

## CARACTERIZAÇÃO TEMPO-FREQUÊNCIA DE UM ESCOAMENTO VERTICAL GÁS-LÍQUIDO

### **Fabiana Lopes Klein**

Universidade de São Paulo, Escola de Engenharia de São Carlos, Núcleo de Engenharia Térmica & Fluidos, Av. Dr. Carlos Botelho, 1465, CEP: 13560-250, e-mail: klein@sc.usp.br - São Carlos, SP, Brasil

### **Paulo Seleglim Junior**

Universidade de São Paulo, Escola de Engenharia de São Carlos, Núcleo de Engenharia Térmica & Fluidos, Av. Dr. Carlos Botelho, 1465, CEP: 13560-250 - São Carlos, SP, Brasil

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

**Palavras chave:** *Escoamento multifásico, Regimes, Caracterização, Tempo-frequência*

## 1. INTRODUÇÃO

Um escoamento multifásico pode ocorrer segundo diversas organizações topológicas chamadas regimes ou configurações de escoamento. Por exemplo, as duas fases de uma

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

Do ponto de vista das aplicações industriais, a segurança e a longevidade de equipamentos e instalações somente podem ser asseguradas quando estes operam segundo os regimes de escoamento para os quais foram dimensionados. Isso implica não apenas na capacidade de antecipá-los durante a fase de projeto, mas também, durante a fase de operação, de diagnosticar em tempo real sob qual configuração o fluido está escoando; assim como as possíveis transições entre elas. Isso torna possível retroagir no processo de forma a assegurar um funcionamento otimizado tanto do ponto de vista da segurança quanto da eficiência operacional.

O desenvolvimento de técnicas de instrumentação específicas para escoamentos multifásicos teve um grande impulso a partir de meados dos anos setenta quando Estados Unidos, França e Japão passaram a investir maciçamente na geração termonuclear de energia.

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 nesta linha tenha sido o de Hubbard & Dukler (1966), cujo objetivo foi a caracterização de diversos regimes de escoamento baseando-se na análise espectral de sinais de pressão. Podemos citar igualmente, os trabalhos de Vince & Lahey (1982), Matsui (1984), Mishima & Ishii (1984), Sekoguchi et al. (1987), Barnea et al. (1980) e muitos outros. Um trabalho de revisão bibliográfica bastante detalhado sobre esse tema, e em particular sobre os métodos de diagnóstico em escoamentos gás-líquido, pode ser encontrado no artigo de Drahos & Cermak (1989).

Porém, se essa metodologia permite caracterizar as configurações de escoamento, a identificação das fronteiras entre eles carece de objetividade, Vince & Lahey (1982). Várias tentativas foram feitas no sentido de preencher esta lacuna. No âmbito dos métodos paramétricos aplicados à determinação de dimensões fractais, podemos citar o trabalho de França et al. (1991). Recentemente Soldati et al. (1996) propuseram a utilização da análise difusional como método adequado à identificação de regimes de escoamento bifásico. Troniewski & Ulbrich (1984) fizeram um grande esforço para testar mapas de regimes de escoamento genéricos utilizando o básico da literatura existente. O objetivo desta análise é a transformação dos mapas de regimes de escoamento da literatura para um sistema de coordenadas escolhido chamado mapa base.

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

No que se refere mais particularmente à mecânica dos escoamentos bifásicos, Hervieu & Leducq (1991) demonstraram a potencialidade da transformada wavelet em termos da caracterização de diferentes configurações de escoamento vertical. Posteriormente, foi proposto um critério objetivo para a transição disperso-intermitente em escoamento vertical, baseado na quantificação do grau de estacionaridade através do desvio padrão da frequência instantânea de Ville, Seleglim & Hervieu (1994). Esta abordagem permitiu otimizações subsequentes no sentido de tornar o critério universal, isto é, independente da transição ou grandeza física estudada. O critério proposto para a transição de regime foi a covariância

tempo-frequência associada a transformada de Gabor, como novo indicador de transição de regime de escoamento. Este foi validado em um circuito experimental onde todas as transições de configuração de escoamento horizontal foram detectadas, Hervieu & Selegim (1998).

Neste trabalho, abordaremos o problema de caracterização dos diferentes regimes de escoamento vertical associados a um escoamento bifásico ar-água. Mais especificamente, pretendemos aplicar métodos de análise conjunta tempo-frequência à sinais obtidos de uma sonda de condutividade elétrica, com o intuito de evidenciar a organização topológica das fases constituintes em escoamento.

Apresentaremos na seção seguinte, os princípios e relações básicas da análise tempo-frequência. Em seguida, descreveremos o aparato experimental (circuito de testes vertical e sonda condutiva) e apresentaremos os resultados.

## 2. ANÁLISE TEMPO-FREQUÊNCIA

A análise de sinais no domínio da frequência baseada apenas nas transformadas de Fourier nem sempre consegue descrever completamente o processo estudado, pois estas mostram 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 de ocorrência em determinadas faixas de tempo, se faz necessário obter a sua representação conjunta tempo-frequência.

Para estudar as propriedades do sinal no tempo  $t$ , suas propriedades no tempo devem ser enfatizadas em detrimento de regiões do suporte. Isso é feito multiplicando o sinal por uma função janela  $h(t)$ , centrada em  $t$ , para produzir um sinal modificado do tipo:

$$s_t(\tau) = s(\tau).h(\tau - t) \quad (1)$$

O sinal modificado é uma função de dois tempos: o tempo fixado  $t$  (tempo desejado) e o tempo corrente  $\tau$ . A função janela 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 interesse. Isto é:

$$s_t(\tau) \sim \begin{cases} s(\tau), & \text{para } \tau \text{ próximo a } t \\ 0, & \text{para } \tau \text{ longe de } t \end{cases} \quad (2)$$

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:

$$S_t(\omega) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{+\infty} e^{-j\omega\tau} s_t(\tau) d\tau \quad (3)$$

$$S_t(\omega) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{+\infty} e^{-j\omega\tau} s(\tau).h(\tau - t) d\tau \quad (4)$$

A potência espectral no tempo  $t$  é então:

$$P_{SP}(t, \omega) = |S_t(\omega)|^2 = \left| \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{+\infty} e^{-j\omega\tau} s(\tau) \cdot h(\tau - t) d\tau \right|^2 \quad (5)$$

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

A “Equação (4)”, é chamada de transformada a curto tempo de Fourier ou transformada de Gabor caso a função seja gaussiana ( $e^{-\alpha\tau^2}$ ).

### 3. O CIRCUITO VERTICAL DE TESTES EM ESCOAMENTOS BIFÁSICOS

O circuito piloto esquematizado na “Fig. 1”, é constituído basicamente de uma seção de testes vertical, construída em partes de acrílico com 50 mm de diâmetro interno, com comprimento total de 10 m. À saída desta última é conectada um separador ciclônico que exausta o ar para o exterior e retorna a água para o reservatório (uma caixa d’água tipo taça). Um misturador recebe água da bomba hidráulica e ar de um compressor de parafuso, e injeta a mistura na entrada da seção de ensaios. Uma torre metálica serve de sustentação para o conjunto, assim como para o separador ciclônico e para a tubulação de retorno.

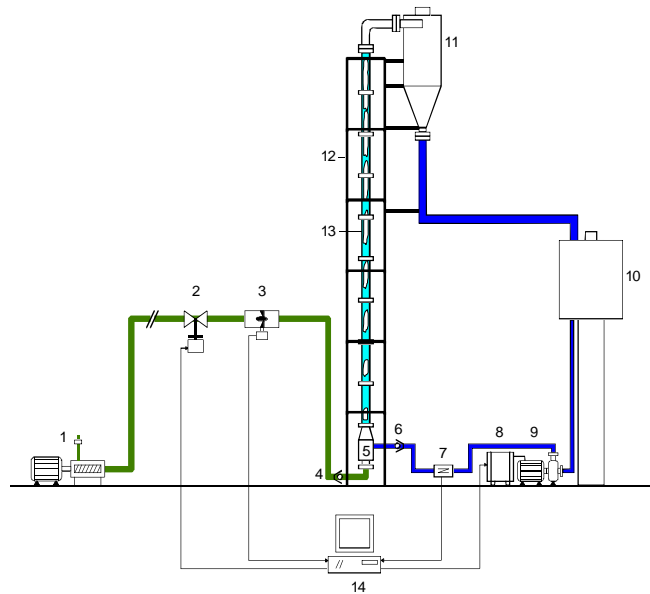


Figura 1 - Diagrama esquemático do circuito piloto para testes em escoamentos bifásicos gás-líquido verticais : 1) compressor de parafuso, 2) servoválvula, 3) medidor de vazão tipo turbina, 4) válvula de retenção para ar, 5) misturador, 6) válvula de retenção para água, 7) medidor de vazão eletromagnético,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

Para garantir a execução de transitórios controlados, isto é, cujo histórico das vazões pode ser imposto a priori, são necessários sistemas de regulação em malha fechada, conforme

indicado na “Fig. 1”. A vazão de água é determinada por intermédio de um medidor eletromagnético e de um variador de frequência que controla a rotação do motor da bomba. Por sua vez, a quantidade de ar injetada no circuito é determinada com auxílio de uma turbina e de uma eletroválvula dotada de um motor de acionamento eletropneumático. Assim, os sinais provenientes dos medidores de vazão são enviados ao microcomputador onde os algoritmos de regulação encontram-se implementados.

#### 4. A SONDA DE MEDIDAS DE CONDUTIVIDADE

Neste trabalho, optamos por basear as análises em medidas de condutividade instantânea do fluido bifásico, uma vez que estão fortemente correlacionados à fração de vazio e, por conseguinte, à topologia do escoamento. A geometria dos eletrodos de sensoriamento baseia-se na configuração adotada originalmente por Asali et al. (1985) e Andreussi et al. (1988), isto é, dois anéis de medida (um anel de excitação e um anel de medição, instalados a 3,30 metros do ponto de injeção de ar) de aço inoxidável montados rentes à parede interna do tubo, conforme ilustrado na “Fig. 2”.

O princípio de medida baseia-se nas diferenças ou contrastes entre as propriedades elétricas das fases constitutivas do escoamento bifásico. A característica fundamental dessa geometria é uma forte correlação entre a impedância global e o regime de escoamento. Isto pode ser atribuído às diferenças na distribuição azimutal de corrente no anel de medição conforme o regime de escoamento no interior do volume de sensoriamento.

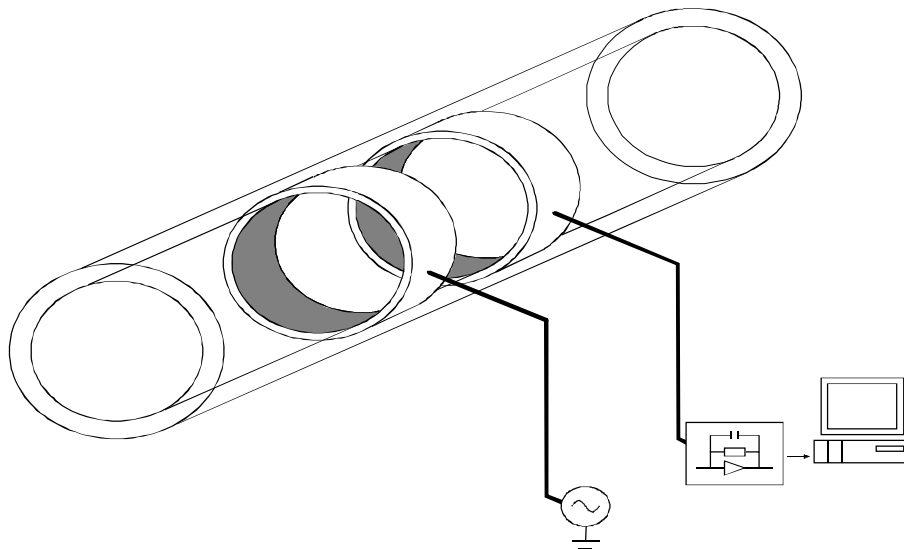


Figura 2 - Sonda de medidas de condutividade elétrica.

#### 5. RESULTADOS

Para dois tipos de escoamento bifásico vertical (escoamento de bolhas e escoamento pistonado) foram realizadas séries de testes permanentes de longa duração no circuito experimental descrito anteriormente. Os sinais analisados correspondem à medidas de condutividade elétrica obtidas por meio da sonda de anéis. A “Tabela 1” mostra as condições relativas às séries de testes realizados, considerando que a velocidade superficial de água ( $U_{\text{água}}$ ) é nula.

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

Tabela 1. Condições experimentais relativas às séries de testes realizados

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

As “Figuras 3 e 4” são diagramas de análise tempo-frequência representativos de dois sinais (8192 amostras a uma frequência de aquisição de 30 Hz) de condutividade elétrica fornecidos pela sonda. Estas figuras apresentam três gráficos. O gráfico disposto horizontalmente representa a variação do sinal de condutividade (volts) em função do tempo (segundos). O gráfico disposto verticalmente representa o espectro do sinal (Hz). O gráfico central representa a transformada de Gabor do sinal. Quanto mais escuro, mais forte é a densidade de energia.

No escoamento de bolhas, o ar encontra-se disperso em pequenas bolhas, movimentando-se umas em relação as outras de maneira aparentemente caótica. Como consequência disto, o sinal de condutividade caracteriza-se no plano tempo-frequência por um espalhamento da potência espectral em torno das frequências mais marcantes. O sinal de condutividade (volts), referente ao Teste 1 (“Tabela 1”), seu espectro (Hz) e o respectivo diagrama tempo-frequência são apresentados na “Fig. 3”.

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

O escoamento pistonado caracteriza-se pela passagem alternada de bolsões de ar (também chamados pistões) e de uma esteira de bolhas menores. Existe uma frequência bem definida e a potência espectral está bem concentrada em torno desta frequência. A “Fig. 4”, referente ao Teste 9 (“Tabela 1”), mostra estas considerações.

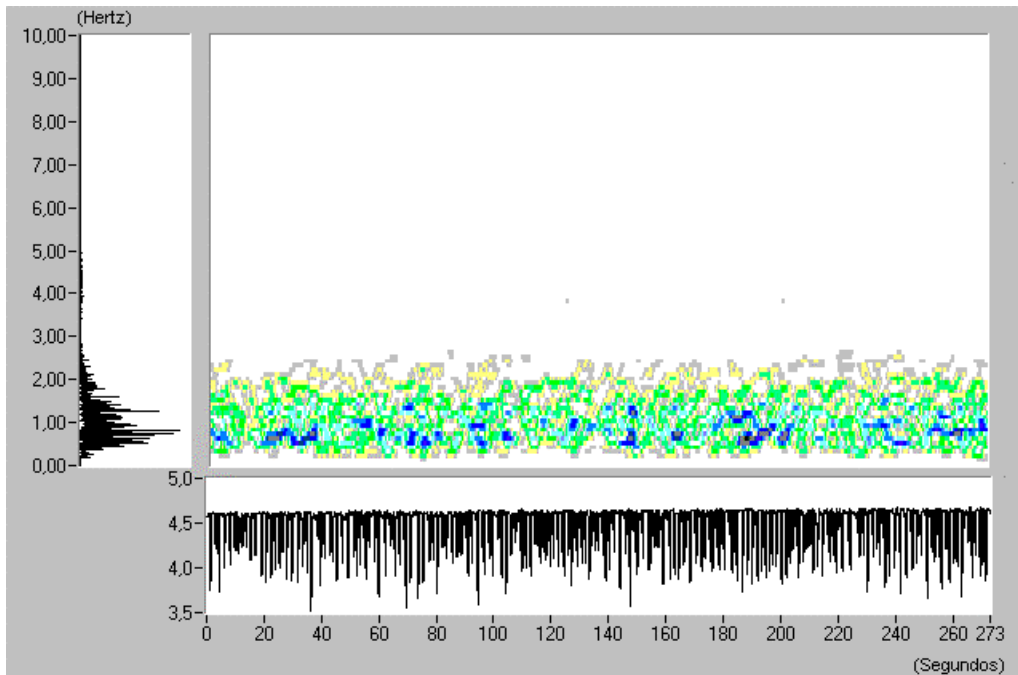


Figura 3 - Diagrama tempo-frequência - escoamento a bolhas ( $U_{ar} = 0,46$  cm/s, Teste 1).

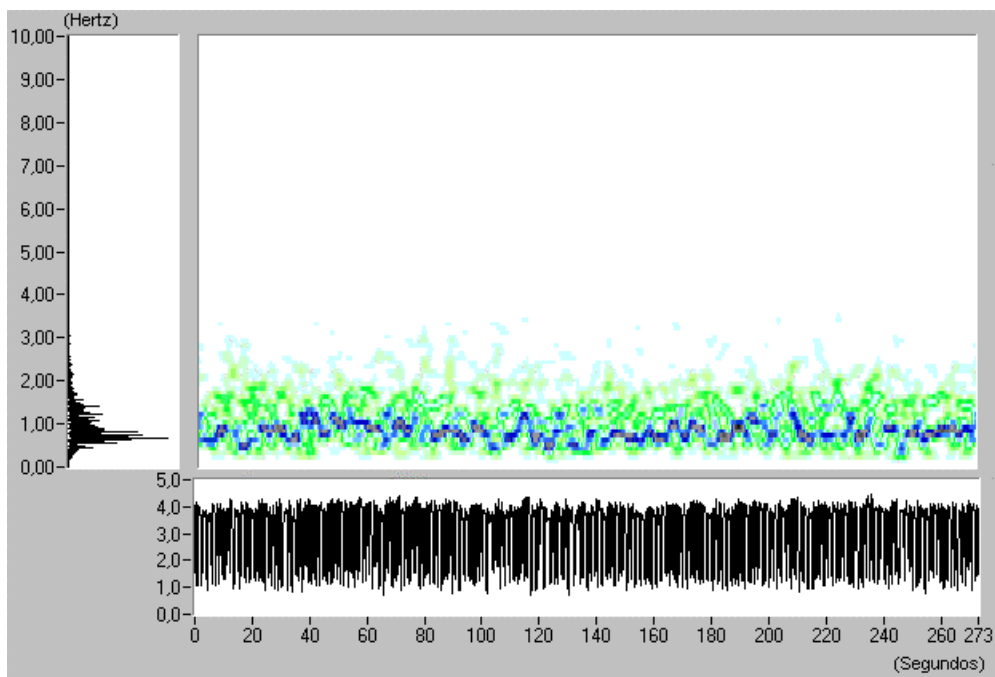


Figura 4 - Diagrama tempo-frequência - escoamento pistonado ( $U_{ar} = 12,71$  cm/s, Teste 9).

As figuras seguintes apresentam o baricentro do sinal (volts), “Fig. 5a”, e o desvio padrão do sinal (volts), “Fig. 5b”, relacionados com a velocidade superficial do ar ( $U_{ar}$ ).

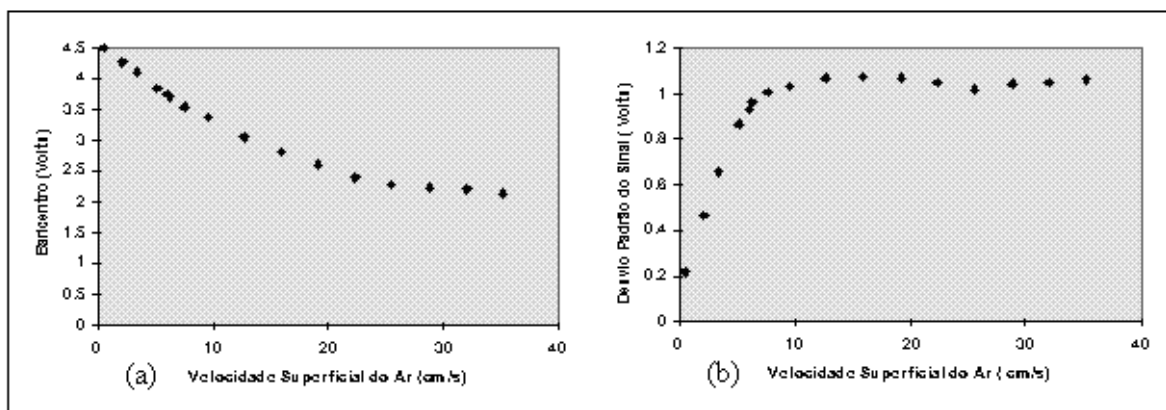


Figura 5 – (a) Baricentro (volts) em função da velocidade superficial do ar (cm/s). (b) Desvio padrão do sinal (volts) em função da velocidade superficial do ar (cm/s).

Analisando a “Fig. 5a” verifica-se uma queda do nível médio de tensão do sinal, o que indica o aumento da fração de vazão. Na “Figura 5b” pode-se observar que a transição do escoamento a bolhas para o pistonado está de acordo com o critério desenvolvido por Vince & Lahey (1982). O patamar após a transição não indica a degeneração do escoamento pistonado em direção aos escoamentos agitados, o que é um defeito desse parâmetro.

As figuras seguintes apresentam a frequência média (Hz), “Fig. 6a”, e o desvio padrão (Hz), “Fig. 6b”, das frequências de cada teste mostrado na “Tabela 1”.

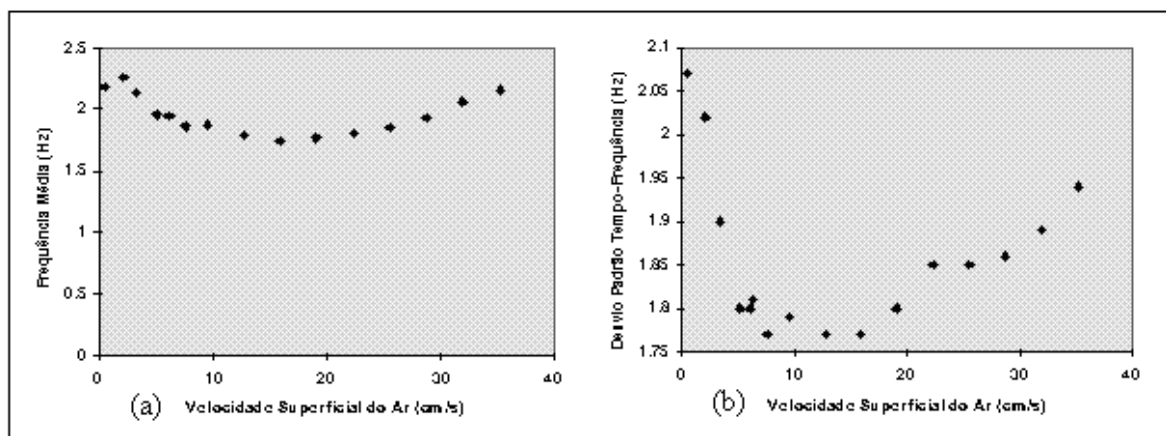


Figura 6 – (a) Frequência média (Hz), calculadas no plano tempo-frequência, em função da velocidade superficial do ar (cm/s). (b) Desvio padrão das frequências (Hz), calculadas no plano tempo-frequência, em função da velocidade superficial do ar (cm/s).

A frequência média, “Fig. 6a”, é alta nos dois primeiros pontos onde o espalhamento de energia é maior. Em seguida, observa-se uma queda na frequência média, pois a energia tende a se concentrar em torno de uma frequência principal, estreitando assim a faixa de espalhamento. Nesse intervalo tem-se uma região de transição do escoamento de bolhas para o pistonado. Depois de um período de estabilidade, a frequência média começa a aumentar, indicando uma tendência em atingir o regime agitante. Na “Figura 6b” o desvio padrão indica o espalhamento da potência espectral no plano tempo-frequência. Alto desvio padrão e baixa velocidade superficial do gás indicam escoamento a bolhas. Podemos verificar que à medida que a velocidade do gás aumenta ocorre uma queda no desvio padrão indicando que o regime



está passando de bolhas para pistonado. Após a transição, o desvio padrão da distribuição tempo-frequência apresenta uma tendência em aumentar, indicando o início do regime agitado.

## 6. CONCLUSÕES

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

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

Estes e outros aspectos inferidos dos resultados, sugerem novos estudos a serem conduzidos em trabalhos futuros. Dentre estes destacam-se a caracterização dos demais escoamentos bifásicos vertical gás líquido (agitante e anular) e a investigação detalhada da fenomenologia da transição entre os escoamentos.

### *Agradecimentos*

Este trabalho contou com o financiamento da CAPES (bolsa MsC de F.L.K.) e FAPESP (projeto individual de pesquisa proc. 96/3663 - 3).

## REFERÊNCIAS

- Andreussi, P., Di Donfrancesco, A. and Messia, M., 1988, An impedance method for the measurement of liquid hold-up in two-phase flow, *International Journal on Multiphase Flow*, v.14, n.6, pp.777-785.
- Asali, J. C., Hanratty, T. J. and Andreussi, P., 1985, Interfacial drag and film height for vertical annular flow, *AIChE J.*, v.31, pp.895-902.
- Barnea, D., Shoham, O. and Taitel, Y., 1980, Flow pattern characterization in two phase flow by electrical conductance probe, *International Journal of Multiphase Flow*, v.6, n.5A, pp.387-397.
- Drahos, J. & Cermak, J., 1989, Diagnostics of gas-liquid flow patterns in chemical engineering systems, *Chemical Engineering Processes*, v.26, pp.147-164.
- França, F., Acikgoz, M., Lahey, R. T. Jr. and Clausse, A., 1991, An application of fractal techniques to flow regime identification, ed A. P. Burns, *Multi-phase production*. London, Elsevier Applied Science, pp.281-293.
- 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. & Seleglim, P. Jr., 1998, An objective indicator for two-phase flow pattern transition, *Third International Conference on Multiphase Flow, ICMF'98*, v.CD-ROM, pp.1-7.

- Hubbard, M. G. & Dukler, A. E., 1966, The characterisation of flow regimes for horizontal two-phase flow, Proc. Heat Transfer and Fluid Mach, eds M. A. Saad and J. A. Moller, Stanford University Press.
- 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, pp.711-720.
- 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, pp.723-737.
- Sekoguchi, K., Inoue, K. and Imasaka, T., 1987, Void signal analysis and gas-liquid two-phase flow regime determination by a statistical pattern recognition method, JSME International Journal, v.30, n.266, pp.1266-1273.
- 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, pp.611-616.
- Soldati, A., Paglianti, A. and Giona, M., 1996, Identification of two phase flow regimes via diffusional analysis of experimental time series, Experiments in Fluids, v.21, n.3, pp.151-160.
- Troniewski, L. & Ulbrich, R., 1984, The analysis of flow regime maps of two-phase gas-liquid flow in pipes, Chemical Engineering Science, v.19, n.7/8, pp.1213-1224.
- Vince, M. A. & Lahey, R. T. Jr., 1982, On the development of an objective flow regime indicator, International Journal Multiphase Flow, v.8, n.2, pp.93-124.

### **TIME-FREQUENCY CHARACTERIZATION OF A VERTICAL GAS-LIQUID FLOW**

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

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