricas, o segmento busca utilizar técnicas para aumentar a eficiência na troca de calor e na separação de fluidos, resultando em equipamentos menores e na redução dos custos de construção e operação.

Na exploração dos poços de petróleo, as fases constituintes do escoamento multifásico (água, óleos, gases e outros contaminantes como areia) não estão misturadas de forma homogênea. Como o objetivo da extração é a obtenção de óleo e gás natural, a extração de água e dos demais contaminantes é indesejada. Tal característica produtiva motiva diversos estudos em escoamentos multifásicos, como aqueles relacionados à separação de fases e à medição multifásica generalizada (THOMAS, 2001).

O estudo dos fenômenos físicos relacionados aos escoamentos em questão permite a modelagem e a previsão do comportamento dinâmico das etapas produtivas. Essa previsão se deve à formulação de equações governantes, determinísticas ou não, representativas dos eventos de estudo. Devido à natureza complexa dos escoamentos turbulentos multifásicos, necessita-se de dados experimentais sobre o objeto de estudo. Estes dados são comumente obtidos através de medições laboratoriais, que podem ser em escala real ou ainda em forma reduzida, e extrapolada através de métodos de similaridade.

Para possibilitar o estudo de novas tecnologias empregadas na separação de fluidos e troca de calor (comumente denominadas de tecnologias de compactação para a superfície ou em etapas submarinas), Oliveira (2016) menciona a necessidade de uma bancada de estudos onde seja possível realizar testes para a avaliação do comportamento dos fluidos sob alta pressão e temperatura em equipamentos como trocadores de calor. Com os dados obtidos, a avaliação de modelos teóricos e a criação de ferramentas de dimensionamento de equipamentos são possíveis.

Considerando as dificuldades em analisar escoamentos complexos, dimensiona-se uma bancada preliminar para a análise de um escoamento de duas fases, composta por uma fase de óleo e outra fase de gás. As duas fases estarão

dispostas em um circuito fechado, com realimentação através de bomba. Dentro do circuito, podemos citar ainda a presença de um tomógrafo para a medição de fração de vazio.

O tomógrafo utilizado é do tipo de capacitância elétrica, que permite caracterizar o comportamento através da comparação das propriedades dielétricas do material. A característica dielétrica do material se refere à capacidade de determinada substância em manter uma carga elétrica. (RIBEIRO, 2003). O fato de o óleo possuir uma capacidade dielétrica superior ao da água permite analisar misturas de óleo e ar através do tomógrafo, mais facilmente que misturas água-ar.

Para uma correta análise do escoamento, faz-se necessário a calibração do equipamento. Esta calibração será feita através da comparação de extremos, onde em um momento coloca-se apenas o material mais dielétrico e em outro o material menos dielétrico. Combinações posteriores poderão ser então analisadas com base nesta calibração de extremos. (PROCESS TOMOGRAPHY, 2009).

A análise do tomógrafo por capacitância elétrica permite ainda a modelagem tridimensional das misturas de escoamentos, permitindo a análise de macroestruturas, em particular regiões de interface entre fases. Esse tipo de reconstrução permite análise profunda para aperfeiçoar equipamentos como, por exemplo, trocadores de calor, condensadores e tanques de decantação.

Objetivo Geral

Caracterizar um escoamento bifásico de óleo e ar através de medições obtidas por um tomógrafo de capacitância elétrica.

Objetivos Específicos

- Projetar os componentes para gerar um escoamento bifásico;
- Construir uma bancada de testes para utilização de um tomógrafo de capacitância elétrica;
- Calibrar o tomógrafo através de análise de extremos.
- Programar ferramentas de mensuração através da calibração do tomógrafo;
- Reconstruir o escoamento bifásico de forma tridimensional.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

Neste capítulo serão abordados os conceitos principais de escoamentos bifásicos e as características essenciais da técnica de medição utilizada: tomografia por capacitância elétrica (ECT). Dentre eles podemos destacar a classificação de escoamentos bifásicos, a tecnologia de tomografia por capacitância elétrica, os modelos de reconstrução e as técnicas de medição e análise de escoamentos bifásicos usando ECT. O objetivo final deste estudo é a análise de escoamentos bifásicos, utilizando meios para descrever perfis de concentração, velocidade, vazão e reconstruções tridimensionais.

2.1 Escoamentos bifásicos

Escoamentos bifásicos são escoamentos que possuem duas fases associadas em seu volume de controle. Estas fases podem ser, por exemplo, óleo, gás e água. Iremos tratar neste trabalho sobre uma combinação específica de óleo e ar, gerando então um escoamento para análise.

Existem diferentes modelos para análise de escoamentos bifásicos. Estes podem ser classificados como modelo homogêneo, modelo de dois fluxos separados ou modelos sofisticados, que consideram os padrões de escoamento. (Collier e Thome, 1996).

Para definir as equações básicas de escoamentos bifásicos, as seguintes considerações serão feitas:

- i. Escoamento unidimensional plenamente desenvolvido;
- ii. Sistema adiabático e em regime permanente;
- iii. Fluidos com propriedades médias na direção normal do escoamento.

2.2 Definições básicas

A vazão de um escoamento bifásico possui sua massa total m composta das parcelas de massa de gás m_g , e de líquido m_l :

$$m = m_g + m_l \quad (1)$$

Define-se o título x como a vazão mássica de gás em relação à vazão mássica total. (OLIVEIRA, 2007).

$$x = \frac{m_g}{m_g + m_l} \quad (2)$$

Outra métrica que será importante nesse trabalho é a fração de vazio α , que representa a razão entre a área ocupada pelo gás, A_g , em relação à área total da região em análise, A . (OLIVEIRA, 2007).

$$A = A_g + A_l \quad (3)$$

$$\alpha = \frac{A_g}{A} \quad (4)$$

As vazões volumétricas, Q_g e Q_l , são representadas pelo produto entre a velocidade de cada fase j e sua área ocupada:

$$Q_g = j_g A_g \quad (5)$$

$$Q_l = j_l A_l \quad (6)$$

A partir da vazão volumétrica de cada componente e da massa específica ρ de cada parcela define-se a vazão mássica \dot{m} de cada fase como:

$$\dot{m}_g = \rho_g Q_g \quad (7)$$

$$\dot{m}_l = \rho_l Q_l \quad (8)$$

A velocidade característica de cada fase separada j_g e j_l é obtida através de:

$$j_g = \frac{Q_g}{A} \quad (9)$$

$$j_l = \frac{Q_l}{A} \quad (10)$$

Os fluxos mássicos G_l e G_g podem ser escritos em função da divisão da vazão mássica individual pela área do tubo. O fluxo mássico total G pode então ser escrito como a soma dos fluxos mássicos individuais:

$$G_g = \frac{\dot{m}_g}{A} \quad (11)$$

$$G_l = \frac{\dot{m}_l}{A} \quad (12)$$

$$G = G_g + G_l \quad (13)$$

A velocidade do meio líquido não necessariamente será igual à velocidade do meio gasoso, e essa diferença pode ser definida através do fator de escorregamento S , que é a razão de velocidade média gasosa pela velocidade média líquida. (COLLIER; THOME, 1996)

$$S = \frac{v_g}{v_l} \quad (14)$$

Ambas as velocidades podem ser reescritas em função do título x conforme (2) e da fração de vazio α :

$$S = \frac{\rho_l x (1-\alpha)}{\rho_g (1-x) \alpha} \quad (15)$$

A queda de pressão no tubo é composta de três parcelas: uma referente à fricção fluido-parede e entre as fases, outra referente à queda de pressão da coluna gravitacional e uma terceira devido à aceleração do escoamento; (OLIVEIRA, 2007).

$$-\frac{dp}{dz} = -\frac{dp}{dz_{\text{atrito}}} - \frac{dp}{dz_{\text{gravitacional}}} - \frac{dp}{dz_{\text{aceleração}}} \quad (16)$$

As quedas de pressão da fase líquida e da fase gasosa podem ser avaliadas individualmente, surgindo assim o parâmetro de Lockhart-Martinelli, X^2 . (BRENNEN, 2005).

$$X^2 = \frac{\left(\frac{dp}{dz}\right)_l}{\left(\frac{dp}{dz}\right)_g} \quad (17)$$

O parâmetro X^2 é um indicativo de qual fase domina o escoamento. Tem-se:

- $X^2 > 1$, para escoamento dominado pela fase líquida;
- $X^2 < 1$, para escoamento dominado pela fase gasosa.

2.3 Padrões de escoamento

A avaliação de escoamentos bifásicos pode ser facilitada pela identificação de macroestruturas dominantes ou características geométricas denominadas de padrões de escoamento. Em escoamentos monofásicos apenas a classificação do regime (turbulento ou laminar) e a possível ocorrência de uma região de

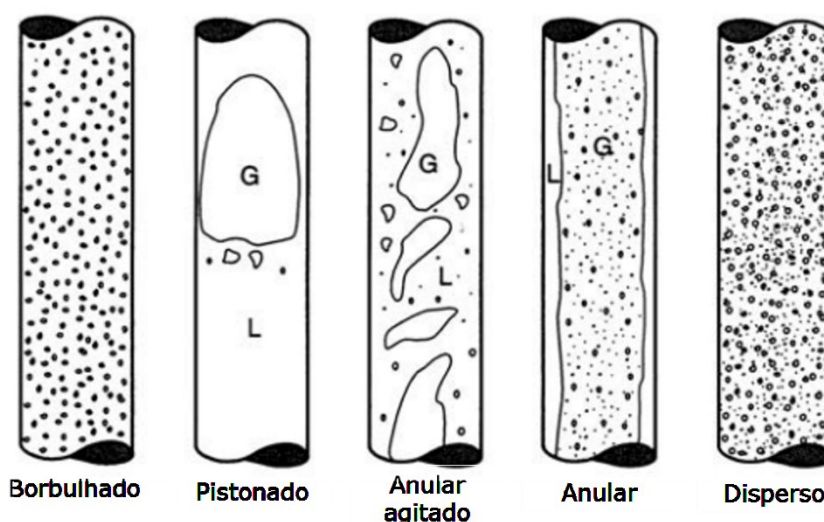
desprendimento da camada limite são suficientes para a caracterização. Na análise de escoamentos bifásicos, além dessas observações, é necessária a caracterização da geometria do volume de controle e da distribuição das fases no escoamento. (OLIVEIRA, 2007).

2.3.1 Padrões em escoamentos verticais

O usual para escoamentos bifásicos aplicados ao setor de óleo e gás é analisar os escoamentos na direção vertical, uma vez que as produções ocorrem normalmente neste sentido através dos tubos de extração de petróleo.

Existem diferentes caracterizações de escoamentos bifásicos, variando em função dos fluidos utilizados e do diâmetro da tubulação. Porém as caracterizações apresentam de um modo geral configurações comuns como: os padrões borbulhado, pistonado e anular. (BRENNEN, 2005).

Figura 1- Padrões de escoamento bifásico na direção vertical.



Fonte: Brennen (2005, p.170).

Cada padrão de escoamento bifásico do tipo líquido-gás pode ser caracterizado de forma simplificada por estes cinco grupos, representados por seus nomes:

- a) Borbulhado (*Bubbly*): bolhas de gás inseridas de forma homogênea em um líquido contínuo.
- b) Pistonado (*Slug*): grandes bolsões de ar se apresentam ao longo de uma faixa de líquido que pode ou não conter bolhas entre os bolsões de ar.
- c) Anular agitado (*Churn*): similar ao escoamento pistonado, mas com maior quantidade de movimento dos fluidos. Por apresentar maior quantidade de movimento, os bolsões se estouram e maior parte do meio líquido fica próximo à parede da tubulação.

- d) Anular (*Annular*): padrão com um filme líquido formado na parede do tubo e um núcleo de gás contínuo no centro.
- e) Disperso (*Disperse*): gotículas dispersas em um meio gasoso.

2.3.2 Padrão de escoamentos bifásicos na direção horizontal

A caracterização de escoamentos bifásicos do tipo líquido-gás na direção horizontal segue um padrão similar ao escoamento vertical, com diferenças decorrentes da ação da gravidade. De um modo geral, a gravidade direciona o meio líquido para a parte inferior da tubulação.

Sua representação visual também pode ser definida por Weisman, representado na Figura 2.

Figura 2– Padrões de escoamento bifásico na direção horizontal.



Fonte: Brennen (2005, p.167).

Apesar de apresentarem características similares, a nomenclatura dos padrões na direção horizontal apresenta algumas diferenças. Tem-se a seguinte classificação:

- a) Borbulhado (*Bubbly*): similar ao padrão borbulhado vertical, mas com a fase líquida concentrada na parte inferior do tubo.
- b) Tamponado (*Plug*): similar ao padrão pistonado (*slug*), com os bolsões da fase gasosa localizados na parte superior do tubo.
- c) Estratificado (*Stratified*): ocorre em escoamentos com baixa quantidade de movimento linear. Caracteriza-se por apresentar duas fases bem separadas e interface lisa.
- d) Estratificado-Ondulado (*Wavy*): similar ao escoamento estratificado, porém com maior quantidade de movimento associada ao gás. Com o aumento da velocidade do gás, a interface apresenta ondulações.

e) Pistonado (*Slug*): este padrão também se assemelha ao padrão estratificado com separação entre fases bem definidas. Porém, com o aumento da velocidade do meio gasoso, ocorre a “explosão” de certas partes da interface, provocando a “erupção” periódica da fase líquida que atinge a superfície superior do tubo.

f) Anular (*Annular*): assemelha-se ao padrão anular na direção vertical. Apresenta variação da espessura da camada de líquido na seção transversal devido à ação da gravidade.

g) Disperso (*Disperse*): gotículas dispersas em um meio gasoso e concentradas na parte inferior do tubo caso apresentem características inerciais.

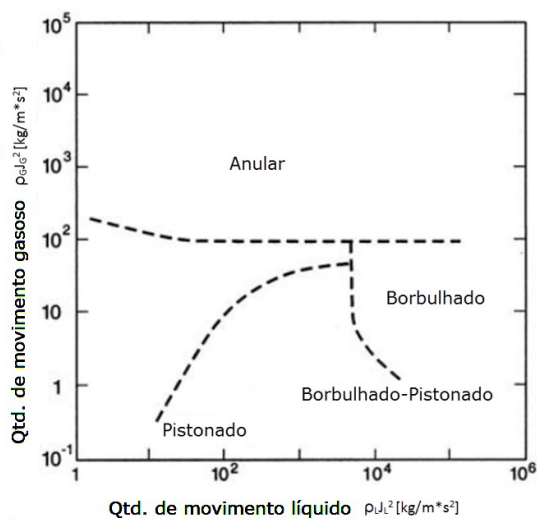
2.4 Mapas de Padrões

Para a identificação do padrão de escoamento são utilizados gráficos com áreas representativas de propriedades da fase líquida e gasosa. A caracterização de um padrão é limitada às condições nas quais os testes foram realizados; condições termodinâmicas como pressão e temperatura além das características geométricas do teste como, por exemplo, o diâmetro dos tubos. Em geral, os mapas de padrão apresentam no eixo horizontal uma grandeza que representa a quantidade de movimento da fase líquida e no eixo vertical, a quantidade de movimento da fase gasosa. (BRENNEN, 2005).

Como a aceleração da gravidade não afeta a distribuição de fases na seção transversal de testes para escoamento vertical, sua caracterização é mais simples se comparada aos padrões do escoamento na direção horizontal. Um exemplo de padrões na vertical é observado na Figura 3. Tal figura foi gerada por Hewitt and Roberts (1969) para um escoamento de ar e água em um tubo de 3,2cm de diâmetro. A quantidade de movimento citado na Figura 3 pode ser relacionada com fluxo mássico, uma vez que multiplicando a densidade do fluido por sua velocidade teremos fluxo mássico:

$$G = \rho j \quad (18)$$

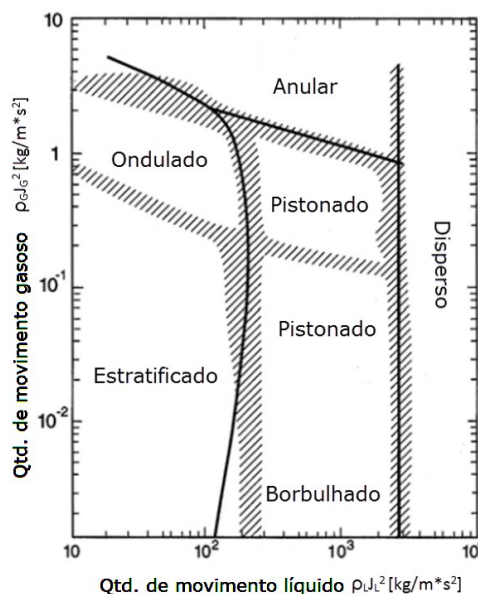
Figura 3 – Mapa de padrões de escoamento água e ar para um tubo vertical de 3,2cm de diâmetro.



Fonte: Brennen (2005, p.171).

Os mapas de padrões horizontais apresentam o mesmo princípio de abordagem, desta vez com a presença da gravidade afetando a distribuição de fases na seção transversal. Uma possível representação pode ser demonstrada na Figura 4 com o eixo horizontal apresentando o fluxo mássico de água e o eixo vertical, o fluxo mássico de gás. A Figura 4 de Weisman representa o mapa de padrões para um escoamento de água e ar em um tubo de 5,1 cm de diâmetro.

Figura 4 – Mapa de padrões de escoamento água e ar para um tubo horizontal de 5,1cm de diâmetro.



Fonte: Brennen (2005, p.166).

2.5 Medição de fração de vazio

Existem diversas técnicas de medição de fração de vazio para escoamentos bifásicos. Entre elas podemos destacar: válvulas de fechamento rápido (VFR), sondas intrusivas, atenuação radioativa, ultrassom, impedância elétrica, efeito *Doppler*, *PIV* e tomografia; descritas em detalhe em Oliveira (2007). Neste trabalho, ênfase será dada a técnicas tomográficas uma vez que o equipamento utilizado se baseia nessa tecnologia.

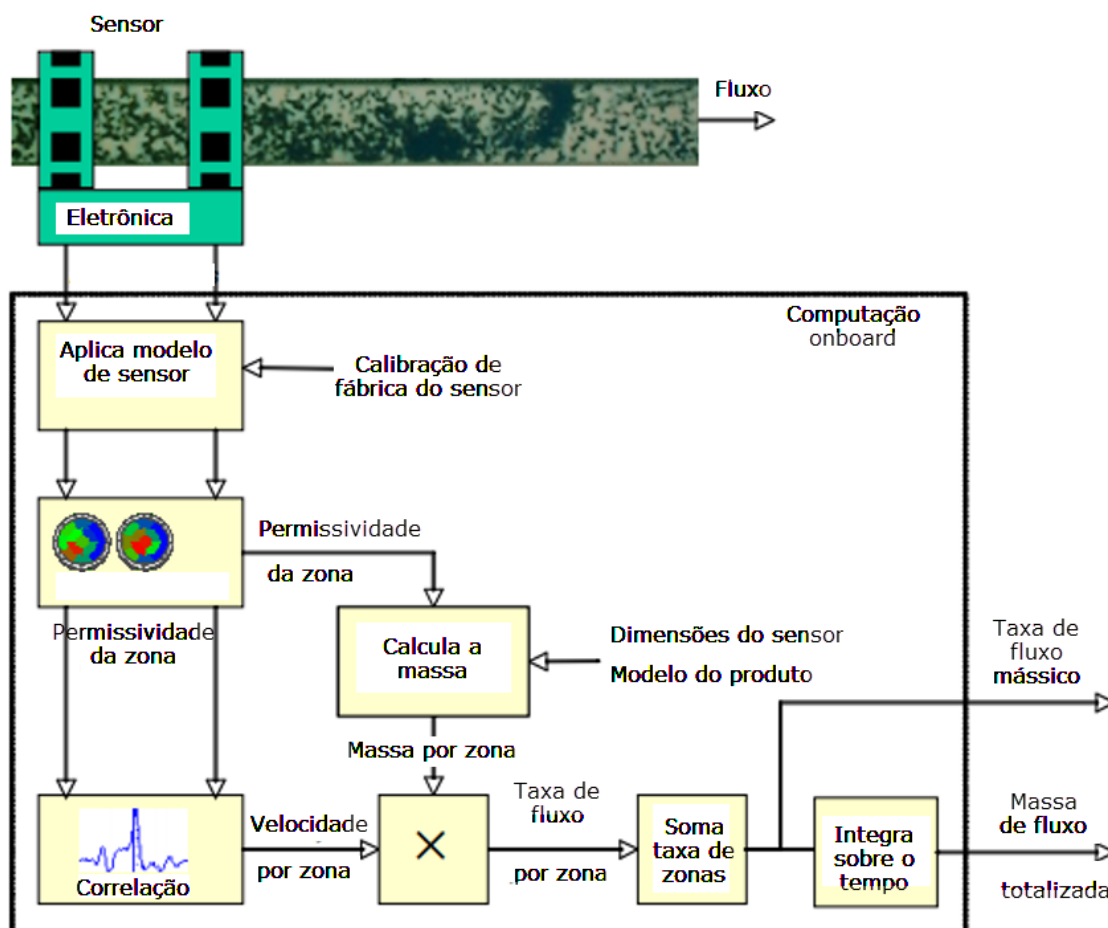
2.5.1 Medição por tomografia de capacitância elétrica (ECT)

O método de medição por tomografia de capacitância elétrica se assemelha ao utilizado em *scanners* de produção de imagens de seções do corpo humano. Entretanto, ao invés de utilizar tecnologias complexas como raios-X ou ressonância magnética, utilizam-se medições de capacitância elétrica. A capacitância elétrica é utilizada para obter perfis de imagem de densidade em diferentes planos da tubulação. Correlações cruzadas são utilizadas para calcular a velocidade local do escoamento a partir de medições em pelo menos dois planos diferentes. A integração dos campos de velocidade e fração de vazio permite estimativas de velocidades e vazões médias globais. (PROCESS TOMOGRAPHY LTD, 2009).

O princípio de medição por tomografia de capacitância elétrica é descrito em Process Tomography LTD na Figura 5. O diagrama simplificado nos mostra um par de sensores multi-eletrodos localizados na tubulação em planos diferentes. A interpretação das grandezas elétricas medidas através de técnicas matemáticas

permite a reconstrução do escoamento; obtendo-se fração de vazio, velocidade e fluxos mássicos.

Figura 5 – Princípios de medição do Tomoflow.



Fonte: Process Tomography LTD (2009, p.1)

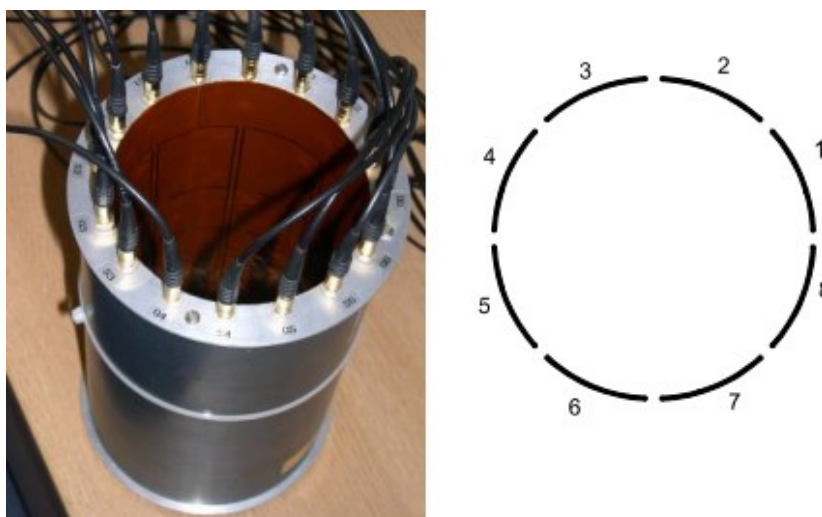
Este tipo de medição, apesar de apresentar custo elevado, possui algumas vantagens:

- A técnica de medição permite distinguir as duas fases, sem a necessidade de separação dos fluxos;
- A técnica de medição é não invasiva, não interagindo com o fluxo e permitindo medir escoamentos abrasivos sem agredir o sensor.
- A medição não apresenta componentes internos na tubulação, evitando queda de pressão devido à presença de sensor intrusivo;
- A medição pode ser executada em dois planos separados: o erro de medição diminui se comparado a técnicas que utilizam velocidade média em apenas um plano do escoamento. (PROCESS TOMOGRAPHY LTD, 2009).

2.5.2 Equipamento de tomografia por capacitância elétrica

A técnica de tomografia por capacitância elétrica ECT mede a concentração da mistura de dois fluidos dielétricos, como gás, óleo, plástico e alguns minerais contidos no interior de um confinamento. O confinamento é então rodeado por pares de eletrodos que fazem a medição da capacitância elétrica. As medições de capacitância permitem a dedução da distribuição de permissividade, que pode ser relacionado com a concentração de cada fluido. Um exemplo de disposição dos eletrodos pode ser observado na Figura 6, e um exemplo de sensor ECT existente, na Figura 6. (PROCESS TOMOGRAPHY LTD, 2009).

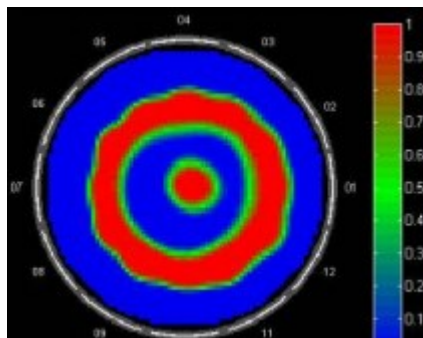
Figura 6 – Exemplo de arranjo de eletrodos na tubulação.



Fonte: Process Tomography LTD (2009, p.5)

A distribuição de concentração é apresentada a partir das medições do sensor ECT e possui resolução limitada em relação ao número de pares de eletrodos. A Figura 7 exemplifica um caso de medição, onde uma escala varia de azul (baixa concentração) a vermelho (alta concentração).

Figura 7 – Exemplo de sensor ECT existente.



Fonte: Process Tomography LTD (2009, p.5)

A taxa típica de captação de imagens é de 200 quadros por segundo. Pelo cruzamento das imagens obtidas nos dois planos de sensores, é possível determinar o perfil de velocidade e o perfil de concentração característico do escoamento. Dados são apresentados em resolução espacial de 1,25 mm²/pixel.

2.6 Propriedades elétricas de fluidos

Dentre as propriedades elétricas de fluidos, as mais importantes para medições utilizando a tecnologia ECT são a permissividade e a constante dielétrica.

A permissividade é um parâmetro que afeta a propagação de campos elétricos, sendo uma medida representativa da oposição a um campo elétrico externo pelas moléculas de um determinado material. Seguindo Maxwell, pode-se relacionar a permissividade ϵ de um material com a permissividade do vácuo ϵ_0 através da constante dielétrica ϵ_r ; ver equação 19:

$$\epsilon = \epsilon_r * \epsilon_0 \quad (19)$$

As constantes dielétricas dos materiais são obtidas experimentalmente, e os valores são dependentes de fatores como temperatura, umidade relativa e frequência elétrica. Exemplos de constantes dielétricas de materiais comuns estão dispostos na Tabela 1.

Quadro 1 - Exemplos de constante dielétrica.

Material	Constante dielétrica
Vácuo	1
Gasolina	2
Ar	1,0006
Óleo de algodão	3,1
Óleo de linhaça	3,3
Óleo de oliva	3,1
Água	80,4

Fonte: Autor (2016).

Materiais com baixa condutividade e constante dielétrica maior que 1 são chamados de materiais dielétricos (MAXWELL EQUATIONS, 2016).

2.7 Reconstrução de capacitância

Os sistemas de medição por ECT são baseados na distorção do campo elétrico causada pela distribuição de materiais no interior do sensor. Enquanto um campo elétrico é gerado entre um eletrodo emissor e um receptor no lado oposto do tubo, as variações desse campo elétrico decorrentes das diferentes concentrações de materiais são interpretadas e convertidas em valores discretos de concentração de acordo com as capacitâncias medidas. (BYARS 2001).

Os valores de capacitância medidos são comparados aos valores de calibração, obtendo-se assim a forma normalizada das capacitâncias. Em geral, os sistemas *ECT* são calibrados ao medir a capacitância C_l quando um material de baixa permissividade é inserido e ao medir a capacitância C_h do material de alta permissividade.

A capacitância medida C_m pode ser normalizada através da equação 20 ao comparar seu valor com os valores C_l e C_h . A capacitância normalizada λ varia de 0 quando o sensor está preenchido pelo material menos permissivo ou 1 quando o sensor está preenchido pelo material mais permissivo. (YANG AND BYARS, 1999)

$$\lambda = \frac{C_m - C_l}{C_h - C_l} \quad (20)$$

Apesar da normalização da capacitância ser um método relativamente simples e de fácil conversão de valores de concentração dos materiais, existe uma dificuldade de reconstrução devido à ausência de linearidade entre a capacitância normalizada e a concentração da mistura analisada. Dessa forma torna-se necessária a utilização de modelos de reconstrução de capacitância cuja seleção depende das características do fluxo analisado.

2.7.1 Modelo de reconstrução em paralelo

É o modelo de reconstrução mais simples. Assume-se que a permissividade efetiva da mistura pode ser obtida pela soma dos efeitos de duas componentes em paralelo. A permissividade efetiva, K_e , da mistura é obtida pelo método paralelo através da equação 21; onde f é a fração de volume do material de maior permissividade e K_h e K_l são as permissividades do material de maior e menor permissividade, respectivamente.

$$K_e = fK_h + (1 - f)K_l \quad (21)$$

Com a normalização da equação 21, nota-se que a fração de volume do material de maior permissividade x é igual à própria permissividade efetiva normalizada K_{en} ; ver a equação 22.

$$K_{en} = f \quad (22)$$

O modelo de reconstrução em paralelo é adequado para casos no qual os materiais estão em fases visivelmente separadas; ver o padrão estratificado na Figura 2.

2.7.2 Modelo de reconstrução em série

No modelo de reconstrução em série, assume-se que a permissividade efetiva da mistura pode ser obtida ao assumir que os dois materiais agem como capacitores em série; ver equação 23:

$$\frac{1}{C} = \frac{1}{C_l} + \frac{1}{C_h} \quad (23)$$

Ao comparar as capacitâncias e a partir da fração de volume do material de maior permissividade, f , obtém-se a equação 24:

$$\frac{1}{K_e} = \frac{1-f}{K_l} + \frac{f}{K_h} \quad (24)$$

Através da normalização da equação 24 e ao isolar o termo de fração de volume do material de maior permissividade, chega-se a:

$$f = \frac{(K_{en} * K_h)}{K_l + K_{en} * (K_h - K_l)} \quad (25)$$

O modelo de reconstrução em série é apropriado para situações nas quais os materiais analisados não formam camadas distintas e nem estão na forma dispersa; ver padrões pistonado, tamponado e borbuhlado nas figuras 1 e 2. Um exemplo de aplicação para o modelo em série é o de barras de material mais permissivo localizadas ao longo do sensor.

2.7.3 Modelo de reconstrução de Maxwell

Outro modelo de reconstrução de capacitâncias foi derivado por Maxwell para descrever a permissividade relativa de um conjunto de esferas dispersas em um meio. Sua representação final em função da fração de volume f do material de maior permissividade pode ser obtida de acordo com a equação 26:

$$f = \frac{K_{en}(2+k)}{3+K_{en}(k-1)} \quad (26)$$

onde $k=K_h/K_i$.

O modelo de reconstrução de Maxwell é apropriado para fluxos dispersos, como bolhas dispersas em um líquido ou partículas dispersas no escoamento; ver padrões disperso e anular nas Figuras 1 e 2.

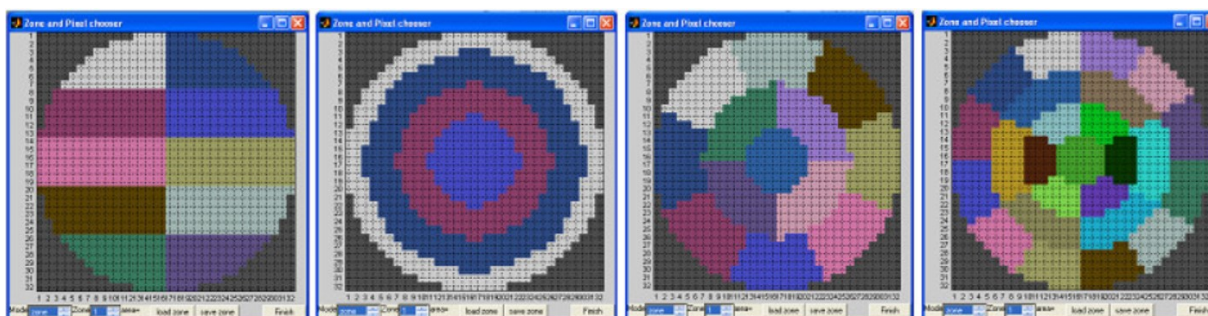
2.8 Correlação cruzada

Uma técnica que pode ser aplicada para determinar o tempo de trânsito de estruturas de fluido em sistemas bifásicos é a correlação cruzada. Essa última relaciona estruturas que passaram por planos distintos através de um pico de correlação. Para explicar a aplicação dessa ferramenta matemática em medições tomográficas, a definição de zonas de análise é introduzida.

2.8.1 Zonas de análise

Para que a técnica de correlação cruzada possa ser aplicada é necessário agrupar os pixels do sistema de medição em zonas de interesse de acordo com o fluxo analisado. O agrupamento das zonas em uma seção analisada é chamado de mapa, e deve ser escolhido para melhor representar o escoamento.

Figura 8–Exemplos de mapas de zonas.



Fonte: TomoflowLtd. (2003, p.69).

2.8.2 Formulação matemática

A correlação $R_{xy,i}$ em cada zona i é calculada através da comparação da concentração $C_{1,i}$ no plano 1 com a concentração $C_{2,i}$ no plano 2, e pode ser definido matematicamente através da equação 27. (TOMOFLOW LTD, 2003):

$$R_{xy,i}(\tau) = \lim_{T \rightarrow \infty} \int_0^T C_{1,i}(t)C_{2,i}(t + \tau)dt \quad (27)$$

A formulação leva em conta o tempo de trânsito τ de uma estrutura localizada na zona i no plano 1 até a mesma zona i no plano 2 separadas por uma distância axial previamente definida. O tempo de trânsito τ de uma estrutura hipotética esférica de diâmetro D_e , passando com velocidade V por sensores de comprimento l separados por uma distância L_s é definido através da equação 28:

$$\tau = \frac{V}{L_s + 2l + D_e} \quad (28)$$

Durante a integração no domínio do tempo da equação 27, o tempo provável de deslocamento das estruturas de fluido está relacionado com o valor máximo da integração do produto $C_{1,i}C_{2,i}$.

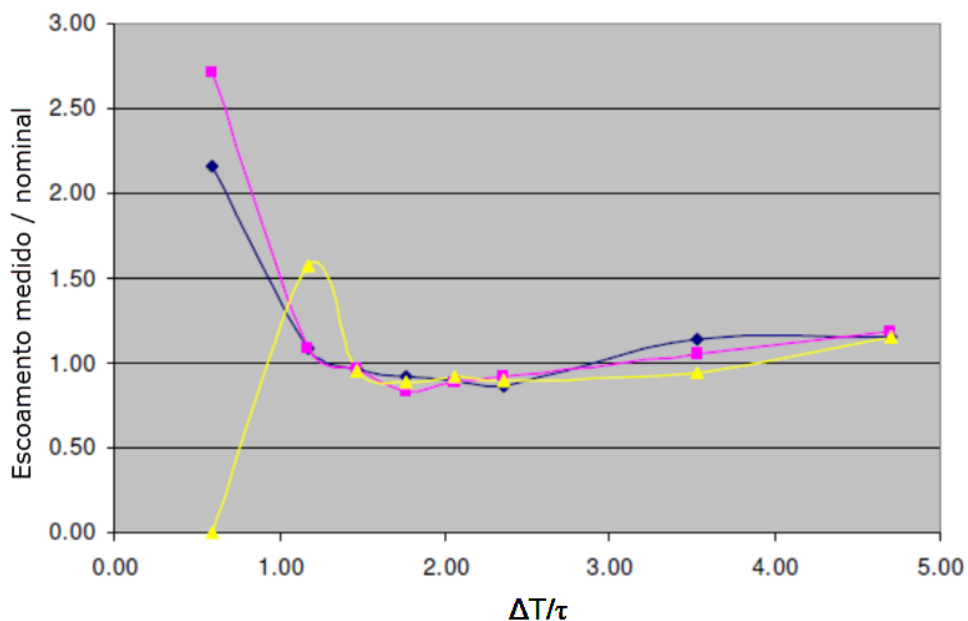
2.8.3 Efeito da janela do tempo sobre a correlação

A janela de tempo diz respeito ao período T no qual o processo de correlação cruzada é realizado. Esta janela tem efeito direto na qualidade da medição se comparada com o valor nominal do fenômeno.

Para determinar valores ideais de janela de tempo T , pode-se utilizar procedimento exibido na Figura 9 que compara o intervalo de tempo ΔT com o tempo de trânsito τ de uma estrutura do fluxo. Observa-se no exemplo abaixo que valores adequados de medição são obtidos na faixa onde $\Delta T/\tau$ se situam entre os valores de 1,5 a 2,5. (TOMOFLOW LTD, 2003).

Portanto de modo a obter valores adequados de correlação é usual a utilização de intervalo de tempo ΔT igual a duas vezes o valor do tempo de trânsito τ . Caso se conheça a velocidade da estrutura de análise, determinar o tempo de trânsito τ é uma tarefa simples, porém na maioria das vezes não sabemos as velocidades analisadas. Dessa forma, procede-se com a obtenção de um valor inicial de velocidades utilizando um valor T arbitrário, e executam-se novas iterações para refino dos resultados.

Figura 9 - Efeito da janela de correlação sobre o resultado medido.

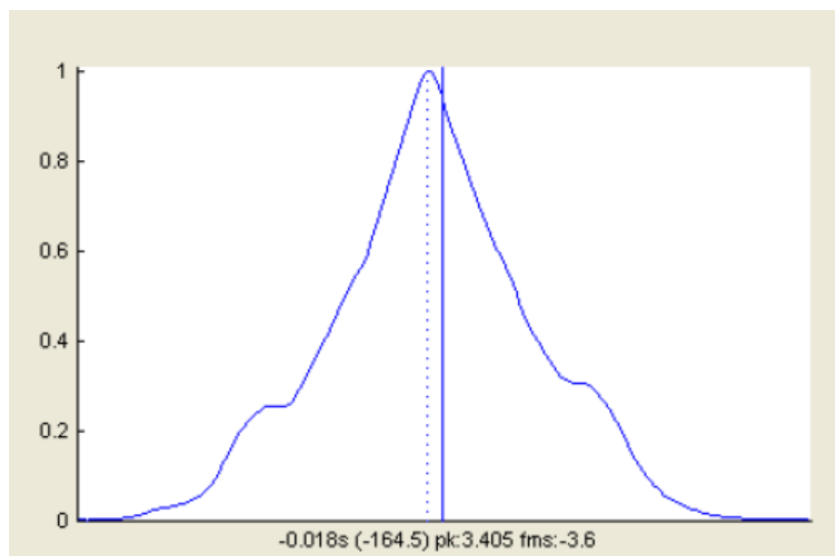


Fonte: TomoflowLtd. (2003, p.56).

2.8.4 Curva de Correlação (*Correlogram*)

A correlação $R_{xy,i}$ pode ser normalizada e representada em um gráfico chamado de correlograma. Através do correlograma pode-se avaliar o pico de correlação e seu atraso no tempo, conforme apresentado na Figura 10.

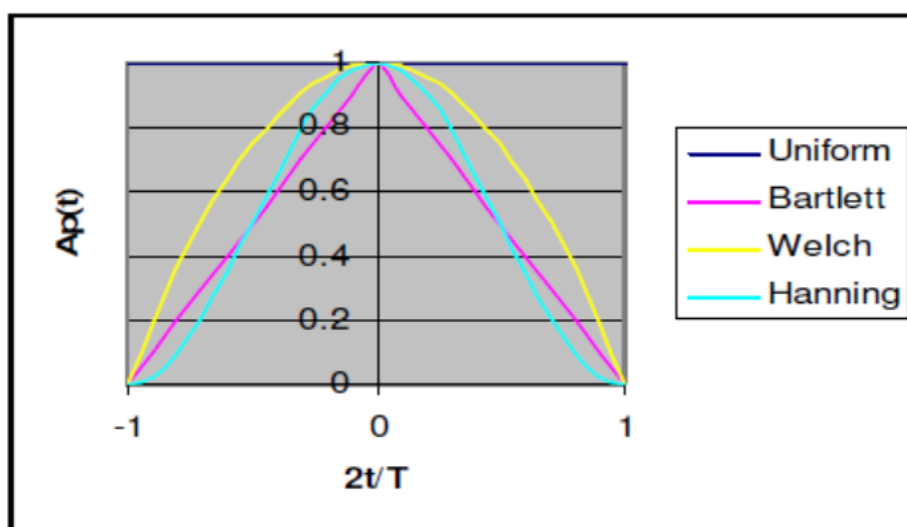
Figura 10 - Exemplo de correlograma



Fonte: TomoflowLtd. (2003, p.46).

Assume-se que o atraso no tempo do pico do correlograma (que corresponde à diferença de tempo entre a linha vertical sólida e a linha vertical tracejada) corresponde ao tempo de trânsito τ de uma estrutura do fluxo entre os planos analisados. A janela de tempo utilizada na correlação deve receber uma função de tratamento de sinal para evitar ruídos. Esta função é conhecida como função de apodização. Quatro funções de apodização estão apresentadas na Figura 11, e a mais comumente utilizada é a proposta por Hanning; ver manual do TOMOFLOW LTD(2003).

Figura 11–Exemplo de funções de apodização



Fonte: TomoflowLtd. (2003, p.59).

3 METODOLOGIA

Nesta seção os métodos e materiais sugeridos para a obtenção dos resultados desejados são apresentados, de modo a possibilitar o estudo de escoamentos bifásicos.

O foco deste trabalho é a visualização de um escoamento bifásico e sua representação tridimensional através da combinação de imagens geradas em dois planos pelo tomógrafo de capacitância elétrica. Através do processamento dos dados de medição, a visualização das concentrações é relacionada às velocidades e vazões. Para tanto é necessária a calibração do equipamento de tomografia por capacitância elétrica em função dos fluidos utilizados, o registro de um determinado padrão de escoamento em uma bancada de testes e uma análise computacional por meio de algoritmo de interpretação dos dados.

3.1 Bancada de testes

Com o objetivo de permitir o estudo do equipamento em foco neste trabalho, foi utilizada uma bancada de testes simplificada com um sistema recirculante de alimentação de fluidos no sensor.

A bancada de testes simplificada é composta por reservatório de óleo, bomba com função de aerador, medidor de tomografia por capacitância elétrica Tomoflow e tubulação para direcionamento do escoamento; ver Figura 12.

Figura 12 – Componentes da bancada de testes para geração de escoamentos ar-óleo.



Fonte: Autor (2016).

No reservatório de óleo (1), foi utilizada uma caixa de plástico com cortes para a inserção de flanges de conexão, da válvula para drenagem de óleo e do cabo de potência da bomba.

Para gerar o escoamento de forma contínua, foi utilizada uma bomba da marca AZOO do modelo Power Head, cuja vazão máxima é de 1800 l/h. A coluna máxima de água deslocada é de 205 cm. A bomba está localizada dentro do reservatório de óleo e é representada pelo número 2.

O sensor ECT utilizado é da marca Tomoflow (3), que serve para medir as capacitâncias. Estas são enviadas para a central de processamento (4).

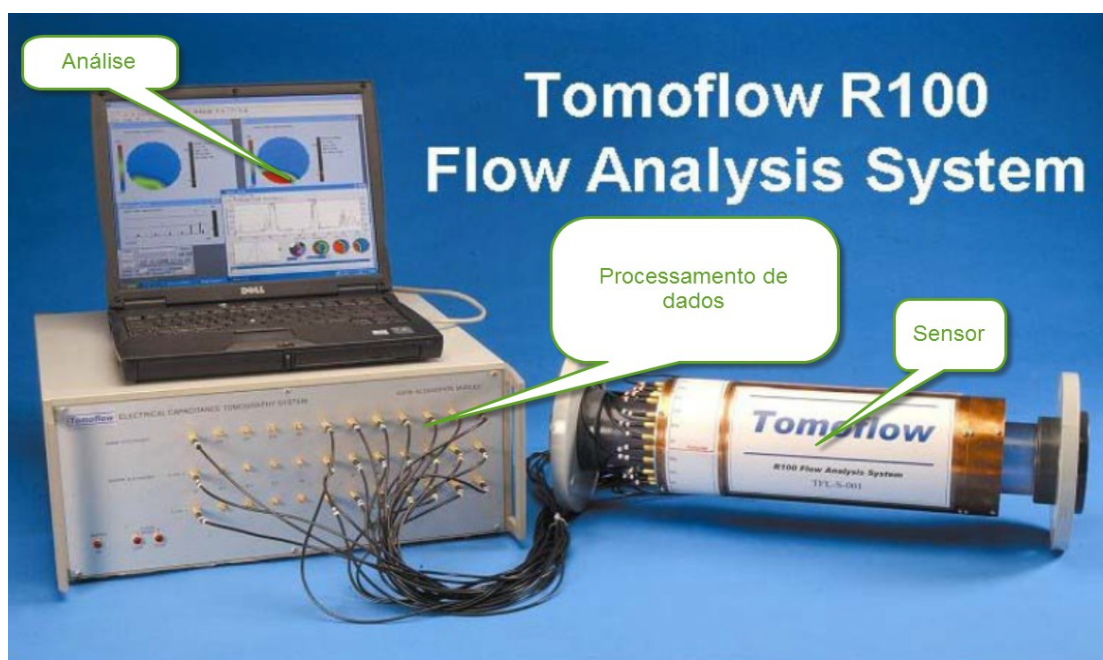
Para possibilitar o escoamento de uma maneira cíclica, utilizou-se tubulação de material PVC (5) com curvas e tubos em forma de circuito fechado de modo a redirecionar o escoamento para dentro do sensor ECT.

3.2 Sistema de medição Tomoflow R100

Para a obtenção de dados experimentais do escoamento foi utilizado o sistema Tomoflow R100: um pacote de análise não intrusiva para escoamentos multifásicos baseado em tomografia por capacitância elétrica.

O pacote é composto por sensores (eletrodos externos à tubulação), uma central de processamento de dados que interpreta os dados do sensor e os envia para um *notebook* onde é feita a análise dos dados.

Figura 13 - Sistema de análise de escoamentos Tomoflow.

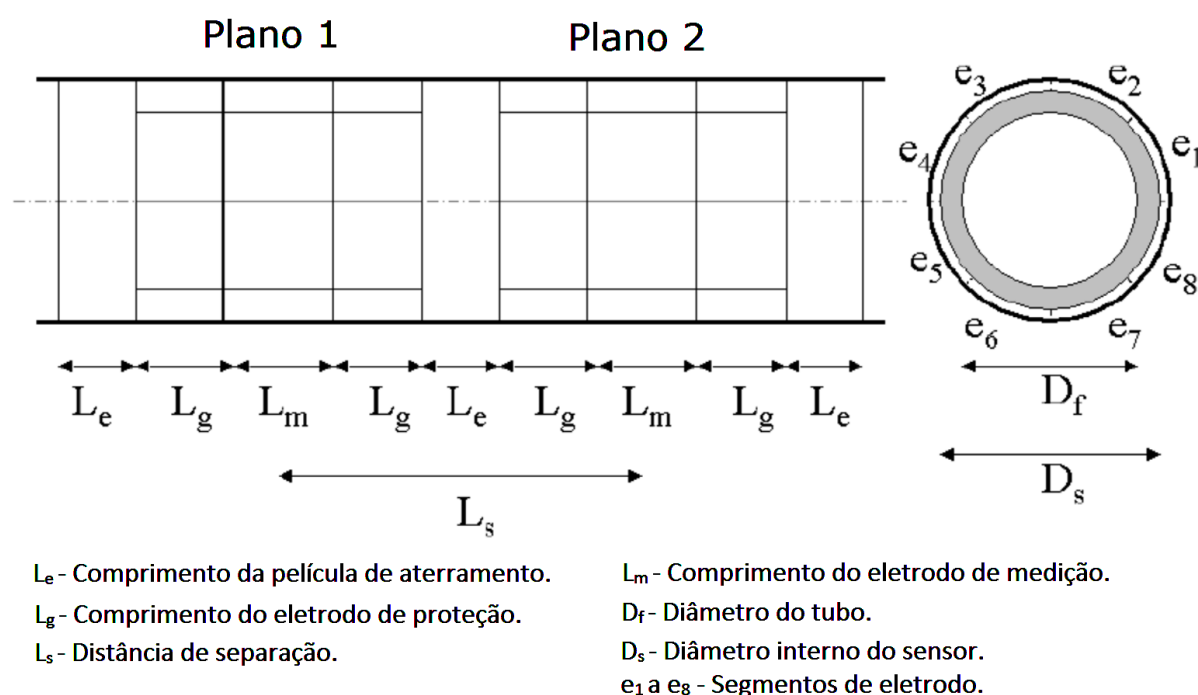


Fonte: TomoflowLtd. (2003, p.3).

3.3 Sensor de medição por capacitância elétrica

O sensor de medição por capacitância elétrica é composto basicamente por um conjunto de eletrodos de medição e eletrodos de proteção montados externamente a um tubo por onde passam os fluidos em análise. Os eletrodos estão dispostos de forma radial, apresentando um ou dois planos de medição; ver Figura 14.

Figura 14 - Elementos do sensor de capacitância.



Fonte: TomoflowLtd. (2003, p.14).

A geometria do sensor tem influência direta na resolução de medição bem como na determinação da velocidade das estruturas do fluxo. O plano de medição é definido pela combinação dos eletrodos de medição e de proteção com comprimento total, L_t , definido pela equação 29:

$$L_t = L_m + 2L_g \quad (29)$$

onde L_m e L_g representam o comprimento de medição e comprimento de proteção.

A separação L_s entre os dois planos de medição é utilizada na correlação cruzada para determinar velocidades. O diâmetro interno, D_f , é utilizado no cálculo de vazão ao associar a velocidade do fluxo com a área da seção, ver Figura 14.

O número de eletrodos de medição e de proteção é usualmente 6, 8 ou 12, afetando diretamente a resolução da medição.

3.3.1 Resolução de medição

A resolução de medição se refere à capacidade do sensor em avaliar as estruturas características do fluxo e pode possuir valores diferentes de resolução radial e resolução axial. (TOMOFLOW LTD., 2003)

A resolução radial é definida pelo comprimento, L_f , definido pela escala da menor estrutura de fluxo que podemos analisar. L_f pode ser calculado pela Equação 30 ao comparar o diâmetro no qual os eletrodos estão dispostos, D_s , com o número de eletrodos, E :

$$L_f = \frac{D_s}{E} \quad (30)$$

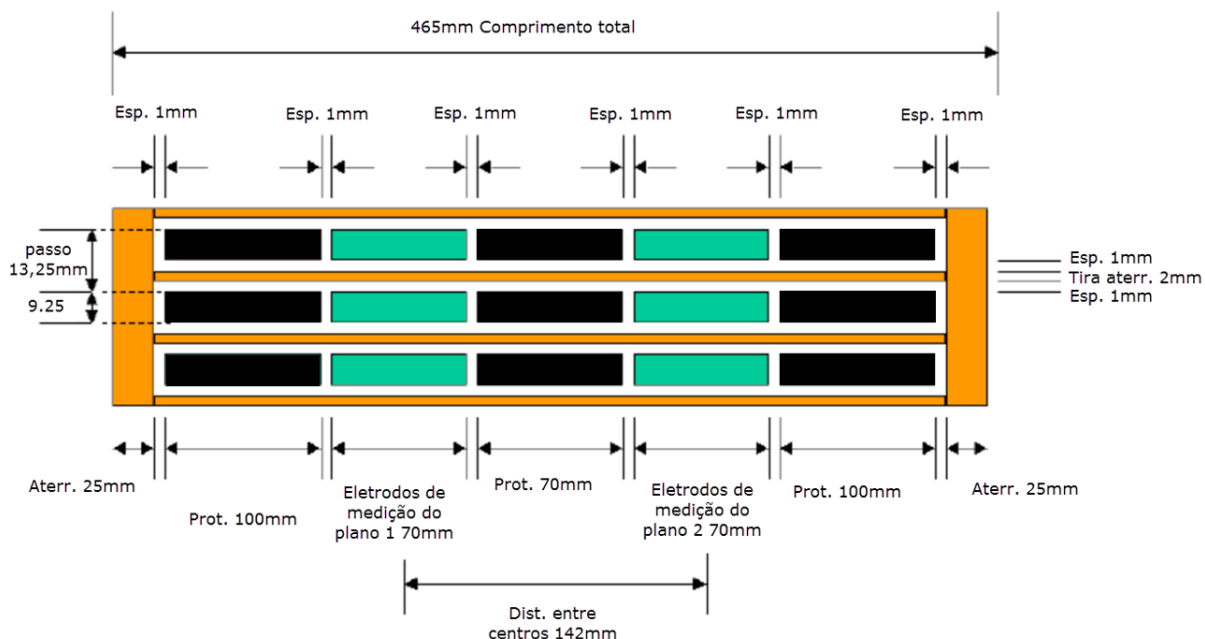
A resolução axial é determinada pelo comprimento do sensor de medição L_m , usualmente menor do que a resolução radial. Portanto as estruturas avaliadas terão maior precisão no sentido radial do que no sentido axial. O comprimento L_m é determinado de acordo com o projeto de instalação do sensor. Comprimentos muito pequenos, e.g. 3 cm para 8 eletrodos resultam em problemas de medição, pois os eletrodos de medição devem ser longos o suficiente para não interferir em sensores próximos. (TOMOFLOW LTD., 2003)

Na prática, o sistema de medição apresenta resolução espacial da ordem da dimensão de um pixel. Para o sensor instalado, a projeção do pixel é de 1,25 mm².

3.3.2 Sensor utilizado

O sensor utilizado nos experimentos foi construído sobre um tubo de 40 mm de diâmetro interno, com espessura de parede de 5 mm. O mesmo possui 12 eletrodos de medição com comprimento, L_m , de 70 mm. A distância entre planos de medição, L_s , é de 142 mm. A disposição dos eletrodos sobre o sensor pode ser verificada na Figura 15.

Figura 15 - Disposição dos eletrodos do sensor utilizado.



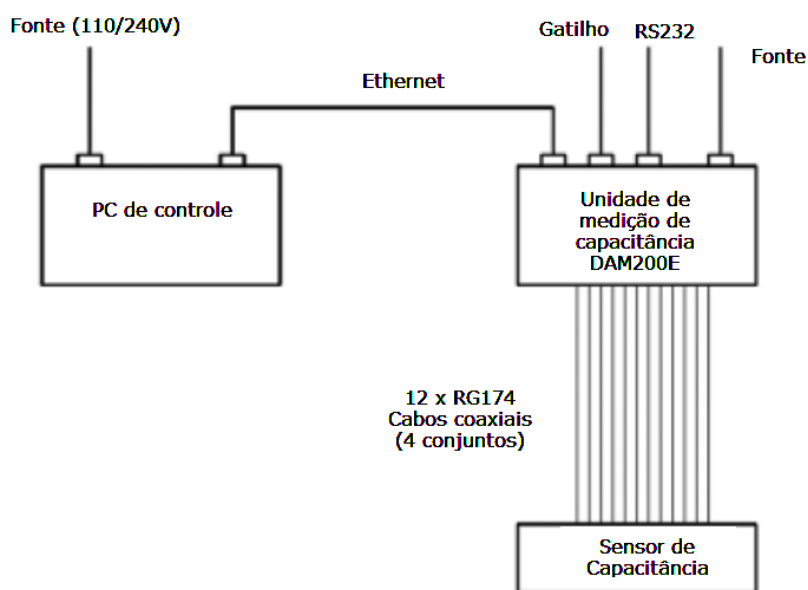
Fonte: Tomoflow. (2003, p.1).

Os retângulos na cor verde representam os eletrodos de medição, enquanto os retângulos na cor preta representam os eletrodos de proteção.

3.4 Calibração do tomógrafo

As medições de fração de vazio por capacitância elétrica realizadas pelo presente tomógrafo (*Tomoflow*) são baseadas na comparação dos valores de rigidez dielétrica dos fluidos em análise e, em seguida, transformadas em imagens do escoamento. Para tanto a calibração do equipamento deve ser efetuada pela comparação de extremos; ver PROCESS TOMOGRAPHY LTD, (2009). Neste trabalho, foi utilizada uma mistura de ar e óleo vegetal.

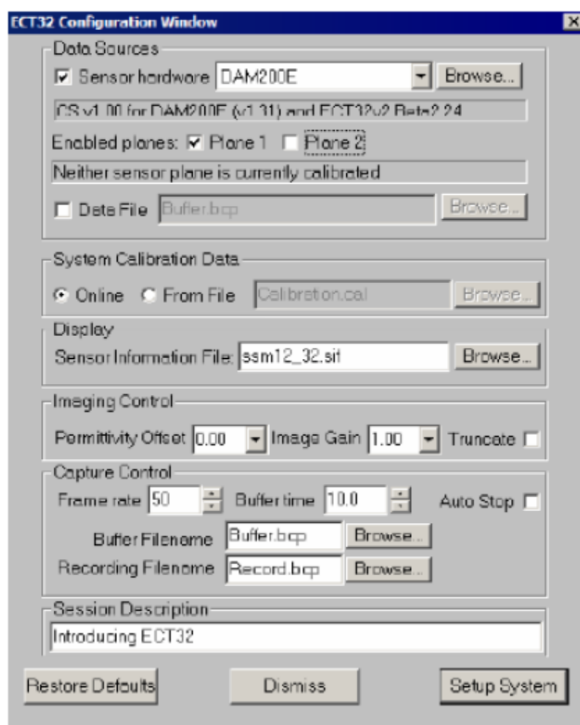
A calibração é iniciada através da conexão entre todos os componentes associados com a tomografia por capacitância elétrica; ver Figura 13. Portanto deve-se verificar a correta conexão do sensor com a central de processamento de dados, e da central de processamento com o computador que monitora o sistema; ver Figura 16.

Figura 16 - Conexão dos equipamentos do *Tomoflow* ECT

Fonte: Process Tomography Ltd. (2006, p.27).

Uma vez que as conexões foram verificadas, inicia-se o processo de calibração utilizando o programa ECT32 v2 que está incluído no pacote do *Tomoflow*. Em sua primeira utilização devem-se restaurar as configurações padrão, selecionar os dois planos de medição e utilizar o arquivo de informações do sensor correto, que é enviado junto com o sensor pelo fabricante do mesmo; ver a janela de configurações da calibração na Figura 17.

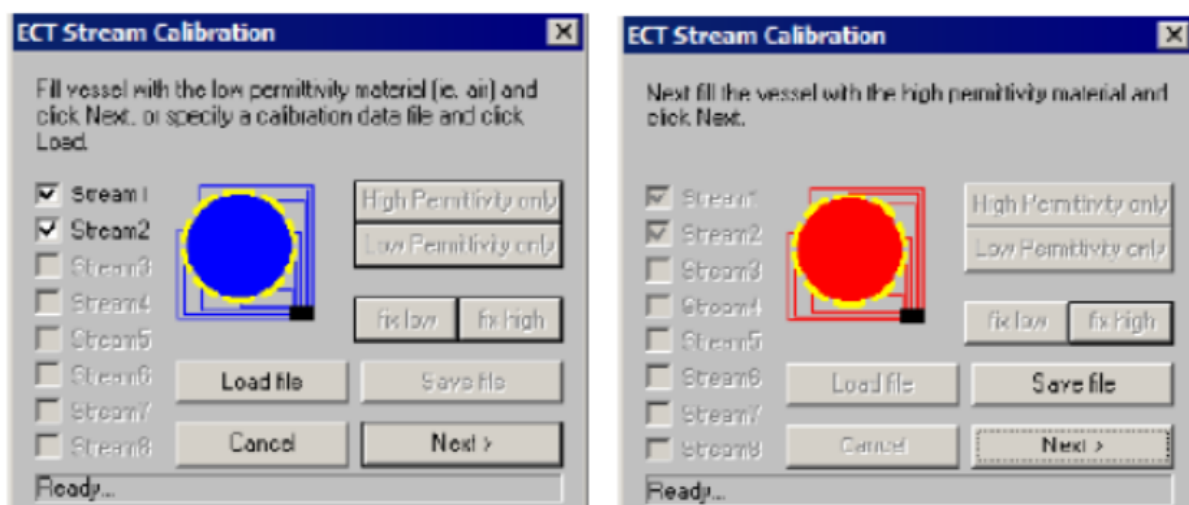
Figura 17 - Janela de configurações da calibração



Fonte: Process Tomography Ltd. (2006, p.29).

Ao utilizar a opção de configuração de sistema, é necessário informar o valor de menor constante dielétrica (fluido mais permissivo). Portanto, a calibração deve ser iniciada apenas com ar presente entre os eletrodos. Na segunda etapa, preenche-se a região entre os sensores com o fluido de maior constante dielétrica (o óleo); ver Figura 18. Desta forma, o sistema ECT gera um arquivo de calibração que serve para a análise de escoamentos com concentrações intermediárias.

Figura 18- Janelas de configuração com sensor vazio e com o sensor cheio.

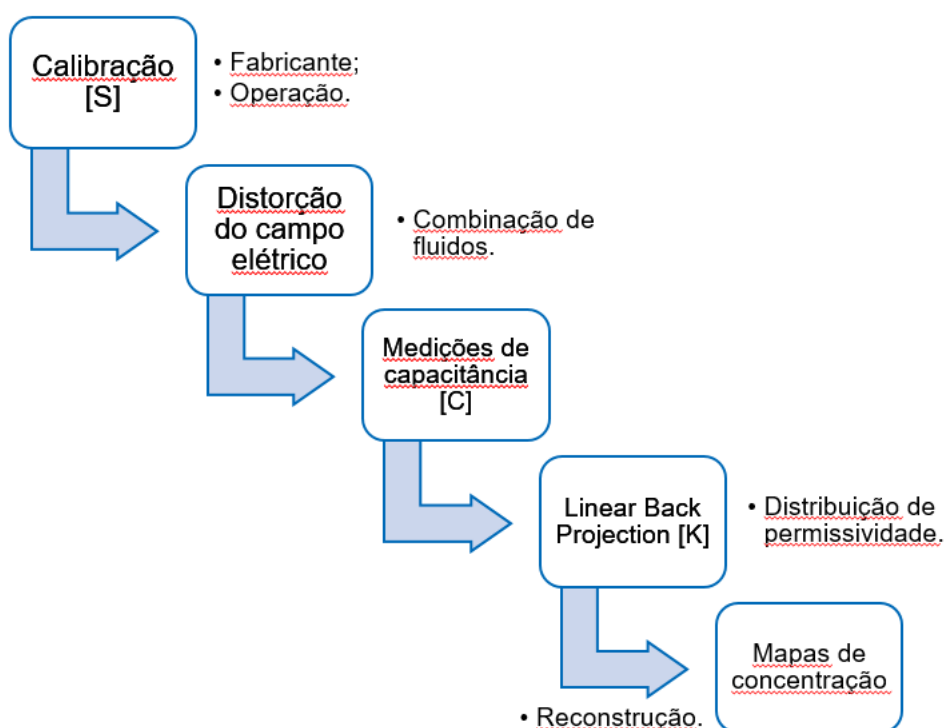


Fonte: Process Tomography Ltd. (2006, p.30).

3.5 Medição de fração de volume

A fração de volume é obtida a partir das medições de capacitância, posteriormente convertidas em imagens de distribuição de permissividade e, em seguida, convertidas em mapas de concentração. Este processo se baseia na distorção do campo elétrico causada pela presença de fluidos com diferentes propriedades dielétricas entre os sensores. Algoritmos são então utilizados para relacionar as medições de capacitância com a concentração da mistura presente no sensor; ver manual do TOMOFLOW LTD (2003). Um exemplo do processo de medição de fração de volume é explicado na figura 19.

Figura 19 - Processo de medição de fração de volume.



Fonte: Autor (2016).

O método utilizado nesse algoritmo é o *Linear Back Projection (LBP)*, baseado em um conjunto de transformadas e transformadas inversas de matrizes. A transformada direta é representada na equação 31, relacionando a matriz de capacitâncias medidas, [C], com a matriz de permissividades, [K], através de uma matriz de sensibilidade, [S]:

$$[C] = [S][K] \quad (31)$$

Os elementos da matriz de capacitâncias [C] são variáveis independentes, obtidas durante medições com a mistura de fluidos. Procura-se a determinação dos

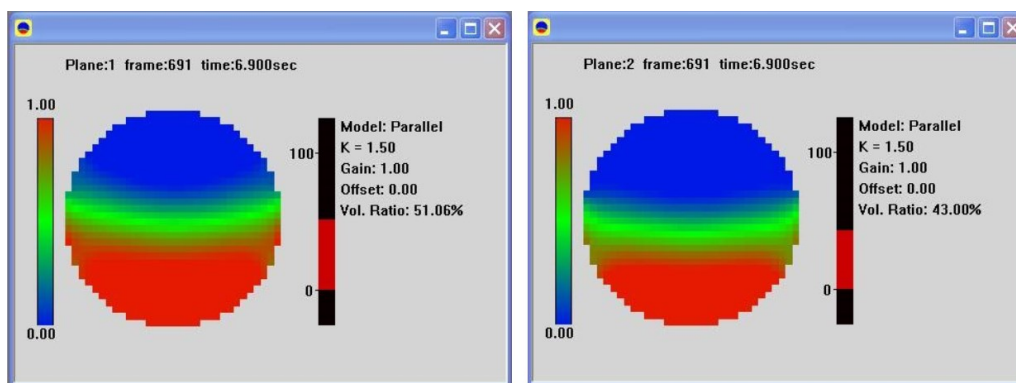
elementos da matriz de permissividade $[K]$, variáveis dependentes. Esta última é obtida a partir da matriz $[Q]$ através de transformada inversa; ver equação 32. A matriz $[Q]$ seria, a princípio, a inversa da matriz $[S]$. Contudo, a inversa de matrizes somente é possível para matrizes quadradas, que não é o caso da matriz $[S]$. Portanto, uma aproximação da inversa de $[S]$, $[Q]$, é utilizada:

$$[K] = [Q][C] \quad (32)$$

O processo descrito acima ocorre de forma automática no software ECT32. O usuário deve apenas informar: o arquivo com as informações do projeto atual do conjunto de sensores, o modelo de reconstrução e a relação entre permissividades K para os modelos em série, em paralelo ou de Maxwell. No caso de medições utilizando o modelo de reconstrução em paralelo, a relação de permissividade não é exigida.

Imagens usuais de medição estão dispostas na Figura 19. Percebe-se, de forma gráfica, a distribuição de concentração nos dois planos de medição e a fração de volume em cada um deles em um determinado tempo t . Uma imagem similar à disposta na Figura 20 é gerada a cada quadro de captura da medição. No exemplo abaixo foram utilizados 100 quadros de captura por segundo.

Figura 20 – Exemplo de medição obtida pelo *Tomoflow* ECT

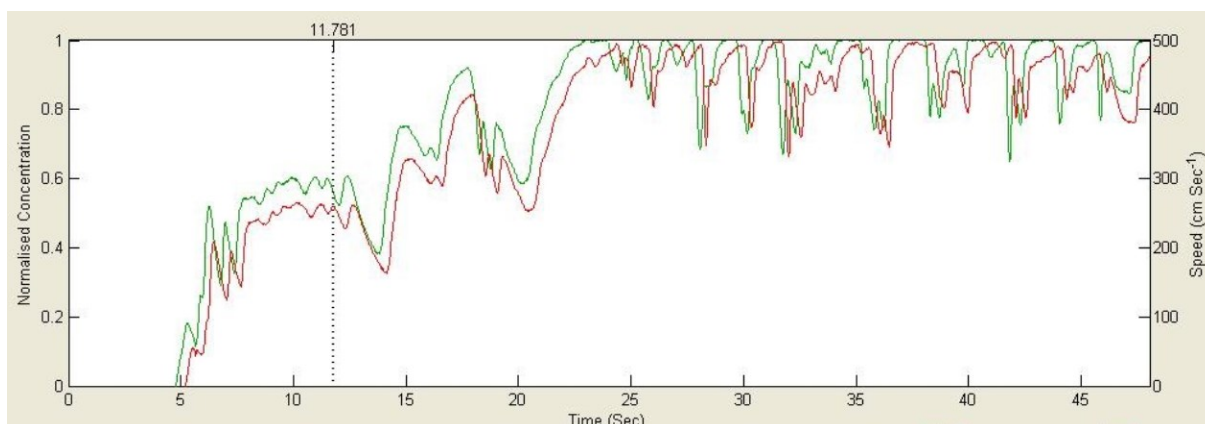


Fonte: Manual do Process Tomography Ltd. (2006, p.98).

3.6 Histogramas de concentração

Com as medições de concentração a cada quadro obtidas através do ECT32 v2, diversas análises podem ser realizadas através do programa Flowanv1.33. Pode-se, por exemplo, analisar a concentração ao longo do tempo (em um pixel, em uma zona ou em toda seção), demonstrando a fração de volume do material menos permissivo que passou pelos planos 1 e 2. Um exemplo de valores de concentração em toda a seção para os planos 1 (verde) e 2 (vermelho) é observado na Figura 21.

Figura 21 - Concentração ao longo do tempo nos os planos 1 (verde) e 2 (vermelho).



Fonte: Autor (2016).

3.7 Medições de velocidade

Medições de velocidade são necessárias para estimar as vazões volumétricas e mássicas. A determinação de velocidade e vazão em escoamentos monofásicos é em geral obtida com precisão a partir de técnicas simples. Porém, sistemas bifásicos exigem técnicas mais sofisticadas para a determinação precisa de velocidades e vazões.

Em geral a medição de velocidade através de ECT se baseia no tempo que determinada partícula fluida leva para percorrer uma distância conhecida *a priori*. Faz-se necessária a utilização de uma técnica capaz de verificar o tempo de trânsito através dessa distância previamente determinada. A técnica utilizada para calcular o tempo de trânsito t no Flowan é baseada na correlação cruzada. Conhecendo-se t e a distância entre os sensores, l , calcula-se a velocidade v das estruturas do fluxo através da equação 33:

$$v = \frac{l}{t} \quad (33)$$

Parâmetros que definem características da correlação são processados no software Flowan para o cálculo da velocidade. O comprimento do sensor (*sensor length* no programa), característica geométrica, e os limites de velocidade (*speedlimits*) estabelecem uma faixa possível de velocidades, definindo as escalas dos gráficos. A escolha da janela de tempo (*window*) foi explicada na seção 2.8.3. Utiliza-se um valor arbitrário inicialmente para obter um tempo estimado de trânsito. Na prática, procura-se uma janela de tempo T aproximadamente duas vezes maior que o tempo de trânsito τ (nota-se que estimativas de velocidades característica facilitam o funcionamento do *Tomoflow* ECT). O campo de correlação mínima (*minimum correlation*) permite filtro de ruído (eliminação de picos em baixos valores do correlograma). Valores muito baixos provocam estimativas de velocidade não

realísticas. O campo que permite encontrar o máximo valor da correlação (*maxfindmode*) define a função que procura o pico do correlograma. As seguintes funções estão disponíveis:

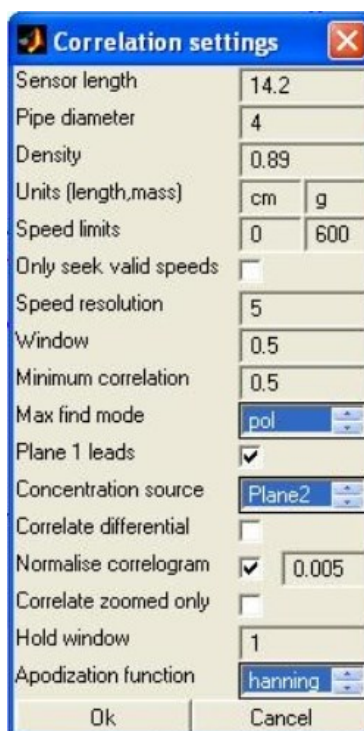
- Pol – trata-se de uma função polinomial, ajustada através de pontos em torno do valor máximo absoluto do conjunto de dados medidos. Considera-se o máximo desta função polinomial;
- COG – utiliza-se a área da curva do correlograma. Essa área é calculada acima de um limiar escolhido. O valor da janela de tempo é selecionado de acordo com o centro da área calculada;
- Max – Considera-se apenas o valor absoluto máximo da correlação.

A opção “plano 1 lidera” (*plane 1 leads*) é utilizada para definir o sentido (positivo ou negativo) no qual o fluxo está sendo considerado. Ao marcar esta opção, considera-se que o escoamento ocorre do plano 1 ao plano 2. Ao acionar o campo “correlacionar o diferencial” (*Correlate differential*), altera-se o processo de correlação, que era anteriormente baseado nos sinais de concentração. Com essa mudança, a correlação é processada a partir do diferencial dos valores de concentração. A vantagem em alterar o método de correlação com a opção acima reside na caracterização de padrões de escoamento onde mudanças bruscas de concentração ocorrem; e.g. padrões do tipo *slug*.

Outras opções de processamento são descritas a seguir. A opção “normalizar a correlação” (*Normalize correlogram*) habilita a utilização de coeficientes de correlação normalizados. O campo “correlacionar apenas o destacado” (*Correlate zoomedonly*) permite correlacionar apenas uma fração do tempo total de medição. A opção “segurar a janela” (*Holdwindow*) estabelece valores anteriores de velocidade para quadros onde o processamento da correlação não foi adequado. Desta forma, o valor inserido em *holdwindow* é o tempo máximo no qual esta condição foi utilizada. O campo de “função de apodização” (*Apodizationfunction*) filtra arestas pontiagudas no processo de correlação, possuindo quatro opções: Uniforme, Bartlett, Welch e Hanning; ver Figura 11.

As configurações utilizadas para a ferramenta de correlação estão exemplificadas na Figura 22. Os demais campos e valores não relatados são referentes ao cálculo de vazão.

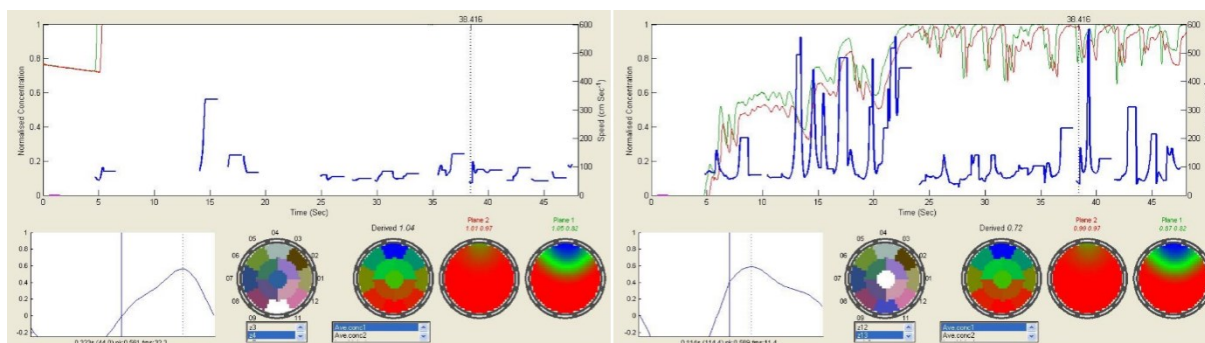
Figura 22 - Configurações de correlação utilizadas para cálculo do campo de velocidades.



Fonte:Autor (2016).

Ao aplicar a correlação nos dados gravados, o Flowan cria gráficos da velocidade ao longo do tempo para diferentes regiões analisadas no tubo (em um pixel, uma zona ou em toda a seção transversal). Em alguns instantes de tempo e em determinadas regiões da seção transversal, o processo de correlação falha, gerando descontinuidades no perfil de velocidade; ver Figura 23, por exemplo.

Figura 23 – Comparação dos perfis velocidade para diferentes regiões da seção transversal do tubo.



Fonte:Autor (2016).

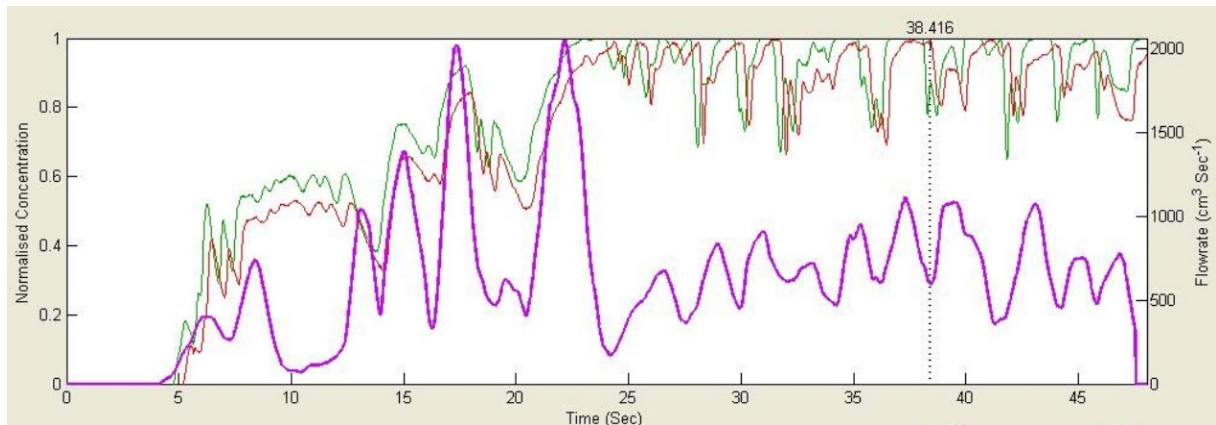
3.8 Medições de vazão

Uma vez que as velocidades foram definidas, é possível obter vazões volumétricas locais (em um pixel ou em uma zona), $q_i(t)$, através da equação 34. Sendo $v_i(t)$ a velocidade local, $C_i(t)$ a concentração local e $A_i(t)$ a área de em pixel i ou de uma zona i . A velocidade é obtida pela correlação das concentrações ou do diferencial de concentrações, a distribuição de concentração pelas medições do conjunto de sensores e a área é conhecida *a priori*.

$$q_i(t) = v_i(t)C_i(t)A_i(t) \quad (34)$$

As vazões locais $q_i(t)$ podem ser somadas para obter uma vazão volumétrica total, $q(t)$. Esse processo é feito através da integração de $q_i(t)$ em toda seção transversal. Um exemplo é apresentado na Figura 24.

Figura 24 – Exemplo da vazão volumétrica total em função do tempo.



Fonte: Autor (2016).

A vazão volumétrica pode ser integrada no tempo para encontrar o volume total escoado V através da equação 35. Conhecendo a massa específica (densidade) do material de maior rigidez dielétrica, obtém-se a massa total que escoou no experimento através da equação 36. A densidade do material analisado deve ser informada pelo usuário na configuração de correlação.

$$V = \sum_{t=t_1}^{t_2} \sum_{i=1}^n q_i(t) \Delta t \quad (35)$$

$$m = V\rho \quad (36)$$

Na figura 25, é apresentado um exemplo com as equações exibidas acima pelo software Flowan.

Figura 25 - Massa total que escoou num experimento aleatório.



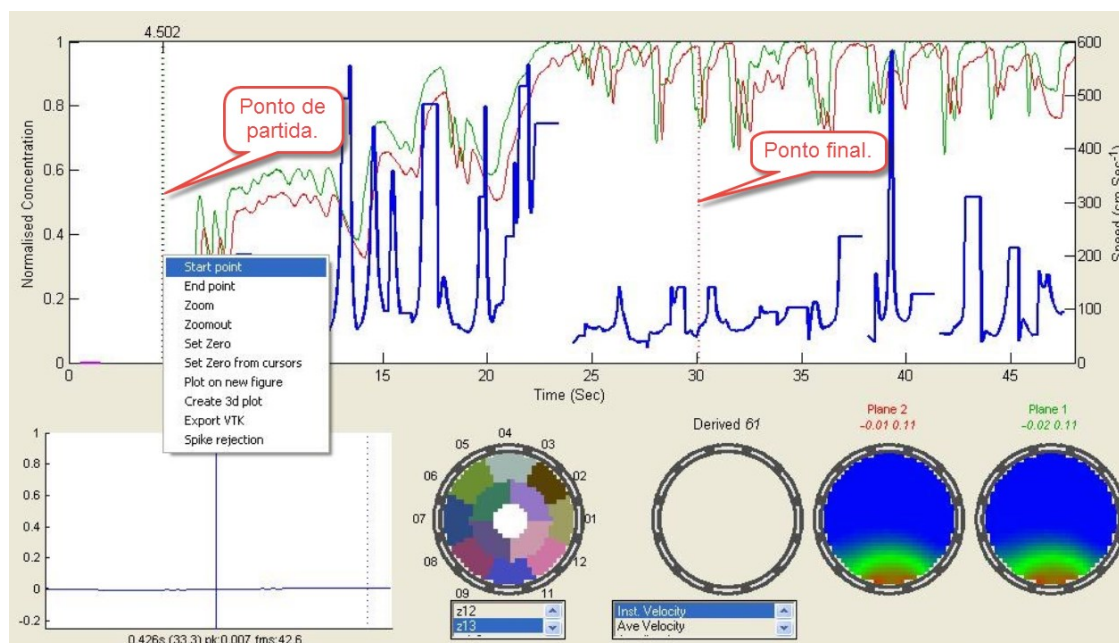
Fonte:Autor (2016).

3.9 Reconstrução tridimensional do escoamento

A partir dados gerados e explicados nas seções anteriores, é possível criar uma representação tridimensional do escoamento. Para que esta etapa seja possível, é necessário que o processo de correlação já se tenha aplicado e as velocidades das estruturas locais estejam disponíveis.

O primeiro passo para a definição da reconstrução tridimensional é a definição do ponto inicial e final num período de medição qualquer. Um exemplo de definição pode ser observado na Figura 26.

Figura 26 - Configurações para a seleção do período no qual ocorrerá reconstrução tridimensional.

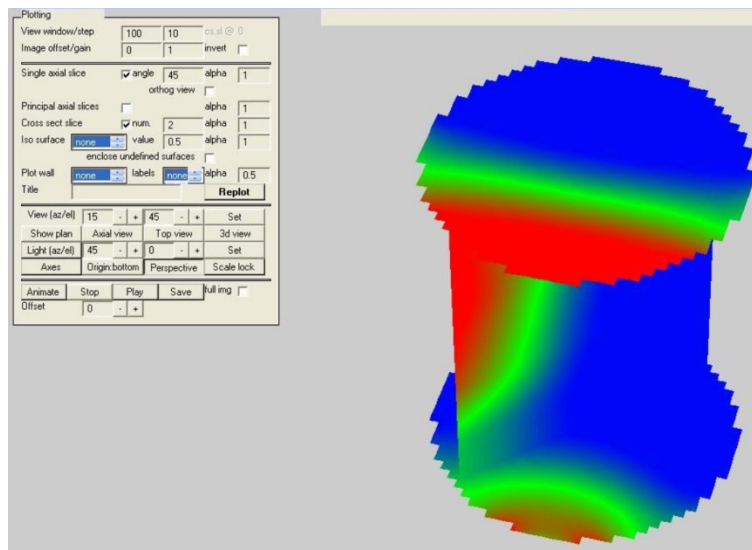


Fonte:Autor (2016).

Uma vez definido o período, a reconstrução tridimensional é iniciada através do comando *Create 3D plot*. A princípio esse comando gera uma representação

preliminar, necessitando de aperfeiçoamento para se tornar representativa; ver Figura 27.

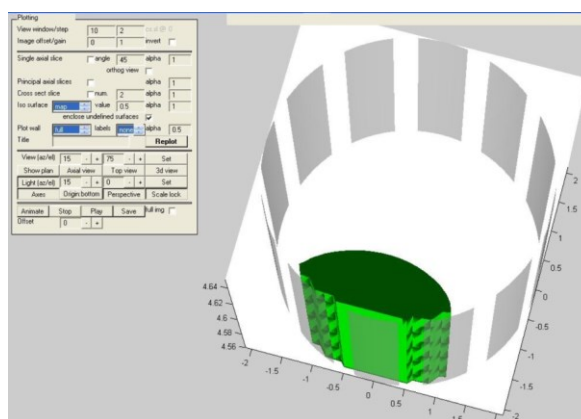
Figura 27 - Reconstrução tridimensional preliminar.



Fonte:Autor (2016).

Ao habilitarmos a função de superfície “iso”, o gráfico de concentrações da figura acima é modificado de forma a demonstrar as interfaces entre os fluidos de diferente permissividade; ver Figura 28. O volume na cor verde representa o fluido de maior rigidez dielétrica. A reconstrução permite a análise das macro-estruturas do escoamento bifásico como, por exemplo, o desprendimento de bolhas ou as escalas características nas interfaces entre os fluidos. A reconstrução integrada de imagens consecutivas pode ainda ser animada em formato de vídeo.

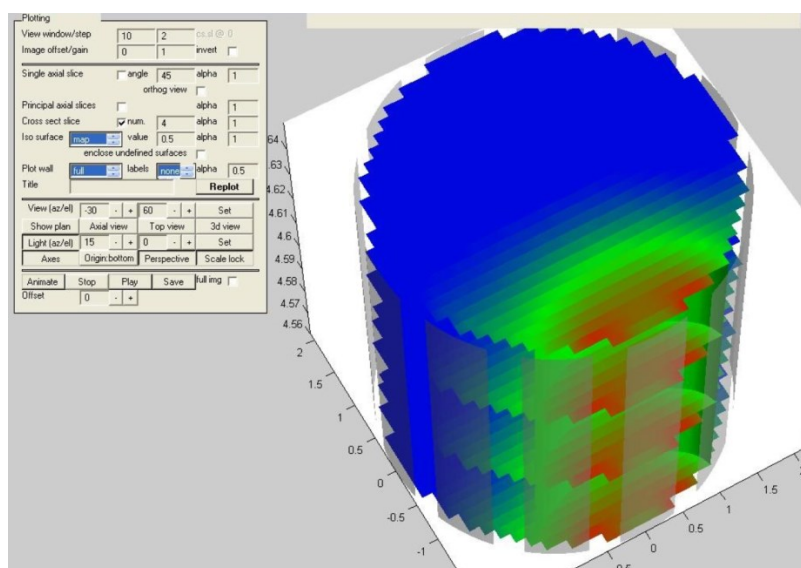
Figura 28 - Reconstrução tridimensional com superfície ISO



Fonte:Autor (2016).

Outra forma de representação da reconstrução tridimensional é através de gráficos de concentração em seções transversais igualmente espaçadas; ver Figura 29. Essa forma de representação permite analisar de uma forma contundente se os mapas de concentração ao longo do tempo evoluem de forma coerente.

Figura 29 - Reconstrução tridimensional em seções transversais igualmente espaçadas.



Fonte: Autor (2016).

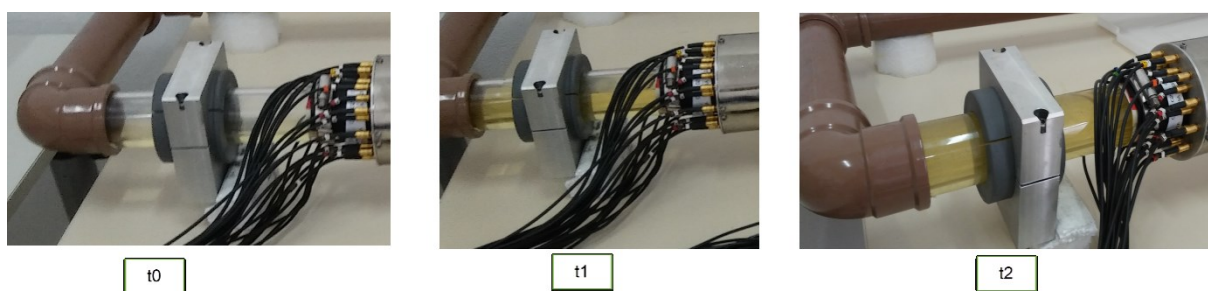
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Nesta seção serão apresentados os resultados obtidos a partir das medições de concentração pelo método de tomografia de capacitância elétrica. Inicialmente foi identificado o tipo de escoamento medido ao comparar as imagens do escoamento com os mapas de padrão de escoamento bifásico. Após a identificação, foram então escolhidos os melhores parâmetros do *Tomoflow ECT* para a análise deste escoamento. Apresentam-se valores correspondentes às vazões analisadas e, por fim, faz-se uma discussão da aplicabilidade do método.

4.1 Padrão de escoamento gerado

A identificação do padrão de escoamento gerado foi realizada através de imagens do escoamento seguido de comparação com fotos de escoamentos registrados em mapas de padrões. As fotos foram tiradas em três instantes: antes de ligar a bomba (t_0), 5 s após ligar a bomba (t_1) e 10s após ligar a bomba (t_2). Os resultados estão apresentados na Figura 30.

Figura 30 - Visualização de uma seção do escoamento em três tempos diferentes.

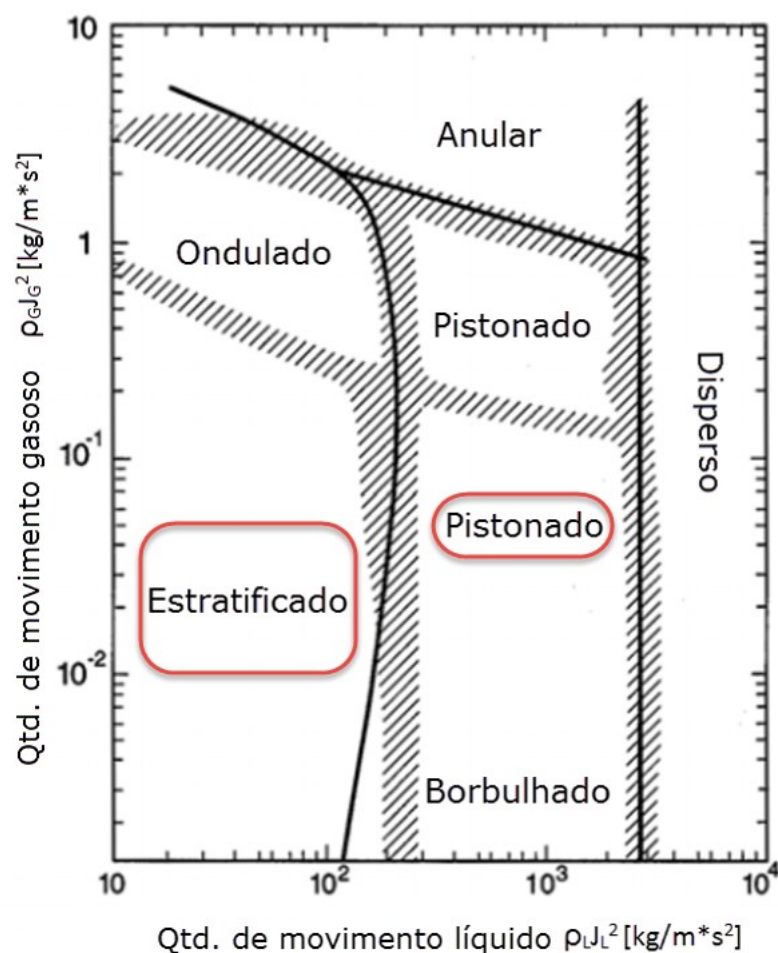


Fonte: Autor (2016).

Comparando as imagens da Figura 29 com o mapa de padrões apresentado na Figura 30, pode-se perceber que o escoamento se comporta de forma intermitente como um escoamento estratificado (com o tubo parcialmente preenchido) seguido de uma grande bolha envolto de líquido (características dos padrões borbulhado, tamponado ou pistonado). Com isso infere-se que o escoamento analisado está caracterizado por fluxos mássicos na região inferior do mapa de padrões, próximo a região de transição estratificado/*slug*. Isso é corroborado pelo baixo fluxo mássico de ar (praticamente nulo). Praticamente apenas o óleo é recirculado na seção de testes. Nessas condições, o fluxo mássico

do óleo determinará o padrão de ocorrência: estratificado, *slug* ou disperso. Como a Figura 31 representa um mapa de padrões para escoamentos de água e ar, cautela deve empregada nessa análise.

Figura 31– Padrões possíveis do escoamento bifásico óleo-ar na direção horizontal.



Fonte: Brennen (2005) adaptado.

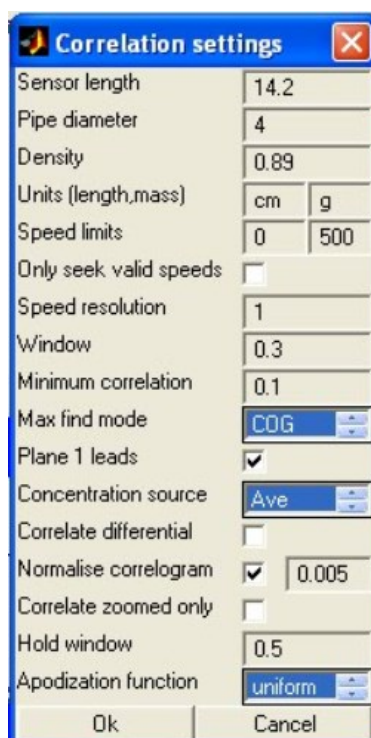
Por fim, considerando que o fluxo mássico da fração de óleo não é elevado, os padrões que serão analisados nesse trabalho são o padrão estratificado e pistonado.

4.2 Influência das configurações de correlação

De modo a verificar a influência das configurações de correlação sobre os resultados de concentração, vazões e velocidades, os parâmetros de correlação foram variados sistematicamente. Alguns parâmetros foram previamente definidos por restrições do problema, como diâmetro do tubo (4 cm), densidade dos fluidos (0,89 g/cm³) e comprimento do sensor (14,2 cm). Parâmetros que necessitam de ajustes são descritos abaixo. Percebeu-se que os parâmetros que mais influenciam são a correlação mínima e a janela de tempo.

O limite de velocidade foi, após tentativa e erro, definido como 500 cm/s após verificar que se tratava do máximo valor de velocidade no experimento. Não houve diferença significativa ao habilitar a opção “*onlyseekvalidspeeds*”. A resolução de velocidade controlada pelo campo (*speedresolution*) foi variada de 1 (resolução fina) a 5 (resolução grosseira). As opções de correlação selecionadas pelo campo (*Max findmode*) foram variadas, mas observou-se pequena dependência deste parâmetro nos resultados finais. Foi utilizado o padrão COG (ver seção 3.7). Os valores de janela de tempo (*HoldWindow*) foram inicialmente definidos como 0,5 e correlação mínima (*minimumcorrelation*) como 0,1. Tais valores apresentaram influência nas velocidades obtidas assim como nos valores de vazão volumétrica e mássica. A ilustração das configurações de correlação utilizada é apresentada na Figura 32.

Figura 32 - Configuração de correlação utilizada.



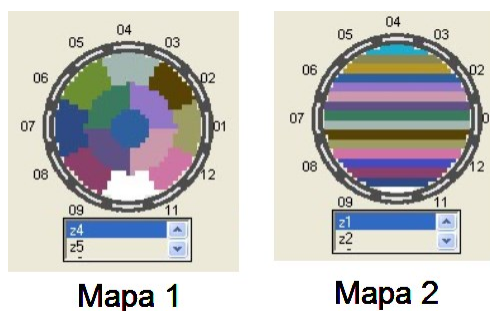
Fonte: Autor (2016).

4.3 Comparação de mapas

A influência do mapa utilizado e do modelo de reconstrução de capacitância nos resultados finais também foram avaliados.

Dois mapas de zonas foram considerados adequados para a representação do escoamento medido. O mapa 1 (Figura 33a) divide a seção do tubo em 13 regiões dispostas ao longo do diâmetro do tubo, já o mapa 2 (Figura 33b) divide a seção do tubo em 16 regiões longitudinais no sentido horizontal do tubo.

Figura 33 - Mapas de zona utilizados para a análise.



Fonte: Autor (2016).

As diferenças entre os mapas analisados nos permitem avaliar diferentes fenômenos presentes no escoamento. O mapa 1 é adequado para avaliar parâmetros presentes nas faces internas do tubo, como por exemplo o perímetro molhado. O mapa 2 possui melhor visualização para gradientes de velocidade ao longo do eixo horizontal.

Dentre os modelos de reconstrução foram testados os três modelos possíveis que o Flowan permite: modelo em série, em paralelo e de Maxwell. Para o escoamento medido, tanto os mapas de zonas quanto os modelos de reconstrução tiveram pouca influência nos resultados finais de concentração e velocidades. Especula-se que as velocidades do escoamento gerado eram baixas e que a alta resolução temporal do equipamento de medição era suficiente para caracterizá-lo corretamente com diferentes variações de configuração dos sensores; ver seção 4.4.

4.4 Influência do modelo de reconstrução

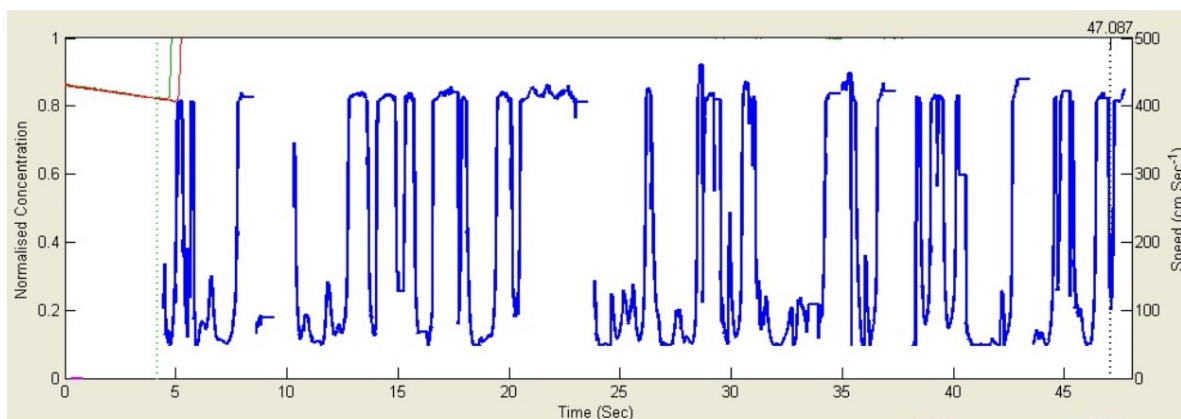
Conforme já discutido, as medições de capacitância podem ser convertidas em perfis de concentração através dos modelos de reconstrução: em paralelo, de Maxwell ou em série. De modo a comparar a influência dos modelos de reconstrução, foram obtidos histogramas de concentração e velocidade em diferentes regiões do tubo para um mesmo escoamento.

A primeira região de análise foi o fundo da tubulação, onde já eram esperados altos valores de concentração de óleo, uma vez que a gravidade faz com que o óleo se concentre na região de fundo. Observa-se na Figura 34 que os modelos de reconstrução para o escoamento analisado possuem pouca ou nenhuma influência sobre os perfis de concentração e velocidade.

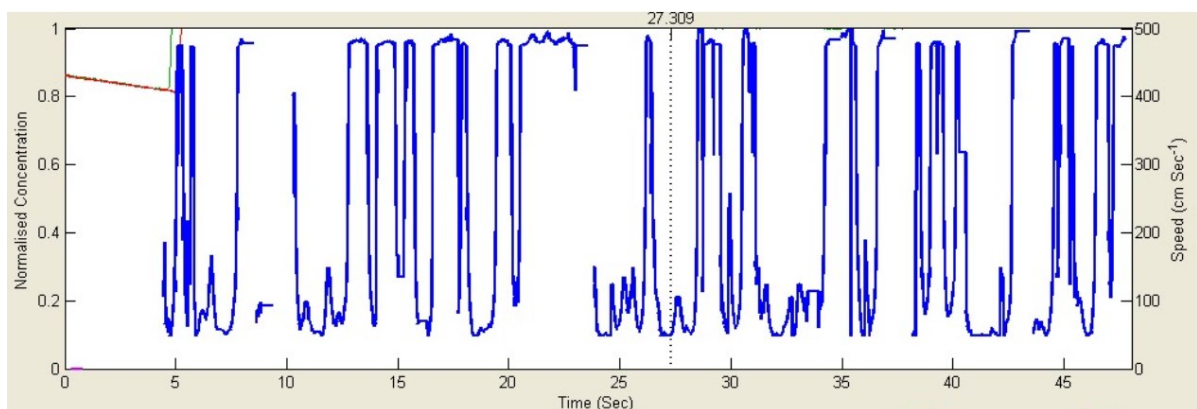
Uma vez que os modelos de reconstrução possuem pouca ou nenhuma influência sobre os valores de concentração obtidos, percebemos ainda que os perfis de velocidade também se mantiveram sem influência dos modelos de reconstrução. Uma pequena diferença foi percebida no histograma de velocidade no fundo do tubo no tempo aproximado de 23 segundos. Contudo, esta pequena diferença não gera modificações significativas nos resultados finais. Aparentemente,

o sensor é robusto para baixas velocidades de fluxo independentemente das configurações de processamento.

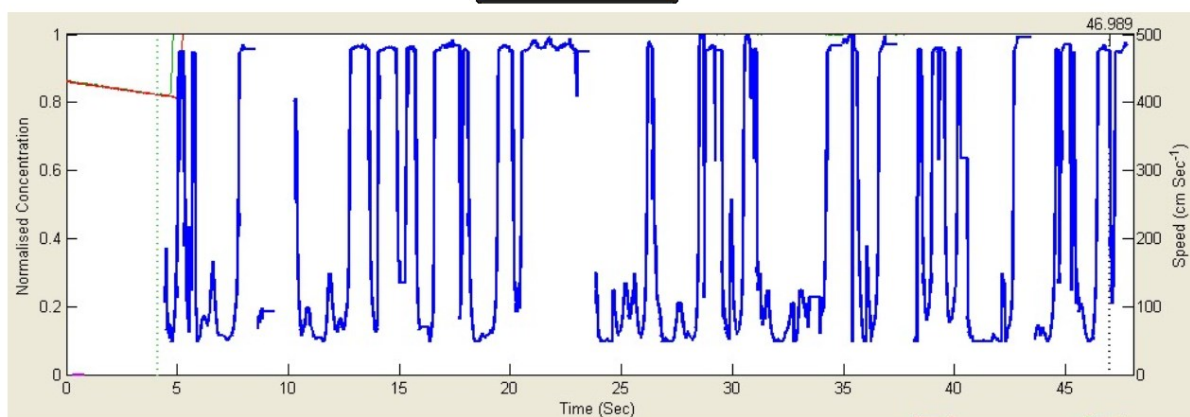
Figura 34 - Comparação dos modelos de reconstrução no fundo do tubo.



Paralelo



Maxwell



Série

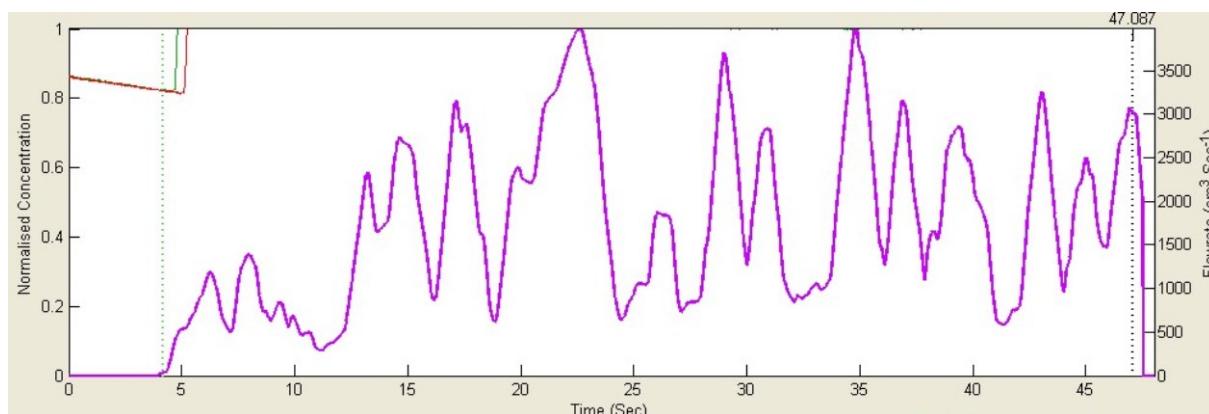
Fonte: Autor (2016).

Conclusões similares são obtidas ao observar a influência dos modelos de reconstrução nos perfis de velocidade em outras regiões do tubo.

4.5 Vazão volumétrica global

Nessa seção são apresentados valores de vazão volumétrica obtidos pelo Flowan de forma global. A característica intermitente dos valores de vazão apresentados na Figura 35 ocorre devido ao padrão repetido de grandes bolhas ou golfadas ao longo do sensor (ver Figura 29c). Os valores de vazão volumétrica global são apresentados no lado direito e as concentrações normalizadas são apresentadas no lado esquerdo da Figura ao longo do tempo de medição. Notou-se que a variação dos parâmetros de correlação pode afetar a magnitude da vazão. Dessa forma, a informação de velocidades características por outras fontes (e.g. câmera rápida) pode auxiliar no refino dos resultados do Tomoflow ECT.

Figura 35 - Histograma da vazão volumétrica global.



Fonte: Autor (2016).

4.6 Vazão mássica total

A vazão mássica total representa a quantidade de material de menor permissividade que passou entre os planos do sensor durante o período analisado. A medição de vazão mássica total é influenciada pelos parâmetros informados nas configurações de correlação, portanto deve ser analisada com cuidado.

As considerações a serem feitas acerca da vazão mássica total são as mesmas do processo de obtenção dos perfis de velocidade, já que a densidade do fluido analisado é constante nesse experimento. A partir das velocidades obtidas pela correlação em diferentes zonas do tubo e das densidades, o programa Flowan informa o valor de vazão mássica total através de sua caixa de texto.

Para a medição de vazão mássica total, verificou-se com as configurações de correlação já citadas um valor de vazão volumétrica total de 76852 cm^3 e de

quantidade de massa total de 68,398 kg de óleo em um tempo de aproximadamente 47 segundos.

O sistema de medição Tomoflow ainda apresenta o somatório de vazões ou vazão “líquida”. Trata-se da diferença entre o fluxo que passou do sentido do plano 1 para o plano 2 em comparação com o sentido inverso. Como no caso analisado só existe fluxo em uma direção, o valor de fluxo do plano 2 para o plano 1 é igual a zero.

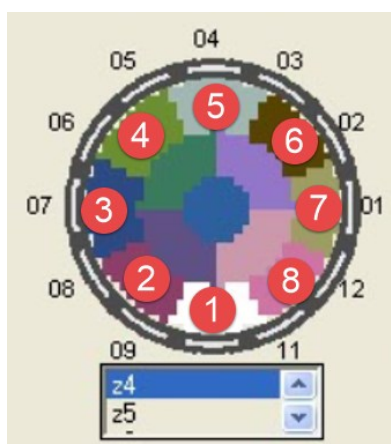
Assim como a velocidade, o parâmetro de vazão mássica total deve ser validado por equipamento ou método adicional, uma vez que os parâmetros de correlação apresentam forte influência nos valores finais. A calibração de vazões médias é relativamente fácil e pode ser obtida através de medição de cada vazão monofásica antes do ponto de mistura.

4.7 Perímetro molhado

Através dos perfis de concentração, é possível estimar o histograma de perímetro molhado da tubulação. Esta métrica permite verificar o percentual da parede da tubulação está sendo percorrida por um dos fluidos e por quanto tempo, influenciando assim parâmetros como a troca de calor, perda de carga e transferência de espécies.

Para exemplificar a utilidade dessa ferramenta, foi escolhido o mapa de zonas 1 (Figura 32a) e consideradas as regiões ao extremo do tubo, conforme a Figura 36.

Figura 36 - Mapa de zonas com regiões analisadas para perímetro molhado.



Fonte:Autor (2016).

Para cada região analisada foi tomada uma média da concentração ao longo do tempo, que pode ser verificada na Tabela 2.

Tabela 2 - Concentração média da zona.

Zona	6s	11s	16s	21s	26s	31s	36s	41s	Média
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1,00
2	0,9	1	1	1	1	1	1	1	0,99
3	0,3	0,7	0,8	0,75	1	1	1	1	0,82
4	0	0,05	0,1	0	0,5	0,6	0,4	0,7	0,29
5	0	0	0	0	0,5	0,6	0,1	0,3	0,19
6	0	0,05	0,1	0	0,6	0,6	0,3	0,7	0,29
7	0,5	0,7	0,8	0,7	1	1	1	1	0,84
8	0,9	1	1	1	1	1	1	1	0,99

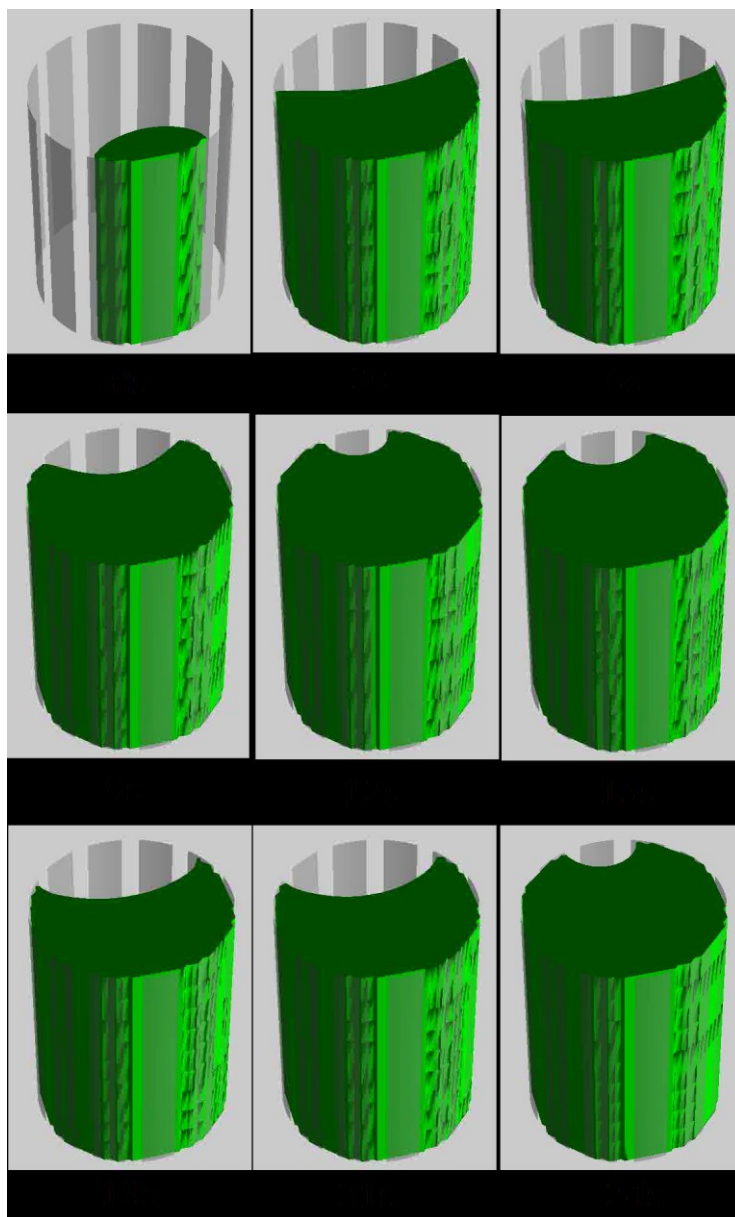
Fonte: Autor (2016).

Através das médias de concentrações em cada região, pode-se inferir a quantidade de óleo presente, e assim estimar o quanto aquela região permanece molhada. Ao tomar uma média de todos estes valores, é possível atribuir um valor de perímetro molhado para o escoamento em análise. Para o escoamento medido, a média temporal e espacial é 0,68. Esse valor indica que, no caso de trocadores de calor, a área efetiva de troca de calor é da ordem de 68% da área superficial do tubo.

4.8 Representação tridimensional através de vídeo

A partir dos dados de concentração e de correlação, é possível realizar representação tridimensional através de vídeo do escoamento medido. As configurações da criação do vídeo foram abordadas no capítulo 4. Imagens do escoamento reproduzido pelo *Tomoflow* são apresentadas a cada 3 segundos na Figura 37, correspondendo ao escoamento apresentado na Figura 30.

Figura 37 - Representação por figuras de vídeo gerado de escoamento.



Fonte: Autor (2016).

Percebe-se que existe um tempo de desenvolvimento do escoamento até os 9 segundos, seguido de escoamento preenchendo o tubo aos 12 segundos, retornando para uma grande bolha de ar aos 21 segundos e novamente preenchendo o tubo aos 24 segundos. Esse processo cíclico se repete ao longo do escoamento gerado.

4.9 Aplicabilidade em fenômenos de transporte

As medições obtidas pelo sistema Tomoflow ajudam diretamente no estudo de fenômenos de transporte, como determinação da transferência de calor e da

potência de bombeamento, permitindo a análise e aperfeiçoamento de diversos equipamentos e sistemas.

Valores de concentração permitem estudar a estrutura do fluxo, e assim definir os modelos matemáticos que serão utilizados para representação do escoamento. Através do mapa de concentração é possível também estimar o perímetro molhado, que afeta diretamente a troca de calor ao determinar a área efetiva de troca.

Através da correlação é possível obter valores de velocidades em diferentes regiões do tubo, gerando assim perfis de velocidade. Tal informação é de extrema importância em fenômenos de transporte em geral, pois auxilia na determinação de perfis de velocidade próximo à parede ou dos perfis das flutuações de velocidade. Esses parâmetros permitem a estimativa de perda de carga e, por analogia Chilton-Colburn, dos coeficientes de transferência de calor.

As características de macro-estruturas de cada padrão de escoamento podem ser avaliadas pelo sensor. Por exemplo, o tempo característico e a frequência de golfadas são determinantes em aplicações de transporte de óleo. Desprendimento de bolhas, trajetória de gotas e características da interface entre os fluidos são essenciais em problemas de separação e refino.

A reconstrução tridimensional por meio de vídeo permite uma análise qualitativa dos fenômenos presentes no escoamento. Avalia-se de forma simplificada como o escoamento se comportou dentro da tubulação e como as estruturas do escoamento se comportam. Essa reconstrução é extremamente difícil com outras técnicas de medição.

4.10 Medição de vazão em tempo real

Apesar de o sistema exigir calibração prévia e análise cuidadosa dos resultados do processo de correlação, a medição de vazão por meio do sistema ECT é bastante prática, principalmente pelo fato de não ser um sistema intrusivo ao fluxo.

O sistema Tomoflow apresenta também um módulo para medição em tempo real através do FlowanRT. Calcula-se a velocidade, a taxa de vazão e fluxo acumulado de massa e vazão. A medição em tempo real possibilita o controle de processos produtivos, como, por exemplo, a quantidade de grãos que está sendo colocado em um container.

5 CONCLUSÕES

É possível perceber que a tecnologia de tomografia por capacitância elétrica (ECT) é adequada para avaliar escoamentos bifásicos onde os fluidos presentes são dielétricos. Destacam-se os perfis de concentração, verificando assim a fração de vazio em diferentes regiões do tubo.

A utilização de mapas de zonas permite avaliar de forma rápida e prática diferentes tipos de escoamentos e também criar perfis de concentração e perfis de velocidade.

Os perfis de concentração são úteis em estudos de troca de calor e potência de bombeamento. Um exemplo é a estimativa de perímetro molhado do tubo, que ao utilizar um mapa correto se mostra útil para determinar a quantidade de fluido que está em contato com a parede do tubo e assim determinar área efetiva de troca.

A utilização de técnicas de correlação permite incluir medições de velocidade em diferentes regiões do tubo. Isto implica no estudo de perfis de velocidade, o que pode ser útil em diversos aspectos da área de escoamentos. Perda de carga, transferência de massa e troca de calor podem ser estimadas. Para determinação de novos modelos, cuidado é importante a partir da calibração dos escoamentos anterior ao processo de mistura. Validação deve ser criteriosa.

A escolha do modelo de reconstrução não apresentou significativa diferença nos resultados de concentração para o escoamento analisado. É possível que essas diferenças se manifestem em diferentes tipos de escoamento ou para escoamentos com maiores velocidades características.

O uso da medição por tomografia de capacitância elétrica em conjunto com o programa Flowan permite ainda a criação de imagens tridimensionais do escoamento analisado, auxiliando no estudo das estruturas dos escoamentos. A partir das imagens geradas é possível também criar vídeos que servem para o estudo do comportamento das estruturas do fluido, bem como estimar alguns parâmetros como as golfadas que acontecem ao analisar os quadros do vídeo.

Por fim, conclui-se que a tecnologia de tomografia por capacitância elétrica pode ser de grande valia para avaliar fenômenos associados a escoamentos bifásicos, e até escoamentos multifásicos onde pelo menos dois fluidos possuem variação em propriedades elétricas.

5.1 Sugestões para trabalhos futuros

Além da continuidade da validação do equipamento, o uso do Tomoflow seria adequado em diversas aplicações em fenômenos de transporte. Citam-se trocadores de calor, processos de extração de petróleo e gás natural e plantas da indústria química.

De modo a verificar valores de concentração obtidos pelo sensor, é possível realizar uma comparação com materiais sólidos. Esses são fáceis de medir e assim a fração de volume que irá ocupar no sensor é conhecida. Desta forma, sugere-se a utilização de barras de algum material dielétrico com diâmetro conhecido para comparar com valores de concentração obtidos pelo método ECT.

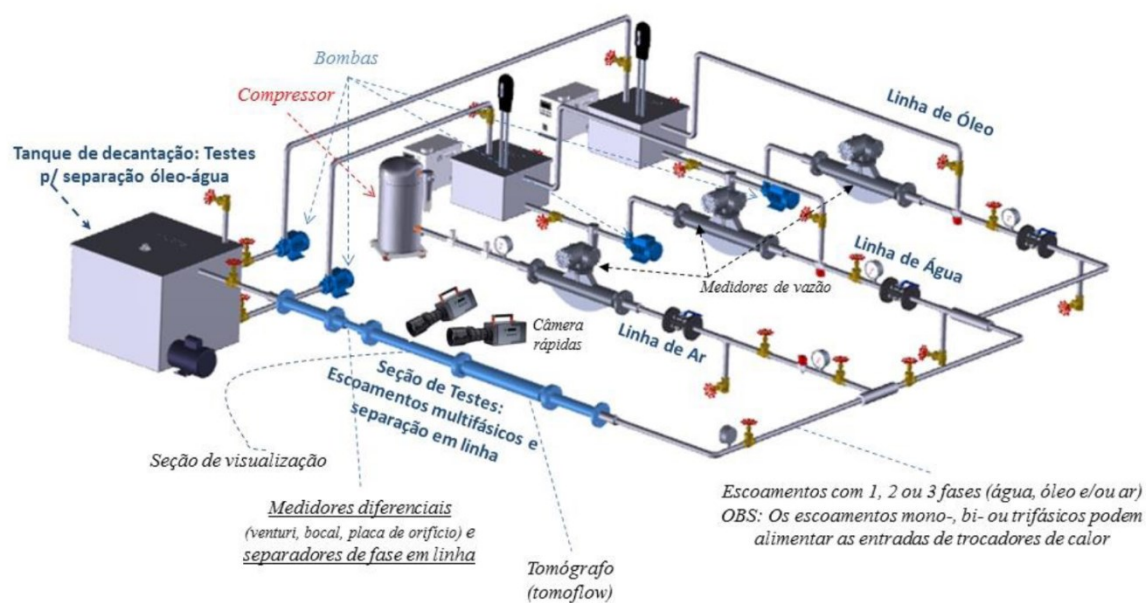
A verificação dos valores gerados pela correlação é uma tarefa mais complexa. Uma sugestão seria utilizar um valor de massa conhecido e passar através do sensor durante um tempo de gravação. Com este valor conhecido de massa, podem-se variar os parâmetros de correlação até que o dado de vazão mássico total medido pelo sensor ECT seja igual ao valor medido antes do escoamento.

Para estudos aprofundados na área de fenômenos de transporte, é importante montar perfis de velocidade. Para tanto, é sugerido isolar os pixels de medição, obter seus valores de velocidade e criar formulações para exibir estas velocidades na forma de um perfil de velocidade que possa ser utilizado em equações características.

Sugere-se ainda gerar outras estruturas de fluxo, como, por exemplo, estruturas pistonadas. Para tanto é necessário variar parâmetros da bomba e da entrada de ar no sistema, exigindo assim um aparato experimental com maior potência.

Para a validação de resultados com ECT e para aprofundar estudos na área de escoamentos multifásicos foi proposta uma bancada de análise de escoamentos de acordo com a Figura 38. Com esta bancada, controla-se o padrão de escoamento gerado a partir de medições individuais em cada linha de escoamento anterior ao processo de mistura. A bancada também permite o estudo de separação de fases em linha e no tanque de decantação.

Figura 38 - Representação em perspectiva da bancada de análise de escoamentos multifásicos.



Fonte: OLIVEIRA (2016).

6 REFERÊNCIAS

BRENNEN, Christopher E. **Fundamentals of Multiphase Flows**. Pasadena: Cambridge University Press, 2005.

COLLIER, John G.; THOME, John R. **Convective Boiling and Condensation**. New York: Oxford, 1994.

Details of the Tomoflow technology. **Process tomography LTD**. Wilmslow, United Kingdom. 2009.

Electrical capacitance tomography, System type PTL300E operating manual. **Process Tomography Ltd**. Wilmslow, United Kingdom. 2006.

HAILE, Gebrehiwot Teame. **Heat transfer in plate heat exchangers**. 2009. 58p. Dissertação – Master's degree programme in chemical and process engineering, Lappeenranta University of technology, Lappeenranta. 2009.

MAXWELL'S EQUATIONS. **Dielectric Constant – Permittivity**. Disponível em: <<http://maxwells-equations.com/materials/permittivity.php>>. Acesso em: 07 nov.2016.

MORAIS, José Mauro de. **Petróleo em águas profundas: uma história tecnológica da Petrobrás na exploração e produção offshore**. Brasília: Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada (IPEA), 2013.

OLIVEIRA, Jorge L. G. O. **Desenvolvimento de um sistema de medição de vazão mássica de baixo custo e alta confiabilidade para escoamentos multifásicos em plantas de produção de óleo e gás natural**. Joinville: Universidade Federal de Santa Catarina, 2016.

OLIVEIRA, Jorge L. G. O. **Medição de vazão de escoamentos bifásicos utilizando tubo de venturi ou placa de orifício associados a um sensor de fração de vazio com campo elétrico girante**. 2007. 116p. Dissertação – Programa de pós-graduação em engenharia mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina – UFSC, Florianópolis. 2007.

RIBEIRO, Marco Antonio. **Medição de petróleo e gás natural**. Salvador: Tek,2003.

THOMAS, José Eduardo. **Fundamentos de engenharia de petróleo**. Rio de Janeiro: Interciência Ltda, 2001.

TFL-003 Sensor test report. **Tomoflow Ltd**. Dorchester, United Kingdom. 2003.

Tomoflow: Flowan User Guide. **Tomoflow Ltd**. Dorchester, United Kingdom. 2006.

User Manual Tomoflow – Flowan v1.33. **Tomoflow Ltd**. Dorchester, United Kingdom. 2003.

User Manual Tomoflow – R100 Flow Analysis System. **Tomoflow Ltd**. Dorchester, United Kingdom. 2003.

YANG, W. Q.; BYARS, M. **An Improved Normalisation Approach for Electrical Capacitance Tomography**. Buxton, Great Manchester.1999.