

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

**ANÁLISE TEMPO-FREQUÊNCIA DE REGIMES DE  
ESCOAMENTO BIFÁSICO GÁS-LÍQUIDO INTERMITENTES  
EM TUBO HORIZONTAL**

**Fabiana Lopes Klein**

Orientador: Prof. Assoc. Paulo Seleglim Jr.

DEDALUS - Acervo - EESC



31100105417



**Serviço de Pós-Graduação EESC/USP**

**EXEMPLAR REVISADO**

Data de entrada no Serviço.....05...../.....09...../.....04.....

Ass.:.....*Maíra*.....

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

São Carlos  
2004

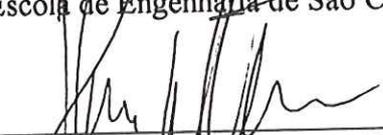
FOLHA DE JULGAMENTO

Candidata: Licenciada **FABIANA LOPES KLEIN**

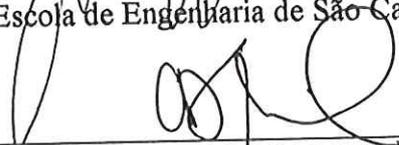
Tese defendida e julgada em 20-10-2004 perante a Comissão Julgadora:

  
Prof. Associado **PAULO SELEGHIM JUNIOR (Orientador)**  
(Escola de Engenharia de São Carlos/USP)

Aprovado

  
Prof. Titular **JOÃO FERNANDO GOMES DE OLIVEIRA**  
(Escola de Engenharia de São Carlos /USP)

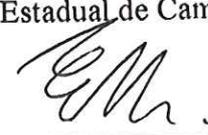
APROVADO

  
Prof. Dr. **CARLOS DIAS MACIEL**  
(Escola de Engenharia de São Carlos/USP)

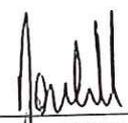
APROVADO

  
Prof. Dr. **ANTONIO CARLOS BANNWART**  
(Universidade Estadual de Campinas/UNICAMP)

APROVADA

  
Dr. **EMERSON DOS REIS**  
(Universidade Estadual de Campinas/UNICAMP)

Aprovado

  
Prof. Associado **JONAS DE CARVALHO**  
Coordenador do Programa de Pós-Graduação  
em Engenharia Mecânica

  
Profª. Titular **MARIA DO CARMO CALJURI**  
Presidente da Comissão de Pós-Graduação

*À memória do meu pai Carlos Alberto .  
À minha mãe Marlene, pelo amor, pelo  
incentivo, pela confiança e por ser a maior  
responsável por mais essa minha conquista.*

## AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus, acima de tudo.

Ao Prof. Dr. Paulo Seleglim Jr. pela orientação, pela amizade e, principalmente, pela confiança de todos esses anos.

Ao Prof. Dr. Carlos Dias Maciel pela paciência e pelo empenho em ajudar-me na finalização deste trabalho.

Aos meus grandes amigos e compadres Carol e Zé Luiz, amigos sinceros e verdadeiros, pela dedicação e confiança, serei eternamente grata.

À minha querida amiga Beth pela amizade, pelo carinho, pela alegria e por ser a melhor companheira em os todos os momentos.

Às minhas amigas, Cuca, Gi, Kelen e Luciana pela amizade, pela companhia e por todos os bons momentos dos melhores anos da minha vida.

Ao Paulo Roberto pela amizade, pela paciência e, principalmente, por estar sempre pronto a me ajudar.

Aos meus queridos “pais adotivos” Rita e Jairo pelo carinho de sempre.

Aos meus amigos Alessandro, Amauri, Andréa, Cláudio, Elizângela, Érica, Geraldo, Graziela, Helder, Juliana, Mariano, Naga, Neilor, Panamá, Paulo Marcos, Rodrigo, Rodrigo Canto, Teodora, Toddy, Vanessa e Volnei.

À Ana Paula não somente por ser uma secretária que muito me ajudou e, sim, pela amizade de todos esses anos.

Aos técnicos do laboratório, Donizeti, Hélio, Jorge, Luchesi, Roberto Lourenço e Roberto Pratavieira.

À minha avó Izaura, a minha tia Núbia, minha tia Mirian e minha tia Joana pelo carinho de sempre.

À minha irmã Flavia pela torcida e ajuda.

Aos meus tios e primos pelo incentivo e apoio em todos os momentos. Em especial às minhas queridas primas Bárbara, Carolina, Júlia, e Marília.

À minha prima e companheirinha Sabrina pelos momentos de descontração com suas incríveis histórias de criança.

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

Ao CNPQ pelo apoio financeiro concedido durante o desenvolvimento deste trabalho.

## **Sumário**

LISTA DE FIGURAS	iii
RESUMO	v
ABSTRACT	vi
1 INTRODUÇÃO	1
2 OBJETIVOS	3
3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	4
3.1 Regimes de Escoamento	4
3.1.1 Regimes de Escoamento Gás-Líquido Horizontal	5
3.2 Técnicas de Medidas em Escoamentos Bifásicos	8
3.3 Técnicas de Análise de Sinais em Escoamentos Bifásicos	16
4 METODOLOGIA	28
4.1 Análise de Sinais	28
4.1.1 Análise Temporal dos Sinais	29
4.1.2 Densidade de Energia e Energia Total de um Sinal	30
4.1.3 Caracterização dos Sinais no Tempo: Média, Tempo Médio e Duração de um Sinal	30
4.1.4 Análise Espectral dos Sinais	32
4.1.5 Densidade Espectral de Energia e Energia Total	34

---

4.1.6 Caracterização dos Sinais na Frequência: Frequência Média, Banda e Média Frequencial	35
4.1.7 A Análise Tempo-Frequência	36
4.1.8 Por que o espectro varia?	38
4.1.9 A Transformada de Fourier a Curto Tempo	39
4.1.9.1 A Transformada de Fourier a Curto Tempo: Equações	40
4.1.10 A Covariância Tempo-Frequência	43
4.2 Instalações Experimentais	48
4.2.1 Descrição do Circuito Horizontal	48
4.2.2 A Sonda de Medidas de Condutividade	49
4.2.3 Sistema de Aquisição	52
<b>5 RESULTADOS</b>	<b>53</b>
5.1 Programa Experimental	53
5.2 Análise dos Resultados	57
<b>6 CONCLUSÕES E SUGESTÕES</b>	<b>62</b>
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b>	<b>64</b>

**LISTA DE FIGURAS**

FIGURA 3.1 – Regimes de escoamento gás-líquido em um duto Horizontal	7
FIGURA 3.2 – Método gravimétrico para medição da fração de vazio (MOREIRA, 1989)	12
FIGURA 3.3 – Esquema básico de um transdutor de Impedância	13
FIGURA 4.1 – Representação tempo-frequência de um sinal caracterizando um regime de escoamento estratificado ondulado em um circuito horizontal gás-líquido (SELEGHIM et al., 1998)	37
FIGURA 4.2 – Representação tempo-frequência de um sinal caracterizando um regime de escoamento intermitente em um circuito horizontal gás-líquido (SELEGHIM et al., 1998)	38
FIGURA 4.3 – Circuito experimental, segundo Seleghim e Hervieu, (1998): (1) seção de ensaios, (2) separador, (3) bomba hidráulica, (4) variador de frequência, (5) compressor, (6) servo-válvula, (7) medidor de vazão eletromagnético (8) medidor de vazão, (9) piloto do circuito, (10) sistema de aquisição de sinais, (11) sonda condutiva, (12) misturador	49
FIGURA 4.4 – Sonda de medidas de condutividade elétrica (a) e eletrodos da sonda de medidas de condutividade (b)	50
FIGURA 4.5 – Imagens qualitativas de escoamentos anular (a) e intermitente (b)	51

- FIGURA 4.6 – 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, (7) filtro Butterworth passa baixo de quarta ordem com frequência de corte de 500Hz 52
- FIGURA 5.1 – Mapa de escoamento de Taitel e Dukler (1976) com indicação da zona de testes na região destacada em cinza (vazões expressas nas CNPT) 54
- FIGURA 5.2 – Gráfico do desvio padrão de cada teste em função das vazões líquida e gasosa 55
- FIGURA 5.3 – Mapa de escoamento bifásico de Taitel e Dukler (1976) com as “cristas” do desvio padrão nas linhas pontilhadas (vazões expressas nas CNTP) 56
- FIGURA 5.4 – Imagem direta dos regimes de escoamento dos testes apresentados na TABELA 5.1 (branco corresponde ao ar e azul escuro a água) 58
- FIGURA 5.5 - Covariância tempo-frequência calculada através da transformada de Gabor de cada sinal correspondente aos testes de 1 a 8 60
- FIGURA 5.6 – Transformada de Gabor do sinal de condutividade do teste 3 (FIGURA 5.4c) – o gráfico (c), diagrama central, é a amplitude da transformada de gabor codificada em níveis de cor (preto- maior intensidade de energia), o gráfico (a), abaixo do diagrama principal, é o sinal de condutividade em função do tempo e o gráfico (b), à esquerda do diagrama principal, é a transformada de Fourier plotada em função da análise espectral 61

## RESUMO

KLEIN, F. L. (2004). *Análise tempo-frequência de regimes de escoamento bifásico gás-líquido intermitentes em tubo horizontal*. Tese (Doutorado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2004.

Um dos atributos fundamentais associados aos escoamentos multifásicos é a existência de estruturas características segundo as quais as diferentes fases do líquido 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. O desenvolvimento de metodologias de caracterização de regimes, bem como a caracterização e o diagnóstico da transição destes regimes de escoamento são de fundamental importância. Este trabalho utiliza a análise tempo-frequência da transformada de Gabor para caracterizar os regimes de escoamento horizontais gás-líquido intermitentes. Mais especificamente, o principal objetivo está em investigar a existência de sub-regimes dentro do regime intermitente, para tanto recorremos à covariância tempo-frequência da transformada de Gabor, que é capaz de detectar transições através da não-estacionaridade associada com as correspondentes transições. Testes experimentais foram conduzidos no circuito TALC em CEA-Grenoble e uma extensiva base de dados foi obtida, cobrindo diversos tipos de escoamento intermitente. Uma sonda de condutividade elétrica, consistindo de dois anéis de eletrodos montados junto à tubulação, produziu sinais dos quais a covariância tempo-frequência foi calculada através da correspondente transformada de Gabor.

Palavras-chave: escoamentos bifásicos; regimes de escoamento; tempo-frequência; intermitente

## ABSTRACT

KLEIN, F. L. (2004). *Time-frequency analysis of intermittent two-phase flows in horizontal piping*. Tese (Doutorado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2004.

One of the main features associated to multiphase flows is the existence of characteristic dynamic structures according to which the different phases of a mixture of immiscible fluids can flow. The manifestation of one of these structures, known a flow pattern or regime, is determined by the flow rates as well as by physical and geometrical properties of the fluids and piping. The development of flow pattern characterization and diagnostic methods, and the associated transitions in between, is of crucial importance for an efficient engineering of such phenomena. Time-frequency analysis based on the Gabor transform is used in this work to characterize horizontal air-water intermittent flow regimes. More specifically, our main objective is to reveal the existence of sub-regimes inside the intermittent regimes region with the help of the corresponding time-frequency covariance based on the Gabor transform, which is capable of detecting transitions by assessing the unstationarity associated with the corresponding transitions. Experimental testes were conducted at the TALC facility at CEA-Grenoble and an extensive database was obtained, covering several types of intermittent flow. A conductivity probe, consisting in two ring electrodes flush mounted to the pipe, delivered signals from which the time-frequency covariance were calculated from the corresponding Gabor transform.

keywords: multiphase flow; flow regimes; time-frequency; intermittent

## ***CAPÍTULO 1 – INTRODUÇÃO***

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.

Mas o que são regimes de escoamento? Na ausência de um entendimento maior sobre a questão, diferentes pesquisadores trabalham com diferentes definições e o resultado é uma profusão de termos derivados de conceitos muitas vezes conflitantes. Sobre a questão levantada, pode-se evocar conceitos da teoria dos sistemas dinâmicos para chegar a uma definição, mesmo que formal. Assim, admitindo que exista um conjunto de equações diferenciais que descreva o comportamento de um escoamento bifásico, um regime de escoamento pode ser interpretado como uma trajetória característica no espaço de fase definido pelas variáveis de descrição do sistema de equações.

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. O desenvolvimento de metodologias de caracterização de regimes, bem como a caracterização e o diagnóstico da transição entre regimes e da transição dentro de um determinado regime são de vital importância, não somente para o projeto, mas principalmente para a operação eficiente de equipamentos e instalações que envolvam o transporte de fluidos multifásicos, e representa hoje um dos grandes desafios das indústrias petroquímicas e termonucleares, entre outras.

## ***CAPÍTULO 2 – OBJETIVOS***

Neste trabalho, investigaremos a existência de transições nos regimes de escoamento horizontais gás-líquido intermitentes. Para tanto recorreremos à covariância tempo-frequência da transformada de Gabor, ferramenta que exhibe com grande nitidez as transições de regimes. A busca de transições dentro da região de escoamento intermitente foi feita experimentalmente através de extensivos testes realizados no circuito TALC, do Commissariat à l'Energie Atomique em Grenoble-França e os resultados sistematicamente analisados com o auxílio de rotinas específicas. Uma sonda de condutividade elétrica instalada neste circuito, produziu os sinais que foram transcritos no plano tempo-frequência através da transformada de Gabor.

## ***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 bifásico 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 escoamento 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 horizontal, portanto aqui será dada uma atenção especial para este tipo de escoamento.

### **3.1.1 - Regimes de Escoamento Gás-Líquido Horizontal**

Os regimes de escoamentos bifásicos observados em tubos e condutos horizontais são complicados pela assimetria das fases, resultado da influência da força gravitacional (COLLIER, 1981). Os padrões de escoamento mais aceitos são discutidos abaixo.

**Escoamento a Bolhas:** No escoamento a bolhas, a fase gás (ou vapor) está dispersa em bolhas discretas em uma fase líquida contínua. As bolhas podem ser pequenas e esféricas ou 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. As bolhas de vapor tendem a viajar na parte superior do tubo (COLLIER, 1981).  
Veja FIGURA 3.1.a

**Escoamento Estratificado:** Este regime somente ocorre para velocidades muito baixas do líquido e vapor (COLLIER, 1981). Segundo DRAHOS & CEMARK (1989), escoamento estratificado é definido como um regime com o

líquido seguindo ao longo do fundo do tubo e o gás ao longo do topo do tubo. Três sub-regimes podem ser distinguidos: estratificado liso, estratificado ondulado e estratificado rugoso.

***Escoamento Estratificado Liso:*** Caracterizado por uma interface desprovida de oscilações significativas. Veja FIGURA 3.1.b

***Escoamento Estratificado Ondulado:*** Aumentando a velocidade do gás, a interface vem a ser perturbada formando ondas que viajam na direção do escoamento. Veja FIGURA 3.1.c

***Escoamento Estratificado Rugoso:*** Partindo de uma configuração estratificada ondulada e aumentando a vazão de ar, com vazão constante de água, é possível observar uma situação em que as ondas superficiais perdem completamente sua coerência, produzindo uma interface de aspecto rugoso (SELEGHIM & HERVIEU, 1998a). Veja FIGURA 3.1.d

***Escoamento Intermitente:*** Característica deste regime de escoamento é uma distribuição axial não uniforme da fase líquida no tubo. O regime de escoamento intermitente é usualmente dividido em dois sub-regimes: bolhas/bolhas alongadas e pistonado. A forma é caracterizada por uma fase líquida homogênea e por uma interface gás-líquido lisa; a estrutura do escoamento é irregular, bolhas alongadas e pequenas seguem ao longo do

topo do tubo. No último sub-regime os pistões são principalmente aerados e a interface gás-líquido tem uma estrutura turbulenta (DRAHOS & CERMAK,1989). Veja Figura 3.1.e.

**Escoamento Anular:** Uma alta velocidade da fase gasosa resultará em um filme líquido junto às paredes da tubulação e, no centro, a formação de uma região contínua de gás. A região central ("core") usualmente contém gotículas líquidas quando a velocidade do gás for suficientemente alta para arrancá-las do filme anular. Para baixas velocidades do gás existe uma estrutura ondulada no fundo onde a camada líquida é mais espessa. Ondas anulares somente aparecem no tubo momentaneamente. Este regime é usualmente chamado regime de escoamento anular ondulado.

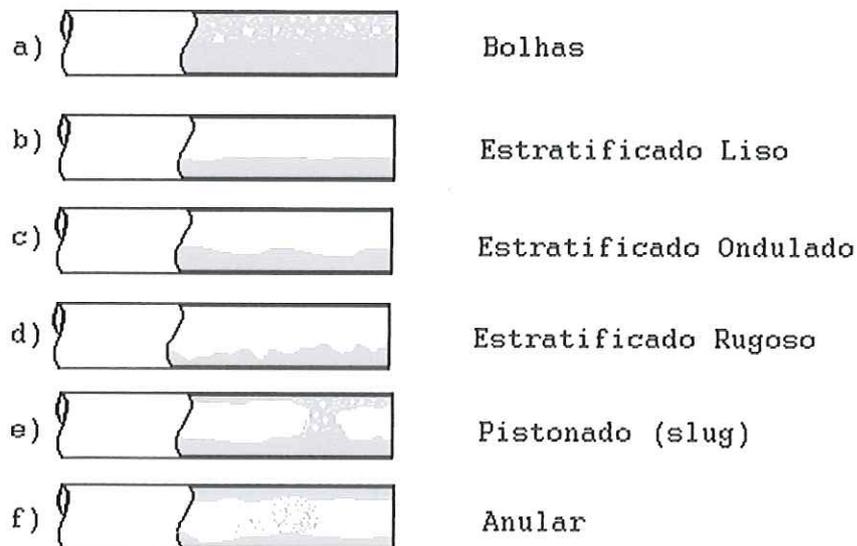


FIGURA 3.1 – Regimes de escoamento gás-líquido em um duto horizontal.

### **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. Velocidades altas podem causar erosão por corrosão no equipamento ou no sistema de tubulação.

A tecnologia de escoamento multifásico teve grande impulso com a indústria do petróleo por volta de 1950. A maioria dos pesquisadores, usava dados obtidos de testes feitos em laboratório. Esses dados incluíam vazão volumétrica de gás, vazão de escoamento líquido, propriedades físicas de cada fase, diâmetro do tubo, ângulo de inclinação e pressão na entrada e na

saída do tubo. Em alguns casos, regimes de escoamento foram observados e a fração de líquido foi medida com uma válvula de fechamento rápido.

Segundo FRANÇA et al. (1991), a primeira proposta de mapas de regimes de escoamento foi baseada na identificação visual da distribuição de fase. Enquanto a identificação visual de regimes de escoamento pode ser adequada para muitos casos, em certas situações esse método é ineficaz ou muito subjetivo. A maior dificuldade da observação visual, é que a descrição é confusa e de difícil interpretação, especialmente quando se trabalha com altas velocidades de escoamentos.

Fluidos eram tratados como misturas homogêneas. Fases de gás e líquido eram supostas escoar com velocidades diferentes, com efeitos inicialmente estimados através de correlações de líquido empírico. Mapas de regimes de escoamento empíricos, freqüentemente baseados em grupos dimensionais, foram usados. Equações de gradiente de pressão foram desenvolvidas com base nos princípios de conservação de massa e momentum, aplicado a misturas homogêneas. Perdas de pressão por atrito foram colocadas na equação de escoamento de fase simples. Alguns pesquisadores também usaram um fator multiplicativo empírico para representar o aumento de atrito resultante de uma segunda fase.

Em 1970, a indústria do petróleo começou a identificar alguns mecanismos físicos básicos, para identificar regimes de escoamento e velocidade de bolhas de gás em colunas de líquido. Neste período surgiu a carta de TAITEL & DUKLER (1976), construída a partir de um modelo físico considerando as relações entre as seguintes variáveis na transição do regime

de escoamento: velocidade superficial de gás e líquido, propriedades físicas dos fluidos e geometria da tubulação. Os mecanismos da transição são baseados em conceitos físicos adaptados às observações do escoamento bifásico feito em laboratório (BRILL, 1992).

Dentre as variáveis que podem ser usadas no diagnóstico de regimes de escoamento, a fração de vazio é sem dúvida uma das mais importantes.

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 sofisticada, 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).

Os instrumentos utilizados para medição de fração de vazio local são caracterizados por informar a presença (ou ausência) das fases em uma pequena região localizada no interior do escoamento bifásico. Quanto menor for o tamanho da extremidade sensora, tanto mais os sinais do sensor se aproximam 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 (MOREIRA, 1989). Assim,

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

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 grandes quantidades de gotas de líquido (água).

Para indicação da fração de vazio volumétrica, 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.

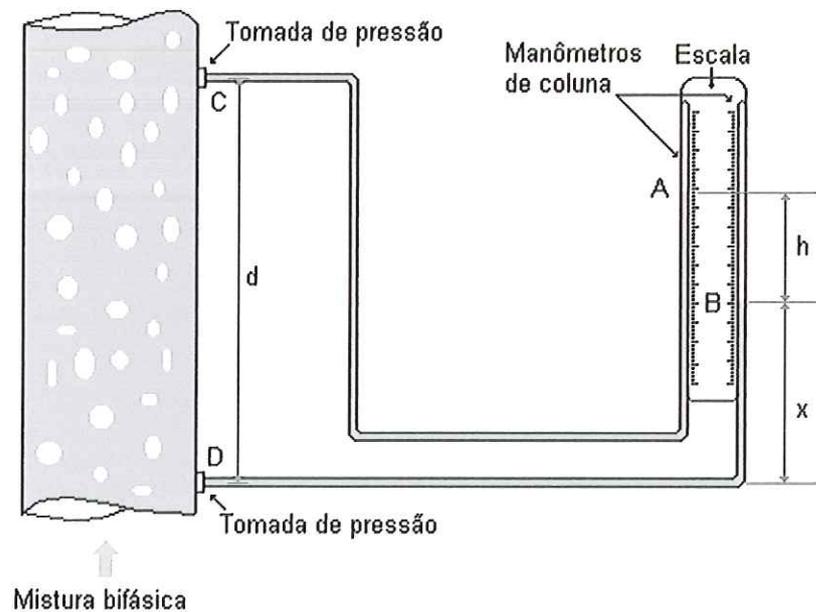


FIGURA 3.2 – Método gravimétrico para medição da fração de vazio  
(MOREIRA, 1989).

No esquema da FIGURA 3.2 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.

Outro modelo de medição de fração de vazio volumétrica é o 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 pode ser vista no esquema da FIGURA 3.3. Trata-se de um par de eletrodos imersos no meio bifásico, cuja geometria acompanha a curvatura da tubulação. Nesta configuração o material das paredes deve ser isolante.

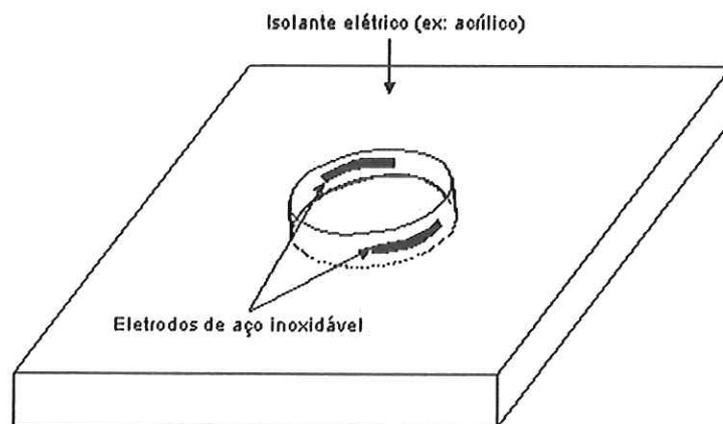


FIGURA 3.3 – Esquema básico de um transdutor de impedância.

O estudo de escoamento multifásico tem levado ao desenvolvimento de várias sondas de impedância elétrica. Em muitos escoamentos multifásicos, onde as fases têm diferenças significativas de impedância, a medida de volume médio e local dessas quantidades pode 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 tipos de sonda. A escala em que a informação é gerada pode variar também: a impedância do meio pode ser medida em uma pequena região com uma sonda local, ou medida sobre um grande volume com um sensor superficial, por exemplo. Sondagens de impedância oferecem uma alta resposta em frequência, baixo custo e construção relativamente fácil (CECCIO & GEORGE, 1996).

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 escoamento.

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, sem reconstrução numérica dos dados experimentais. Vários testes transientes foram feitos em um circuito bifásico com o objetivo de demonstrar a capacidade da sonda em exibir não somente grandes estruturas como pistões, mas também alguns detalhes refinados como ondulação e rugosidade interfaciais em escoamento estratificado, e o escoamento do filme líquido na transição entre regime de escoamento Intermitente e anular.

Uma nova tendência no desenvolvimento de técnicas de medida por tomografia, para a produção e pesquisa, é o uso de técnicas elétricas. Essas

técnicas são baseadas no contraste entre propriedades elétricas ou eletromagnéticas dos componentes no volume de medida. A tomografia capacitiva está no estado mais avançado de desenvolvimento e assim já aplicável na indústria e pesquisa (REINECKE & MEWES, 1996).

SUN et al. (1999) apresentaram um algoritmo de reconstrução numérica para sistema de tomografia capacitiva elétrica. Para melhorar a qualidade de imagem, redes neurais foram utilizadas para a reconstrução da imagem dos dados da tomografia capacitiva elétrica.

Existe uma forte relação entre regimes de escoamento bifásico e o comportamento térmico hidráulico de um circuito de circulação natural. De qualquer modo, as descrições das variações de regimes de escoamentos são exclusivamente qualitativas. HSIEH et al. (1997), estudaram as variações de regimes de escoamento através de técnicas de visualização dinâmica. Transições de regimes de escoamento foram registradas e processadas usando técnicas de análise de imagens. Como resultado, a vazão do escoamento no circuito, a pressão, a temperatura do fluido e os regimes de escoamento puderam ser comparados ao mesmo tempo e os detalhes das iterações entre regimes de escoamento e outras propriedades termodinâmicas puderam ser exploradas.

### **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.

Admite-se que, historicamente, o primeiro trabalho tenha sido o de HUBBARD & DUKLER (1966), cujo objetivo foi à caracterização de diversos regimes de escoamento baseando-se na análise espectral de sinais de pressão. 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 (densidade espectral de potência) 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 escoamento. 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.

BARNEA et al. (1980) classificaram alguns regimes baseados na observação de várias flutuações de sinais no tempo, utilizando o sinal de uma sonda condutiva em um escoamento bifásico. Como consequência um conjunto de sondas foi sugerido e detectou claramente todos os padrões de escoamento na horizontal e na vertical. A técnica proposta foi baseada na diferença significativa 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 em tubo horizontal e vertical puderam ser facilmente construídos utilizando a informação direta dos traços gráficos oscilatórios obtidos pelo conjunto de sondas condutivas.

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.

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.

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 os aspectos estocásticos do escoamento pistonado, 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 um computador equipado com uma placa de aquisição, trabalhando com altas taxas de amostragem. Somente parâmetros principais foram calculados e armazenados para cada unidade de pistão: a velocidade frontal do pistão, velocidade do pistão, o comprimento do pistão 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.

É bem conhecido que em escoamento bifásico, uma mudança abrupta em perda de pressão é freqüentemente 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 a posição no 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 predizer 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. 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 qualifica este método para aplicação industrial. O

problema pode ser a característica do sinal de pressão ou uma possível influência da configuração experimental sob as características do sinal.

SPEDDING & SPENCE (1993) obtiveram dados experimentais de regimes de escoamento horizontal ar-água. Os regimes de escoamento foram identificados por uma combinação de observação direta 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 escoamento. Vários dos mapas não predisseram corretamente os regimes. Modelos teóricos e empíricos foram desenvolvidos para a predição de transição de regimes de escoamento.

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

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).

YAMASHITA (1997) investigou um procedimento de classificação de regimes de escoamento em um transportador pneumático vertical através de

uma rede neural com atraso no tempo, a qual é uma rede *feedforward* multicamadas, desenvolvida para reconhecimento de fenômenos. Nesse estudo, um sensor de mudança eletrostática foi combinado com uma rede neural com atraso no tempo para compor um sistema de sensor inteligente. O desempenho da rede neural após o treinamento foi excelente, exceto para as regiões de transição. Uma rede neural multicamadas também foi utilizada, apresentando um desempenho próximo ao da rede neural com atraso no tempo. Entretanto, a rede neural com atraso no tempo mostrou uma habilidade de generalização (diagnóstico) superior à rede neural multicamadas.

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. Resultados experimentais mostraram que flutuações na fração de vazio média e as assinaturas do regime de escoamento podem estar relacionadas ao sinal de saída da medida de impedância. Desta maneira, a fase simples de líquido e a fase simples de gás têm sido claramente exibidas pelas propriedades estatísticas do sinal de impedância. Portanto, 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 auto-organizativa. Redes neurais têm-se mostrado apropriadas na classificação de regimes de escoamento. Além disso, rede neural auto-organizativa 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.

MI et al. (2001) evitaram qualquer erro de instrumentação e qualquer julgamento subjetivo envolvido na identificação de regime de escoamento bifásico vertical. A identificação deste regime foi baseada na simulação teórica de escoamento bifásico com um sistema de redes neurais supervisionadas e outro com redes auto-organizativas. Estatísticas do sinal de impedância do escoamento bifásico foram usadas como entradas para as redes neurais. Os resultados demonstraram que as redes neurais são apropriadas para classificar regimes de escoamento vertical.

CRIVELARO et al. (2002) utilizaram uma rede neural com aprendizado supervisionado, em associação a uma sonda de visualização direta, para a identificação de regimes de escoamento horizontal gás-líquido, produzidos em

um circuito experimental. Mais especificamente, os sinais produzidos pela sonda foram utilizados para compor uma imagem qualitativa do escoamento e, em seguida, enviados à rede neural para reconhecimento do padrão. As porcentagens de acerto da rede neural foram satisfatórias, obtendo-se uma porcentagem mínima de acerto de 70%, uma porcentagem média de acerto de 82% e uma porcentagem máxima de acerto de 99%.

No âmbito dos métodos paramétricos aplicados à determinação de dimensões fractais, pode-se citar o trabalho de FRANÇA et al. (1991), que propuseram uma técnica fractal para identificação de regimes de escoamento. Foram discutidas algumas medidas de pressão em escoamento bifásico horizontal ar-água. A função densidade de probabilidade e a densidade espectral de potência dos sinais foram calculadas e a técnica fractal também foi usada na tentativa de classificar os vários regimes de escoamento.

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. Assim, por exemplo, SIROVICH (1987), ARGOUL et al. (1989), LIANDRA et al. (1990), ELYGARAY et al. (1992) e FARGE (1992) aplicaram tais métodos no estudo da turbulência. Na área de aplicações em medicina, pode-se citar SENHADJI et al. (1992) – análise de eletrocardiogramas, assim como WOOD & BARRY (1994) – análise e reconstrução de imagens tomográficas. PITTON (2000) aplicou a análise tempo-frequência ao estudo de sinais estocásticos.

No que se refere à mecânica dos fluidos bifásicos, HERVIEU & LEDUCQ (1991) mostraram 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 não-estacionaridade 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) e SELEGHIM & HERVIEU (1998a) otimizaram 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 à covariância tempo-frequência associada à 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 escoamento 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 de escoamento 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, fortemente relacionados à topologia do escoamento, foram transcritos no plano tempo-frequência através da transformada de Gabor. Os resultados

mostraram a habilidade da transformada de Gabor em revelar, não somente aspectos genéricos quanto à 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.

DELPRAT et. al. (1999) mostraram como explorar informações espectrais e espaciais para se obter uma identificação de regimes de escoamento. 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 espectral. Plotando a posição de cada experimento em um espaço tridimensional definido por este conjunto de parâmetros, observou-se que os pontos estavam agrupados em quatro aglomerados, correspondendo a quatro regimes de escoamento investigados. Além disso, as regiões limite desses aglomerados não se sobrepuseram. Isto mostrou que esses parâmetros foram capazes de classificar corretamente os padrões de escoamento bifásico.

Klein (1999) abordou o problema de caracterização dos diferentes regimes de escoamento vertical associados a um fluido bifásico ar-água. Dois tipos de escoamento bifásico vertical gás-líquido foram caracterizados através de sinais de condutividade elétrica 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 implantados algoritmos de aquisição e análise, destinados ao cálculo da transformada de Gabor, associados aos sinais de condutividade fornecidos pela sonda. Os resultados mostraram com clareza como a fenomenologia se traduz no plano tempo-frequência, e a universalidade de aplicação do método de análise.

HERVIEU (2002) analisou simultaneamente a densidade espectral de potência do sinal obtido por um sensor de impedância com vários eletrodos, obtendo uma representação espaço-frequência a qual mostra aspectos particulares dos diferentes regimes de escoamento. Esses aspectos foram caracterizados por um conjunto de três parâmetros escalares, quantificando respectivamente a localização em espaço, em frequência e a forma do conteúdo espectral. A demonstração final dessa caracterização tempo-frequência foi provada pelo uso de uma rede neural com várias camadas, treinada com os parâmetros escalares.

SELLI et al. (2004) desenvolveram um procedimento baseado na aquisição de sinais de pressão flutuante e na sua subsequente decomposição em coeficientes tempo-frequência associados à transformada de Gabor, seguido por sua análise através de um modelo neural previamente treinado. Diferentes regimes de escoamento horizontal gás-líquido foram gerados no circuito experimental do Núcleo de Engenharia Térmica e Fluidos da Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo. Os regimes de escoamento intermitente e estratificado ondulado foram identificados com grande acerto, isto pode ser atribuído a sua assinatura tempo-frequência,

associada com a frequência de intermitência e com a frequência de oscilação da interface de estratificação, respectivamente. Acertos menores foram obtidos para o escoamento anular, provavelmente porque este regime não foi corretamente explorado devido às limitações na máxima vazão de gás fornecida pelo compressor.

## ***CAPÍTULO 4 – METODOLOGIA***

### ***4.1 - Análise de Sinais***

A análise de sinais é o estudo e caracterização das propriedades básicas dos sinais e foi historicamente desenvolvida simultaneamente com a descoberta dos sinais fundamentais da natureza, tais como campo elétrico, onda sonora e corrente elétrica. 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.

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.

### **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. Costuma-se denotar um sinal por  $s(t)$ . Em princípio um sinal pode ter qualquer forma funcional representando sinais reais como, por exemplo, ondas de som e corrente elétrica.

Um sinal variando no tempo é o senoidal, com amplitude ( $a$ ) e frequência ( $\omega_0$ ) constantes:

$$s(t) = a \cdot \sin(\omega_0 t) \quad (4.1)$$

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:

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

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

### **4.1.2 – Densidade de Energia e Energia Total de um Sinal**

A intensidade de um sinal é dada por  $|s(t)|^2$ . Em um pequeno intervalo de tempo  $\Delta t$  consome-se a quantidade  $|s(t)|^2 \Delta t$  de energia para produzir o sinal nesse intervalo de tempo. Dessa forma,  $|s(t)|^2$  é a energia por unidade de tempo, ou a densidade de energia ou ainda a potência instantânea do sinal (COHEN, 1995).

A energia total  $E$  de um sinal é obtida pela integração da densidade de energia sobre todo o tempo:

$$E = \int_{-\infty}^{+\infty} |s(t)|^2 dt \quad (4.3)$$

### **4.1.3 – Caracterização dos Sinais no Tempo: Média, Tempo Médio e Duração de um Sinal**

Considerando  $|s(t)|^2$  como a densidade de energia temporal de um sinal  $s(t)$ , então o tempo médio (ou baricentro)  $\langle t \rangle$  pode ser definido como:

$$\langle t \rangle = \frac{1}{E} \int_{-\infty}^{+\infty} t |s(t)|^2 dt \quad (4.4)$$

As razões para definir um tempo médio são:

- a) pode-se ter uma caracterização aproximada da densidade de energia temporal do sinal;
- b) pode-se ter uma indicação de onde a energia está concentrada.

Muitas medidas podem ser usadas para averiguar o quanto a densidade está concentrada em torno do tempo médio. Dentre elas o desvio padrão  $\sigma_t$  é a medida mais comumente utilizada, e é dada por:

$$\sigma_t^2 = \frac{1}{E} \int_{-\infty}^{+\infty} (t - \langle t \rangle)^2 |s(t)|^2 dt \quad (4.5)$$

O desvio padrão é um indicador da duração do sinal. Se o desvio padrão  $\sigma_t$  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 tem-se um sinal de longa duração. Existem sinais que apresentam desvio padrão infinito, mesmo tendo energia finita. Isso indica que o sinal é muito duradouro.

#### **4.1.4 - Análise Espectral dos Sinais**

A análise 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 frequência de luz que emitem ou absorvem energia (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.

Existem quatro principais razões para utilizar-se a análise frequencial ou análise espectral de um sinal. Primeiro, analisando espectralmente um sinal, pode-se descobrir características de sua fonte.

Segundo, a propagação de ondas através de um meio depende geralmente da frequência. A propagação de um sinal através de um meio é bastante complicada mas o efeito básico é que ondas de diferentes frequências podem propagar-se com diferentes velocidades. Para se estudar a propagação como função da frequência dependente do meio, decompõe-se

o sinal em diferentes componentes espectrais, analisa-se cada componente separadamente e então se reconstrói o sinal para se obter a forma de onda resultante.

A terceira razão para decomposição espectral é que quase sempre simplifica a análise do sinal.

Finalmente, a decomposição ou análise de Fourier é uma poderosa ferramenta matemática 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  $s(t)$  a expansão é da forma:

$$s(t) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{+\infty} S(\omega) e^{j\omega t} d\omega \quad (4.6)$$

O sinal é constituído pela adição (superposição linear) de sinais simples  $e^{j\omega t}$  cada um caracterizado pela frequência  $\omega$  e contribuindo com uma quantidade relativa indicada pelo coeficiente  $S(\omega)$ , que é obtido a partir do sinal através da equação:

$$S(\omega) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{+\infty} s(t) e^{-j\omega t} dt \quad (4.7)$$

$S(\omega)$  é chamado de espectro do sinal  $s(t)$  ou a transformada de Fourier de  $s(t)$ .

Da mesma forma que  $s(t)$ , é freqüentemente vantajoso escrever o espectro  $S(\omega)$ , que normalmente é um número complexo, em coordenadas polares:

$$S(\omega) = B(\omega)e^{j\psi(\omega)} \quad (4.8)$$

Onde  $B(\omega)$  é denominado amplitude e  $\psi(\omega)$  é a fase espectral.

#### **4.1.5 – Densidade Espectral de Energia e Energia Total**

Analogamente ao sinal no domínio do tempo considera-se  $|S(\omega)|^2$  como sendo a densidade de energia por unidade de frequência. Da mesma forma  $|S(\omega)|^2 \Delta\omega$  é a fração de energia no intervalo frequencial  $\Delta\omega$  na frequência  $\omega$ .

A energia total do sinal é dada por:

$$E = \int_{-\infty}^{+\infty} |s(t)|^2 dt = \int_{-\infty}^{+\infty} |S(\omega)|^2 d\omega \quad (4.9)$$

Essa identidade é comumente chamada de Teorema de Parseval ou Teorema de Rayleigh (COHEN, 1995).

#### **4.1.6 - Caracterização dos Sinais na Frequência: Frequência Média, Banda e Média Frequencial**

Se  $|S(\omega)|^2$  representa a densidade espectral de energia, pode-se então calcular a frequência média, usando a mesma motivação do domínio no tempo (equação 4.4). A frequência média  $\langle \omega \rangle$  e seu desvio padrão  $\sigma_\omega$  são dados, respectivamente, por (COHEN, 1995):

$$\langle \omega \rangle = \frac{1}{E} \int_{-\infty}^{+\infty} \omega |S(\omega)|^2 d\omega \quad (4.10)$$

$$\sigma_\omega^2 = \frac{1}{E} \int_{-\infty}^{+\infty} (\omega - \langle \omega \rangle)^2 |S(\omega)|^2 d\omega \quad (4.11)$$

A média de qualquer função espectral  $g(\omega)$  é:

$$\langle g(\omega) \rangle = \frac{1}{E} \int_{-\infty}^{+\infty} g(\omega) |S(\omega)|^2 d\omega \quad (4.12)$$

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

#### **4.1.7 - A Análise Tempo - Frequência**

A análise tempo-frequência originou-se há 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.

O sinal e o seu espectro (domínio da frequência) às vezes não são suficientes sozinhos para descrever a situação física, pois não descrevem inteiramente o que está acontecendo. Em particular, a partir do espectro sabe-se quais frequências estavam presentes no sinal, mas não quando elas existiram. Devido a isso, é importante descrever como o conteúdo espectral variou no tempo. Uma das maneiras de se fazer isso é através de um diagrama tempo-frequência, no padrão mostrado na FIGURA 4.1.

A FIGURA 4.1 representa o sinal proveniente de uma sonda de condutividade elétrica, caracterizando um regime particular de escoamento bifásico gás-líquido horizontal (estratificado ondulado, SELEGHIM et al., 1998). O sinal variando no tempo é mostrado no gráfico abaixo do principal. O gráfico da esquerda (disposto verticalmente) mostra as frequências que ocorreram durante o sinal (vê-se que o espectro está compreendido basicamente entre

3,5 e 6,5Hz). O gráfico principal (maior dentre os três) representa a análise tempo-frequência. Os pontos em preto compreendem as frequências mais marcantes (considerado as principais), como se pode verificar para a frequência de 5Hz; sabe-se assim quando ela atuou.

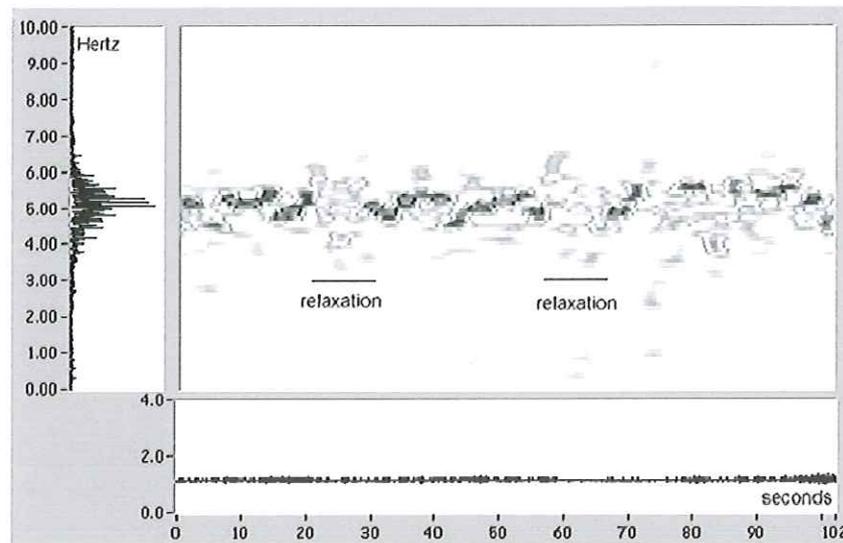


FIGURA 4.1 – Representação tempo-frequência de um sinal caracterizando um regime de escoamento estratificado ondulado em um circuito horizontal gás-líquido (SELEGHIM et al., 1998).

A Figura 4.2, também proveniente de uma sonda de condutividade elétrica, caracteriza o regime de escoamento intermitente. Observa-se que as frequências presentes estão dentro da faixa de 0 a 1,5 Hz, e a frequência de 0,5 Hz esteve presente em quase toda duração do sinal.

Portanto, a diferença entre o espectro e a representação tempo-frequência é que o primeiro permite determinar quais frequências existiram, e

a representação tempo-frequência é uma transformação bidimensional que permite determinar quais frequências existiram em quais períodos de tempo.

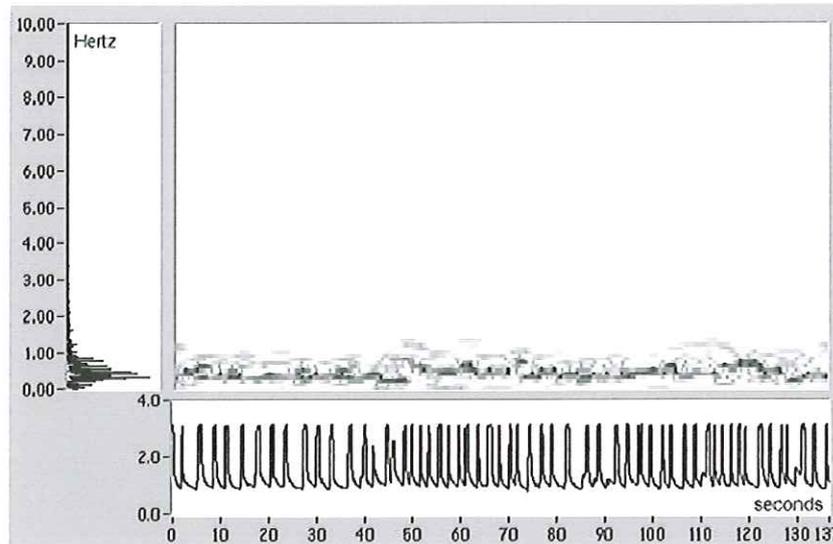


FIGURA 4.2 - Representação tempo-frequência de um sinal caracterizando um regime de escoamento intermitente em um circuito horizontal gás-líquido (SELEGHIM et al., 1998).

#### **4.1.8 – Por que 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.

#### ***4.1.9 - A Transformada de Fourier a Curto Tempo***

A transformada de Fourier a curto tempo 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 final clarinetes. Utilizando a análise de Fourier durante toda a gravação (1 hora), a energia espectral mostra picos nas frequências correspondentes aos violinos e aos clarinetes, ou seja, ela comprova que houve violinos e clarinetes 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 clarinetes. 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 janela de análise for muito estreita, o espectro torna-se sem significado e não mostra nenhuma relação com o espectro total.

#### ***4.1.9.1 - A Transformada de Fourier a Curto Tempo:***

##### ***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 ocorrendo em determinadas faixas de tempo se faz necessário obter a sua representação conjunta tempo-frequência.

O objetivo básico da análise tempo-frequência é descobrir uma função que descreva a densidade de energia de um sinal simultaneamente no tempo e na frequência, e que possa ser usada e manipulada da mesma forma como qualquer densidade. De posse de tal distribuição (ou função), pode-se saber qual a fração de energia existente em uma determinada faixa temporal e frequencial, pode-se calcular a densidade de freqüências em um tempo particular, dentre outros.

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 (COHEN, 1995) :

$$s_t(\tau) = s(\tau)h_\tau(\tau - t) \quad (4.13)$$

O sinal modificado é uma função de dois tempos: o tempo fixado  $t$  (tempo de análise) e o tempo corrente  $\tau$ , onde  $T$  é o tempo de duração da janela. A função janela  $h_\tau(\tau)$  é a função escolhida para levar o sinal de forma inalterada em torno de  $t$  e de forma oculta para os tempos distantes do tempo de análise.

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  $s_t(\tau)$  refletirá a distribuição de frequências em torno daquele tempo (COHEN, 1995):

$$S_t(\omega) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{+\infty} e^{-j\omega\tau} s_t(\tau) d\tau \quad (4.14)$$

$$S_t(\omega) = P(t, \omega) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{+\infty} e^{-j\omega\tau} s(\tau) h(\tau - t) d\tau \quad (4.15)$$

A densidade de energia espectral no tempo  $t$  é então:

$$P_{SP}(t, \omega) = |S_t(\omega)|^2 = \left| \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{+\infty} e^{-j\omega\tau} s(\tau) h(\tau - t) d\tau \right|^2 \quad (4.16)$$

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.

Transformada a curto tempo de Fourier, transformada de Gabor, transformada de Wavelet e distribuição de Wigner-Ville são formas de se construir a função  $P(t, \omega)$ . O que distingue cada forma é a função analisante  $h$

utilizada. A transformada de Gabor (utilizada nesse trabalho para construir o plano tempo-frequência), por exemplo, usa a função gaussiana (distribuição normal) como a função analisante  $h$ .

A eq. (4.15) é chamada transformada a curto tempo de Fourier ou transformada de Gabor caso a função seja gaussiana  $(e^{-at^2})$ .

#### **4.1.10 – A Covariância Tempo-Frequência**

A análise tempo-frequência constitui uma poderosa ferramenta para avaliar a não-estacionaridade de um sinal ou de um processo.

Se um sinal não varia em algum sentido, diz-se que ele é estacionário. Caso contrário, ele é considerado não estacionário. No contexto dos processos determinísticos a estacionaridade é geralmente assumida como um estado em que a composição frequencial é constante em relação ao tempo (FLINDRIN, 1993; HERVIEU & SELEGHIM, 1998). Sinais reais, no entanto, nunca são puramente estacionários, logo uma definição mais realista é avaliar o seu grau de não estacionaridade.

A covariância indica a correlação entre o conteúdo espectral em tempos diferentes. Logo, se a frequência não varia com o tempo, a covariância é nula. Quanto maior o grau de não estacionaridade de um sinal, mais a frequência varia com o tempo e, portanto maior a covariância.

Como já se mencionou, se o sinal analisado é estacionário o conteúdo espectral não varia com o tempo, ou seja, um envelope espectral constante apenas sujeito à modulação em amplitude. Portanto, se tempo e frequência são variáveis independentes, assumi-se que  $P(t,\omega)$  é uma função separável, isto é:

$$P(t,\omega) = F(t).G(\omega) \quad (4.17)$$

Considerando  $\tau$  um instante particular no centro da distribuição tempo-frequência e definindo um apropriado horizonte  $T$  de análise, um tempo central  $\Delta_t(\tau)$ , uma frequência central  $\Delta_\omega(\tau)$  e um momento misto  $\Delta_{t\omega}(\tau)$ , temos:

$$\Delta_t(\tau) = \frac{1}{E(\tau)} \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{\tau-\frac{T}{2}}^{\tau+\frac{T}{2}} t.P(t,\omega) dt d\omega \quad (4.18)$$

$$\Delta_\omega(\tau) = \frac{1}{E(\tau)} \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{\tau-\frac{T}{2}}^{\tau+\frac{T}{2}} \omega.P(t,\omega) dt d\omega \quad (4.19)$$

$$\Delta_{t\omega}(\tau) = \frac{1}{E(\tau)} \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{\tau-\frac{T}{2}}^{\tau+\frac{T}{2}} \omega t.P(t,\omega) dt d\omega \quad (4.20)$$

Onde  $\Sigma(\tau)$  é um intervalo de deslizamento centralizado em  $\tau$  com  $T$  de duração e,  $E(\tau)$  é a energia total de  $\Sigma(\tau)$ , definidos por:

$$\Sigma(\tau) = \left[ \tau - \frac{T}{2}, \tau + \frac{T}{2} \right] \quad (4.21)$$

$$E(\tau) = \iint_{\Sigma(\tau)} P(t, \omega) dt d\omega \quad (4.22)$$

Se o sinal for independente do tempo e da frequência, é razoável assumir que a média temporal e a média frequencial não estão relacionadas, sob essa suposição podemos esperar que:

$$\Delta_{\omega t}(\tau) = \Delta_{\omega}(\tau) \Delta_t(\tau) \quad (4.23)$$

É por esse motivo que o excesso de  $\Delta_{\omega t}(\tau)$  sobre  $\Delta_{\omega}(\tau) \Delta_t(\tau)$  é uma boa indicação de quanto o tempo está correlacionado com a frequência. Logo, a covariância tempo-frequência é definida como (SELEGHIM & HERVIEU, 1998a):

$$\text{cov}_{\omega t} = \Delta_{\omega t}(\tau) - \Delta_{\omega}(\tau) \Delta_t(\tau) \quad (4.24)$$

Vamos provar que para a função  $P(t, \omega)$  da eq.(4.17) a covariância é nula, partindo da eq.(4.24) e utilizando as eqs.(4.18), (4.19), (4.20) e (4.22).

$$\text{cov}_{\omega t} = \left| \Delta_{\omega t}(\tau) - \Delta_{\omega}(\tau) \Delta_t(\tau) \right|$$

$$\text{cov}_{\omega t} = \left| \frac{1}{E(\tau)} \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{\tau-\frac{T}{2}}^{\tau+\frac{T}{2}} t \omega P(t, \omega) dt d\omega - \frac{1}{E(\tau)} \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{\tau-\frac{T}{2}}^{\tau+\frac{T}{2}} \omega P(t, \omega) dt d\omega \cdot \frac{1}{E(\tau)} \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{\tau-\frac{T}{2}}^{\tau+\frac{T}{2}} t P(t, \omega) dt d\omega \right|$$

$$\text{cov}_{\omega t} = \left| \frac{1}{E(\tau)} \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{\tau-\frac{T}{2}}^{\tau+\frac{T}{2}} t \omega F(t) G(\omega) dt d\omega - \frac{1}{E(\tau)} \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{\tau-\frac{T}{2}}^{\tau+\frac{T}{2}} \omega F(t) G(\omega) dt d\omega \cdot \frac{1}{E(\tau)} \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{\tau-\frac{T}{2}}^{\tau+\frac{T}{2}} t F(t) G(\omega) dt d\omega \right|$$

$$\text{cov}_{\omega t} = \left| \frac{1}{E(\tau)} \int_{-\infty}^{+\infty} \omega G(\omega) \left[ \int_{\tau-\frac{T}{2}}^{\tau+\frac{T}{2}} t F(t) dt \right] d\omega - \frac{1}{E(\tau)} \int_{-\infty}^{+\infty} \omega G(\omega) \left[ \int_{\tau-\frac{T}{2}}^{\tau+\frac{T}{2}} F(t) dt \right] d\omega \cdot \frac{1}{E(\tau)} \int_{-\infty}^{+\infty} G(\omega) \left[ \int_{\tau-\frac{T}{2}}^{\tau+\frac{T}{2}} t F(t) dt \right] d\omega \right|$$

Sendo:

$$\int_{\tau-\frac{T}{2}}^{\tau+\frac{T}{2}} t F(t) dt = K_1 \quad (4.25)$$

$$\int_{\tau-\frac{T}{2}}^{\tau+\frac{T}{2}} F(t) dt = K_2 \quad (4.26)$$

Obtém-se:

$$\text{cov}_{\omega t} = \left| \frac{1}{E(\tau)} \int_{-\infty}^{+\infty} \omega G(\omega) K_1 d\omega - \frac{1}{E(\tau)} \int_{-\infty}^{+\infty} \omega G(\omega) K_2 d\omega \cdot \frac{1}{E(\tau)} \int_{-\infty}^{+\infty} G(\omega) K_1 d\omega \right|$$

$$\text{cov}_{\omega t} = \left| \frac{1}{E(\tau)} K_1 \int_{-\infty}^{+\infty} \omega G(\omega) d\omega - \frac{1}{E(\tau)} K_2 \int_{-\infty}^{+\infty} \omega G(\omega) d\omega \cdot \frac{1}{E(\tau)} K_1 \int_{-\infty}^{+\infty} G(\omega) d\omega \right|$$

Pela definição de  $E(\tau)$ , eq.(4.22), tem-se:

$$E(\tau) = \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{\tau-\frac{T}{2}}^{\tau+\frac{T}{2}} P(t, \omega) dt d\omega$$

$$E(\tau) = \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{\tau-\frac{T}{2}}^{\tau+\frac{T}{2}} F(t) G(\omega) dt d\omega = \int_{-\infty}^{+\infty} G(\omega) \left[ \int_{\tau-\frac{T}{2}}^{\tau+\frac{T}{2}} F(t) dt \right] d\omega = \int_{-\infty}^{+\infty} G(\omega) K_2 d\omega = k_2 \int_{-\infty}^{+\infty} G(\omega) d\omega$$

Assim:

$$\text{cov}_{\omega t} = \left| \frac{1}{E(\tau)} K_1 \int_{-\infty}^{+\infty} \omega G(\omega) d\omega - \frac{1}{E(\tau)} K_2 \int_{-\infty}^{+\infty} \omega G(\omega) d\omega \cdot \frac{1}{k_2 \int_{-\infty}^{+\infty} G(\omega) d\omega} \cdot K_1 \int_{-\infty}^{+\infty} G(\omega) d\omega \right|$$

$$\text{cov}_{\omega t} = \left| \frac{1}{E(\tau)} K_1 \int_{-\infty}^{+\infty} \omega G(\omega) d\omega - \frac{1}{E(\tau)} K_1 \int_{-\infty}^{+\infty} \omega G(\omega) d\omega \right|$$

Portanto,

$$\text{cov}_{\omega t} = 0$$

## **4.2 - Instalações Experimentais**

### **4.2.1 - Descrição do Circuito Horizontal**

A busca de transições dentro da região de escoamento intermitente foi feita experimentalmente através de extensivos testes experimentais realizados no circuito TALC, do Commissariat à l'Energie Atomique em Grenoble-França.

O circuito é basicamente composto de sistema de alimentação de água e ar, um misturador, uma seção de ensaios horizontal e um separador, conforme indicado na FIGURA 4.3. A seção de ensaios é construída em acrílico e suas dimensões são de 60mm de diâmetro interno e 30m de comprimento.

A instrumentação de controle do circuito inclui transdutores de pressão e temperatura, bancos de medidores de vazão do tipo turbina e eletromagnético, respectivamente para medidas das vazões de ar e água. Dois sistemas de regulação baseado na lógica PID asseguram a possibilidade de se impor, a priori e de forma independente, as variações temporais de vazão a serem executadas durante o ensaio. É importante ressaltar que uma escolha cuidadosa dos parâmetros de PID é fundamental para o desempenho do circuito, tanto nos ensaios transientes como na operação de estado estacionário. Isto está relacionado ao fato de que o comportamento dinâmico do circuito bifásico depende do escoamento padrão que pode mudar abruptamente e inteiramente durante um teste transiente.

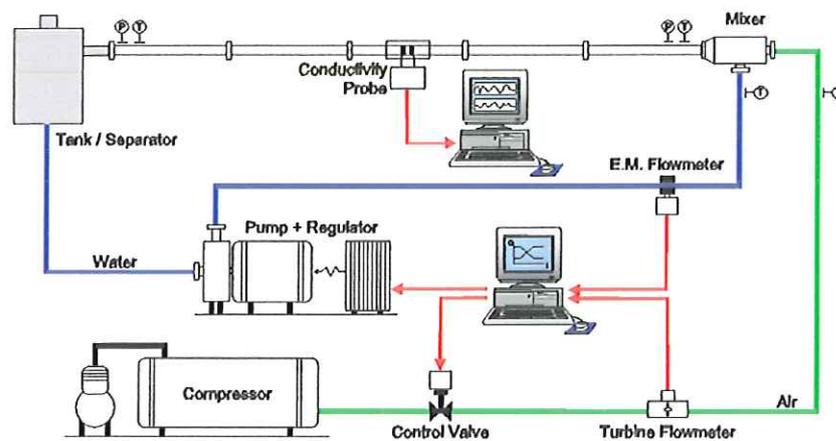


FIGURA 4.3 - Circuito experimental, segundo Selegim e Hervieu, (1998): (1) seção de ensaios, (2) separador, (3) bomba hidráulica, (4) variador de frequência, (5) compressor, (6) servo-válvula, (7) medidor de vazão eletromagnético, (8) medidor de vazão, (9) piloto do circuito, (10) sistema de aquisição de sinais, (11) sonda condutiva, (12) misturador.

#### 4.2.2 - A Sonda de Medidas de Condutividade

Neste trabalho, optou-se 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 parietais respectivamente utilizados para excitação e medição. A característica fundamental dos eletrodos anelares

reportada por esses autores é uma forte correlação entre impedância global e o regime de escoamento.

Simulações numéricas mostraram que isso pode se atribuído a grandes variações na distribuição azimutal de corrente no anel de medição conforme o regime de escoamento multifásico no interior do volume de sensibilidade. Em consequência, uma partição deste último para fins de visualização pôde ser obtida por intermédio de uma segmentação do anel de medida, conforme indicado na FIGURA 4.4b.

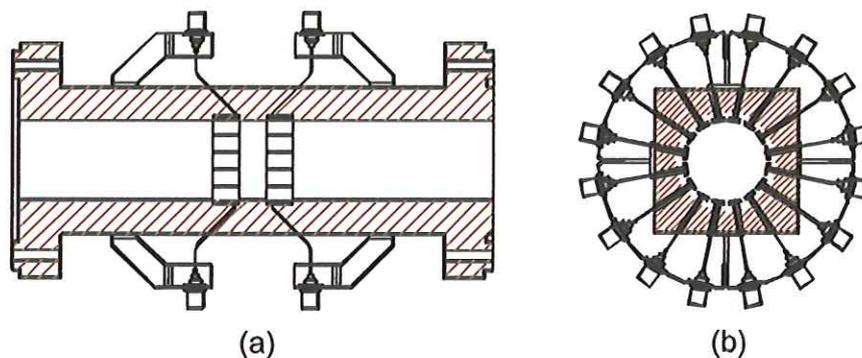


FIGURA 4.4 - Sonda de medidas de condutividade elétrica (a) e eletrodos da sonda de medidas de condutividade (b).

Este sistema de medida é capaz de produzir imagens qualitativas do escoamento traçando a corrente elétrica de cada eletrodo em função do tempo (escala horizontal) e de sua posição angular (escala vertical), como se pode observar nas FIGURAS 4.5a e 4.5b. Estas imagens são muito ricas não somente quanto a grandes estruturas bifásicas, mas também em detalhes relativamente finos da geometria das fases. Isto está ilustrado na FIGURA 4.5 pelos escoamentos anular e intermitente, na qual a corrente elétrica está

codificada em níveis de cor, com branco correspondendo a zero (fração de vazio igual a um) e preto correspondendo ao valor máximo (fração de vazio igual a zero). Na FIGURA 4.5a, escoamento anular, é possível observar o filme líquido escoando na região parietal do tubo com uma espessura maior na porção inferior da tubulação (região central da imagem). Possível também observar a passagem regular de ondas. No escoamento intermitente ilustrado na FIGURA 4.5b, além dos bolsões de ar característicos de escoamentos intermitentes, pode-se observar detalhes quanto à estrutura bicôncava da parte posterior.

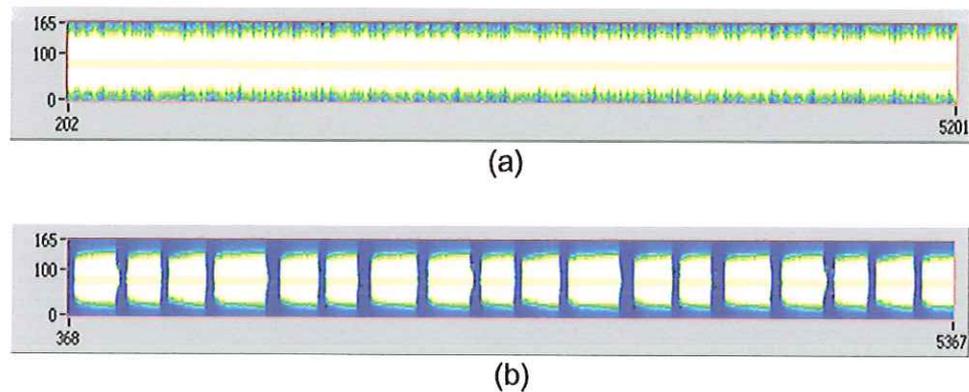


FIGURA 4.5 – Imagens qualitativas de escoamentos anular (a) e intermitente (b).

### 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.

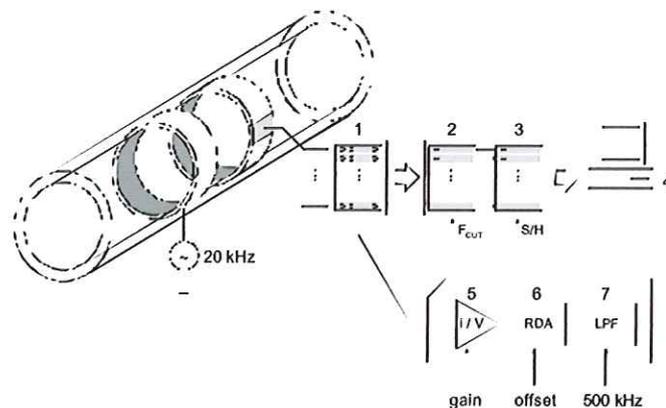


FIGURA 4.6 – Sistema de aquisição: (1) transdutores corrente/voltagem, (2) filtros (anti-aliasing), (3) circuito *sample and hold*, (4) microcomputador com placa de aquisição, (5) conversor de corrente para voltagem com controle de ganho, (6) retificador com controle offset, (7) filtro Butterworth passa baixo de quarta ordem com frequência de corte de 500Hz.

## **CAPÍTULO 5 - RESULTADOS**

### **5.1 - Programa Experimental**

Primeiramente, para cada grande família de escoamentos bifásicos horizontais, uma série extensiva de testes de longa duração foi realizada no circuito experimental descrito anteriormente. Os sinais analisados correspondem à soma da corrente elétrica de cada um dos eletrodos da sonda de visualização direta, cujo princípio de funcionamento encontra-se esquematizado na FIGURA 4.4. Assim para cada teste, estes sinais foram filtrados (anti-aliasing) e amostrados a taxas de 100Hz. Denotando-se  $Q_l$  e  $Q_g$  as vazões líquida e gasosa respectivamente (nas CNPT), os testes apresentam as vazões máximas e mínimas em torno de:  $Q_{l \text{ mínima}} = 0.5\text{m}^3/\text{h}$ ,  $Q_{l \text{ máxima}} = 50\text{m}^3/\text{h}$ ,  $Q_{g \text{ mínima}} = 6\text{m}^3/\text{h}$  e  $Q_{g \text{ máxima}} = 250\text{m}^3/\text{h}$ . Estes valores juntamente com os ensaios estão na região destacada em cinza do mapa de escoamento de Taitel e Dukler da FIGURA 5.1 (TAITEL & DUKLER, 1976).

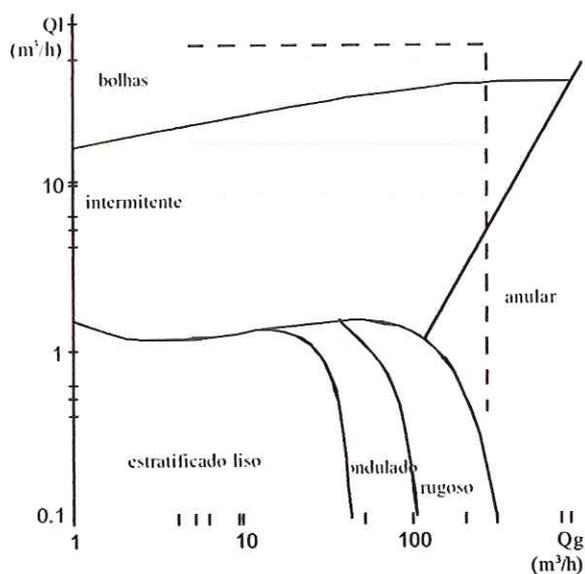


FIGURA 5.1- Mapa de escoamento de Taitel e Dukler (1976) com indicação da zona de testes na região destacada em cinza (vazões expressas nas CNPT).

Através da transformada de Gabor obtive-se o desvio padrão de cada teste, definido pela eq.(5.1).

$$\sigma^2(\tau) = \frac{1}{E} \int_{-\infty}^{+\infty} (\omega - \mu)^2 P_{SP}(t, \omega) d\omega \tag{5.1}$$

Onde:

$$\mu(\tau) = \frac{1}{E} \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} \omega P_{SP}(t, \omega) dt d\omega \tag{5.2}$$

$$P_{SP}(t, \omega) = |S_t(\omega)|^2 = \left| \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{+\infty} e^{-j\omega\tau} s(\tau)h(\tau-t)d\tau \right|^2 \quad (5.3)$$

E, juntamente, com as respectivas vazões líquida e gasosa plotou-se o seguinte gráfico (FIGURA 5.2), onde se pode observar duas cristas bastante acentuadas (indicadas na FIGURA 5.2).

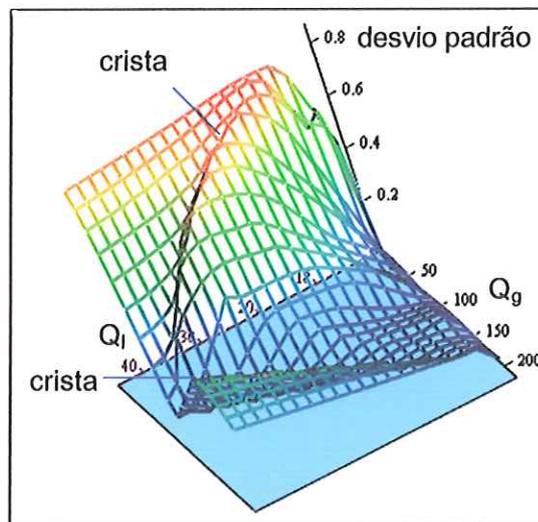


FIGURA 5.2 – Gráfico do desvio padrão de cada teste em função das vazões líquida e gasosa.

Identificando os pontos dessa “crista” no mapa de escoamento de Taitel e Dukler, obtém-se uma grande semelhança entre este modelo teórico e o resultado dos ensaios na região do escoamento intermitente e da transição do escoamento a bolhas para o intermitente. Essa semelhança pode ser observada nas linhas pontilhadas da FIGURA 5.3.

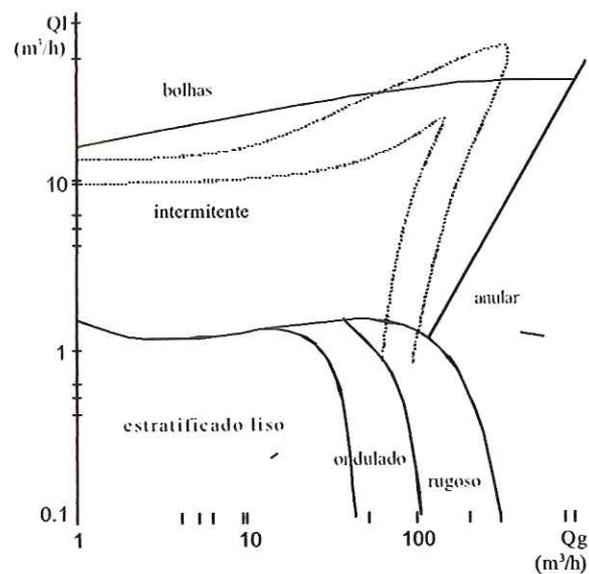


FIGURA 5.3 - Mapa de escoamento bifásico de Taitel e Dukler (1976) com as "cristas" do desvio padrão nas linhas pontilhadas (vazões expressas nas CNTP).

Diante da identificação dos regimes de escoamento dos sinais analisados através do desvio padrão da transformada de Gabor, partimos para o objetivo principal que é revelar a existência de uma transição dentro da região onde ocorre o regime de escoamento intermitente. Os testes relativos aos escoamentos intermitentes foram analisados e uma possível transição foi detectada em uma determinada região. Os exatos valores de cada teste são dados na TABELA 5.1.

TABELA 5.1- Condições dos testes relativos ao regime intermitente.

Testes experimentais	$Q_g$ (m <sup>3</sup> /h)	$Q_l$ (m <sup>3</sup> /h)
Teste 1	14.5	5.02
Teste 2	16.2	6.00
Teste 3	16.2	7.04
Teste 4	16.7	6.97
Teste 5	18.4	5.95
Teste 6	20.0	4.94
Teste 7	23.6	3.99
Teste 8	24.8	5.04

## 5.2 - Análise dos Resultados

Os escoamentos intermitentes que correspondem aos testes apresentados na TABELA 5.1 podem ser visualizados plotando-se a corrente elétrica de cada eletrodo em função do tempo (escala horizontal) e de sua posição angular (escala vertical). Isto é feito na FIGURA 5.4, na qual níveis de cores indicam a intensidade de corrente elétrica (branco correspondendo ao ar e azul escuro correspondendo à água).

O regime de escoamento intermitente caracteriza-se pela passagem de bolsões de ar (também chamados “pistões”) separados por um filme líquido que pode ser mais ou menos aerado, dependendo da velocidade da estrutura. Por conseguinte, o sinal de condutividade oscila de um patamar mais alto, associado à presença de líquido, a um patamar inferior, associado à passagem de um bolsão de ar, ou seja, oscila entre dois níveis característicos

com uma periodicidade média que reflete a frequência de intermitência do escoamento.



FIGURA 5.4 – Imagem direta dos regimes de escoamento dos testes apresentados na TABELA 5.1 (branco corresponde ao ar e azul escuro a água).

As imagens das FIGURAS 5.4a e 5.4g (testes 1 e 7, respectivamente) apresentam escoamento intermitente altamente estacionário, com filme líquido não aerado, para o qual a frequência de intermitência é particularmente estável. Opondo-se a isto, a FIGURA 5.4b (teste 2) mostra uma situação em que alguns bolsões de ar estão mais próximos e outros mais espaçados (efeito sanfona). Em consequência disto, a estabilidade do escoamento diminui e a frequência de intermitência oscila, indicando uma possível transição de regime. Este comportamento instável é também observado nas FIGURAS 5.4c e 5.4d (testes 3 e 4). Nos testes subsequentes à distância entre os bolsões de ar é aproximadamente constante, exceto para a FIGURA 5.4h (teste 8) para o qual uma seqüência de pequenas bolhas é seguida por grandes bolhas alongadas com a cauda biconvexa, indicando possivelmente uma nova transição de regime.

A oscilação da frequência de intermitência pode ser melhor visualizada com a ajuda de uma distribuição tempo-frequência, como a transformada de Gabor, e a correspondente covariância tempo-frequência. Como dito anteriormente, a covariância tempo-frequência reflete o grau de estacionaridade do sinal e constitui um indicador da transição do regime de escoamento (HERVIEU & SELEGHIM, 1998). Assim, as transições de escoamento são caracterizadas pelos altos valores da covariância comparados com os correspondentes valores obtidos enquanto escoamento estabilizado. A FIGURA 5.5 mostra a covariância tempo-frequência da

transformada de Gabor de cada sinal correspondente aos testes de 1 a 8, definidos na TABELA 5.1.

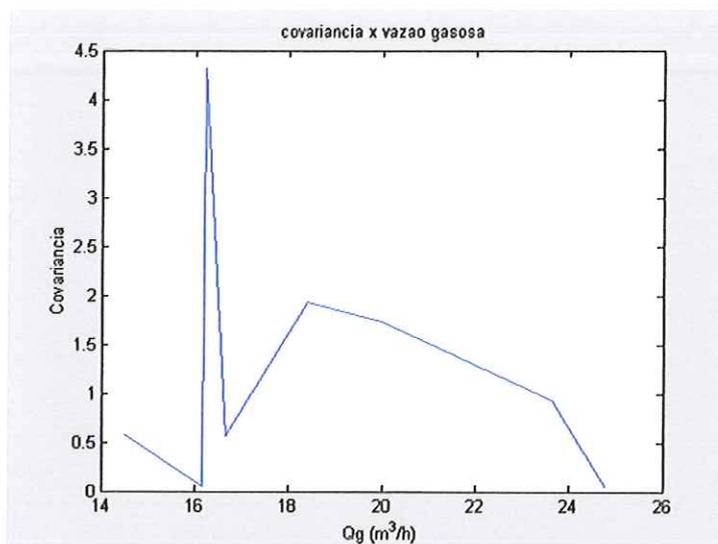


FIGURA 5.5 - Covariância tempo-frequência calculada através da transformada de Gabor de cada sinal correspondente aos testes de 1 a 8.

Pode-se observar que o teste 3 (FIGURA 5.4c) é menos estacionário e corresponde a uma transição entre dois tipos de escoamento intermitente. O alto nível de não-estacionaridade deste teste reflete a forte oscilação de sua frequência de intermitência, o que está relacionado ao efeito sanfona.

A FIGURA 5.6 mostra a transformada de Gabor do sinal de condutividade relativo ao teste 3 da TABELA 5.1. 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, onde as regiões mais escuras do gráfico apresentam maior densidade de energia, isto é, quanto

mais escuro mais forte é a densidade de energia. Pode-se observar que a frequência de intermitência oscila entre valores extremos de aproximadamente 0.4Hz e 0.9Hz, com uma frequência central predominante de cerca de 0.5Hz.

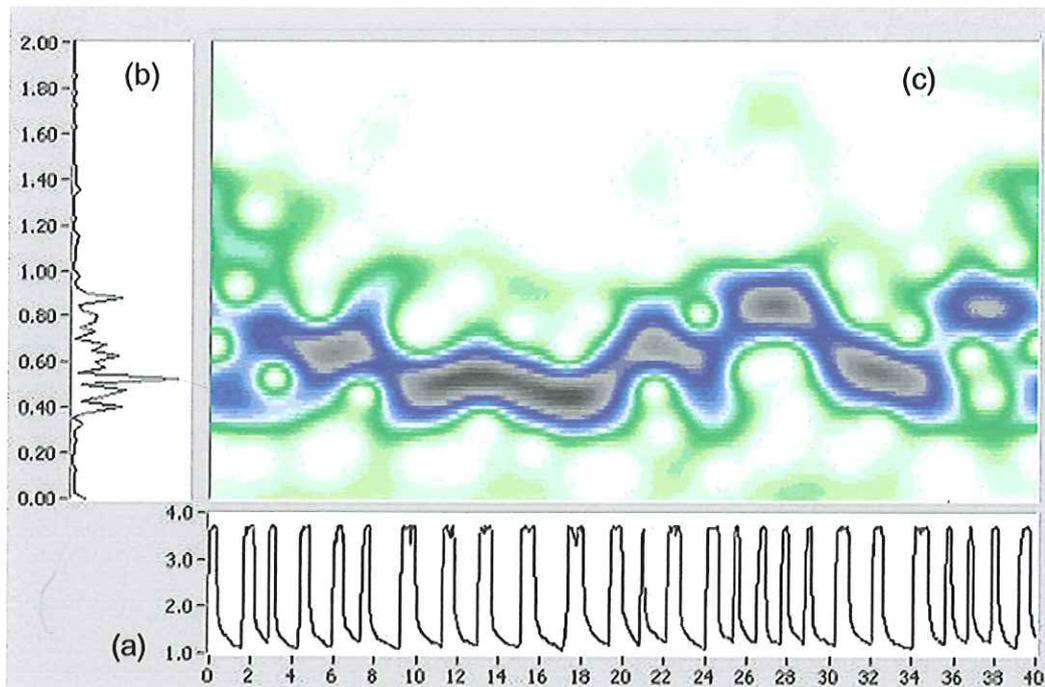


FIGURA 5.6 – Transformada de Gabor do sinal de condutividade do teste 3 (FIGURA 5.4c) – o gráfico (c), diagrama central, é a amplitude da transformada de gabor codificada em níveis de cor (preto- maior intensidade de energia), o gráfico (a), abaixo do diagrama principal, é o sinal de condutividade em função do tempo e o gráfico (b), à esquerda do diagrama principal, é a transformada de Fourier plotada em função da análise espectral.

## ***CAPÍTULO 6 – CONCLUSÕES E SUGESTÕES***

Neste trabalho investigou-se a existência de sub-regimes dentro da região de escoamento gás-líquido intermitente em um tubo horizontal. Isto foi feito com o auxílio da covariância tempo-frequência da transformada de Gabor que avalia o grau de não-estacionaridade de um sinal e constitui um indicador da transição de regime de escoamento (SELEGHIM & HERVIEU, 1998a). Testes experimentais foram conduzidos no circuito TALC, do Commissariat à l’Energie Atomique, em Grenoble, França, para escoamentos bifásicos horizontais. Uma sonda de condutividade elétrica produziu os sinais que foram transcritos no plano tempo-frequência através da transformada de Gabor.

Os resultados mostram o grande potencial da análise tempo-frequência não somente na caracterização dos regimes de escoamento, mas também na caracterização das transições desses regimes.

A covariância tempo-frequência da transformada de Gabor dos sinais indica que um aumento do grau de não-estacionaridade está associado ao “efeito sanfona”, isto é, a passagem alternada de grupos de bolsões de ar mais próximos e mais espaçados. A análise da correspondente transformada de Gabor mostra que este efeito é caracterizado por uma forte oscilação da

frequência de intermitência e indica que, possivelmente, o regime de escoamento está transitando entre dois tipos de escoamento intermitente.

Estes e outros aspectos inferidos do resultado sugerem novos estudos a serem realizados no sentido de uma investigação mais extensiva da própria região de escoamento intermitente, bem como a busca de sub-regimes dentro da região dos demais regimes de escoamento gás-líquido horizontal.

## **REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS**

ARGOUL, F.; ARNÉODO, A.; GRASSEAU, G.; GAGNE, Y.; HOPFINGER, E.; FRISCH, U. (1989). Wavelet analysis of turbulence data reveals the multifractal nature of the Richardson cascade. *Nature*, v. 338, p. 51-53.

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: na illustration from the monitoring of multiphase flow. In: IEE CONFERENCE PUBLICATION 3RD INTERNATIONAL CONFERENCE ON ARTIFICIAL NEURAL NETWORKS, n. 372, p. 41-46.

BRIGHAM, E. ORAN (1988). *FFT: the fast Fourier transform and its applications*. New Jersey, Prentice Hall.

BRILL, J. P. (1992). State of the art in multiphase flow. *Journal of Petroleum Technology*, v. 44, n. 5, p. 538-541.

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.

COHEN, L. (1995). *Time-frequency analysis*. New Jersey, Prentice Hall.

COLLIER, J. G. (1981). *Convective boiling and condensation*. 2.ed. England, McGraw - Hill Book Company.

CRIVELARO, K.C.O.; SELEGHIM P. JR.; HERVIEU, E. (2002). Detection of horizontal two-phase flow patterns through a neural network model. *Journal of Brazilian Society of Mechanical Sciences*, v. 24, n. 1, p. 70-75.

- DANIELS, L. (1995). Dealing with two-phase flows. *Chemical Engineering*, v. 102, p. 70-78.
- DELPRAT, N.; DIASPARRA, B.; HERVIEU, E. (1999). Identification des régimes d'une représentation spatio-fréquentielle. *Comptes Rendus de L'Académie 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.
- ELYGARAY, J.; BERKOZ, G.; HOLMES, P. (1992). Wavelet analysis of motion of coherent structures. *Proceedings of the International Conference on "Wavelets and Applications"*, p. 471-476.
- FARGE, M. (1992). The continuous wavelet transform of two-dimensional turbulent flows. *Wavelets and Applications*, p. 275-302. Jones and Bartlett Publishers – Boston, M.B. Ruskai et al. eds.

- FLINDRIN, P. (1993). *Temps – Fréquence*. Hermès, Paris.
- FRANÇA, F.; ACIKGOZ, M.; LAHEY, R.T.JR.; CLAUSSE, A. (1991). The use of fractal techniques for flow regime identification. *International Journal on Multiphase Flow*, v. 17, n. 4, p. 545-552.
- GRUBERT, J. P. (1995). Application of neural networks in stratified flow stability analysis. *Journal of Hydraulic Engineering*, v. 121i7, p. 523-532.
- 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. In: SECOND INTERNATIONAL CONFERENCE ON MULTIPHASE FLOW, ICMF'95, FT1-25, v. 3.
- HERVIEU, E.; SELEGHIM, P. Jr. (1998). An objective indicator for two-phase flow pattern transition. In: THIRD INTERNATIONAL CONFERENCE ON MULTIPHASE FLOW, ICMF'98, v. CD-ROM, p. 1-7.

- HERVIEU, E. (2001). Identification of gas-liquid flow regimes from a spsce-frequency representation by use neural networks. In: FOURTH INTERNATIONAL CONFERENCE ON MULTIPHASE FLOW, ICMF'01, v. cd-rom, p. 1-12. New Orleans, Lousiana.
- HSIEH, C.C.; WANG, S. B.; PAN, C. (1997). Dynamic visualization of two-phase flow patterns in a natural circulation loop. *Int. J. Multiphase Flow*, v. 23, n. 6, p. 1147-1170.
- 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. 11<sup>TH</sup> NATIONAL ASME/AICHE HEAT TRANSFER CONFERENCE, p. 58-69. Agosto, 1969. Minneapolis, Minnesota.
- HUBBARD, M.G.; DUKLER, A.E. (1966). The characterization of flow regimes for horizontal two-phase flow. *Proc. Heat Transfer and Fluid Mach.* Institute. Stanford University Press – M.A. Saad & J.A. Moller eds.

- KLEIN, F.L. (1999). *Caracterização tempo-frequência de regimes de escoamento bifásico*. São Carlos. Dissertação (Mestrado) - Escola de Engenharia de São Carlos - Universidade de São Paulo. 1999.
- LIANDRA, J.; MORET-BAILLY, F. (1990). The wavelet transform: some applications to fluid dynamics and turbulence. *European Journal of Mechanics B: Fluids*, v. 9, n. 1, p. 1-19.
- 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 flow 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*, p. 1-14. New York.
- MI, Y.; ISHII, M.; TSOUKALAS, L.H. (2001). Flow regimes identification methodology with neural networks and two-phase flow models. *Nuclear Engineering and Design*, n. 204, p. 87-100.

- 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. In: THIRD INTERNATIONAL CONFERENCE ON MULTIPHASE FLOW, ICMF'98, v. cd-rom, p. 1-8.
- 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. 1989.
- 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.
- PITTON, J.W. (2000). The statistics of time-frequência analysis. *Journal of the Franklin Institute*, p. 379-388.

- REINECKE, N.; MEWES, D. (1996). Recent developments and industrial/research applications of capacitance tomography. *Measurement Science and Technology*, v. 7, p. 233-246.
- 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, P. Jr. (1996). *Caractérisation des changements de configuration d'un écoulement diphasique horizontal par l'application de méthodes d'analyse temps-fréquence*. Grenoble. 301p. Tese (Doutorado) – De L'Institut National Polytechnique de Grenoble. 1996.
- SELEGHIM, P. Jr.; HERVIEU, E.; SANTOS, A. M. (1998). Time frequency characterization of two-phase horizontal air-water flow regimes. *Journal of Brazilian Society of Mechanical Sciences*, v. 20, n .1, p. 39-50.

- SELEGHIM, P. Jr.; HERVIEU, E. (1998a). An objective indicator for two-phase flow pattern transition. *Nuclear Engineering and Design*, v. 184, p. 421-435.
- SELEGHIM, P. Jr.; HERVIEU, E. (1998b). Direct imagin of horizontal gas-liquid flows. *Measurement Science & Technology*, v. 9, n. 8, p.1492-1500.
- SELEGHIM, P. JR. (2002). *Criação de uma linha de pesquisa em instrumentação e controle de escoamentos multifásicos industriais*. 130p. Tese (Livre-docência) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos. 2002.
- SELLI, M.F. (2004). On-line identification of horizontal two-phase flow regimes through gabor transform and neural network processing. In: 10<sup>th</sup> BRAZILIAN CONGRESS OF THERMAL ENGINEERING AND SCIENCES, 9., Rio de Janeiro, 2004. Aceito.
- SENHADJI, L.; CARRAULT, G.; BELLANGER, J.J. (1992). Détection et cartographie multiéchelles en EEG., Wavelet analysis of motion of coherent structures. *Proceedings of the International Conference on "Wavelets and Applications"*, p. 609-614. Toulouse – France, Y. Meyer & S. Roques eds.

- SIROVICH, L. (1987). Turbulence and the dynamics of coherent structures. Part III: dynamics and scaling. *Quarterly of Applied Mathematics*, v. XLV, n. 3, p. 583-590.
- 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, anais, p. 174-180. Buxton.
- 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.
- 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.

WANG, M. J.; LU, Z. Q.; FENG, J. K. (1991). Statistical identification of flow pattern and the transition for horizontal two-phase flow. In: BURNS, A.P., ed. *Multiphase production*, p.342-352. London, Elsevier Applied Sciena.

YAMASHITA, Y. (1997). Time delay neural networks for the classification of flow regimes. *Computers & Chemical Engineering*, v. 21, p. 367-371.

WOOD, J.C.; BARRY, D.T. (1994). Linear signal synthesis using the Radon-Wigner transform. *IEEE Transactions on Signal Processing*, v. 42, n. 8, p. 2105-2111.