



CARACTERIZAÇÃO TEMPO-FREQUÊNCIA DE REGIMES DE ESCOAMENTO HORIZONTAIS

Fabiana Lopes Klein

Núcleo de Engenharia Térmica & Fluidos
Universidade de São Paulo
Av. Trabalhador São-Carlense, 400 – Centro
CEP 13566-590 – São Carlos – SP
e-mail: klein@sc.usp.br

Paulo Seleghim Junior

Núcleo de Engenharia Térmica & Fluidos
Universidade de São Paulo
Av. Trabalhador São-Carlense, 400 – Centro
CEP 13566-590 – São Carlos – SP
e-mail: seleghim@sc.usp.br

Eric Hervieu

DRN/DTP/SETEX/LTDF
Commissariat à l’Energie Atomique
38054 Grenoble cedex 9 – França
e-mail: hervieu@ntp.cea.fr

Resumo. *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. Neste trabalho, a análise tempo-frequência foi utilizada para caracterizar regimes de escoamento bifásico gás-líquido horizontais. Dados estatísticos obtidos através destes regimes, juntamente com as vazões gasosa e líquida foram comparados com um modelo teórico de transição de regimes (o mapa de transição de escoamentos bifásicos de Taitel & Dukler). A transformada de Gabor foi aplicada na análise dos sinais de uma sonda de condutividade, instalada em um circuito experimental de testes com escoamentos ar-água horizontais. Os resultados obtidos, momentos estatísticos calculados a partir da distribuição de Gabor, demonstram objetivamente a existência de três grandes famílias de regime de escoamento.*

Palavras-chaves: *escoamentos bifásicos, regimes, caracterização, tempo-frequência*

1. INTRODUÇÃO

Um fluido multifásico pode escoar segundo diversas organizações topológicas chamadas regimes ou configurações de escoamento. Por exemplo, as duas fases de uma mistura gás-líquido podem escoar horizontalmente de forma dispersa (regimes a bolhas ou gotas pulverizadas) ou segregada (regimes anular e estratificado). 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. Isto implica não apenas a capacidade de se diagnosticar em tempo real as configurações de escoamento, mas também a possibilidade de uma eventual transição de regime. 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 term nuclear 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 e Dukler (1966), cujo objetivo foi à caracterização de diversos regimes de escoamento baseando-se na análise espectral de sinais de pressão. Podemos citar igualmente, os trabalhos de Vince e Lahey (1982), Matsui (1984), Mishima e 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 e Cermak (1989).

Porém, se essa metodologia permite caracterizar as configurações de escoamento, a identificação das fronteiras entre eles carece de objetividade, Vince e 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). Soldati et al (1996) propuseram a utilização da análise difusional como método adequado à identificação de regimes de escoamento bifásico. Troniewski e 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 fluidos bifásicos, Hervieu e 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, Selegim e 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 à covariância tempo-frequência associada à transformada de Gabor, como novo indicador de transição de regime de escoamento (Hervieu e Selegim, 1998).

Neste trabalho, a curva do desvio padrão obtida através destes regimes juntamente com as vazões gasosa e líquida será comparada com um modelo teórico de transição de regimes de escoamento bifásico (o mapa de transição de escoamentos bifásicos de Taitel e Dukler, 1976). A

transformada de Gabor será aplicada na análise dos sinais de uma sonda de condutividade, instalada em um circuito experimental com escoamentos ar-água horizontais.

Apresentaremos na seção seguinte, os princípios e relações básicas da análise tempo-frequência. Em seguida, descreveremos o aparato experimental (circuito de testes horizontal 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 τ . 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:

$$s_\tau(t) \approx \begin{cases} s(\tau), & \text{para } \tau \text{ próximo à } t \\ 0 & \text{para } \tau \text{ longe de } t \end{cases} \quad (2)$$

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 densidade de energia espectral no tempo t é então:

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

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 janela seja gaussiana.

3. INSTALAÇÕES EXPERIMENTAIS

3.1. O Circuito Experimental

O circuito BHETA, do Commissariat à l'Énergie Atomique em Grenoble – França, é basicamente composto de sistema de alimentação de água e ar, um misturador, uma seção de ensaios horizontal e um separador, conforme indicado na Fig. (1). 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.

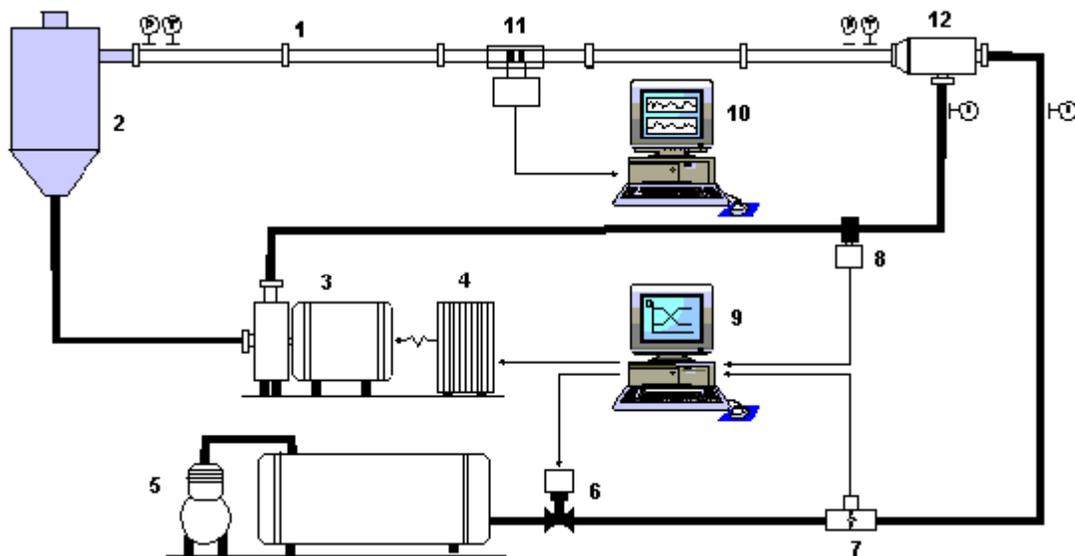


Figura 1. Circuito experimental, segundo Selegim e Hervieu, (1998): (1) seção de ensaios, (2) separador, (3) bomba hidráulica, (4) variador de frequência, (5) compressor, (6) servo-válvula, (7) medidor de vazão eletromagnético, (8) medidor de vazão, (9) piloto do circuito, (10) sistema de aquisição de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

3.2. A Sonda de Condutividade

Segundo Selegim e Hervieu (1998), para se obter uma imagem do escoamento diretamente da medida de quantidades físicas, isto é, sem reconstrução numérica, é necessário produzir uma divisão na região de sensoriamento em um certo número de sub-regiões independentes. Por exemplo, uma representação do perfil de imagem da fração de vazio pode ser obtida pela partição do volume de sensoriamento por meio de um certo número de detectores de fase. Se estes detectores não perturbarem o escoamento e suas zonas de sensibilidade forem restritas a uma pequena região

do sensor, o conjunto de sinais assim obtidos pode ser diretamente plotado respeitando a estrutura da partição. Como cada valor é representativo da fração de vazio local, o resultado estará próximo do perfil de fase real.

A geometria adotada por Seleghim e Hervieu (1998), consiste de dois anéis de eletrodos de aço inoxidável montados juntos à parede do tubo como 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. Conseqüentemente uma partição do volume de medida pode ser obtida pela segmentação medida que resulta em uma série de eletrodos dispostos regularmente de acordo com o perímetro do tubo, como esquematizado na Fig. (2).

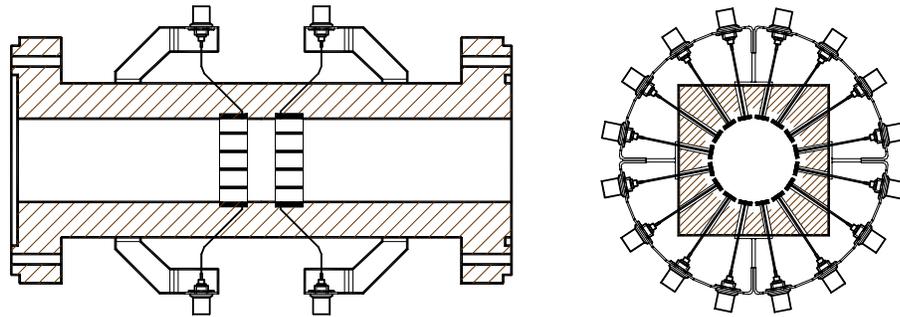


Figura 2. Sonda condutiva segundo Seleghim e Hervieu (1998)

4. MATRIZ DE TESTES E RESULTADOS

Para cada grande família de escoamentos bifásicos horizontais foram realizadas séries de testes de longa duração no circuito experimental descrito anteriormente. Os sinais analisados correspondem à medida de condutividade elétrica obtida por meio da sonda de visualização, cujo princípio de funcionamento encontra-se esquematizado na Fig. (2). Assim para cada teste, estes sinais foram filtrados (anti-aliasing) e amostrados a taxas de 100Hz. Denotando Q_l e Q_g as vazões líquida e gasosa respectivamente, 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 são mostrados no mapa de escoamento de Taitel e Dukler da Fig. (3) (Taitel & Dukler, 1976).

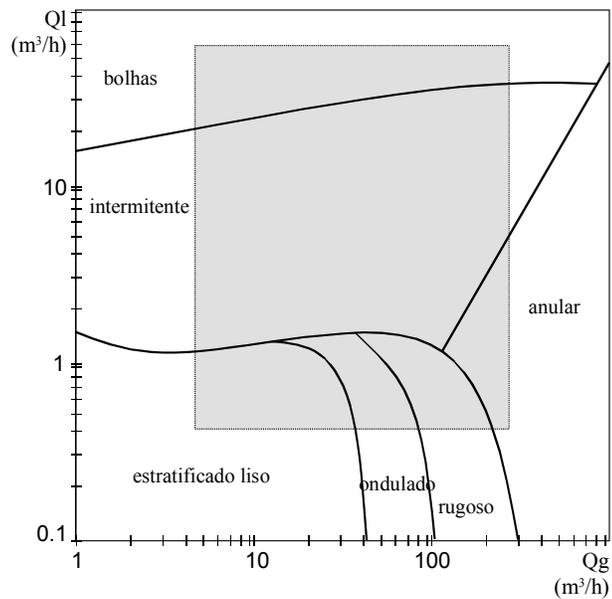


Figura 3. Mapa de escoamento bifásico de Taitel e Dukler (1976) com indicação da zona dos testes (vazões expressas nas CNTP)

Através da transformada de Gabor obtivemos o desvio padrão de cada teste, definido pela Eq. (6).

$$\Delta^2(\tau) = \int_{-\infty}^{+\infty} (\omega - \mu_{px})^2 P_{SP}(t, \omega) d\omega \quad (6)$$

onde:

$$\mu_{px}(\tau) = \frac{1}{E_x(\tau)} \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} \omega S_t(\omega) dt d\omega \quad (7)$$

$$E_x(\tau) = \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} S_t(\omega) dt d\omega \quad (8)$$

E, juntamente, com as respectivas vazões líquidas e gasosas plotamos o gráfico abaixo, onde podemos observar duas “cristas” bastante acentuadas.

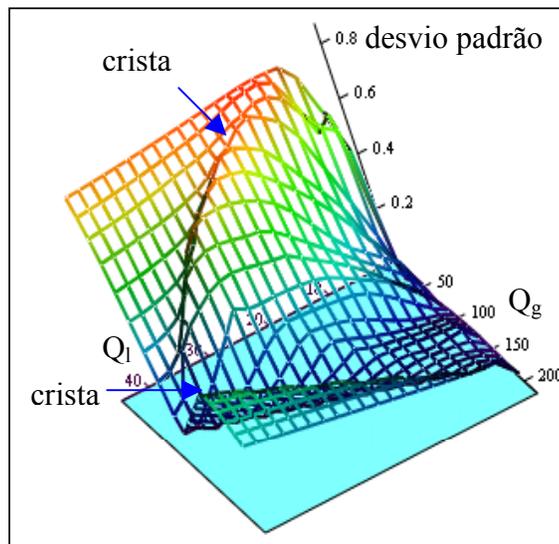


Figura 4. Gráfico do Desvio Padrão em função das vazões líquida e gasosa

Identificando os pontos dessa “crista” (Fig. (4)) no mapa de escoamento de Taitel & Dukler da Fig. (3), obtemos uma semelhança grande entre este modelo teórico e o resultado dos ensaios na região de transição do escoamento a bolhas para o intermitente. Essa semelhança pode ser observada na Fig. (5).

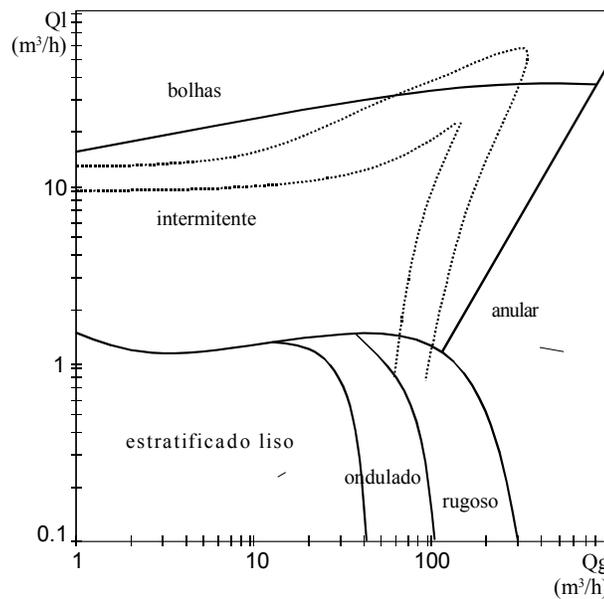


Figura 5. Mapa de escoamento bifásico de Taitel e Dukler (1976) com as “cristas” do desvio padrão (vazões expressas nas CNTP)

5. CONCLUSÕES

Neste trabalho, comparamos um modelo teórico de transição de regimes de escoamento bifásico (o mapa de transição de escoamentos bifásicos de Taitel e Dukler, 1976) com a curva do desvio padrão de vários testes e suas respectivas vazões líquidas e gasosas. Para tanto, uma série de ensaios foram conduzidos em um circuito experimental através de uma sonda condutiva. Igualmente, foram

implementados algoritmos de aquisição e análise destinados ao cálculo da transformada de Gabor associados aos sinais de condutividade fornecidos pela sonda. Graças a esses cálculos obtivemos o desvio padrão da transformada de Gabor de acordo com a Eq. (6).

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

Pudemos observar uma grande aproximação do modelo teórico (mapa de Taitel e Dukler) para o resultado prático dos testes realizados na região de transição do escoamento a bolhas para o intermitente.

Estes e outros aspectos inferidos do resultado sugerem novos estudos a serem conduzidos no sentido de uma investigação bastante detalhada da fenomenologia da transição entre os regimes de escoamento horizontais.

6. AGRADECIMENTOS

Este trabalho contou com o financiamento do CNPq (bolsa Dr. de F.L.K.).

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Barnea, D., Shoham, O. and Taitel, Y., 1980, "Flow Pattern Characterization in Two Phase Flow by Electrical Conductance Probe", *International Journal of Multiphase Flow*, Vol. 6, No.5A, pp.387-397.
- Drahos, J. and Cermak, J., 1989, "Diagnostics of Gas-Liquid Flow Patterns in Chemical Engineering Systems", *Chemical Engineering Processes*, Vol. 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, *Mult-Phase Production*. London, Elsevier Applied Science, pp.281-293.
- Hervieu, E. and 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. and Selegim, 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. and Dukler, A. E., 1966, "The Characterisation of Flow Regimes for Horizontal Two-Phase Flow", *Proc. Heat Transfer and Fluid Mech*, Eds. M. A. Saad and J. A. Moller, Stanford University Press.
- Matsui, G., 1984, "Identification of Flow Regimes in Vertical Gas-Liquid Two-Phase Low Using Differential Pressure Fluctuations", *International Journal Multiphase Flow*, Vol. 10, No. 6, pp.711-720.
- Mishima, K. and Ishii, M., 1984, "Flow Regime Transition Criteria for Upward Two-Phase Flow in Vertical Tubes", *International Journal Heat Mass Transfer*, Vol. 27, No. 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*, Vol. 30, No. 266, pp.1266-1273.
- Selegim, P. Jr. and 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, Vol. 21, No. 3, pp.151-160.
- Taitel, Y. and Dukler, A.E., 1976, "A Model for Predicting Flow Regime Transitions in Horizontal and Near Horizontal Gas-Liquid Flow", AIChE Journal, Vol. 22, No. 1, pp. 47-55.
- Troniewski, L. and Ulbrich, R., 1984, "The Analysis of Flow Regime Maps of Two-Phase Gas-Liquid Flow in Pipes", Chemical Engineering Science, Vol. 19, No. 7/8, pp.1213-1224.
- Vince, M. A. and Lahey, R. T. Jr., 1982, "On the Development of An Objective Flow Regime Indicator", International Journal Multiphase Flow, Vol. 8, No. 2, pp.93-124.

TIME FREQUENCY CHARACTERIZATION OF HORIZONTAL FLOW REGIMES

Fabiana Lopes Klein

Núcleo de Engenharia Térmica & Fluidos
Universidade de São Paulo
Av. Trabalhador São-Carlense, 400 – Centro
CEP 13566-590 – São Carlos – SP
e-mail: klein@sc.usp.br

Paulo Seleghim Junior

Núcleo de Engenharia Térmica & Fluidos
Universidade de São Paulo
Av. Trabalhador São-Carlense, 400 – Centro
CEP 13566-590 – São Carlos – SP
e-mail: seleghim@sc.usp.br

Eric Hervieu

DRN/DTP/SETEX/LTDF
Commissariat à l'Energie Atomique
38054 Grenoble cedex 9 – França
e-mail: hervieu@ntp.ceea.fr

***Abstract.** One of the fundamental attributes associated to multiphase flows is the existence of characteristic structures, according to which the different phases of the fluid may flow. The formation of one of those structures, known as configurations or flow regimes, is determined by the discharges and physical properties of the phases, besides geometric parameters, such as diameter and inclination of the conduit. The development of methodologies to characterize regimes, as well the characterization and the diagnostic of flow regime transition, are of fundamental importance. The time-frequency analysis is used to characterize horizontal gas-liquid flow regimes. In this work, data from these regimes with gas and liquid are compared with a theoretical model of regimes transition (Taitel and Dukler's two-phase flow transition map). The Gabor transform is applied in the analysis of the signals from a conductivity probe, installed in an experimental circuit of horizontal air-water flow. The results calculated from Gabor transform show objectively the existence of three principal family of flow regime.*

Keywords: Multiphase flow, Regimes, Characterization, Time-frequency