

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

**CARACTERIZAÇÃO TEMPO-FREQUÊNCIA DE REGIMES DE
ESCOAMENTO BIFÁSICO**

FABIANA LOPES KLEIN



Dissertação apresentada à Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica

Orientador: Prof.Dr. Paulo Seleglim Júnior

São Carlos
- 1999 -



Class.	TESE-EESC
Cutt.	2869
Tombo	172 99

42080000112

S/S 1063923

Ficha catalográfica preparada pela Seção de Tratamento
da Informação do Serviço de Biblioteca – EESC/USP

K64c Klein, Fabiana Lopes
Caracterização tempo-frequência de regimes de
escoamento bifásico / Fabiana Lopes Klein. -- São
Carlos, 1999.

Dissertação (Mestrado) -- Escola de Engenharia de
São Carlos-Universidade de São Paulo, 1999.

Área: Engenharia Mecânica.

Orientador: Prof. Dr. Paulo Seleglim Júnior.

1. Escoamento multifásico. 2. Regimes. 3. Tempo-
frequência. I. Título.

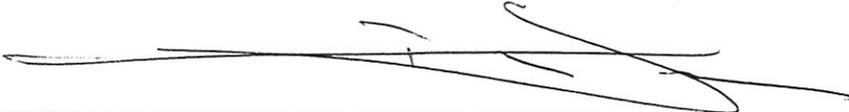
FOLHA DE APROVAÇÃO

Candidata: Licenciada **FABIANA LOPES KLEIN**

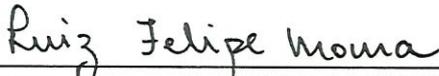
Dissertação defendida e aprovada em 10.09.1999
pela Comissão Julgadora:



Prof. Doutor **PAULO SELEGHIM JUNIOR (Orientador)**
(Escola de Engenharia de São Carlos - Universidade de São Paulo)



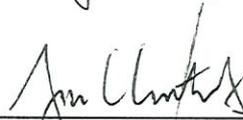
Prof. Titular **JOÃO FERNANDO GOMES DE OLIVEIRA**
(Escola de Engenharia de São Carlos - Universidade de São Paulo)



Prof. Doutor **LUIZ FELIPE MENDES DE MOURA**
(Universidade Estadual de Campinas - UNICAMP)



Prof. Associado **ARTHUR JOSÉ VIEIRA PORTO**
Coordenador da Área de Engenharia Mecânica



JOSÉ CARLOS A. CINTRA
Presidente da Comissão de Pós-Graduação

Aos meus pais.

*À minha mãe, que tanto amo, pelo
enorme apoio, pela dedicação e
por ser a minha melhor amiga.*

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus, acima de tudo.

Ao Prof. Dr. Paulo Seleglim Jr. pela orientação, pela amizade e, principalmente, por acreditar e confiar no meu trabalho.

Ao Prof. Dr. Arthur José Vieira Porto e à comissão de pós-graduação do departamento de Engenharia Mecânica pelos esclarecimentos sempre que necessário.

Ao Prof. Dr. João Fernando Gomes de Oliveira pela amizade, pela ajuda e pelas dicas.

À Kelen por ter sido sempre uma grande amiga e pelo seu companheirismo dentro e fora da Universidade.

À Gi, que apesar de alguns desentendimentos, considero uma grande amiga.

À Luciana pelo tempo gasto me ajudando a elaborar este trabalho e, principalmente, pela amizade e companhia.

Ao meu grande amigo Luciano pelas discussões, sugestões, paciência e pelo empenho em ajudar-me em toda a realização deste trabalho.

Ao Marcello (Barata) pela amizade, companhia, dedicação e pelos bons momentos.

Ao Evandro que ajudou-me, pacientemente, a resolver todos os problemas com o computador.

Aos meus queridos amigos Zé Luiz, Ricardinho, Mateus, Rita, Simone, Carol, Mariana, Fernanda, Susana, Andressa, Cícero e Paola, ao Engana Samba pelos deliciosos momentos de descontração e ao Junior, em especial.

Aos meus grandes amigos Rodrigo, Godoy, Mariano, Todinho, Panamá, Geraldo, Neilor, Claudião, Ana Lúcia, Teodora, Volnei, Celso, Rosenda, Barrão, Dinho, Alessandro, Vagner, Richard, Shammas, Klauss, Alexandre, Alexandre (Mimi), Renato, Adriano.

Aos meus amigos de laboratório Fernando Camargo, Fernando Schiavon, Luben, João Paulo, Márcio, Luchesi, Roberto Carlos Prativiera, Roberto Lourenço, Hélio, Felipe, Torres, Vanessa, Isabela.

Aos meus novos amigos Tonho, Renata, Aureo, Ed., Tutti e todo pessoal da casa da Beth.

Ao Pedro que mesmo longe esteve sempre presente com seu carinho, sua força, sua amizade e seu companheirismo.

À Beth e a Ana Paula não só pela constante disponibilidade em ajudar-me com problemas burocráticos, mas principalmente pela amizade. Em especial à Beth pelo carinho, dedicação, confiança e, acima de tudo, por ser uma pessoa maravilhosa que em tão pouco tempo me conquistou com sua amizade verdadeira e com sua lição de vida.

À minha tia Miriam pela ajuda, pelo carinho e por estar sempre presente nos momentos mais difíceis da minha vida.

À minha avó Izaura e a minha tia Nubia pelo carinho e pelas orações.

À minha avó Baby que lá do céu, tenho certeza, está olhando por mim.

À minha irmã Flavia que, de sua maneira, sempre esteve presente torcendo por mim.

Aos meus tios e primos pelo incentivo e apoio em todos os momentos.

Aos funcionários do departamento de Engenharia Mecânica que sempre estiveram dispostos ao atendimento.

À CAPES pelo apoio financeiro concedido durante o desenvolvimento deste trabalho.

Sumário

LISTA DE FIGURAS.....	iii
LISTA DE TABELAS.....	vi
RESUMO.....	vii
ABSTRACT.....	viii
1 - INTRODUÇÃO.....	1
2 - OBJETIVOS.....	4
3 - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	5
3.1 - Regimes de Escoamento.....	5
3.1.1 - Regimes de Escoamento Gás-Líquido Vertical.....	6
3.2 - Técnicas de Medidas em Escoamentos Bifásicos.....	8
3.2.1 - Fração de Vazio Local.....	10
3.2.2 - Sensor Ótico.....	12
3.2.3 - Anemômetros de Filme e Fio Quente.....	13
3.2.4 - Fração de Vazio Volumétrica.....	16
3.2.4.1 - Método Gravimétrico.....	16
3.2.4.2 - Transdutor de Impedância.....	17
3.3 - Técnicas de Análise de Sinais em Escoamentos Bifásicos.....	20
3.3.1 - Perda de Pressão.....	26
3.3.2 - Método Estatístico.....	28
3.3.3 - Redes Neurais.....	29
4 - METODOLOGIA.....	33
4.1 - Análise de Sinais.....	33

4.1.1 – Análise Temporal dos Sinais.....	34
4.1.2 – Energia de um Sinal.....	35
4.1.3 – Baricentro e Duração de um Sinal.....	35
4.1.4 – Análise Freqüencial dos Sinais.....	36
4.1.5 – Caracterização dos Sinais na Freqüência: Freqüência Média e Banda.....	39
4.1.6 – Interpretando a Transformada de Fourier.....	39
4.1.7 – Classificação dos Sinais.....	41
4.1.8 – A Análise Tempo-Freqüência.....	42
4.1.8.1 – A Necessidade da Análise Tempo-Freqüência.....	44
4.1.9 – Porquê o Espectro Varia?.....	46
4.1.10 – A Transformada a Curto Tempo de Fourier.....	47
4.1.10.1 – A Transformada a Curto Tempo de Fourier: Equações.....	48
4.2 – Instalações Experimentais.....	50
4.2.1 – Descrição do Circuito Vertical.....	50
4.2.2 – A Sonda de Medidas de Condutividade.....	52
4.2.3 – Sistema de Aquisição.....	54
5 - RESULTADOS.....	56
5.1 – Programa Experimental.....	56
5.2 – Análise dos Resultados.....	58
6 - CONCLUSÕES E SUGESTÕES.....	65
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	67

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 3.1 - Regimes de escoamento gás-líquido em um duto vertical.....	8
FIGURA 3.2 - a) Transdutor genérico para fração local; b) sinal característico (MOREIRA, 1989).....	11
FIGURA 3.3 - Sensor ótico para medida de fração local (MOREIRA, 1989).....	12
FIGURA 3.4 - Esquema de um anemômetro de fio quente (DOEBLIN, 1990).....	13
FIGURA 3.5 - Esquema do circuito elétrico: a) anemômetro tipo corrente constante; b) anemômetro tipo temperatura constante (DOEBLIN, 1990).....	14
FIGURA 3.6 - Sensores de filme quente (DOEBLIN, 1990).....	15
FIGURA 3.7 - Método gravimétrico para medição da fração de vazio (MOREIRA, 1989).....	17
FIGURA 3.8 - Esquema básico de um transdutor de impedância.....	18
FIGURA 4.1 - Interpretando a Transformada de Fourier (BRIGHAM, 1988).....	40
FIGURA 4.2 – Gráfico tempo-frequência da onda sonora emitida por uma baleia (COHEN, 1995).....	43

FIGURA 4.3 – Diagrama esquemático do circuito piloto para testes em escoamentos bifásicos gás-líquido verticais: 1) compressor de parafuso, 2) servoválvula, 3) medidor de vazão tipo turbina, 4) válvula anti-retorno para ar, 5) misturador, 6) válvula anti-retorno para água, 7) medidor de vazão eletromagnético, 8) conversor de frequência, 9) bomba hidráulica, 10) caixa d'água, 11) ciclone de separação, 12) torre de sustentação, 13) seção de ensaios e 14) microcomputador de controle.....	51
FIGURA 4.4 - Sonda de medidas de condutividade elétrica.....	52
FIGURA 4.5 – Sonda de anéis desmontada.....	53
FIGURA 4.6 - Sonda de anéis no circuito.....	53
FIGURA 4.7 - Sistema de aquisição: 1) transdutores corrente/voltagem, 2) filtros (anti-aliasing), 3) circuito <i>sample and hold</i> , 4) microcomputador com placa de aquisição, 5) conversor de corrente para voltagem com controle de ganho, 6) retificador com controle offset e 7) filtro Butterworth passa baixo de quarta ordem com frequência de corte de 500Hz.....	54
FIGURA 4.8 – Sala de controle dos ensaios experimentais.....	55
FIGURA 5.1 – Baricentro (volts) em função da velocidade superficial do ar (cm/s).....	58
FIGURA 5.2 – Desvio padrão do sinal (volts) em função da velocidade superficial do ar (cm/s).....	59
FIGURA 5.3 – Diagrama tempo-frequência - escoamento a bolhas ($U_{ar}=0,46$ cm/s, Teste 1).....	61

FIGURA 5.4 – Diagrama tempo-frequência – escoamento pistonado ($U_{ar}=12,71$ cm/s, Teste 9).....	62
FIGURA 5.5 – Frequência média das frequências (Hz), calculadas no plano tempo-frequência, em função da velocidade superficial do ar (cm/s).....	63
FIGURA 5.6 – Desvio Padrão das frequências (Hz), calculadas no plano tempo- frequência, em função da velocidade superficial do ar (cm/s).....	64

LISTA DE TABELAS

TABELA 5.1 - Condições relativas às séries de testes realizados.....	57
--	----

Resumo

KLEIN, F. L. (1999). *Caracterização tempo-frequência de regimes de escoamento bifásico*. São Carlos, 1999. 74p. Dissertação (Mestrado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.

Um dos atributos fundamentais associados aos escoamentos multifásicos é a existência de estruturas características, segundo as quais as diferentes fases do fluido escoam. O surgimento de uma dessas estruturas, conhecidas como configurações ou regimes de escoamento, é determinado pelas vazões e propriedades físicas dos componentes, além de parâmetros geométricos como diâmetro e inclinação do conduto. Do ponto de vista das aplicações práticas, a principal implicação da existência dos regimes de escoamento refere-se a sua forte relação com variáveis operacionais importantes como perdas de pressão, taxas de reação, dissolução química, etc. Assim, em fase de projeto, os modelos físicos capazes de prever sob que configuração um determinado fluido multifásico vai escoar são de vital importância. Apesar do esforço de vários pesquisadores, modelos confiáveis existem unicamente para um número restrito de situações. Portanto, o desenvolvimento de metodologias de caracterização de regimes é de vital importância, não somente para o projeto, mas também para a operação eficiente de equipamentos multifásicos. Nesta direção, a análise tempo-frequência surge como uma possibilidade extremamente promissora, principalmente quanto a sua universalidade, i.e. a aplicação de uma mesma metodologia para todas as configurações de escoamento. Neste trabalho, a transformada de Gabor é aplicada na análise dos sinais de uma sonda de condutividade, instalada em um circuito experimental com escoamentos ar-água verticais. A sonda é constituída de dois anéis perietais feitos em aço inoxidável. A seção de testes, construída em acrílico para permitir a visualização do escoamento, tem 10 m de altura e 50 mm de diâmetro interno. Os resultados demonstram com clareza como a fenomenologia se traduz no plano tempo-frequência, e a universalidade de aplicação do método de análise.

Palavras-chave: escoamento multifásico, regimes, caracterização, tempo-frequência.

Abstract

KLEIN, F. L. (1999). *Time-frequency characterization of gas-liquid flow*. São Carlos, 1999. 74p. Dissertação (Mestrado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.

One of the fundamental attributes associated to the multiphase flows is the existence of characteristic structures, according to which the different phases of the fluid flow. The formation of one of those structures, known as configurations or flow regimes, is determined by the discharges and physical properties of the phases, besides geometric parameters, such as diameter and inclination of the conduit. From the point of view of practical applications, the main implication of the existence of the flow regimes are their strong relationship with important operational variables, such as pressure losses, reaction rates, chemical breakup, etc. So, in a project stage, the physical models capable of predicting under which configuration a certain multiphase fluid will flow are of vital importance. In spite of the effort of several researchers, reliable models exist only for a restricted number of situations. Therefore, the development of methodologies of characterization of regimes is of vital importance, not only for the project, but also for the efficient operation of multiphase equipments. In this direction, time-frequency analysis appears as an extremely promising possibility, mainly regarding its generality, i.e. the application of a same methodology for every possible flow configurations. In this work, Gabor transform is applied in the analysis of the signals from a conductivity probe, installed in an experimental circuit of vertical air-water flow. The probe is constituted of two parietal rings made of stainless steel. The section of tests, built in acrylic to allow flow visualization, is 10 m high and 50 mm internal diameter. The results demonstrate with clarity how the phenomenology translates itself in the time-frequency plane, and show that the method of analysis can be generalised.

Words key: Multiphase flow, Regimes, Characterization, Time-frequency

CAPÍTULO 1 – INTRODUÇÃO

Um fluido multifásico pode escoar segundo diversas organizações topológicas chamadas regimes ou configurações de escoamento. Por exemplo, as duas fases de uma mistura gás-líquido podem escoar horizontalmente de forma dispersa (regimes a bolhas ou gotas pulverizadas) ou segregada (regimes anular e estratificado). Em um leito fluidizado o escoamento gasoso através do sólido particulado pode ser de tal maneira que a fluidização seja homogênea, borbulhante ou caótica, com a formação de vazios sem forma e movimento coerentes. Estes regimes, por sua vez, são determinantes no comportamento de parâmetros macroscópicos tais como perdas de pressão, trocas térmicas etc., podendo variar de maneira brutal de uma configuração de escoamento para outra.

Do ponto de vista das aplicações industriais, a segurança e a longevidade de equipamentos e instalações somente podem ser asseguradas quando estes operam segundo os regimes de escoamento para os quais foram dimensionados. Isso implica não apenas na capacidade de antecipá-los durante a fase de projeto, mas também, durante a fase de operação, de diagnosticar em tempo real sob qual configuração o fluido está

escoando; assim como as possíveis transições entre elas. Isso torna possível retroagir no processo de forma a assegurar um funcionamento otimizado tanto do ponto de vista da segurança quanto da eficiência operacional.

Um exemplo bastante eloquente do potencial prático da aplicação de metodologias de controle ativo em escoamentos multifásicos, refere-se ao bombeamento de óleos de alta viscosidade com auxílio da técnica do *core anular flow* que permite uma otimização bastante significativa. Nesta técnica, a água é introduzida em quantidades controladas no escoamento de forma a reduzir o gradiente de pressão e, em consequência, a potência de bombeamento. Diminuições bastante significativas podem ser obtidas quando a água escoar na região anular e o óleo na região central do tubo (diz-se no jargão que o oleoduto é “lubrificado” pelo filme anular de água). Não obstante, a eficácia comprovada em condições de laboratório, o problema da aplicação desta técnica em condições industriais ou de campo consiste em manter a configuração anular face às perturbações não controláveis, como o relevo percorrido pela tubulação, variações de demanda, etc.

Algumas técnicas empíricas de estabilização do regime de escoamento têm sido empregadas, dentre elas a injeção de quantidades adicionais de água, o que reduz a capacidade útil do oleoduto, ou o uso de aditivos químicos destinados a reduzir a viscosidade do óleo, resultando em um aumento importante dos custos de produção. É evidente que tais soluções são insatisfatórias, seja por razões operacionais ou econômicas.

Uma solução eficaz consiste em dotar o oleoduto de um certo número de dispositivos inteligentes capazes de detectar quando a configuração anular se desestabiliza e de retroagirem no sentido oposto, por exemplo, reinjetando ou extraindo excedentes de água de forma a manter a espessura do filme parietal. É portanto, claro que, o desenvolvimento desse tipo de tecnologia tem como pré-requisito fundamental o diagnóstico automático das diferentes configurações de escoamento multifásico, assim como das transições entre elas.

CAPÍTULO 2 – OBJETIVOS

O propósito deste projeto de mestrado é o de caracterizar, conjuntamente em tempo e frequência, os diferentes regimes de escoamento bifásico vertical gás-líquido.

Este trabalho se focalizará no problema de análise do escoamento bifásico a partir de seus sinais e de suas representações no plano tempo-frequência. Para tanto, serão realizados ensaios em um circuito experimental, e os resultados sistematicamente analisados com o auxílio de rotinas específicas visando a identificação das imagens características de cada configuração de escoamento.

Especificamente os objetivos são:

- a construção de uma sonda de condutividade elétrica, que fornecerá o sinal a ser analisado;
- ensaios e análise dos sinais, transcritos no plano tempo-frequência através da transformada de Gabor;
- caracterização dos regimes de escoamento bifásico gás-líquido em escoamento vertical.

CAPÍTULO 3 - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 - Regimes de escoamento

A análise de escoamento monofásico é feita facilmente, podendo-se estabelecer se o escoamento é laminar ou turbulento, e se ocorre qualquer efeito de escoamento secundário ou de separação. Essa informação é igualmente usada no estudo do escoamento gás-líquido. No entanto, talvez de maior importância nesse último caso seja a topologia ou a organização geométrica das fases constituintes do escoamento. Um regime particular de escoamento depende das condições de pressão, fluxo de calor, e da geometria do tubo. Do ponto de vista do projeto de dispositivos para transporte e manipulação de misturas multifásicas, a grande importância atribuída aos regimes de escoamentos se deve à possibilidade de associar a eles modelos simplificados para o cálculo de parâmetros macroscópicos como perda de carga, taxas de transferência de calor, etc. Na literatura especializada é comum caracterizar os regimes de escoamento de acordo com o posicionamento do duto, seja ele vertical ou horizontal. Neste trabalho de pesquisa os regimes de escoamento estudados serão em tubo

vertical, portanto aqui será dada uma atenção especial para este tipo de escoamento.

3.1.1 - Regimes de Escoamento Gás-Líquido Vertical

Os regimes de escoamento bifásico observados em tubos e condutos verticais serão discutidos abaixo e esquematicamente mostrados na FIGURA 3.1.

Escoamento a Bolhas: No escoamento a bolhas, a fase gás (ou vapor) está dispersa em bolhas discretas em uma fase líquida contínua. Em um extremo as bolhas podem ser pequenas e esféricas; e em outro, podem ser grandes com uma capa esférica e uma cauda plana. Neste último estado, embora o tamanho da bolha não se aproxime do diâmetro da tubulação, há alguma confusão com o escoamento pistonado (COLLIER, 1981).

No escoamento a bolhas, que ocorre para o gás em baixas velocidades, a fase gasosa é distribuída aproximadamente uniforme na forma de bolhas discretas na fase líquida contínua (DRAHOS & CERMAK, 1989), conforme FIGURA 3.1a.

Escoamento Pistonado: No escoamento pistonado as bolhas de gás (ou vapor) têm aproximadamente o diâmetro da tubulação. A parte superior da

bolha tem um formato esférico, enquanto a extremidade inferior é aproximadamente plana, seguida por uma esteira de bolhas menores (ver FIGURA 3.1b). Um filme de líquido descendente separa o “pistão” de gás (bolha maior) das paredes da tubulação. O tamanho do pistão é variável e depende das condições do escoamento (COLLIER, 1981).

Escoamento Agitante: Neste caso, a “ponte” de líquido com bolhas entre os pistões é rompida, por ação hidrodinâmica, formando-se um escoamento de fases separadas, com interface irregular (ver FIGURA 3.1c).

Escoamento Anular: Este é caracterizado por um filme da fase líquida junto às paredes da tubulação e, no centro, ocorre o escoamento da fase gás. Se a vazão de gás for aumentada, observa-se o surgimento de gotas de líquido dispersas no meio gasoso extraídas do filme parietal (COLLIER, 1981). O padrão de escoamento mostrado na FIGURA 3.1d representa o regime *wispy annular* no qual as gotas se encontram aglomeradas na região central do tubo ocupada pelo gás.

Como no escoamento horizontal, o núcleo gasoso contínuo e o filme líquido ao redor do tubo são características do escoamento padrão anular. O filme é aproximadamente uniforme e o total de gotículas no núcleo depende da velocidade da fase e das propriedades do líquido (DRAHOS & CERMAK, 1989).

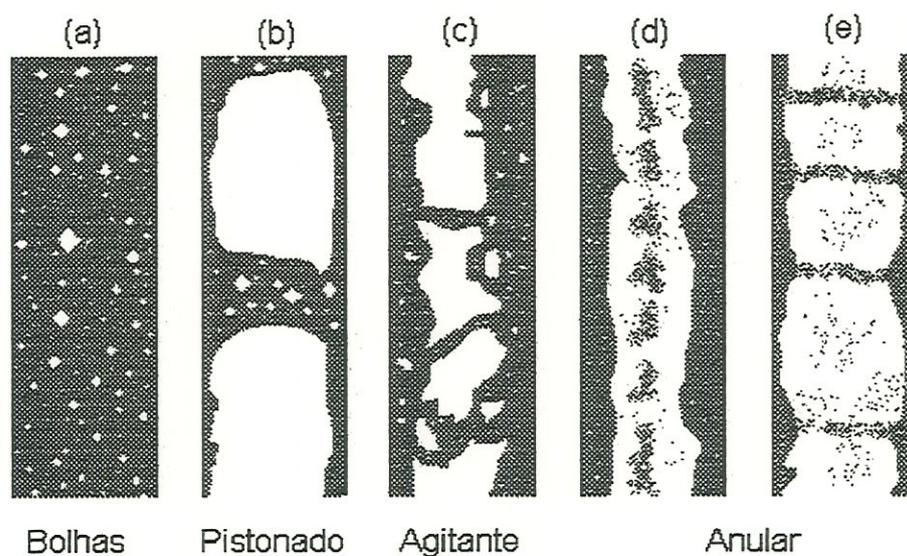


FIGURA 3.1 – Regimes de escoamento gás-líquido em um duto vertical.

3.2 - Técnicas de Medidas em Escoamentos Bifásicos

Escoamentos gás-líquido em dutos ou equipamentos para a manipulação desse tipo de mistura, frequentemente geram grandes dificuldades de projeto e operação. Tipicamente, sistemas de fluidos bifásicos são susceptíveis a instabilidade do escoamento, como por exemplo, flutuações de temperatura e pressão. Como resultado, escoamentos gás-líquido são evitados o quanto possível, separando as duas fases em correntes individuais de gás e de líquido. De qualquer modo, certas condições do processo exigem ou produzem, inevitavelmente, duas fases.

A maior complexidade em escoamentos bifásicos resulta do crescimento e colapso das interfaces gás-líquida que podem gerar vários regimes de escoamento. As velocidades lineares das fases gás e líquida em cada regime de escoamento são impostas pelo comportamento do sistema termohidráulico. De fato, o líquido em um escoamento bifásico pode ser acelerado para velocidades maiores que a velocidade do vapor. Velocidades altas podem causar erosão por corrosão no equipamento ou no sistema de tubulação.

O comportamento termohidráulico do sistema bifásico inclui variações na queda de pressão, padrão de escoamento ou fração de vazio. Aumentando o diâmetro do tubo reduz a queda de pressão para uma dada vazão ou, alternativamente, resulta em um aumento de vazão em função da perda de pressão no sistema de tubulação (DANIELS, 1995). Daí surge a necessidade de se estudar os vários tipos de regimes de escoamento. Existem várias técnicas para identificação de regimes de escoamento bifásico as quais serão discutidas a seguir.

O desenvolvimento de técnicas de instrumentação específicas para escoamentos multifásicos teve um grande impulso a partir de meados dos anos setenta, quando os Estados Unidos, França e Japão passaram a investir maciçamente na geração termonuclear de energia. Neste período surgiu a carta de TAITEL & DUKLER (1976), que foi construída a partir de um modelo matemático considerando as relações entre as seguintes variáveis na transição do regime de escoamento: velocidades superficiais do gás e líquido, propriedades físicas dos fluidos e geometria da tubulação.

Os mecanismos da transição são baseados em conceitos físicos e são completamente estimados sem levar em consideração a existência dos regimes.

Diversas técnicas de medição da fração de vazio têm sido utilizada pelos pesquisadores nos últimos quarenta anos. Os mais variados princípios são utilizados no sentido de se quantificar, ou apenas acusar, a presença da fase na mistura bifásica. Há técnicas de medição que requerem instrumentação sofisticadas, como os aparelhos de absorção (como por exemplo os de raio X), e técnicas mais acessíveis, como os sensores resistivos (MOREIRA, 1989).

A aplicação de um ou de outro tipo de instrumento é determinada por fatores inerentes à própria mistura bifásica (como suas propriedades elétricas, térmicas, óticas, de absorção, etc.) e das condições de operação (regime de escoamento, velocidade, temperatura e pressão).

A seguir serão apresentados os instrumentos mais conhecidos para medição da fração de vazio, classificados pelo tipo de média espacial em que se enquadram.

3.2.1 – Fração de Vazio Local

Os instrumentos que se enquadram sob esta classificação são caracterizados por informar a presença (ou ausência) das fases numa

pequena região localizada no interior do escoamento bifásico. Quanto menor for o tamanho da extremidade sensora, tanto mais os sinais do sensor se aproximarão da função indicadora de fase, X_k , definida como indicador da presença da fase K (K=Líquido ou Gás) em um dado ponto \bar{x} e instante t. Assim,

$$X_k(\bar{x}, t) = \begin{cases} 1, & \text{se a fase K está presente.} \\ 0, & \text{se a fase K não está presente.} \end{cases} \quad (3.1)$$

Um pequeno sensor, FIGURA 3.2.a, é imerso na mistura. Conforme gás ou líquido atinge a extremidade sensora, sinais elétricos característicos são gerados. Dessa forma, o resultado final é um gráfico do tipo daquele esboçado na Figura 3.2.b.

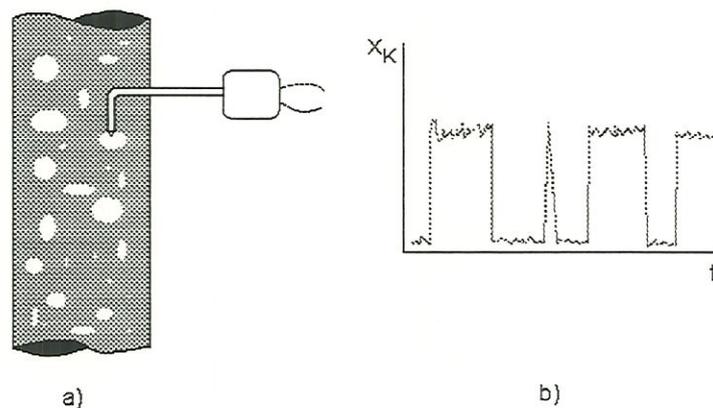


FIGURA 3.2 – a) Transdutor genérico para fração local; b) Sinal característico (MOREIRA, 1989).

3.2.2 – Sensor Ótico

O princípio de funcionamento deste tipo de transdutor está baseado na diferença que existe entre o índice de refração das fases gás (n_G) e líquida (n_L). MOREIRA (1989) dá um exemplo desse tipo de sensor, mostrado na FIGURA 3.3.

O sistema foto-transdutor serve para indicar os casos em que o feixe ótico, emitido pela lâmpada, atravessa ou não a fibra ótica. Quando a extremidade da sonda está em meio gasoso, a quantidade de luz refletida é mínima. Já quando em meio líquido, a quantidade de luz refletida é bem maior que no meio gasoso. Essa luz refletida é transmitida para um foto-sensor que transforma esse sinal em sinal elétrico, o qual, durante um determinado intervalo de tempo, dará uma resposta semelhante ao gráfico da FIGURA 3.2.b.

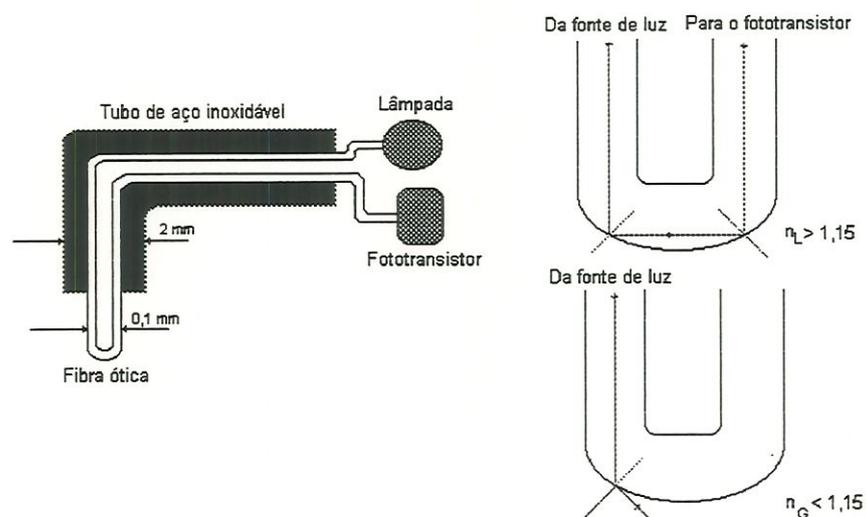


FIGURA 3.3 – Sensor ótico para medição de fração local (MOREIRA, 1989).

3.2.3 – Anemômetros de Filme e Fio Quente

Anemômetros de fio quente (FIGURA 3.4) comumente são de dois tipos básicos:

- a) corrente constante
- b) temperatura constante

Ambos utilizam o mesmo princípio físico, mas em formas diferentes. No anemômetro tipo corrente constante, um fino fio resistivo, sob uma corrente elétrica constante, é exposto a um escoamento. O fio alcança uma temperatura de equilíbrio quando o calor gerado $R.I^2$ (R =resistência, I =corrente) é balanceado pela perda de calor convectivo de sua superfície. O circuito é projetado de tal modo que o calor $R.I^2$ seja essencialmente constante, assim a temperatura do fio pode ser ajustada pela variação da perda convectiva até que o equilíbrio seja alcançado. A temperatura do fio pode ser medida através de sua resistência elétrica.

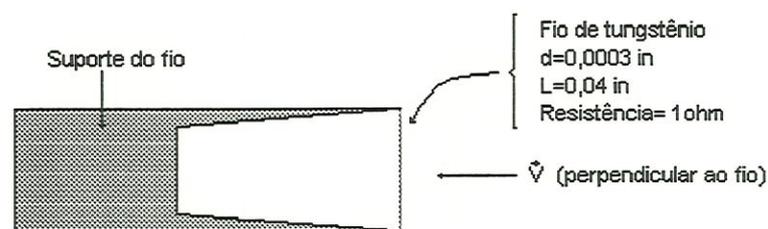


FIGURA 3.4: Esquema de um anemômetro de fio quente (DOEBLIN, 1990).

Para anemômetro tipo temperatura constante, a corrente através do fio é ajustada para manter a temperatura do fio constante. A FIGURA 3.5 mostra o arranjo do circuito elétrico para ambos os tipos de anemômetros de fio quente.

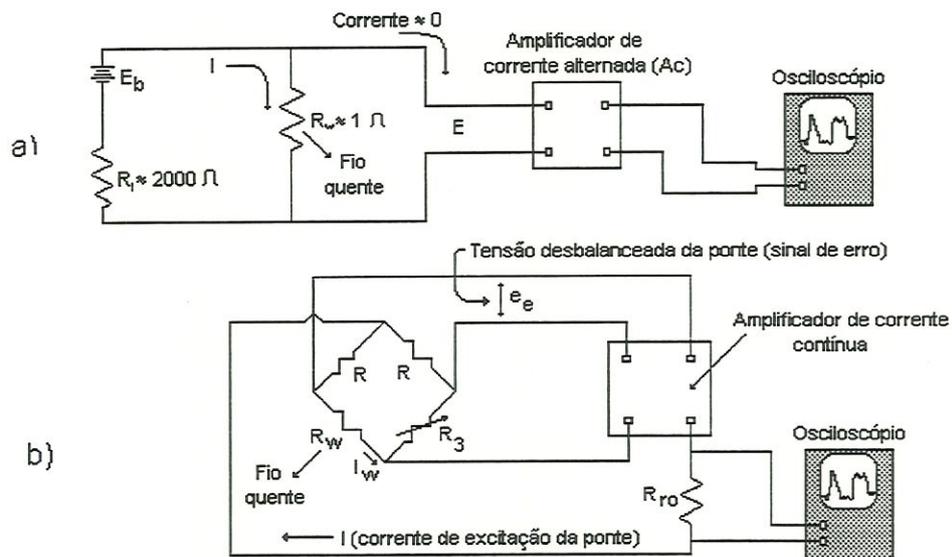


FIGURA 3.5 – Esquema do circuito elétrico: a) anemômetro tipo corrente constante; b) anemômetro tipo temperatura constante (DOEBLIN, 1990).

Uma variação do anemômetro de fio quente é o transdutor de filme quente. Nesse, o elemento resistivo é um fino filme de platina depositada sobre uma base de vidro. O filme toma lugar do fio quente e o circuito elétrico necessário é basicamente similar àquele usado para o anemômetro de fio quente tipo temperatura constante. Os anemômetros de filme quente apresentam maior resistência mecânica que seus similares. Dependendo da utilização, os anemômetros de filme quente podem apresentar dutos de

água para refrigeração (DOEBLIN, 1990), o que permite utilizá-los em altas temperaturas. São possíveis várias configurações para esses sensores, a FIGURA 3.6 mostra duas possibilidades.

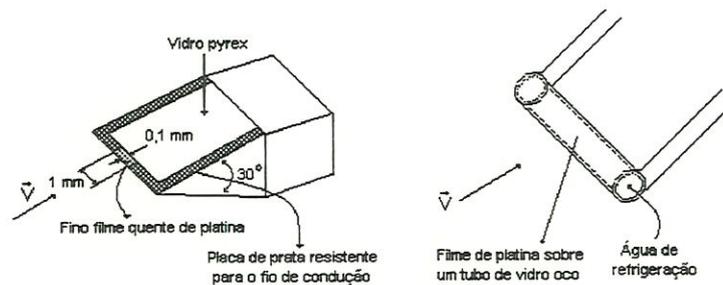


FIGURA 3.6 – Sensores de filme quente (DOEBELIN, 1990).

HSU et al (1963) usaram um anemômetro de filme quente (temperatura constante) para determinar o padrão de escoamento e medir a fração de vazio local em uma tubulação vertical onde a mistura bifásica água-vapor escoava ascendentemente. De forma a verificar os resultados obtidos com o anemômetro, esses pesquisadores utilizaram uma filmadora (500 quadros/segundo) para gravar as variações do escoamento e então comparar com os dados obtidos pelo transdutor de filme quente. Desse experimento, os autores concordaram que o anemômetro de filme quente foi capaz de determinar qualitativamente o tipo de escoamento e quantitativamente a fração de vazio. Também notaram que é muito difícil diferenciar, utilizando o anemômetro de filme quente, entre os regimes a bolhas e o anular com grande quantidades de gotas de líquido (água).

3.2.4 – Fração de Vazio Volumétrica

Para indicação da fração de vazio volumétrica serão descritos dois modelos de medição: o método gravimétrico e o transdutor de impedância.

3.2.4.1 – Método Gravimétrico

O método gravimétrico é a técnica de obtenção da fração de vazio baseada na medida da densidade média da mistura bifásica. Seu emprego em escoamento de misturas bifásicas está ligado às seguintes condições de operação:

- regime de escoamento permanente;
- densidade das fases constantes (fluidos incompressíveis);
- efeitos de atrito nulos junto às paredes do duto;
- acelerações desprezíveis.

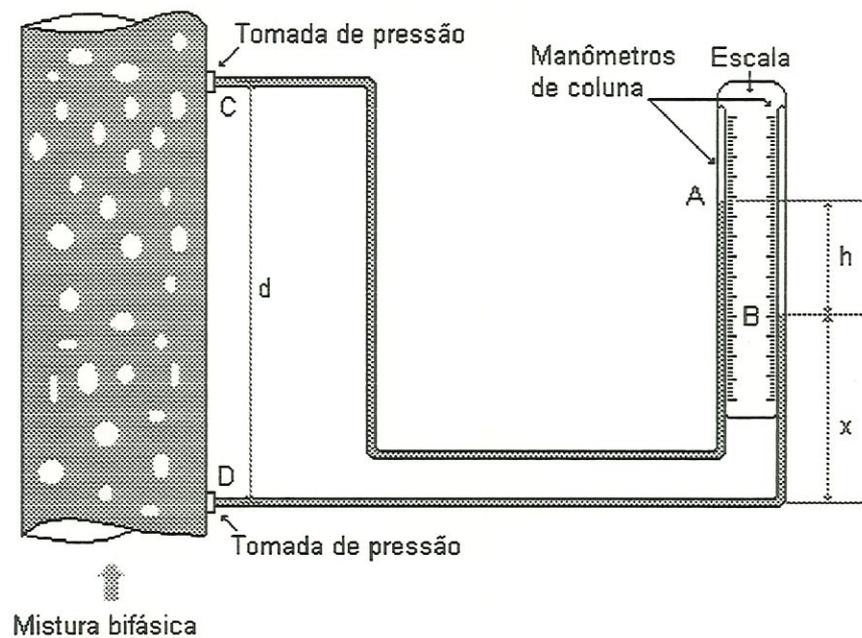


FIGURA 3.7 – Método gravimétrico para medição da fração de vazio
(MOREIRA, 1989).

No esquema da FIGURA 3.7 se ilustra a seção de ensaios, para uma dada situação de escoamento, destacando-se dois pontos de tomada de pressão estática, distanciados entre si. Internamente à tubulação ocorre escoamento bifásico e os manômetros de coluna estão preenchidos com o mesmo líquido de fase contínua da mistura e a mesma temperatura.

3.2.4.2 – Transdutor de Impedância

O princípio de operação de sensores elétricos fundamenta-se na diferença de ordem de grandeza entre as propriedades elétricas das fases.

Transdutores de condutividade (ou resistividade) são aqueles cujo princípio de funcionamento está relacionado à condutividade média das fases. Capacitivo é a designação para os transdutores que medem a capacitância média das misturas não condutivas. Finalmente, transdutores de impedância são aqueles que operam nas faixas capacitiva e resistiva simultaneamente.

Transdutores de impedância apresentam diversas formas construtivas. Uma das geometrias mais elementares, porém não menos eficiente, pode ser vista no esquema da FIGURA 3.8. Trata-se de um par de eletrodos imersos no meio bifásico, cuja geometria acompanha a curvatura da tubulação, além disso, apresenta a parede feita de material isolante eletricamente.

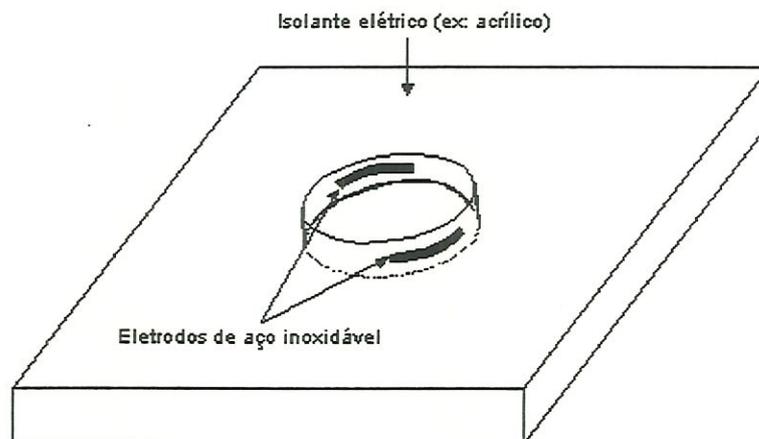


FIGURA 3.8 – Esquema básico de um transdutor de impedância.

ANDREUSSI et. al. (1988) mostraram que uma sonda não intrusiva feita de dois anéis de eletrodos montados na parede do tubo pode ser muito

eficaz na medida da quantidade média de líquido sobre diferentes condições de escoamentos. Somente a quantidade relativa de uma fase líquida contínua pode ser determinada pela sonda quando a impedância é dada por um termo puramente resistivo.

O estudo de escoamento multifásico tem levado ao desenvolvimento de várias sondas de impedância elétrica. Em muitos escoamentos multifásicos, as fases têm diferenças significativas de impedância, medida de volume médio e local dessas quantidades podem revelar informações sobre a distribuição espacial e temporal das fases dentro do escoamento. Resistência, capacitância, indutância ou qualquer combinação dessas quantidades podem ser medidas pelos vários modelos de sonda. A escala em que a informação é gerada pode variar também: a impedância do escoamento pode ser medida em uma pequena região com uma sonda local, ou medida sobre um largo volume com um sensor superficial, por exemplo. Com uma seleção criteriosa da geometria da sonda e uma calibração apropriada, sondas de impedância têm sido usadas para medir uma variedade de propriedades de escoamentos multifásicos, por exemplo, média e flutuação da fração de vazio em escoamentos a bolhas, dinâmica de escoamentos pistonados etc. Sondas de impedância oferecem uma alta resposta em frequência, baixos custos e construção relativamente fácil (CECCIO & GEORGE, 1996).

SELEGHIM & HERVIEU (1998b) apresentaram uma sonda de imagem direta para escoamento bifásico. A configuração do eletrodo é adaptada no sentido de que uma representação da imagem da distribuição

de fase dentro do volume de sensoriamento pode ser obtida por simplesmente plotar o sinal correspondente para medidas condutivas periféricas.

3.3 – Técnicas de Análise de Sinais em Escoamentos Bifásicos

Num contexto mais amplo, as técnicas de análise de sinais representam um recurso imprescindível na instrumentação de escoamentos multifásicos, tendo em vista a grande complexidade de seus mecanismos básicos. No que concerne o emprego de métodos de tratamento de sinais, visando a obtenção de informações referentes à organização interna do escoamento, existem igualmente um grande número de publicações.

Nesta linha, VINCE & LAHEY (1982) caracterizaram diversos regimes de escoamento baseando-se em uma técnica de absorção transiente de Raio-X para escoamentos ar-água em um tubo vertical. O sinal de um sistema de suporte duplo de Raio-X foi processado para gerar PSD (densidades de potência espectral) e PDFs (funções densidade de probabilidade). O modelo e o número de modos destas distribuições foram estudados em uma tentativa para discriminar os regimes de escoamentos.

Para quantificar as informações nos histogramas, os primeiros quatro momentos associados a estas distribuições foram analisados como possíveis indicadores do regime de escoamento. A média, a distribuição

sobre a média (variância), a medida de assimetria e a kurtose foram relatadas para vários escoamentos bifásicos. Foi instituído que os momentos associados a PSD exibiram uma dependência na velocidade superficial do líquido. A variância associada com a PDF apresentou-se como um critério razoável para discriminar escoamentos a bolhas, anular e pistonado. Contudo, foi difícil determinar precisamente o local da fronteira dos regimes usando esta técnica.

Pode-se citar igualmente, o trabalho de BARNEA et al. (1980) que classificaram alguns regimes baseados na observação de várias flutuações de sinais no tempo, utilizaram o sinal de uma sonda condutiva em um escoamento bifásico vertical. Como resultado um conjunto de sondas foi sugerido e mostra claramente todos os escoamentos padrão detectados na horizontal e na vertical. A técnica proposta foi baseada na significativa diferença da condutividade elétrica do ar e da água. O método de identificação do padrão de escoamento foi baseado em traços gráficos oscilatórios que foram obtidos continuamente. Os mapas de escoamentos horizontal e vertical puderam ser facilmente construídos utilizando a informação direta dos traços gráficos oscilatórios obtidos pelo conjunto de sondas condutivas.

MATSUI (1984) registrou simultaneamente os sinais de pressão de pequenas distâncias ($D/2$) e distâncias relativamente grandes ($10D$). As PSDs destes dados foram calculadas e os resultados mostraram configurações distintas, de acordo com a distância entre os sensores. As

PDFs unimodal e bimodal foram instituídas para escoamentos intermitentes pelas pequenas e grandes distâncias entre as pressões, respectivamente.

MISHIMA & ISHII (1984) desenvolveram um critério para a transição de escoamento bifásico ascendente em tubos verticais. Os resultados confirmaram que o critério pode ser aplicado sobre um grande número de parâmetros, assim como em escoamentos agitantes.

TRONIEWSKI & ULBRICH (1984) fizeram um grande esforço para testar mapas de regimes de escoamento genéricos utilizando o básico da literatura existente. O objetivo desta análise foi a transformação dos mapas de regimes de escoamento da literatura para um sistema de coordenadas escolhido chamado mapa base.

SEKOGUCHI et al. (1987) aplicaram um método de reconhecimento de padrão estático para a análise da fração de vazio média dos sinais de uma seção transversal para discriminar regimes de escoamento gás-líquido, teve como objetivo distinguir padrão de escoamentos baseado em características da fração de vazio em sinais séries-temporal. Um trabalho de revisão bibliográfica bastante detalhado sobre esse tema e em particular sobre os métodos de diagnóstico em escoamentos gás-líquido, pode ser encontrado no artigo de DRAHOS & CERMAK (1989).

No âmbito dos métodos paramétricos aplicados à determinação de dimensões fractais, pode-se citar o trabalho de FRANÇA et al. (1991). Segundo FRANÇA et al. (1991), a primeira proposta de mapas de regimes de escoamento foi baseada sob a identificação visual de distribuição de fase. Enquanto que a identificação de regimes de escoamento através

destes mapas é adequada para alguns casos, para muitas situações, este método é inconclusivo. Informações sobre o padrão dos escoamentos são usualmente obtidas por observação visual. A maior dificuldade da observação visual, é que a descrição é confusa e de difícil interpretação, especialmente quando trabalha-se com altas velocidades de escoamentos. Recentemente SOLDATI et al. (1996) descreveram a análise difusional e compararam com outros métodos analíticos e então aplicaram para a série temporal experimental de escoamento horizontal ar/óleo. Diferentes variáveis do escoamento foram registradas durante o experimento e apresentaram uma discussão para escolha da série temporal apropriada.

DELPRAT et. al. (1999) demonstraram como explorar informações spectral e espacial para se obter uma identificação de regimes de escoamentos. Foi feita uma investigação concentrada em quatro regimes de escoamento: escoamento estratificado ondulado, escoamento estratificado rugoso, escoamento intermitente e escoamento a bolhas. A representação espaço-frequência pode ser caracterizada por um conjunto de três parâmetros escalares, quantificando respectivamente a localização no espaço, a localização em frequência e a forma do conteúdo spectral. Plotando a posição de cada experimento em um espaço tridimensional definido por este conjunto de parâmetros, observaram que os pontos estavam agrupados em quatro aglomerados ("Clusters"), correspondendo a quatro regimes de escoamentos investigados. Além disso, as regiões limite desses aglomerados não se sobrepõem. Isto demonstra que esses

parâmetros são capazes de classificar corretamente os padrões de escoamentos bifásicos.

No escopo dos métodos não paramétricos, as técnicas de análise tempo-frequência e tempo-escala (wavelets) foram aplicadas com muito sucesso a um grande número de problemas tecnológicos e científicos.

No que se refere à mecânica dos fluidos bifásicos, HERVIEU & LEDUCQ (1991) demonstraram a potencialidade da transformada wavelet em termos da caracterização de diferentes configurações de escoamento vertical. Posteriormente, SELEGHIM (1993) propôs um critério objetivo para a transição disperso-intermitente em escoamento vertical, baseado na quantificação do grau de instacionaridade através do desvio padrão da frequência instantânea de Ville. Este critério foi validado em testes feitos em diferentes circuitos experimentais, relatados por SELEGHIM & HERVIEU (1994) e HERVIEU & SELEGHIM (1995).

SELEGHIM (1996) otimizou o critério proposto anteriormente no sentido de torná-lo universal, isto é, independente da transição ou grandeza física estudada. O critério proposto para a transição de regime foi a covariância tempo-frequência associada a transformada de Gabor, como novo indicador de transição de regime de escoamento. Este foi validado em um circuito experimental onde todas as transições de configuração de escoamento horizontal foram detectadas pelo indicador proposto.

SELEGHIM et al. (1998) propuseram caracterizar, conjuntamente em tempo e frequência, os diferentes regimes de escoamentos bifásico ar-água horizontal. Para tanto, uma série de ensaios foram realizados num circuito

experimental capaz de reproduzir, de forma estável e controlada, os principais regimes horizontais.

Igualmente, uma sonda de medição da condutividade elétrica foi especialmente desenvolvida a partir de uma geometria básica, constituída de dois anéis parietais. Os sinais obtidos são fortemente correlacionados à topologia do escoamento, em seguida, foram transcritos no plano tempo-frequência através da transformada de Gabor. Os resultados mostram a habilidade da transformada de Gabor em revelar, não somente aspectos genéricos quanto a configuração do escoamento, mas também detalhes relativamente finos, como estruturas características da interface de segregação em escoamento estratificado, ou sub-intermitências ligadas a acoplamentos entre dois modos dinâmicos em escoamento intermitente.

HERVIEU & SELEGHIM (1998a) propuseram o desenvolvimento de um indicador objetivo para caracterizar e diagnosticar as transições dos regimes de escoamento bifásico. A aproximação foi baseada na suposição fundamental de que a transição de um escoamento é menos estacionária do que um escoamento com um regime estável.

A seguir serão apresentadas outras técnicas de análise de sinais aplicadas aos escoamentos bifásicos.

3.3.1 – Perda de Pressão

É bem conhecido que em escoamento bifásico, uma mudança abrupta em perda de pressão é frequentemente associada com uma mudança de regime de escoamento (WAMBSGANSS et al. 1994).

Existem numerosas melhorias nas correlações e métodos para prever a perda de pressão em escoamento gás-líquido. Poucas delas levam em consideração a estrutura altamente complexa de um escoamento bifásico. Deve-se manter em mente que a estrutura do escoamento varia com o tempo e posição do tubo. Como resultado, a diferença de pressão entre dois pontos também varia com o tempo e seu cálculo direto não é prático. Além disso, pesquisadores têm desenvolvido técnicas para prever as diferenças médias de pressão baseados nas condições médias do escoamento (DANIELS, 1995).

LIN & HANRATY (1987) utilizaram a técnica de medida de pressão para detecção de regime de escoamento pistonado. O regime de escoamento foi definido para escoamento pistonado ar-água em um tubo transparente horizontal. Para baixas velocidades de gás, uma transição de escoamento pistonado foi facilmente detectada visualmente. Para altas velocidades este não foi o caso. Como técnica, utilizou-se um par de transdutores de pressão independentemente da direção do escoamento como um artifício para detecção. A análise de queda de pressão é

apropriada para regimes de escoamento permanente, e particularmente vantajosa para regime de escoamento intermitente. Segundo DRAHOS & CERMAK (1989), a principal vantagem do método de flutuações de pressão é sua simplicidade experimental, a qual pré-determina este método para aplicação industrial. Problema pode ser a característica do sinal de pressão ou uma possível influência da configuração experimental sob as características do sinal.

SPEDDING & SPENCE (1993) determinaram dados experimentais em escoamento horizontal ar-água. Os regimes de escoamentos foram identificados por uma combinação de observação visual e por vídeo, características de flutuações de pressão e um exame detalhado de perda de pressão. Os resultados junto com trabalhos prévios foram usados para teste em mapas de regimes de escoamentos. Vários dos mapas não predisseram corretamente os regimes. Modelos teóricos e empíricos foram desenvolvidos para a predição de transição de regimes de escoamentos.

WAMBSGANSS et al. (1994), mediram em tubo horizontal a queda de pressão e flutuações de pressão estática. Os regimes de escoamento foram identificados e o objetivo do método foi determinar as transições dos regime de escoamento a bolhas para *plug* e de *plug* para pistonado. Em particular é mostrado que a transição é acompanhada por um claro e abrupto aumento na medida de pressão estática.

3.3.2 – Método Estatístico

WANG et al. (1991) através de resultados experimentais demonstraram que aspectos estatísticos de sinais de pressão diferencial podem ser usados como um indicador de regimes de escoamento em escoamento bifásico horizontal. Os autores introduziram um método estatístico para classificação de regimes de escoamentos próximos da região de transição. Produziu-se uma redução média na zona de transição para estabelecer com maior confiança a relação das regiões de transição dos regimes de escoamento.

SEKOGUCHI et al. (1987), aplicaram um método estatístico e média de fração de vazio para identificação de regimes de escoamentos. O reconhecimento dos regimes de escoamento foi baseado em um sistema especialista para analisar ondas do cérebro humano. Uma aplicação deste sistema para ondas do cérebro pode automaticamente ser processado com 75% de confiança nos dados obtidos. A aplicação da mesma técnica de reconhecimento que foi usada para diagnosticar ondas do cérebro humano pode ser usada para a determinação de regime de escoamento bifásico. NYDAL et al. (1992), desenvolveram uma instrumentação especial com análise e aquisição de dados simultâneos. Isto foi usado para determinar as características do escoamento pistonado, considerando seus aspectos estocásticos. Uma investigação experimental deste regime de escoamento deve ser baseada sob extensiva e exata medida de seus principais parâmetros, como duração, velocidade e média de fração de vazio. Foi feita

uma investigação experimental sobre propriedades estatísticas do escoamento pistonado. A distribuição estatística dos parâmetros do regime pistonado foi obtida para diferentes tamanhos de tubo e condições de entrada, e a relação de funções foi calculada como indicação das relações estatísticas entre os parâmetros deste escoamento. Um instrumento especial foi projetado para medir diretamente os parâmetros do escoamento pistonado. Sinais de três sondas condutivas foram processados em tempo real em um computador trabalhando com altas taxas de amostragem. Somente parâmetros principais foram calculados e armazenados para cada unidade do escoamento pistonado: a velocidade frontal, a velocidade, o comprimento e o volume do pistão. O conceito de análise e aquisição de dados simultâneos permite a combinação de altas taxas de amostragem com longos períodos de aquisição. Isto também possibilita caracterizar o regime de escoamento pistonado em vazões onde a frequência do pistão é baixa.

3.3.3 - Redes Neurais

Uma rede neural pode expressar uma relação de não linearidade entre entradas e saídas e aprender a relação automaticamente. Por isso é conveniente o uso de redes neurais para relatar o padrão de escoamento

com os parâmetros estatísticos de flutuações de fase a gás (MONJI & MATSUI, 1998).

Segundo BISHOP (1994), um fator chave que limita a implementação comum de soluções de redes neurais em muitas áreas tem sido a dificuldade em demonstrar que as saídas geradas pela rede são de confiança. Uma fonte de erro importante está nos novos dados de entrada, isto é, dados de entrada diferidos significativamente dos dados usados para treinar a rede. O autor investiga o grau de confiança entre os novos dados de entrada e a correspondente saída da rede. É descrito um procedimento quantitativo para avaliar as novidades e demonstrar seu desempenho em uma aplicação que envolve monitoramento de escoamento multifásico de óleo em dutos. MOON & CHANG (1994), propuseram um método para estimar o fluxo de calor crítico (CHF), em um reator nuclear, baseado na teoria de conjuntos difusos e redes neurais artificiais. Este tipo de predição é muito importante no projeto de reatores nucleares e em diversas aplicações industriais. Os conjuntos difusos foram usados para classificar os dados experimentais de CHF, através de poucos conjuntos de dados, de acordo com suas características. Após a classificação dos dados experimentais, as características dos conjuntos resultantes são discutidas, dando-se ênfase tanto na distribuição das condições experimentais como no mecanismo físico relacionado ao fluxo de calor. Os dados de CHF são usados no treinamento em uma rede neural artificial para estimar o CHF.

GRUBERT (1995) utilizou uma rede neural do tipo *feedforward* com algoritmo de aprendizagem *backpropagation* (repropagação) para estimar as

condições de escoamento quando a mistura interfacial em estruturas estratificadas se iniciam. Isto foi realizado pelo treinamento da rede com dados experimentais obtidos em laboratório. Antes do treinamento ser feito, muitas decisões foram tomadas quanto ao tamanho da rede e definição de seus parâmetros de treinamento. Essas decisões foram tomadas com base no sucesso do treinamento de uma condição de escoamento estratificado similar, onde a solução teórica é conhecida. Finalmente, esses resultados foram comparados através de uma aproximação utilizando resultados da teoria de escoamento inviscido, teoria de escoamento turbulento e experimentos de laboratório sobre atrito interfacial. Esta predição foi verificada com o protótipo dos dados disponíveis, de acordo com os resultados da rede neural e os resultados teóricos.

YAMASHITA (1997) investigou um procedimento de classificação de regimes de escoamento em um transportador pneumático vertical através de uma *time-delay neural network* (TDNN), a qual é uma rede *feedforward* multicamadas, desenvolvida para reconhecimento da fala. O espectro da série temporal do sinal de um sensor eletrostático foi usado para caracterizar os regime de escoamento. O desempenho da rede neural após o treinamento foi excelente, exceto para as regiões de transição. Uma rede neural multicamadas do tipo *perceptron* (MLP) foi também utilizada, apresentando um desempenho próximo do anterior. Entretanto, a TDNN mostrou uma habilidade de generalização (diagnóstico) superior que a MLP.

MI et. al. (1997) utilizaram um medidor de fração de vazio com multi eletrodos de impedância e redes neurais para identificação de regimes de

escoamento. Os resultados experimentais mostraram que área média de fração de vazio pode ser relacionada ao sinal de saída da medida de impedância, e ao regime de escoamento, desta maneira como fase simples de líquido e fase simples de gás tem sido exibida claramente pelas propriedades estatísticas do sinal de impedância. Por isso, sinal de impedância tem sido empregado na entrada da rede neural para classificação dos regimes de escoamento. Foram desenvolvidas duas redes neurais para identificação de regimes de escoamento, uma rede neural supervisionada e uma rede neural *self-organizing*. Redes neurais têm mostrado ser apropriada na classificação de regimes de escoamento. Além disso, rede neural *self-organizing* descobre informações sobre transição de regimes de escoamento.

MONJI & MATSUI (1998) utilizaram uma rede neural *feedforward* na identificação de regimes de escoamento bifásico gás-líquido. Foram utilizados dois tipos diferentes de padrões de treinamento. O primeiro tipo baseou-se em parâmetros estatísticos relativos às flutuações de fração de vazio. O segundo tipo baseou-se em dados de uma série temporal relativa a flutuação de fase do gás. A rede neural treinada utilizando o algoritmo *backpropagation* aprendeu a identificar regimes de escoamento observados experimentalmente. Após o treinamento, a percentagem máxima de classificação correta de dados, não usados no treinamento foi de 91% para a rede baseada em parâmetros estatísticos e 74% para a rede baseada em uma série temporal. Os regimes de escoamento não foram corretamente identificados nas regiões de transição de um regime para outro.

CAPÍTULO 4 – METODOLOGIA

4.1 - Análise de Sinais

Análise de sinais é o estudo dos métodos de caracterização das propriedades básicas de sinais e foi historicamente desenvolvida paralelamente com a descoberta das grandezas fundamentais da natureza, tais como: campo elétrico, ondas sonoras e correntes elétricas (COHEN, 1995). Um sinal é geralmente uma função que depende de várias variáveis, estas normalmente representando espaço e tempo. O campo elétrico, por exemplo, varia tanto em função do tempo como do espaço. Este capítulo dará ênfase a variação temporal de um sinal.

O tempo é uma variável fundamental. No entanto, algumas vezes é vantajoso estudar o sinal em uma representação diferente da temporal, ou seja, analisá-lo no plano das frequências.

Além do tempo, a mais importante variável de representação é a frequência. Sua representação matemática foi formalizada por Fourier, cuja principal motivação era solucionar a equação que governa o comportamento do calor.

4.1.1 - Análise Temporal dos Sinais

Quantidades físicas fundamentais como campo elétrico e magnético, pressão, voltagem, etc., variam no tempo e são chamadas formas de ondas ou sinais temporais. Denota-se o sinal por $x(t)$.

O mais simples sinal variando no tempo é o senoidal, caracterizado pela amplitude a , e sua frequência ω_0 , representado normalmente como:

$$x(t) = a \sin(\omega_0 t) \quad (4.1)$$

Dizer que cada sinal tem amplitude constante não significa que o sinal é de valor constante, mas que a máxima e a mínima das oscilações são constantes.

De forma generalizada o sinal senoidal pode ser escrito como:

$$x(t) = a(t) \sin[v(t)] \quad (4.2)$$

onde a amplitude, $a(t)$, e a fase, $v(t)$, são agora funções do tempo.

4.1.2 – Energia de um Sinal

Se $|x(t)|^2$ é a energia ou intensidade de um sinal, então a energia total é obtida pela integração da densidade sobre todo o tempo, ou seja:

$$E_x = \int |x(t)|^2 dt \quad (4.3)$$

4.1.3 - Baricentro e Duração de um Sinal

Considerando $|x(t)|^2$ como a densidade temporal de um sinal $x(t)$, então o baricentro, \tilde{t} , pode ser definido como:

$$\tilde{t} = \frac{1}{E_x} \int t |x(t)|^2 dt \quad (4.4)$$

As razões para definir o baricentro são que este pode dar uma caracterização total da densidade e pode dar um indicador de onde a energia está concentrada.

Muitas medidas podem ser usadas para determinar o espalhamento ao redor do baricentro. A mais comum delas é o desvio padrão, Δ_x , dado por:

$$\Delta_x^2 = \frac{1}{E_x} \int (t - \bar{t})^2 |x(t)|^2 dt \quad (4.5)$$

O desvio padrão é um indicador da duração do sinal. Se o desvio padrão, Δ_x , é pequeno, então grande parte do sinal se encontra concentrado em torno do tempo médio e passará rapidamente, o que indica curta duração. De forma contrária temos um sinal de longa duração. Existem sinais que apresentam desvio padrão infinito, mesmo tendo energia finita. Isso indica que o sinal é muito duradouro (COHEN, 1995).

4.1.4 - Análise Freqüencial dos Sinais

A análise freqüencial ou, também bastante usado, espectral, tornou-se extremamente rica com o estabelecimento de suas bases teóricas após o trabalho de Fourier. Isto se consolidou com a invenção do espectroscópio e com a descoberta de que, através da análise espectral da luz, pode-se determinar a natureza da matéria; que átomos e moléculas podem ser caracterizados pelo espectro de freqüência de luz que emitem ou absorvem (COHEN, 1995).

Bunsen e Kirchhoff tornaram a análise espectral uma grande descoberta devido às suas contribuições deixadas seis anos após Fourier ter apresentado suas idéias. Em suas descobertas, observaram que o

espectro da luz pode ser usado para reconhecimento, detecção e classificação das substâncias.

A análise do espectro tem ajudado na descoberta das leis básicas da natureza e tem permitido que tenha-se um maior entendimento da natureza das substâncias no universo. Portanto, seria apropriado referir-se à análise espectral como a análise de Bunsen-Kirchhoff.

Existem quatro principais razões para utilizar-se a análise frequencial ou análise espectral. Primeiro, analisando espectralmente um sinal, pode-se descobrir características de sua fonte. É dessa forma que se estuda a composição de estrelas, do sangue, dos papéis, etc.

Segundo, a propagação de ondas através de um meio depende geralmente da frequência. A propagação de uma onda através de um meio é complicada mas o efeito básico é que ondas de diferentes frequências propagam com diferentes velocidades, a exemplo do que ocorre em um prisma. Para se estudar a propagação como função da frequência, decompõem-se o sinal em diferentes componentes frequenciais, analisa-se cada componente e então reconstrói-se o sinal para obter-se a forma de onda resultante.

A terceira razão para decomposição espectral é que simplifica o entendimento dos sinais. Simples senóides são comuns na natureza e isto resulta do fato de que para algumas equações fundamentais de movimento, senóides são possíveis soluções, como também são suas somas.

Finalmente, a decomposição ou análise de Fourier é uma poderosa ferramenta para a solução de equações diferenciais ordinárias e parciais.

Na análise de Fourier o sinal é expandido em termos de senos de diferentes frequências. Assim, para um sinal $x(t)$ a expansão é da forma (COHEN, 1995):

$$x(t) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int X(\omega) e^{j\omega t} d\omega \quad (4.6)$$

O sinal é constituído pela soma de componentes harmônicas $e^{j\omega t}$, caracterizadas pela frequência ω e ponderadas por $X(\omega)$, que é obtido a partir do sinal através da eq. (4.7).

$$X(\omega) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int x(t) e^{-j\omega t} dt \quad (4.7)$$

$X(\omega)$ é chamado de espectro do sinal $x(t)$ ou a transformada de Fourier de $x(t)$. Desde que $X(\omega)$ e $x(t)$ estão biunivocamente relacionados pode-se dizer que o espectro é a representação do sinal no domínio da frequência.

Analogamente ao sinal considera-se $|X(\omega)|^2$ a densidade de energia do espectro.

Considerando que a densidade de energia do espectro é $|X(\omega)|^2$, a energia total é definida por:

$$E_x = \int |x(t)|^2 dt = \int |X(\omega)|^2 d\omega \quad (4.8)$$

4.1.5 - Caracterização dos Sinais na Frequência: Frequência Média e Banda

Se $|X(\omega)|^2$ representa a densidade em frequência, então pode-se usar para calcular a frequência média, a mesma motivação inicial como no domínio do tempo, isto é, dando uma idéia aproximada das características principais da densidade espectral. A frequência média, $\tilde{\omega}$, e o desvio padrão, Δ_x , (também conhecido como o valor médio quadrático da banda de frequências e representado por B) são dados, respectivamente, por:

$$\tilde{\omega} = \frac{1}{E_x} \int \omega |X(\omega)|^2 d\omega \quad (4.9)$$

$$B^2 = \Delta_x^2 = \frac{1}{E_x} \int (\omega - \tilde{\omega})^2 |X(\omega)|^2 d\omega \quad (4.10)$$

A densidade de energia espectral $|X(\omega)|^2$ representa as frequências que existiram durante o sinal. No entanto, ela não fornece nenhuma indicação de quando tais frequências ocorreram.

4.1.6 - Interpretando a Transformada de Fourier

Uma interpretação simplificada da transformada de Fourier é ilustrada na FIGURA (4.1). A transformada de Fourier identifica e distingue as ondas

senoidais de diferentes frequências (e suas respectivas amplitudes) que se combinam para formar o sinal (BRIGHAM, 1988). Matematicamente essa relação é dada pela eq. (4.7).

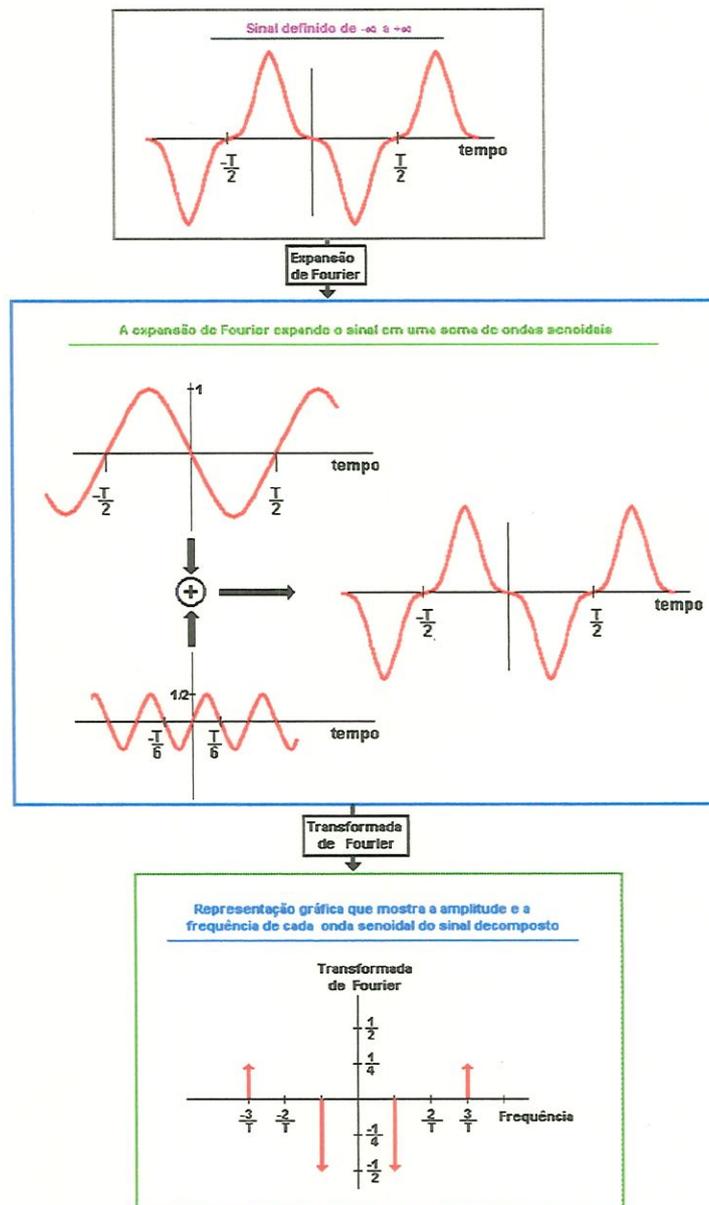


FIGURA 4.1 - Interpretando a Transformada de Fourier (BRIGHAM, 1988).



Portanto, a transformada de Fourier é uma representação no domínio da frequência de uma função temporal (sinal). $X(\omega)$ contém exatamente a mesma informação que a função original, somente se diferenciando na maneira de apresentação. Ou seja, a análise de Fourier permite examinar uma função temporal em outro ponto de vista referencial: pela análise frequencial.

4.1.7 - Classificação dos Sinais

Devido a diversidade de sinais existentes, a classificação dos sinais é feita de modo amplo. Se um sinal não varia em algum sentido, então diz-se que ele é **estacionário**; caso contrário ele é **não estacionário**. Se um sinal é de curta duração, ele é geralmente chamado de **transiente**. (Curto, nesse caso, é um termo bastante relativo que pode significar um milhão de anos para Astronomia ou um bilionésimo de segundo no caso da Física Nuclear).

Se um sinal é explicitamente conhecido, diz-se que se tem um sinal **determinístico**. Muito freqüentemente os sinais são governados por eventos randômicos, possibilitando o surgimento de vários sinais. Nesse caso o sinal é dito **randômico** ou **estocástico**.

O conteúdo espectral é algumas vezes usado para classificar sinais. Sinais cujo espectro se concentra em uma faixa frequencial relativamente

pequena são chamados de **banda limitada**; caso contrário são chamados de **banda larga**.

4.1.8 - A Análise Tempo - Frequência

A análise tempo-frequência originou-se a aproximadamente cinquenta anos, e tem tido recentemente um maior desenvolvimento no estabelecimento de seus princípios básicos e nas aplicações práticas.

É importante ressaltar que este campo está evoluindo muito rapidamente, com a introdução de novas idéias.

A idéia fundamental da análise tempo-frequência é entender e analisar situações onde a composição frequencial de um sinal está mudando no tempo. Um exemplo real mostra a necessidade da análise tempo-frequência. Vejamos a onda sonora emitida por uma baleia, indicada na FIGURA 4.2, que é constituída por três gráficos.

O gráfico da esquerda é o sinal original variando no tempo, ou melhor, intensidade x tempo. A densidade espectral está abaixo da figura principal e indica quais frequências existiram. Falta saber quando essas frequências existiram. Na figura principal está o gráfico tempo x frequência. A partir dele pode-se determinar as frequências e suas intensidades relativas quando o tempo avança.

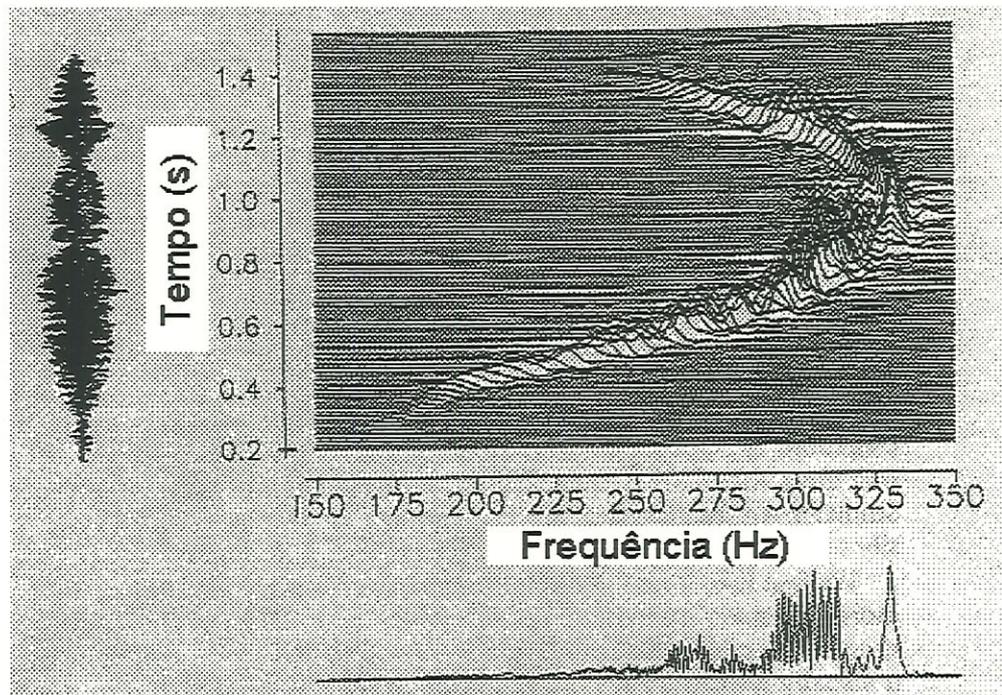


FIGURA 4.2 - Gráfico tempo-frequência da onda sonora emitida por uma baleia (COHEN, 1995).

Observando o sinal variando no tempo, não se pode afirmar muita coisa, embora verifica-se que a intensidade ou altura do som varia com o tempo. Para este som o espectro diz que a frequências variaram entre 175 e 325 Hz. Esta informação é importante, mas diz muito pouco sobre o que realmente está acontecendo, pois através do espectro não se pode saber quando estas frequências existiram. Exemplificando, não se sabe apenas olhando para o espectro se o som de 300Hz foi feito continuamente ou somente em alguns momentos discretos (alternados).

Através do gráfico tempo x frequência observa-se que no início a frequência estava em torno de 175 Hz e aumentou de forma mais ou menos

linear até cerca de 325 Hz; essa variação se deu durante 0,5 segundo. Durante 0,1 segundo o som apresentou frequência de 325 Hz, a partir do qual começou a cair.

Portanto, a diferença entre o espectro e a distribuição tempo-frequência é que o primeiro nos permite determinar quais frequências existiram, mas uma análise combinada tempo-frequência nos permite saber quais frequências existiram em um determinado instante.

4.1.8.1 - A Necessidade da Análise Tempo - Frequência

Suponha-se ter as distribuições individuais da altura e do peso de um tipo particular de animal. Estas distribuições individuais dizem tudo o que desejamos saber sobre a distribuição de altura e peso. No entanto, partindo destas distribuições pode-se determinar como a altura e o peso estão relacionados? Pode-se determinar se os indivíduos altos são mais pesados? A resposta é não. As distribuições individuais de altura e peso não são uma descrição total da situação, pois partindo destas densidades, não é possível saber como as alturas e pesos estão relacionados. É preciso a junção da densidade de altura e peso em uma distribuição conjunta. Da mesma forma, a densidade de energia no tempo e a densidade de energia em frequência não são suficientes sozinhas para descrever totalmente a situação física, pois não descrevem exatamente o que está acontecendo. Em particular,

através do espectro sabe-se quais as frequências estavam presentes no sinal, mas não se sabe quando existiram, por esta razão existe a necessidade de descrever como o conteúdo do espectro varia no tempo. Deseja-se estabelecer a distribuição que representa a energia ou a intensidade de um sinal simultaneamente no tempo e frequência. Uma das maneiras de se fazer isso é através do diagrama tempo-frequência.

A variação do espectro no tempo é muito comum no cotidiano. Durante um pôr do sol a composição frequencial da luz (ou seja, sua cor) muda rapidamente. Quando diz-se que o céu está avermelhado, está se falando em uma descrição tempo-frequência, pois se descreve como a frequência está variando no tempo. A altura do som da voz humana muda constantemente quando se fala, o que é ocasionado pela mudança da frequência emitida. A notação musical padrão é uma clara representação tempo-frequência, visto que esta notação mostra ao músico em que instantes quais notas ou quais frequências deverá produzir.

Pode-se pensar na distribuição tempo-frequência como sendo a intensidade ou a concentração de energia em tempos e frequências particulares.

A utilização da análise tempo-frequência também pode ser observada no estudo do material cerâmico. Segundo COELHO et al. (1996), o limite de desenvolvimento no uso de materiais cerâmicos é comumente atribuído a sua natureza frágil, que leva a uma perda superficial durante o processo de usinagem. Recentes trabalhos, entretanto, concluíram que todo material cerâmico pode ter um comportamento dúctil, dependendo das condições de

corde usadas. Utilizou-se então a emissão acústica para identificar a transição do regime dúctil para o frágil e com a análise tempo-frequência foi possível detectar picos de energia em altas frequências na região onde a cerâmica foi quebrada. Este padrão no plano tempo-frequência indica pulsos de energia para altas frequências, que são características de pedaços fragmentados de um material frágil.

4.1.9 - Porquê o Espectro Varia ?

Existem muitas causas para a variação do espectro no tempo. Pode-se citar dois grandes mecanismos físicos que abrangem a maioria das situações. A primeira causa é que a produção de frequências particulares depende de parâmetros físicos que também mudam com o tempo. Uma corda de violão, por exemplo, com comprimento e tensão fixos produz uma frequência particular se perturbada. Se o comprimento ou a tensão variam com o tempo, diferentes frequências serão produzidas, porque a corda vibrará aleatoriamente. Quando violinistas tocam, mudam continuamente o comprimento das cordas, assim produzem diferentes frequências.

Um navio deslocando-se com velocidade constante devido à rotação de seu hélice girando com velocidade constante tem o som deste produzido em uma frequência igualmente constante. Se o navio acelera, então o hélice muda a razão de rotação, atingindo a água com uma frequência diferente.

Outra causa geradora da variação espectral é a influência do meio.

4.1.10 - A Transformada a Curto Tempo de Fourier

A transformada a curto tempo de Fourier é o método mais usado para estudar sinais não estacionários. Suponha o seguinte caso: gravou-se uma hora de uma determinada música onde no início da gravação sabe-se que houve violinos e no fim tambores. Utilizando a análise de Fourier durante toda a gravação (1 hora), a energia espectral mostra picos nas frequências correspondentes aos violinos e aos tambores, ou seja, ela comprova que houve violinos e tambores durante a música, no entanto, não indica quando eles ocorreram. O mais indicado a se fazer é "quebrar" o sinal gravado (a música) em segmentos de cinco minutos e então analisar espectralmente (transformada de Fourier) cada segmento. O exame de cada segmento determinará em quais intervalos de tempo ocorreram as frequências características dos violinos e dos tambores. Desejando-se uma melhor localização temporal dessas frequências, pode-se reduzir o intervalo de cinco minutos para, por exemplo, um minuto. Essa é a idéia básica da transformada a curto tempo de Fourier: quebrar o sinal em pequenos intervalos de tempo para assim determinar quais frequências existem em cada intervalo e desse modo ter uma noção de como o espectro varia no tempo.

É importante saber que os intervalos de tempo não podem ser muito curtos. Isso porque, se a faixa temporal for muito estreita, o espectro da faixa torna-se sem significado e não mostra nenhuma relação com o espectro total.

4.1.10.1 - A Transformada a Curto Tempo de Fourier:

Equações

A análise de sinais no domínio da frequência, baseada apenas nas transformadas de Fourier, nem sempre consegue descrever completamente o que está acontecendo pois esta mostra as frequências existentes para a duração total do sinal e não aquelas existentes em uma janela de tempo particular. Se o sinal é do tipo periódico durante todo o tempo, a análise do espectro em frequência é suficiente para uma boa descrição do seu comportamento. Porém, quando o sinal é composto por várias formas de ondas e seu espectro ocorre em determinadas faixas de tempo se faz necessário obter a sua representação conjunta tempo-frequência.

Para estudar as propriedades do sinal no tempo t , dá-se ênfase ao sinal naquele tempo e oculta-o em outros tempos. Isso é feito multiplicando o sinal por uma função janela $h(t)$ para produzir um sinal modificado do tipo :

$$x_t(\tau) = x(\tau).h(\tau - t) \quad (4.11)$$

O termo janela vem da idéia de olhar somente uma parte do sinal, da mesma forma que quando se olha através de uma janela real vê-se somente uma porção relativamente pequena do cenário.

Desde que o sinal modificado enfatiza o sinal em torno do tempo t , a transformada de Fourier de $x_t(\tau)$ refletirá a distribuição de frequências em torno daquele tempo (COHEN, 1995):

$$X_t(\omega) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int e^{-j\omega\tau} x_t(\tau) d\tau \quad (4.12)$$

$$X_t(\omega) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int e^{-j\omega\tau} x(\tau) h(\tau - t) d\tau \quad (4.13)$$

A densidade de energia espectral no tempo t é então:

$$P(t, \omega) = |X_t(\omega)|^2 = \left| \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int e^{-j\omega\tau} x(\tau) h(\tau - t) d\tau \right|^2 \quad (4.14)$$

Para cada tempo t obtém-se um espectro diferente e a totalidade desse espectro é a distribuição tempo-frequência. Essa distribuição normalmente é denominada espectrograma.

A eq. (4.13), é chamada de transformada a curto tempo de Fourier ou transformada de Gabor caso a função seja gaussiana ($e^{-\alpha^2}$).

4.2 - Instalações Experimentais

4.2.1 - Descrição do Circuito Vertical

O circuito piloto esquematizado na FIGURA 4.3, é constituído basicamente de uma seção de testes vertical, construída em partes de acrílico com 50 mm de diâmetro interno, com comprimento total de 10 m. À saída desta última é conectado um separador ciclônico que exausta o ar para o exterior e retorna a água para o reservatório (uma caixa d'água tipo taça). Um misturador recebe água da bomba hidráulica e ar de um compressor de parafuso, e injeta a mistura na entrada da seção de ensaios. Uma torre metálica serve de sustentação para o conjunto, assim como para o separador ciclônico e para a tubulação de retorno.

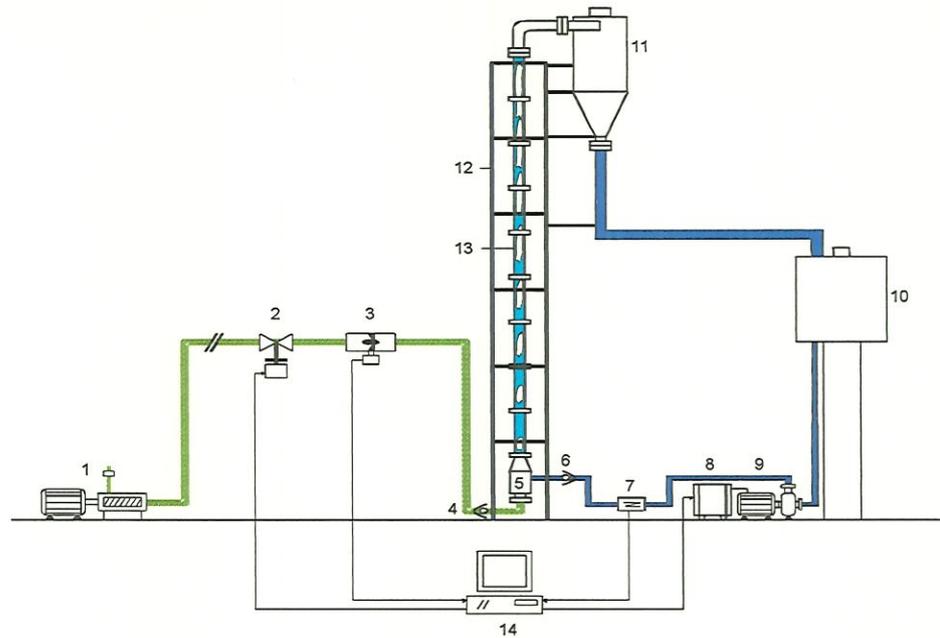


FIGURA 4.3 - Diagrama esquemático do circuito piloto para testes em escoamentos bifásicos gás-líquido verticais: 1) compressor de parafuso, 2) servoválvula, 3) medidor de vazão tipo turbina, 4) válvula anti-retorno para ar, 5) misturador, 6) válvula anti-retorno para água, 7) medidor de vazão, 8) conversor de frequência, 9) bomba hidráulica, 10) caixa d'água, 11) ciclone de separação, 12) torre de sustentação, 13) seção de ensaios e 14) microcomputador de controle.

Para garantir a execução de transitórios controlados, isto é, cujo histórico das vazões pode ser imposto a priori, é necessário um sistema de regulação em malha fechada, conforme indicado na FIGURA 4.3. A vazão de água é determinada por intermédio de um conjunto de placas de orifício e de um variador de frequência que controla a rotação do motor da bomba. Por sua vez, a quantidade de ar injetada no circuito é determinada com auxílio de uma turbina e de uma eletroválvula dotada de um motor de

acionamento eletropneumático. Assim, os sinais provenientes dos medidores de vazão são enviados ao microcomputador onde os algoritmos de regulação encontram-se implementados.

4.2.2 - A Sonda de Medidas de Condutividade

Neste trabalho, optamos por basear as análises em medidas de condutividade instantânea do fluido bifásico, uma vez que estão fortemente correlacionados à fração de vazio e, por conseguinte, à topologia do escoamento. A geometria dos eletrodos de sensoriamento baseia-se na configuração adotada originalmente por ASALI et al. (1985) e ANDREUSSI et al. (1988), isto é, dois anéis de medida (um anel de excitação e um anel de medição) de aço inoxidável montados rentes à parede interna do tubo, conforme ilustrado na FIGURA 4.4.

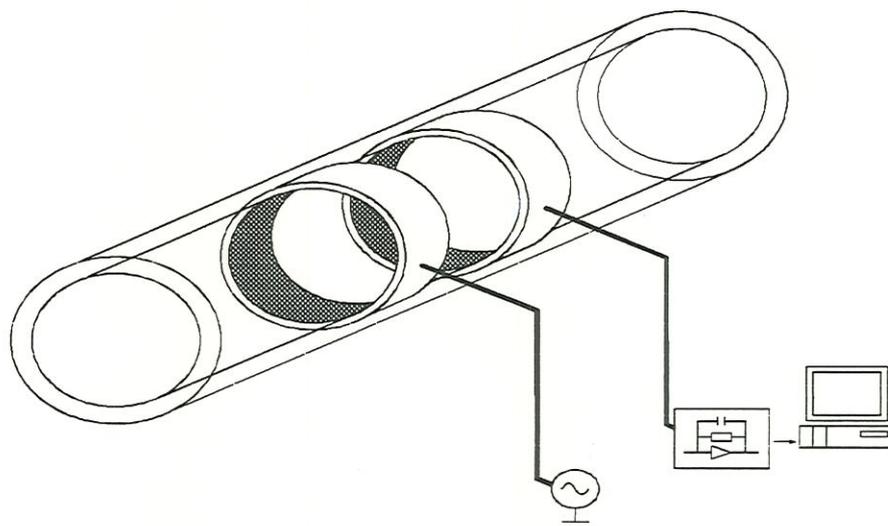


FIGURA 4.4 - Sonda de medidas de condutividade elétrica.

Uma característica fundamental da geometria dos anéis é que a impedância global está fortemente acoplada com o padrão de escoamento dentro do volume de sensoriamento. Isto pode ser atribuído às diferenças no fluxo azimutal de corrente para diferentes regimes de escoamento.

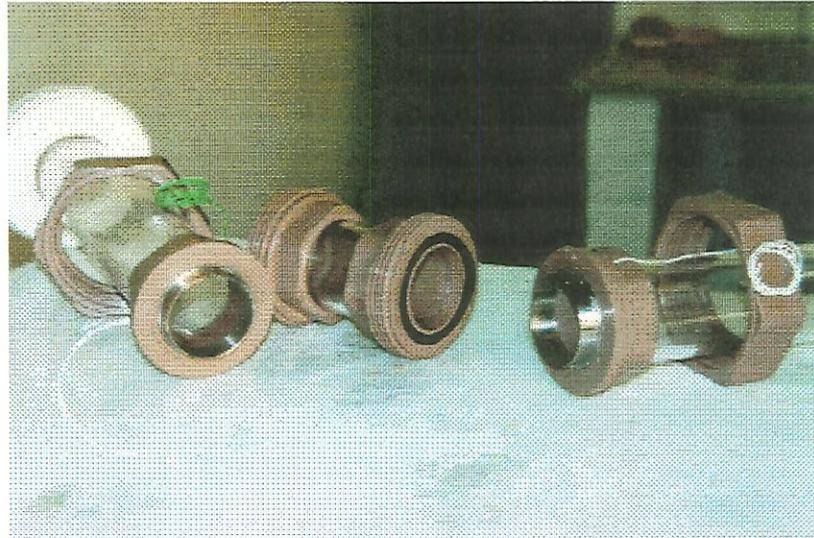


FIGURA 4.5 – Sonda de anéis desmontada.

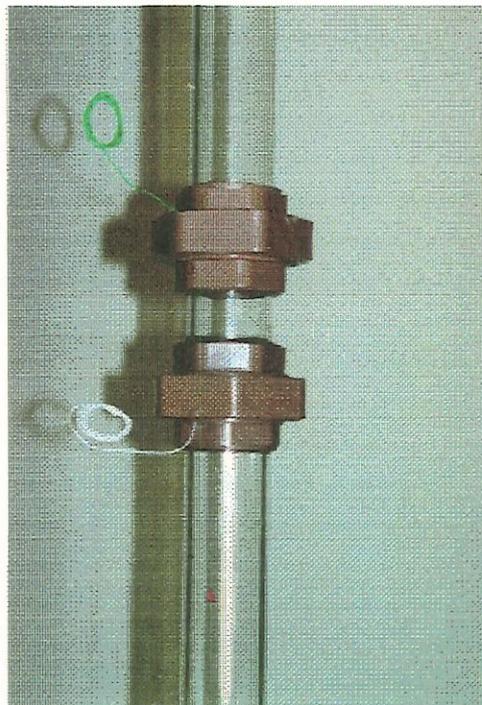


FIGURA 4.6 – Sonda de anéis no circuito

4.2.3 – Sistema de Aquisição

Entre os anéis (medição e excitação) da sonda de condutividade elétrica existe uma diferença de potencial constante. A medida em que o escoamento passa por esses anéis uma corrente elétrica é produzida e assim, obtém-se o sinal. Em seguida, o sinal é convertido de ampere para volts através de um transdutor, passando então por um pré-condicionador onde é feita a filtragem passa baixa (anti-aliasing). A próxima etapa consiste na conversão do sinal analógico em digital, passando então para a fase de processamento. Nessa fase o sinal é transcrito para o plano tempo-frequência através da transformada de Gabor, podendo finalmente, ser analisado.

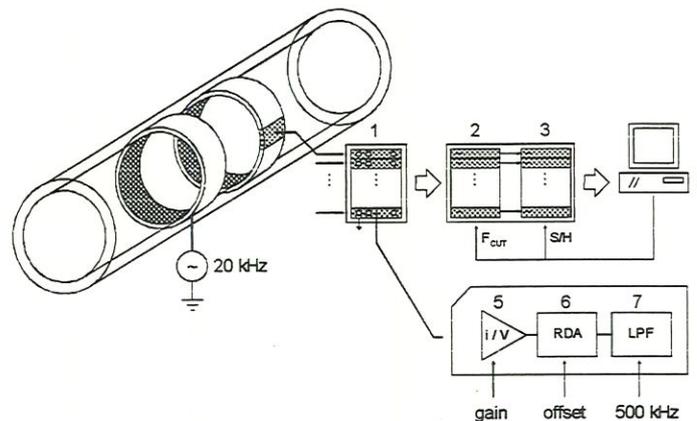


FIGURA 4.7 – Sistema de aquisição: 1) transdutores corrente/voltagem, 2) filtros (anti-aliasing), 3) circuito *sample and hold*, 4) microcomputador com placa de aquisição, 5) conversor de corrente para voltagem com controle de ganho, 6) retificador com controle offset e 7) filtro Butterworth passa baixo de quarta ordem com frequência de corte de 500Hz.

Através da FIGURA 4.8 pode-se observar a sala de controle dos ensaios experimentais.

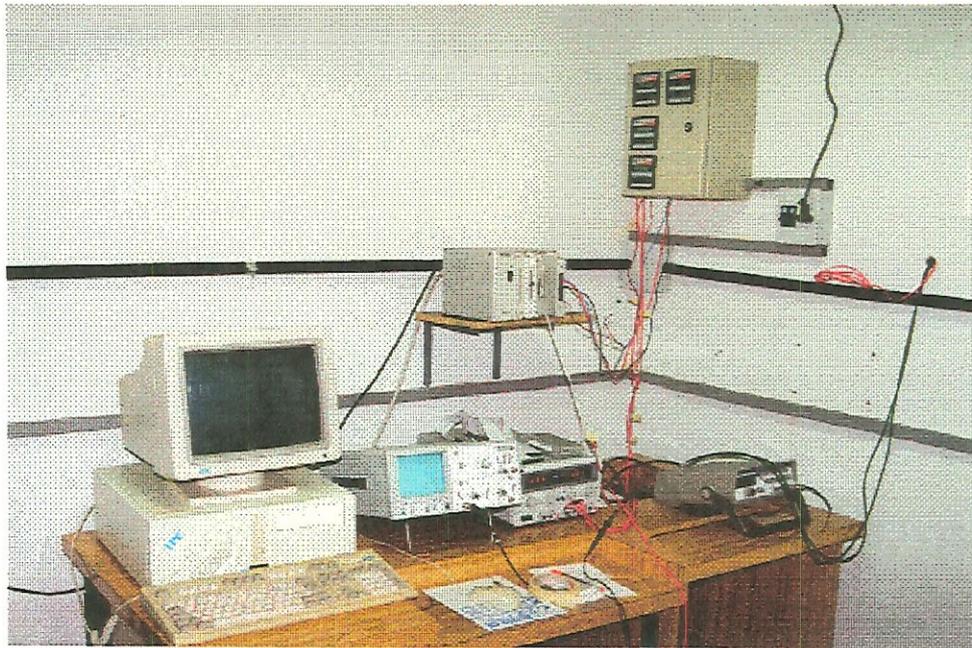


FIGURA 4.8 - Sala de controle dos ensaios experimentais.

CAPÍTULO 5 - RESULTADOS

5.1 - Programa Experimental

Foram realizadas séries de testes permanentes de longa duração no circuito experimental descrito anteriormente para dois tipos de escoamento bifásico vertical (escoamento a bolhas e pistonado). Os sinais analisados correspondem à medidas de condutividade elétrica obtidas por meio da sonda de anéis, cujo princípio de funcionamento encontra-se esquematizado na FIGURA 4.4. A TABELA 5.1 mostra as condições relativas às séries de testes realizados, considerando que a velocidade superficial da água ($U_{\text{água}}$) é nula. Não variou-se a vazão de água porque quando a bomba hidráulica era ligada induzia, através do conversor de frequência, ruído no sistema de aquisição.

Os sinais de condutividade foram amostrados a frequência de 30 Hz em um total de 8192 amostras (o que produz um tempo de duração para cada teste de 273,1 segundos).

TABELA 5.1 - Condições relativas às séries de testes realizados.

Regimes	U_{ar} (cm/s)	Duração (s)
Teste 1	0,46	273,1
Teste 2	2,12	273,1
Teste 3	3,37	273,1
Teste 4	5,15	273,1
Teste 5	6,07	273,1
Teste 6	7,60	273,1
Teste 7	6,68	273,1
Teste 8	9,50	273,1
Teste 9	12,71	273,1
Teste 10	15,93	273,1
Teste 11	19,15	273,1
Teste 12	22,37	273,1
Teste 13	25,59	273,1
Teste 14	28,80	273,1
Teste 15	32,03	273,1
Teste 16	35,24	273,1

Uma vez a informação relativa à configuração de escoamento codificada no sinal, o que foi assegurado por um sensoriamento correto, o passo seguinte consistiu em transcrevê-la em um espaço adequado de análise visando a identificação de características de cada regime de escoamento. Isto foi feito utilizando como método de análise tempo-frequência a transformada de Gabor, eq. (4.13).

5.2 - Análise dos Resultados

A FIGURA 5.1 apresenta a curva do baricentro (volts), eq. (4.4), em função da velocidade superficial do ar (U_{ar} , cm/s). Cada ponto desta figura representa o baricentro dos pontos de cada teste mostrado na TABELA 5.1.

A FIGURA 5.2 apresenta o desvio padrão do sinal (volts), eq. (4.5), proveniente da sonda de condutividade elétrica, em função da velocidade superficial do ar (U_{ar} , cm/s). Cada ponto desta figura representa o desvio padrão dos pontos (8192) de cada teste mostrado na TABELA 5.1.

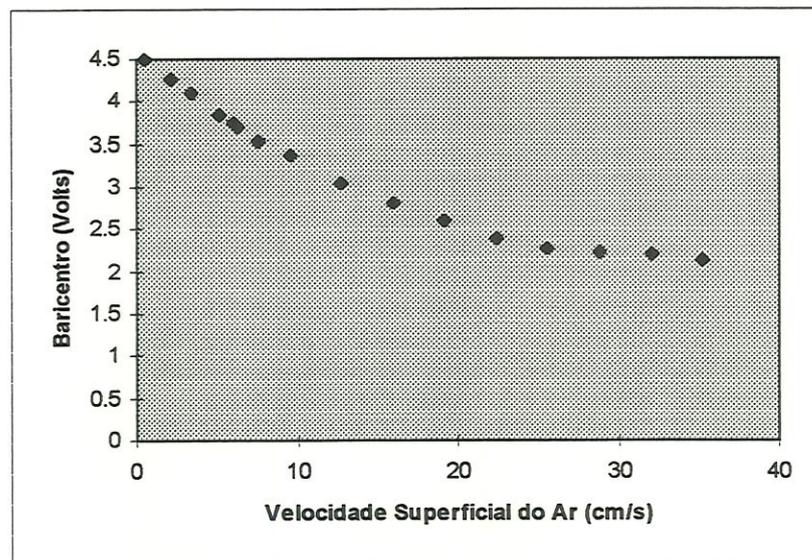


FIGURA 5.1 – Baricentro (volts) em função da velocidade superficial do ar (cm/s).

Analisando a FIGURA 5.1 verifica-se uma queda do nível médio de tensão do sinal, o que indica o aumento da fração de vazio e essa é a única informação desse parâmetro, não permitindo opinar sobre os regimes. Na FIGURA 5.2 pode-se observar que a região de transição do escoamento a bolhas para o escoamento pistonado está de acordo com o critério desenvolvido por Vince & Lahey (1982). O patamar após a transição não indica a degeneração do escoamento pistonado em direção aos escoamentos agitados, o que é um defeito desse parâmetro.

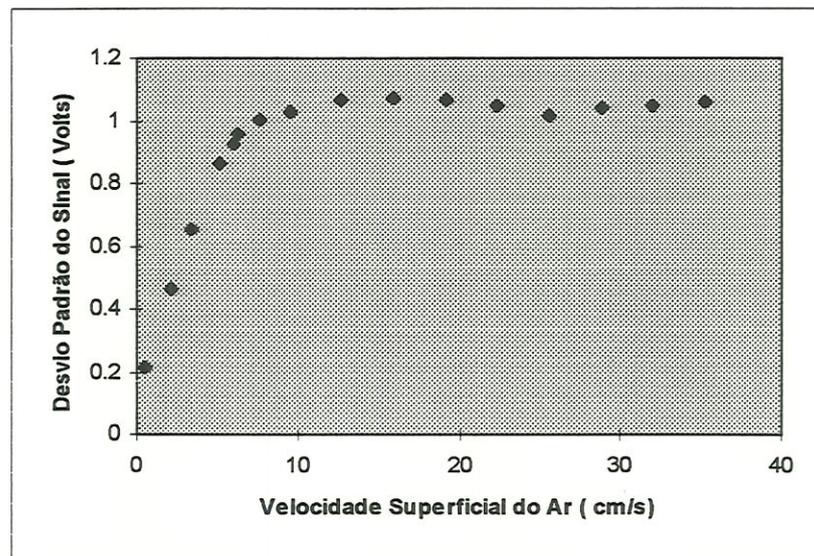


FIGURA 5.2 - Desvio padrão do sinal (volts) em função da velocidade superficial do ar (cm/s).

As FIGURAS 5.3 e 5.4 são diagramas de análise tempo-frequência representativos de dois sinais (8192 amostras a uma frequência de aquisição de 30 Hz) de condutividade elétrica fornecidos pela sonda. Estas

figuras apresentam três gráficos. O gráfico (a) representa a variação do sinal de condutividade (volts) em função do tempo (segundos). O gráfico (b), disposto verticalmente, representa o espectro do sinal (Hz). O gráfico (c) representa a transformada de Gabor do sinal, ou seja, apresenta a energia do sinal em função da frequência (disposta no eixo vertical, em Hz) e do tempo (disposto no eixo horizontal, em segundos). Quanto mais escuro, mais forte é a densidade de energia.

No escoamento a bolhas, o ar encontra-se disperso em grandes bolhas (bolhas de Taylor), apresentando uma certa periodicidade entre elas e movimentando-se uma em relação as outras de maneira aparentemente caótica (devido à esteira de pequenas bolhas existente entre as grandes bolhas). Como consequência disto, o sinal de condutividade caracteriza-se no plano tempo-frequência por um espalhamento da energia espectral em torno das frequências mais marcantes. O sinal de condutividade (volts), referente ao Teste 1 (TABELA 5.1), seu espectro (Hz) e o respectivo diagrama tempo-frequência são apresentados na FIGURA 5.3.

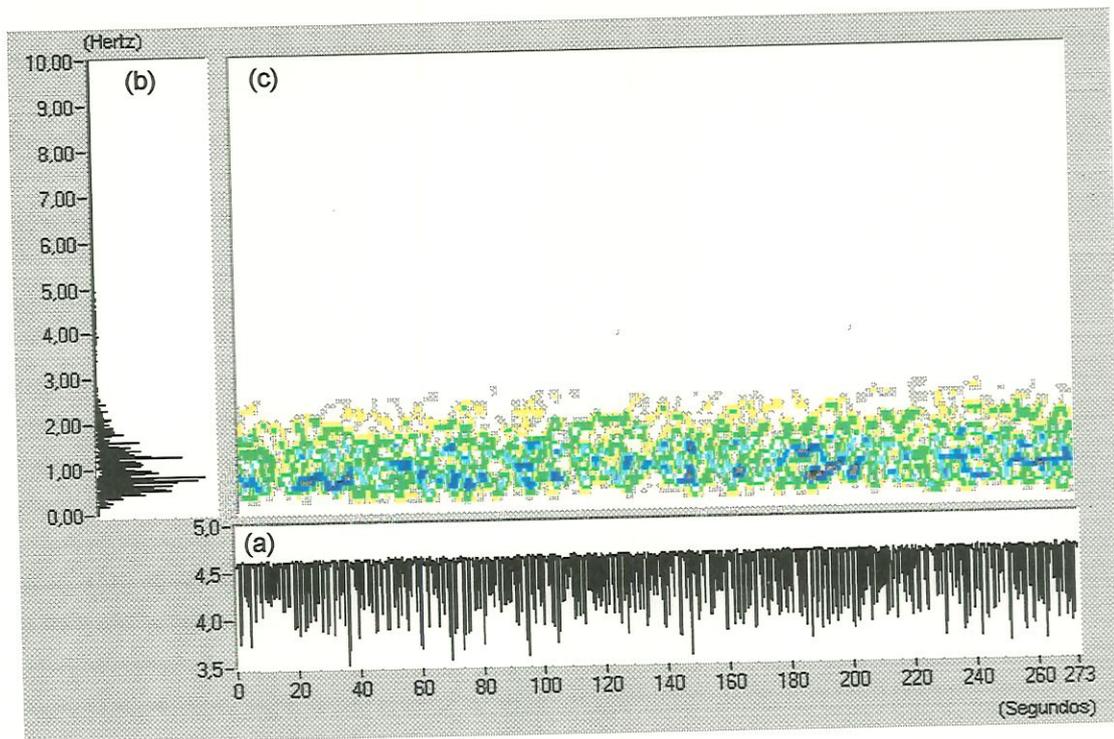


FIGURA 5.3 - Diagrama tempo-frequência - escoamento a bolhas ($U_{ar}=0,46$ cm/s, Teste 1).

Analisando a FIGURA 5.3 verificou-se que o plano tempo-frequência apresenta a energia espalhada sobre uma faixa frequencial (de 0 a 3 Hz), havendo um aumento de energia em torno das frequências principais (a frequência 0,9 Hz é uma delas).

O escoamento pistonado caracteriza-se pela passagem alternada de bolsões de ar (também chamados pistões) e de uma esteira de bolhas menores. Existe uma frequência bem definida e a energia espectral está bem concentrada em torno desta frequência. A FIGURA 5.4, referente ao Teste 9 (TABELA 5.1), mostra estas considerações.

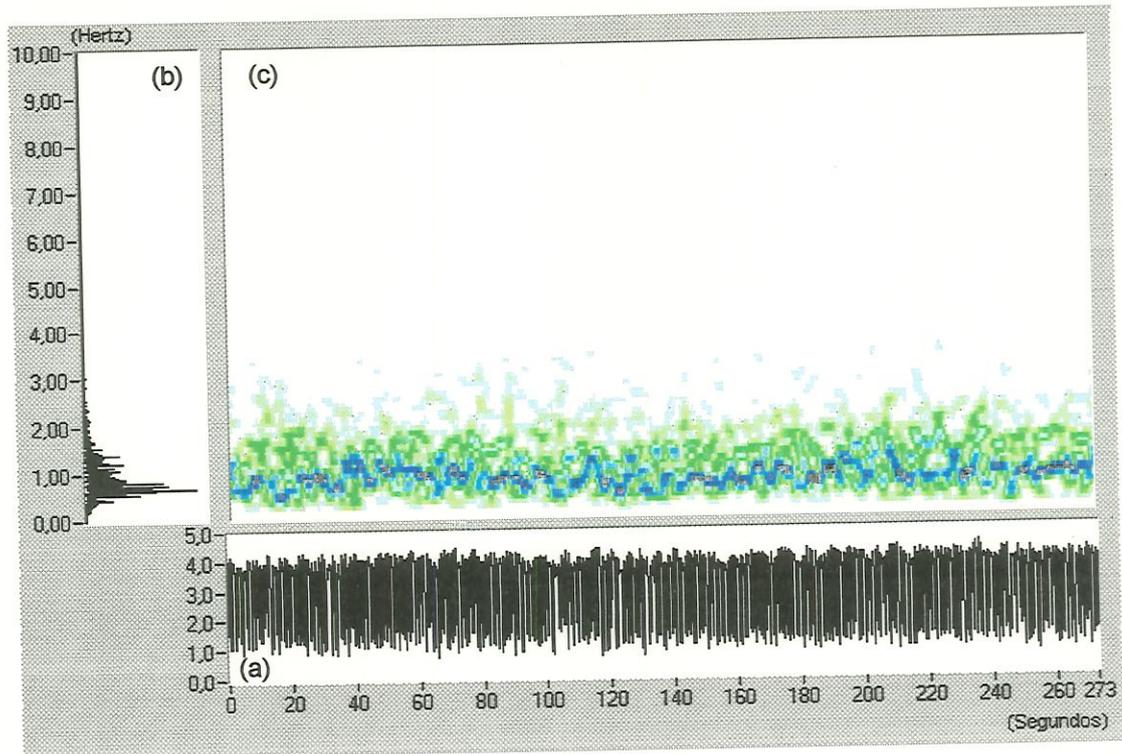


FIGURA 5.4 – Diagrama tempo-frequência – escoamento pistonado
($U_{ar}=12,71$ cm/s, Teste 9).

Analisando a FIGURA 5.4 pode-se verificar no espectro que existe uma frequência bem definida (0,8 Hz), indicando que a periodicidade no regime pistonado é bem mais marcante do que no regime a bolhas. A quantidade de energia é maior que no regime anterior e tende a se concentrar em torno da frequência principal.

Para se estabelecer a ligação da região visualizada no plano tempo-frequência com cada um dos regimes conseguidos, analisou-se o comportamento de duas variáveis estatísticas (frequência média e desvio padrão das frequências) calculadas no plano tempo-frequência em função da velocidade superficial do ar. Cada ponto das FIGURAS 5.5 e 5.6

representa, respectivamente, a frequência média, eq. (4.9), e o desvio padrão, eq. (4.10), das frequências de cada teste mostrado na TABELA 5.1.

A frequência média é alta nos dois primeiros pontos onde o espalhamento de energia é maior. Em seguida, observa-se uma queda na frequência média, pois a energia tende a se concentrar em torno de uma frequência principal, estreitando assim a faixa de espalhamento. Nesse intervalo tem-se uma região de transição do escoamento a bolhas para o pistonado. Depois de um período de estabilidade, a frequência média começa a aumentar, indicando uma tendência em atingir o regime agitante.

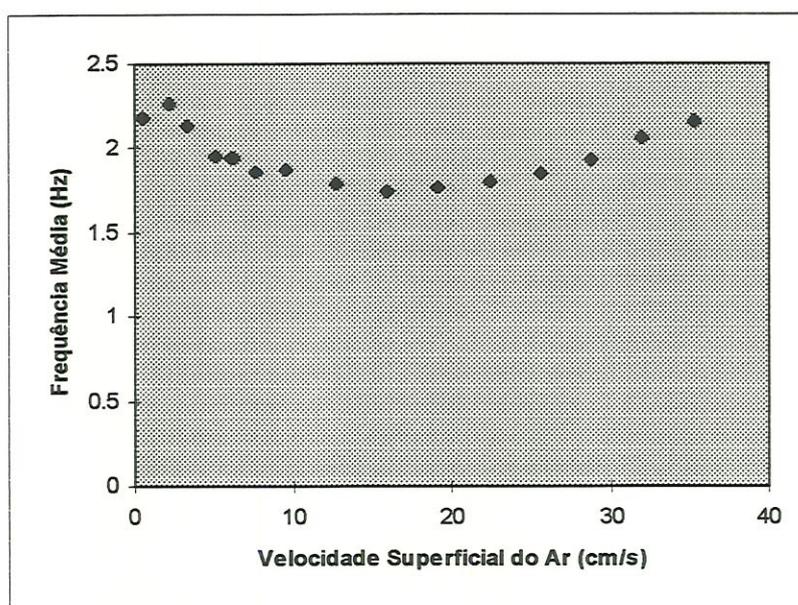


FIGURA 5.5 - Frequência média (Hz), calculadas no plano tempo-frequência, em função da velocidade superficial do ar (cm/s).

O desvio padrão indica o espalhamento das frequências no plano tempo-frequência. Alto desvio padrão e baixa velocidade superficial do ar indicam escoamento a bolhas. Pode-se verificar que à medida que a velocidade do ar aumenta ocorre uma queda no desvio padrão indicando que o regime está passando de bolhas para pistonado. Após a transição, o desvio padrão da distribuição tempo-frequência apresenta uma tendência em aumentar, indicando o início do regime agitado, observado na FIGURA 5.6.

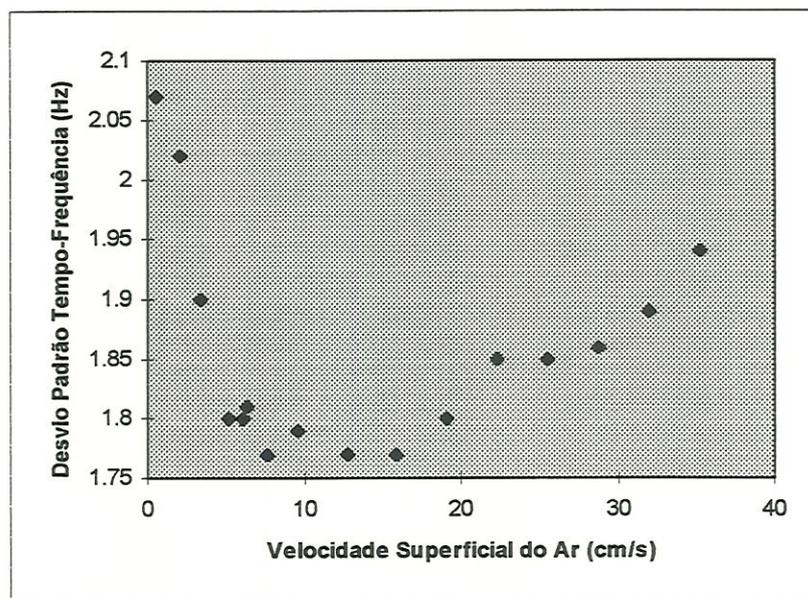


FIGURA 5.6 - Desvio Padrão das frequências (Hz), calculadas no plano tempo-frequência, em função da velocidade superficial do ar (cm/s).

CAPÍTULO 6 – CONCLUSÕES E SUGESTÕES

Neste trabalho, dois tipos de escoamento bifásico vertical gás-líquido foram caracterizados através de sinais de condutividade e sua representação no plano tempo-frequência. Para tanto, uma série de ensaios foram conduzidos em um circuito experimental, e uma sonda condutiva, foi especialmente desenvolvida. Igualmente, foram implementados algoritmos de aquisição e análise destinados ao cálculo da transformada de Gabor associados aos sinais de condutividade fornecidos pela sonda.

Os resultados mostram o grande potencial da análise tempo-frequência em evidenciar detalhes relativamente finos da fenomenologia dos escoamentos. Especificamente, apesar do desvio padrão do sinal indicar a transição do escoamento a bolhas para o pistonado, esse parâmetro não indica a degeneração do regime pistonado que ocorre com o aumento de variância, isto é, a transição para o regime agitado. Por outro lado, o desvio padrão da distribuição tempo-frequência é capaz de indicar esse comportamento.

Estes e outros aspectos inferidos dos resultados, sugerem novos estudos a serem conduzidos em trabalhos futuros. Dentre estes destacam-se a caracterização dos demais escoamentos bifásicos vertical gás líquido

(agitante e anular) e a investigação detalhada da fenomenologia da transição entre os escoamentos.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ANDREUSSI, P.; DONFRANCESCO, A.; MESSIA, M. (1988). An impedance method for the measurement of liquid hold-up in two-phase flow. *Int. J. Multiphase Flow*, v. 14, n. 6, p. 777-785.
- ASALI, J. C.; HANRATTY, T. J.; ANDREUSSI, P. (1985). Interfacial drag and film height for vertical annular flow. *AIChE J.*, v.31, p.895-902.
- BARNEA, D.; SHOHAM, O.; TAITEL, Y. (1980). Flow pattern characterization in two phase flow by electrical conductance probe. *International Journal of Multiphase flow*, v.6, n.5A, p.387-397.
- BISHOP, C. M. (1994). Neural network validation: an illustration from the monitoring of multiphase flow. *IEE Conference Publication 3rd International Conference on Artificial Neural Networks*, n.372, p.41-46, May.

- BRIGHAM, E. ORAN (1988). FFT: the fast Fourier transform and its applications. New Jersey, Prentice Hall.
- CECCIO, S. L.; GEORGE, D. L. (1996). A review of electrical impedance techniques for the measurement of multiphase flows. *Journal of Fluids Engineering*, v. 118, p. 391-399, june.
- COELHO, R. T.; SANCHEZ, L. E. A.; OLIVEIRA, J. F. G.; SELEGHIM, P. Jr. (1996). An investigation into the behaviour of ceramic materials under scratching test using acoustic emission. *International Manufacturing Engineering Conference*, p.41-43, August.
- COHEN, L. (1995). *Time-frequency analysis*. New Jersey, Prentice Hall.
- COLLIER, J. G. (1981). *Convective boiling and condensation*. England, McGraw - Hill Inc.
- DANIELS, L. (1995). Dealing with two-phase flows. *Chemical Engineering*, v. 102, p. 70-78, june.
- DELPRAT, N.; DIASPARRA, B.; HERVIEU, E. (1999). Identification des régimes d'une représentation spatio-fréquentielle. *Comptes Rendus de L'Academie Science./no prelo/*

- DOEBLIN, E. O. (1990). *Measurement systems application and design*. 4. Ed. New York, McGraw-Hill.
- DRAHOS, J.; CERMAK, J. (1989). Diagnostics of gas-liquid flow patterns in chemical engineering systems. *Chemical Engineering Processes*, v.26, p.147-164.
- FRANÇA, F.; ACIKGOZ, M.; CLAUSSE, A. (1991). An application of fractal techniques to flow regime identification. In: BURNS, A. P., ed. *Multiphase production*. London, Elsevier Applied Science. p. 281-293
- GRUBERT, J. P. (1995). Application of neural networks in stratified flow stability analysis. *Journal of Hydraulic Engineering*, v.121i7, p. 523-532, Jul.
- HERVIEU, E.; LEDUCQ, D. (1991). The wavelet transform as a diagnostic tool in two-phase flows: characterisation of multiphase flows from wall measurements. European Two-Phase Flow Group Meeting, Rome.
- HERVIEU, E.; SELEGHIM, P. Jr. (1995). Characterization of gas-liquid two-phase flow pattern transition by analysis of the instantaneous frequency. *Second International Conference on Multiphase Flow*, FT1-25, v.3.

- HERVIEU, E; SELEGHIM, P. Jr. (1998). An objective indicator for two-phase flow pattern transition. *Third International Conference on Multiphase Flow, ICMF'98*, v.CD-ROM, p.1-7, june.
- HSU, Y. Y.; SIMON, F. F.; GRAHAM, R. W. (1963). Aplication of hot-wire anemometry for two-phase flow measurements such as void-fraction and slip velocity. Apresentado para o ASME Winter Meeting, Philadelphia, USA apud DELHAY, J. M. (1969). Hot-film anemotry in two-phase flow. IN: Two-phase flow instrumentation. 11TH NATIONAL ASME/AICHE HEAT TRANSFER CONFERENCE. Agosto, 1969. Minneapolis, Minnesota, USA. P. 58-69.
- LIN, P. Y.; HANRATY, T. J. (1987). Detection of slug flow from pressure measurements. *Int. J. Multiphase Flow*, v.13, n.1, p.13-21.
- MATSUI, G. (1984). Identification of flow regimes in vertical gas-liquid two-phase low using differential pressure fluctuations. *International Journal Multiphase Flow*, v.10, n.6, p.711-720.
- MI, Y.; LI, M.; XIAO, Z.; TSOUKALAS, L. H.; ISHII, M. (1997). Impedance void-meter and neural networks for vertical two-phase flows. OECD/CSNI Specialist Meeting on Advanced Instrumentation and Measurement Techniques, Santa Barbara. Proceedings. New York, p.1-14.



- MISHIMA, K.; ISHII, M. (1984). Flow regime transition criteria for upward two-phase flow in vertical tubes. *International Journal Heat Mass Transfer*, v.27, n.5, p.723-737.
- MONJI, H.; MATSUI, G. (1998). Flow pattern identification of gas-liquido two-phse flow using a neural network. *Third International Conference on Multiphase Flow*, v. cd-rom, p. 1-8, Jun.
- MOON, S. K.; CHANG, S. H. (1994). Classification and prediction of the critical heat flux using fuzzy theory and artificial neural networks. *Nuclear Engineering and Design*, p.151-161.
- MOREIRA, J. R. S. (1989). *Transdutor de impedância para a medida da fração de vazio*. São Paulo. Dissertação (Mestrado) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.
- NYDAL, O. J.; PINTUS, S.; ANDREUSSI, P. (1992). Statistical characterization of slug flow in horizontal pipes. *Int. J. Multiphase Flow*, v.18, p.439-453, Jan.
- REINECKE, N.; MEWES, D. (1996). Recent developments and industrial/research applications of capacitance tomography. *Measurement Science and Technology*, v. 7, p. 233-246,jan.

- SEKOGUCHI, K.; INOUE, K.; IMASAKA, T. (1987). Void signal analysis and gas-liquid two-phase flow regime determination by a statistical pattern recognition method. *JSME International Journal*, v.30, n.266, p.1266-1273.
- SELEGHIM, P. Jr. (1993). *Analyse temps-fréquence appliquée aux écoulements diphasiques, Mémoire de DEA*. Grenoble, Institut National Polytechnique de Grenoble.
- SELEGHIM, P. Jr.; HERVIEU, E. (1994). Caractérisation des changements de configuration des écoulements diphasiques gaz-liquide par analyse de la fréquence instantanée. *C. R. Acad. Sci. Paris*, t.319, série II, p.611-616.
- SELEGHIM JUNIOR, P. (1996). *Caracterisation des changements de configuration d'un écoulement diphasique horizontal par l'application de methodes d'analyse temps-frequence*. Grenoble. 301p. Tese (Doutorado) – De L'Institut National Polytechnique de Grenoble.
- SELEGHIM, P. Jr.; HERVIEU, E.; SANTOS, A. M. (1998). Time frequency characterization of two-phase horizontal air-water flow regimes. *Revista Brasileira de Ciências Mecânicas*, v.20, n.1, p.39-50.

- SELEGHIM JUNIOR, P.; HERVIEU, E. (1998a). An objective indicator for two-phase flow pattern transition. *Nuclear Engineering and Design*, v. 184, p. 421-435.
- SELEGHIM JUNIOR, P.; HERVIEU, E. (1998b). Direct imagin of horizontal gas-liquid flows. *Measurement Science & Technology*, v. 9, n. 8, p.1492-1500.
- SOLDATI, A.; PAGLIANTI, A.; GIONA, M. (1996). Identification of two phase flow regimes via diffusional analysis of experimental time series. *Experiments in Fluids*, v.21, n.3, p.151-160, july.
- SPEEDING, P. L.; SPENCE, D. R. (1993). Flow regimes in two-phase gas-liquido flow. *Int. J. Multiphase flow*, v.19, n.2, p.245-280.
- SUN, T. D.; MUDDE, R.; SCHOUTEN, J. C.; SCARLETT, B.; VAN DEN BLEEK, C. M. (1999). Image reconstruction of an electrical capacitance tomography system using an artificial neural network. In: 1st WORLD CONGRESS ON INDUSTRIAL PROCESS TOMOGRAPHY, Buxton, 1999. Anais. p. 174-180.
- TAITEL, Y.; DUKLER, A. E. (1976). A model for predicting flow regime transitions in horizontal and near horizontal gas-liquido flow. *AIChE Journal*, v.22, n.1, p.47-55, Jan.

- TRONIEWSKI, L.; ULBRICH, R. (1984). The analysis of flow regime maps of two-phase gas-liquid flow in pipes. *Chemical Engineering Science*, v.19, n.7/8, p.1213-1224.
- VINCE, M. A.; LAHEY, R. T. Jr. (1982). On the development of an objective flow regime indicator. *International Journal Multiphase Flow*, v.8, n.2, p.93-124.
- WAMBSGANSS, M. W.; JENDRZEJCZYK, J. A.; FRANCE, D. M. (1994). Determination and characteristics of the transition to two-phase slug flow in small horizontal channels. *Journal of Fluids Engineering*, v.116, p.140-146, Mar.
- WANG, M. J.; LU, Z. Q.; FENG, J. K. (1991). Statistical identification of flow pattern and the transition for horizontal two-phase flow. 5th International
- YAMASHITA, Y. (1997). Time delay neural networks for the classification of flow regimes. *Computers & Chemical Engineering*, v.21, p.367-371.