

MEDIÇÃO DE FRAÇÕES VOLUMÉTRICAS DE ESCOAMENTOS BIFÁSICOS BASEADA EM ANÁLISE DE VIBRAÇÕES

Ranieri Ambrosio Merini, ramerini@petrobras.com.br
Antonio Lopes Gama, agama@vm.uff.br
Yan Barboza Bastos, yanbastos@hotmail.com
Paulo Henrique Azeredo Walter Filho, paulowalter@yahoo.com.br

Universidade Federal Fluminense, Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica - PGMEC, Rua Passo da Pátria 156, Niteroi, RJ - 24210-240

***Resumo:** Este trabalho propõe o desenvolvimento de um sistema não-intrusivo para medição de fração volumétrica de escoamento bifásico gás-líquido baseado em análise de vibrações. O método consiste em excitar um conduto em frequências elevadas utilizando um atuador e medir a vibração produzida com acelerômetros. Os sinais de excitação e resposta do conduto são enviados a uma unidade de processamento de sinais para geração de funções de resposta em frequência do conduto. São estabelecidas correlações entre a variação das frequências naturais do conduto com a fração volumétrica das fases de líquido e gás. Resultados numéricos e experimentais mostram que o método é capaz de apresentar grande sensibilidade às variações de fração volumétrica do escoamento bifásico em diferentes regimes de escoamento.*

***Palavras-chave:** escoamento bifásico, análise de vibrações, frações volumétricas.*

1. INTRODUÇÃO

A medição da vazão das fases de água, óleo e gás de um escoamento multifásico permite a otimização de diversas atividades realizadas na produção de petróleo. O conhecimento das frações produzidas por cada poço é de fundamental importância em qualquer esforço para se melhorar o fator de recuperação de reservatórios. O controle de processos de elevação artificial, por outro lado, ganha em simplicidade e robustez enquanto pode também ser otimizado ao dispor dessas medições. Outra aplicação da medição multifásica é nos testes de produção de poços onde os medidores multifásicos começam a substituir os volumosos separadores de teste de poços, permitindo também uma medição em tempo real durante transitórios com maior qualidade que a medição obtida com a utilização do separador.

Até poucos anos atrás, a medição das vazões de cada fase de um escoamento multifásico era obtida somente após a passagem por um separador. Esta metodologia é ainda largamente utilizada, seja pelos altos custos dos medidores de vazão para escoamento multifásico ou pelo fato de que a qualidade da medição não atende as exigências da agência reguladora. Apesar de todos os esforços em diferentes áreas relacionadas com esta tecnologia, a medição de vazões em escoamento multifásico para cada poço ainda carece de desenvolvimento para sua utilização com qualidade e custo competitivo.

Um dos procedimentos normalmente utilizados na medição de vazão de escoamentos bifásicos do tipo líquido-gás consiste na combinação de técnicas de medição da fração volumétrica das fases com métodos de medição da velocidade de escoamento. Num artigo publicado recentemente, Gama et al., 2009, obtiveram curvas de correlações entre a aceleração RMS medida em tubos e a velocidade superficial de mistura do escoamento bifásico. As curvas apresentadas são funções dependentes da fração volumétrica do escoamento bifásico. No mesmo estudo foram apresentados resultados preliminares de um método de medição das frações volumétricas em função da frequência natural da tubulação. Conhecendo-se as duas variáveis – aceleração RMS do tubo e fração volumétrica – é possível a determinação da velocidade superficial de mistura e obtenção do fluxo mássico do escoamento bifásico.

Desta forma, este trabalho propõe o desenvolvimento de um sistema não-intrusivo de medição das frações volumétricas para um escoamento bifásico baseado em análise de vibrações. A metodologia utilizada para obtenção das frações volumétricas é baseada na detecção de variação da frequência natural da tubulação em função da fração volumétrica das fases do escoamento. O método consiste primeiramente em obter as funções de resposta em frequência ou os espectros em frequência dos sinais de vibração da tubulação ao ser excitada externamente por atuadores e submetida à escoamentos bifásicos com diferentes frações volumétricas. As funções de resposta em frequência ou os espectros em frequência são então analisados para obtenção de correlações entre as variações de frequência natural do tubo e as frações volumétricas do escoamento. Foram analisadas diversas condições de escoamento, possuindo não apenas diferentes frações volumétricas, mas também diferentes distribuições espaciais das fases segundo os regimes de

escoamento bifásico. São apresentados resultados de testes com misturas de água e ar, realizados em tubos horizontais, que mostram a viabilidade do método proposto neste trabalho. .

2. ESCOAMENTO DE SISTEMAS LÍQUIDO-GÁS

Em escoamentos bifásicos de sistemas líquido-gás podem existir várias formas de interação entre as duas fases (Mandhane *et al.*, 1974), dependendo das condições operacionais (vazão, pressão, temperatura), das propriedades dos fluidos de cada fase (densidade, viscosidade, tensão superficial) e da geometria do sistema (dimensão, inclinação, forma). O padrão de fluxo depende principalmente das velocidades do gás e do líquido, e da relação gás/líquido. Os regimes de escoamento descrevem a distribuição espacial das fases conforme pode ser observado na Figura 1 no caso de tubos horizontais e verticais.

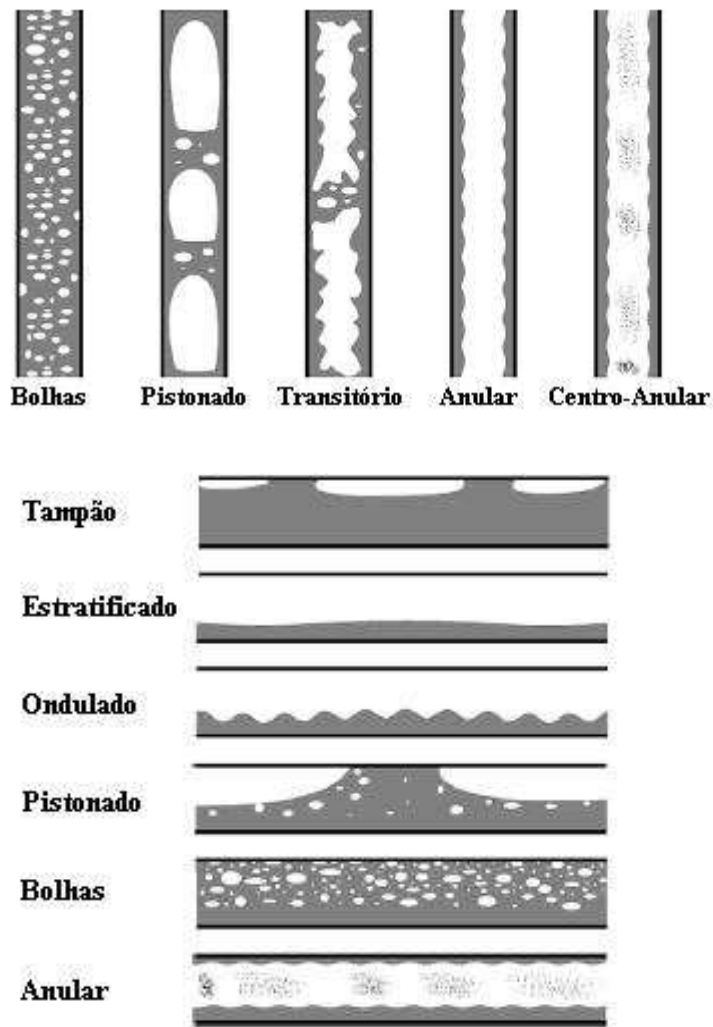


Figura 1. Regimes de escoamentos bifásicos em tubulações verticais e horizontais

O presente trabalho tem como principal objetivo realizar um estudo experimental sobre a possibilidade da determinação da fração volumétrica das fases de escoamentos bifásicos de líquido e gás através da análise de vibrações. O método apresentado neste trabalho baseia-se na variação da frequência natural do tubo em função das frações de líquido e gás e será verificado para os casos de escoamentos em tubos horizontais. É importante notar que não apenas a fração volumétrica, mas também a distribuição espacial das fases pode ter considerável influência na frequência natural do tubo. Para verificar o método proposto neste trabalho, serão realizados testes sob variadas condições de escoamento definidos através da velocidade de mistura V e a fração volumétrica de gás C_G conforme a seguir:

$$V = V_L + V_G \quad (1)$$

$$C_G = \frac{V_G}{V} \quad (2)$$

onde V_L e V_G são as velocidades superficiais de líquido e gás, respectivamente, dadas pelas expressões a seguir:

$$V_L = \frac{Q_L}{A} \quad \text{e} \quad V_G = \frac{Q_G}{A} \quad (3)$$

em que Q_L e Q_G são as vazões volumétricas de água e ar respectivamente, e A é a área da seção transversal do tubo. As condições de escoamento utilizadas nos testes empregando um circuito de água e ar são mostradas na Tabela 1. As vazões volumétricas de ar variam na faixa de 0.88 a 16.8 m³/h e as vazões volumétricas de água na faixa de 0.18 a 5.30 m³/h.

Tabela 1. Condições de escoamento utilizadas nos testes.

Número	Velocidade Superficial de Mistura	Fração Volumétrica de Ar
	V (m/s)	C _G (%)
1	1	50
2	2	50
3	3	50
4	4	50
5	5	50
6	6	50
7	1	60
8	2	60
9	3	60
10	4	60
11	5	60
12	6	60
13	1	70
14	2	70
15	3	70
16	4	70
17	5	70
18	6	70
19	7	70
20	8	70
21	1	80
22	2	80
23	3	80
24	4	80
25	5	80
26	6	80
27	7	80
28	8	80
29	1	90
30	2	90
31	3	90
32	4	90
33	5	90
34	6	90
35	7	90
36	8	90
37	2	95
38	3	95
39	4	95
40	5	95
41	6	95
42	7	95
43	8	95
44	10	95

3. BANCADA DE TESTES

A Figura 2 apresenta o esquema do circuito de testes do laboratório utilizado para simulação do escoamento bifásico. O sistema consiste de uma bomba centrífuga com capacidade de vazão de 8 m³/h, um compressor de ar com capacidade de vazão de 30 m³/h, dois rotâmetros para medição das frações volumétricas de ar, dois rotâmetros para medição das frações volumétricas de água, válvulas manuais para controle das vazões, transdutores de pressão, reservatório de água e separador de mistura.

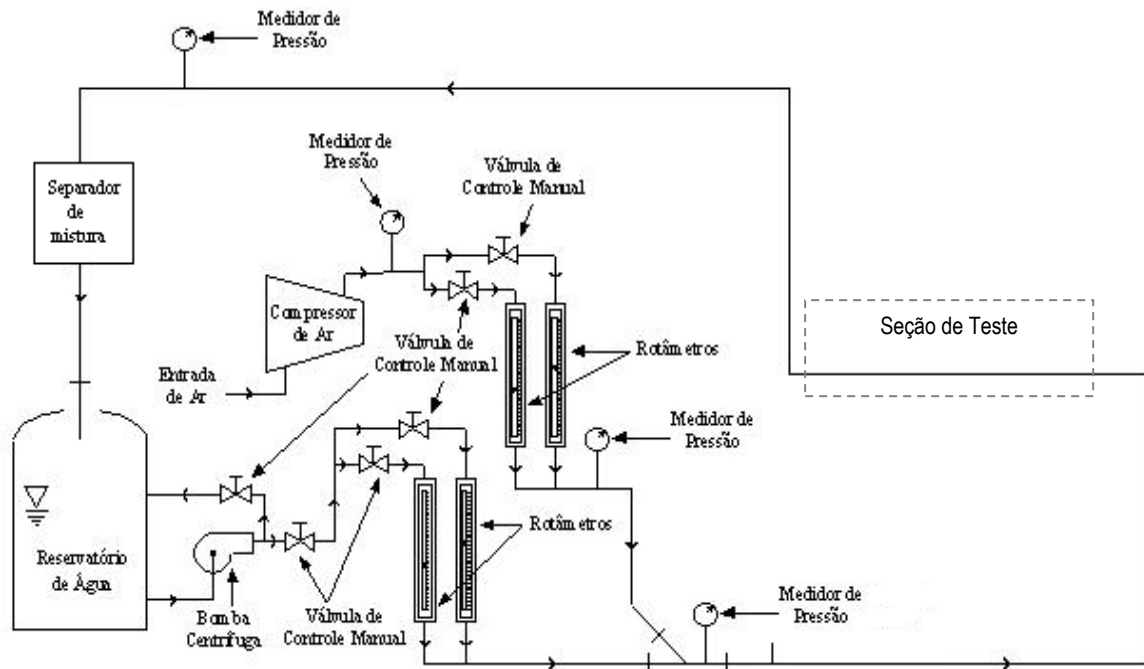


Figura 2. Esquema do loop de testes do laboratório.

A tubulação é de acrílico com diâmetro externo de $31,75\text{ mm}$ ($1\frac{1}{4}''$) e interno de $25,4\text{ mm}$ ($1''$) fixada em uma bancada de aço. Todo o sistema está isolado através de conexões e mangueiras afim de evitar qualquer influência na seção de teste devido às vibrações da bomba, do compressor e das fixações. Na Figura 3, pode-se observar em detalhes a seção de teste que consiste num trecho reto da tubulação, de comprimento “L”, ancorada na bancada.

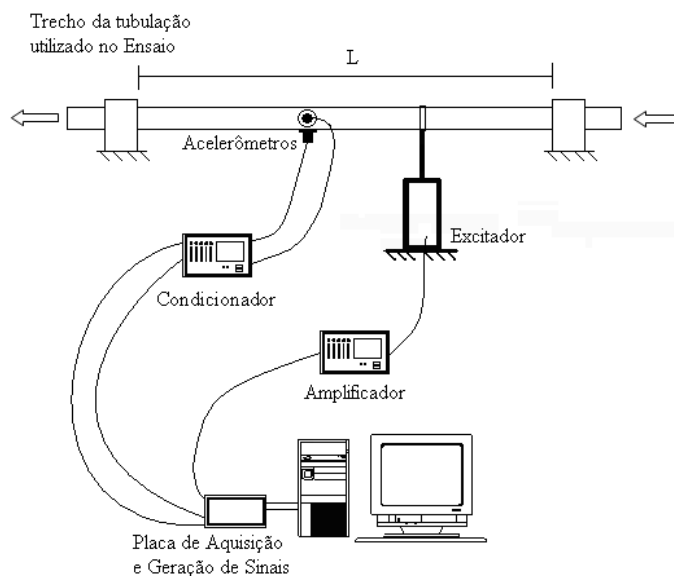


Figura 3. Seção de teste e Sistema de Controle, Aquisição e Processamento de Dados

4. SISTEMA DE CONTROLE, AQUISIÇÃO E PROCESSAMENTO

Os sinais de vibração, obtidos de acelerômetros instalados de forma a medir a vibração do tubo no plano vertical e no plano horizontal foram analisados utilizando um analisador de sinais dinâmicos comercial e um sistema desenvolvido utilizando a plataforma Labview™. O sistema de controle, aquisição e processamento utilizado no ensaio e na aquisição de dados consiste de dois acelerômetros, um shaker, um condicionador de sinais, um amplificador de sinais, placa de aquisição/geração e software implementado em plataforma Labview.

O ensaio é realizado da seguinte forma: é simulada uma situação de escoamento bifásico no loop de testes. O sistema de controle faz com que o shaker atue sobre a tubulação excitando-a numa determinada faixa de frequência. O sinal de vibração resultante da excitação e do escoamento bifásico é adquirido pelo sistema de aquisição. Os sinais de

excitação e vibração da tubulação são enviados ao sistema de processamento de dados e através da função de resposta em frequência o software identifica a frequência natural do conjunto tubulação e escoamento. No diagrama da figura 3 é mostrada a lógica resumida de análise do software desenvolvido.

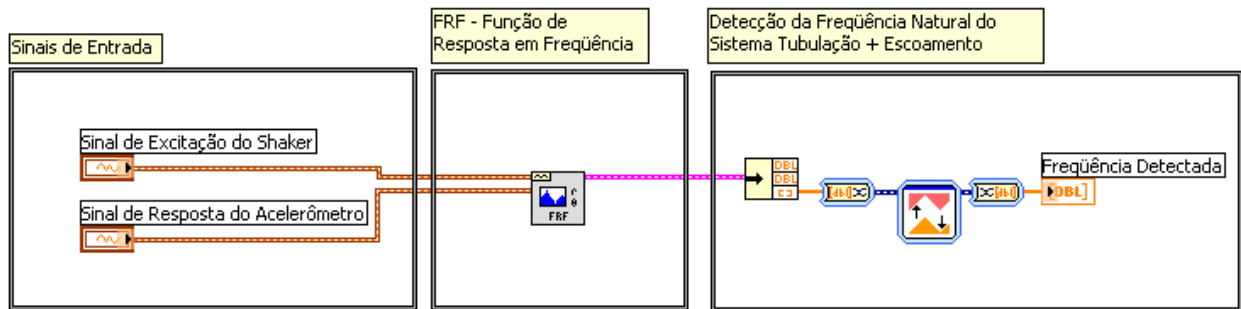


Figura 4. Diagrama simplificado de análise do software.

Os dados dos sinais dos acelerômetros e do sinal de excitação do shaker são gravados em um computador através do sistema de aquisição. Para cada condição de escoamento bifásico analisada os sinais de vibração foram adquiridos num período de 30 segundos a uma amostragem de 2048 pontos/segundo.

5. SIMULAÇÃO NUMÉRICA

Análises numéricas utilizando o método de elementos finitos também foram realizadas utilizando o programa comercial ANSYSTM. As simulações foram feitas para tubos parcialmente cheios de água, onde empregou-se o elemento sólido SOLID186 modificado para modelar a água. As propriedades do tubo de acrílico utilizadas nas simulações estão na Tabela 2. Estas simulações tem como objetivo determinar as condições a serem empregadas nos testes experimentais e verificar as variações das frequências naturais do tubo causadas por diferentes frações volumétricas e também por diferentes distribuições espaciais das fases no interior do tubo. Verificou-se nas análises numéricas que uma maior sensibilidade às variações do conteúdo de água no tubo podem ser obtidas em frequências mais elevadas, em que as mudanças no conteúdo de água produzem maiores variações nas frequências naturais do tubo.

Tabela 2. Propriedades da tubulação utilizadas na simulação numérica

Distância 'L' (mm)	500
Módulo de Elasticidade (GPa)	2,4
Densidade (kg/m ³)	1200

6. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os primeiros testes foram realizados em um tubo reto de 500 mm de comprimento na posição horizontal e engastado nas extremidades. O tubo foi excitado por um forçamento randômico na faixa de frequência compreendida entre 0 e 1000 Hz, aplicado por um excitador eletromagnético. As funções de resposta em frequência do tubo foram obtidas para diferentes condições de escoamento em que as frações volumétricas de ar C_G variaram de 0 a 100%, ou seja as condições de escoamento monofásico de ar e água também foram utilizadas. Nestes testes, foi empregada uma mesma velocidade de mistura V . Os resultados mostraram que as variações na segunda frequência natural do tubo permitiam obter uma melhor correlação com as frações volumétricas. A Figura 5 apresenta uma comparação entre os valores obtidos nos experimentos e nas simulações numéricas. Os resultados mostram uma boa concordância entre os resultados numéricos e experimentais apesar do modelo simplificado utilizado nas simulações. Nota-se também uma grande variação de frequência em função das mudanças no conteúdo do tubo, possibilitando a detecção de pequenas variações de fração volumétrica.

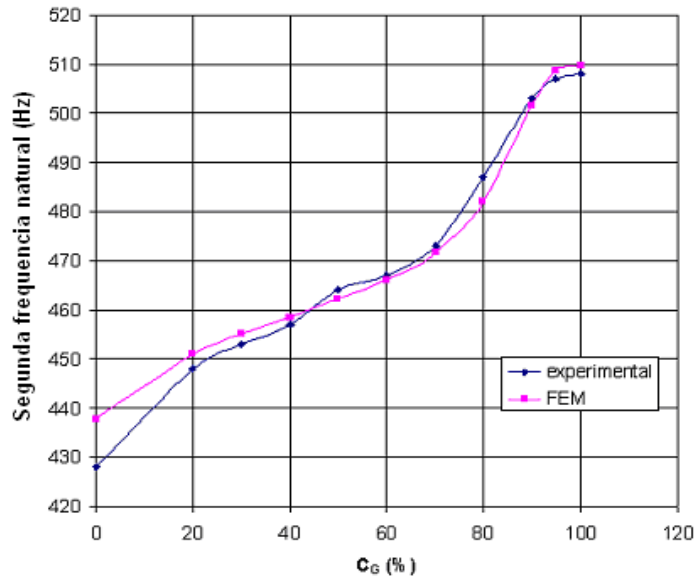


Figura 5. Variação da segunda frequência natural do tubo de 500 mm de comprimento em função da fração volumétrica de ar.

As análises seguintes foram realizadas com o objetivo de avaliar o método proposto em condições de escoamento diversificadas, em que foram empregadas diferentes velocidades de mistura V e diferentes frações volumétricas de ar C_G . Nos testes foi empregado um tubo de acrílico com 653 mm de comprimento ancorado nas extremidades. A Figura 6 mostra espectros em frequência dos sinais de vibração no plano vertical medidos com o acelerômetro instalado no tubo, para uma mesma velocidade de mistura do escoamento ($V = 3$ m/s) e diferentes frações volumétricas de ar. Cada espectro mostrado na Figura 6 foi obtido a partir de uma média realizada com 40 espectros em frequência. O tempo total para obtenção do espectro médio foi de cerca de 2 minutos, o que permite obter um espectro representativo de cada condição de escoamento.

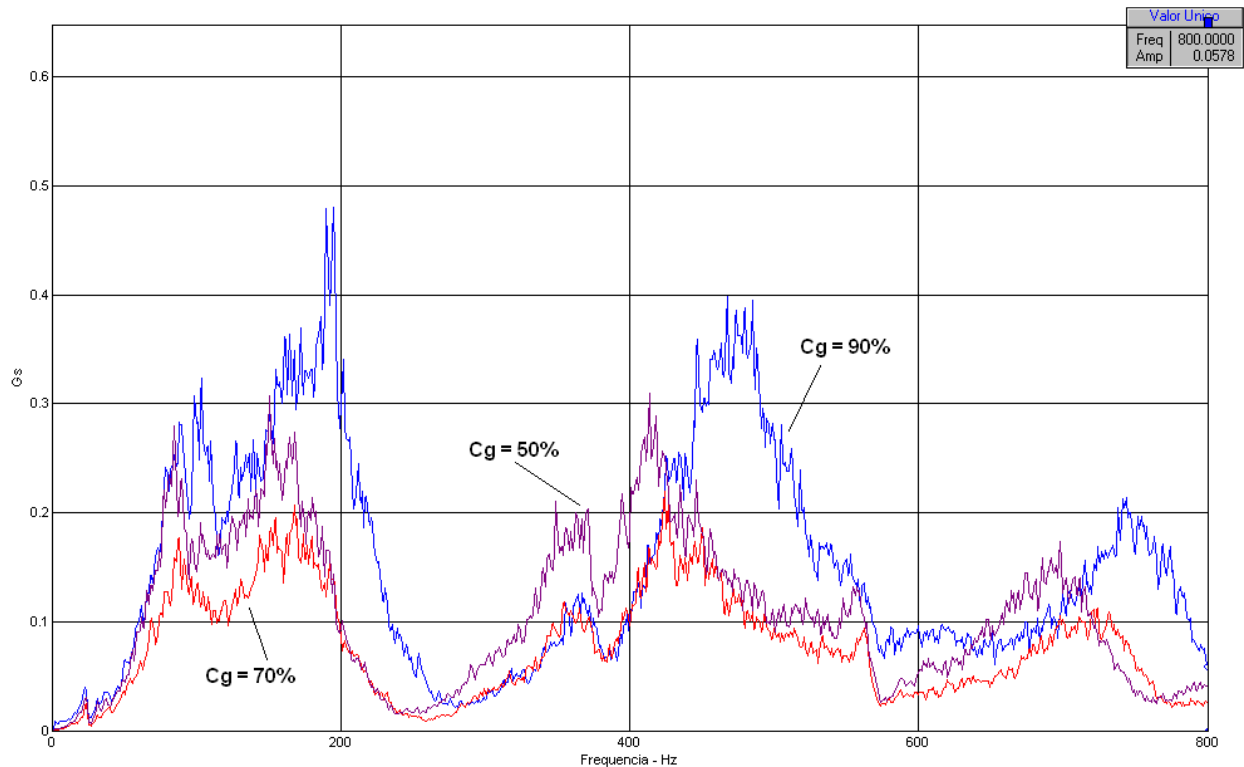


Figura 6. Espectros de vibração do tubo de 653 mm submetido à escoamentos com diferentes frações volumétricas de ar.

No método proposto é importante identificar as melhores faixas do espectro para que se possa determinar a fração volumétrica do escoamento em função da variação de frequência natural do tubo. Na Figura 6 nota-se que a frequência natural do tubo situada entre 600 e 800 Hz, apresenta maiores variações em função da fração volumétrica de ar presente no escoamento bifásico. Note que há um aumento evidente desta frequência natural com o aumento da fração volumétrica de ar, e que o mesmo não pode ser dito para as outras frequências naturais do tubo.

A variação da frequência natural do tubo compreendida entre 600 e 800 Hz em função da fração volumétrica de ar pode ser observada na Figura 7. Nota-se uma variação de cerca de 160 Hz para uma variação de 0 a 100% de fração volumétrica de ar, o que resulta em uma boa sensibilidade do método na determinação da fração volumétrica das fases do escoamento.

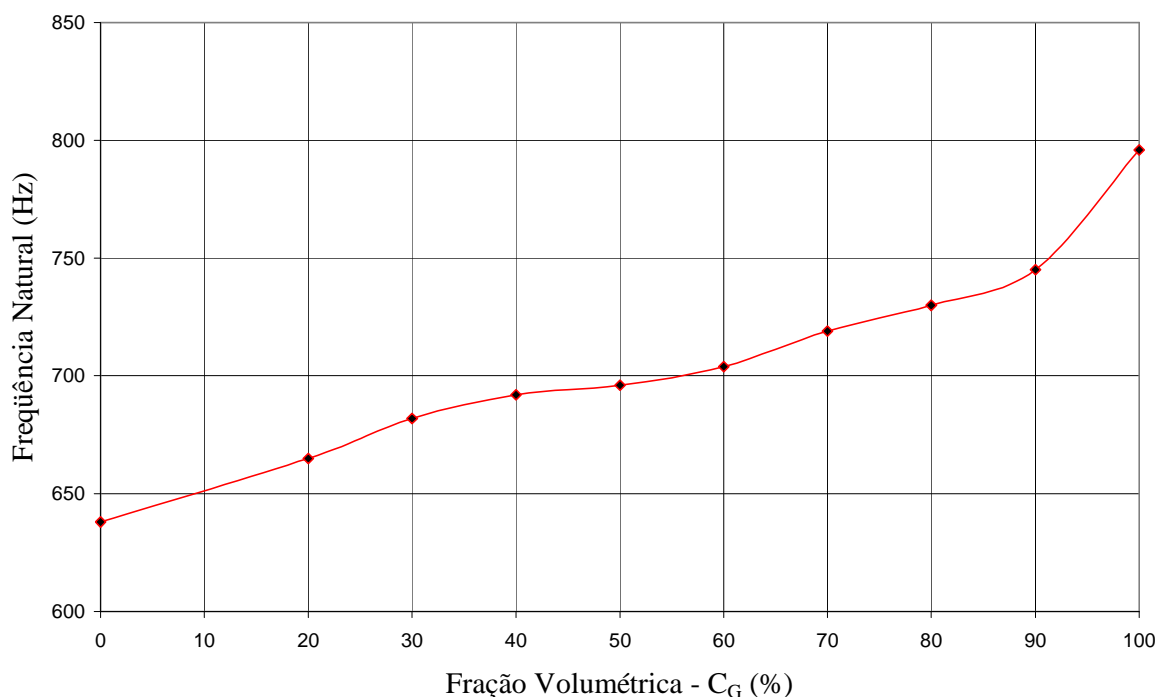


Figura 7. Variação de frequência natural do tubo de 653 mm em função da fração volumétrica de ar.

Testes adicionais foram agora realizados variando-se a velocidade de mistura do escoamento e mantendo-se a fração volumétrica constante. Estes tiveram como finalidade verificar as variações de frequência natural causadas por diferentes velocidades de mistura, o que causa mudanças na distribuição espacial das fases. A Figura 8 mostra os resultados de testes realizados com escoamentos possuindo diferentes frações volumétricas de ar ($C_G = 40, 50, 70$ e 90%) e velocidades de mistura que variaram de 2 a 5 m/s. Nota-se na Figura 8 que o comportamento da variação da frequência natural do tubo em função da fração volumétrica se apresenta de forma semelhante para as diferentes velocidades de mistura. Deve-se ressaltar que cada ponto no gráfico da figura 8 corresponde a um valor de frequência natural obtido de espectros de frequência como o que foi apresentado na Figura 6, ou seja, provenientes de médias realizadas com 40 espectros.

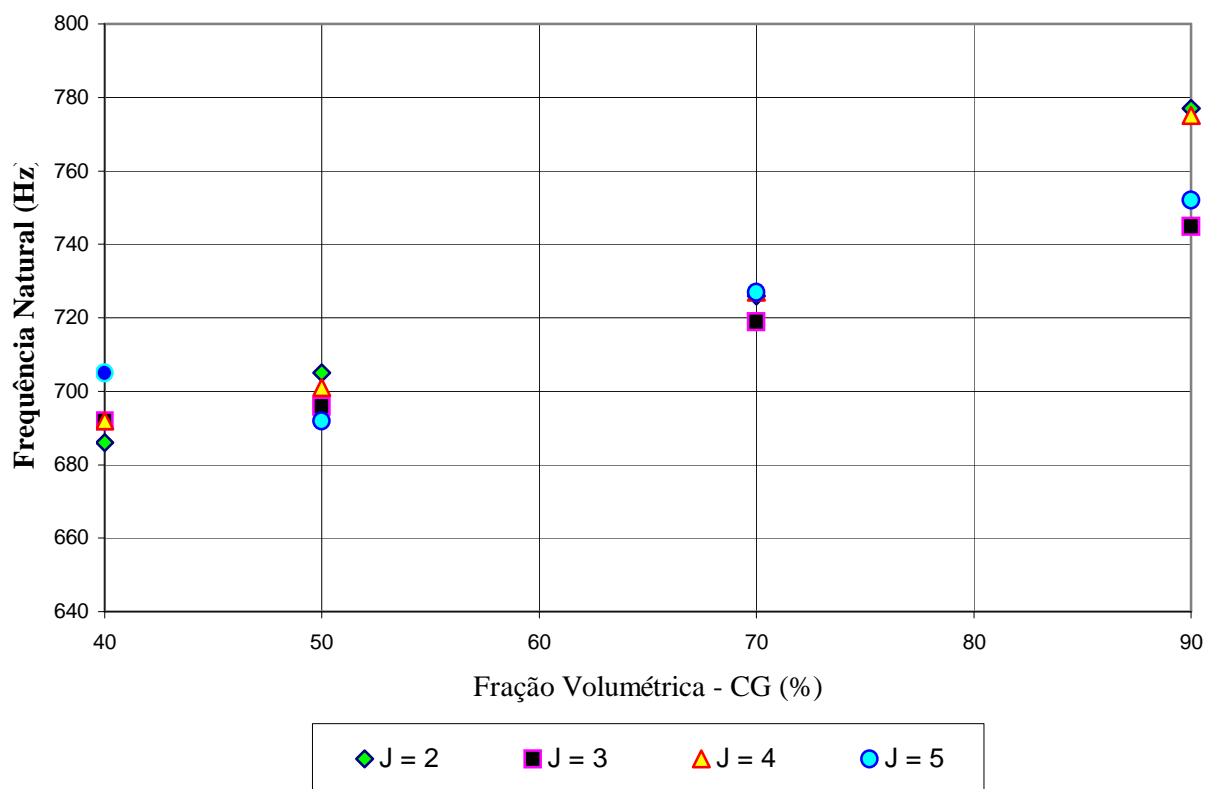


Figura 8. Variação de frequência natural do tubo de 653 mm em função da velocidade de mistura do escoamento bifásico.

7. CONCLUSÕES

O presente trabalho apresenta um método para determinação da fração volumétrica de escoamentos bifásicos de líquido e gás baseado na variação de frequência natural do tubo no interior do qual ocorre o escoamento. Resultados preliminares de testes realizados com diferentes condições de escoamento mostram que o método apresenta grande sensibilidade às variações de fração volumétrica do escoamento, entretanto ainda necessita de aperfeiçoamentos que permitam reduzir sua incerteza na determinação das frações volumétricas. Testes adicionais também devem ser realizados em uma faixa mais ampla de velocidades de mistura e com o tubo em diferentes posições, principalmente na posição vertical.

8. REFERÊNCIAS

- Gama, A. L., Ferreira, L. R. dos S. and Filho, P. H. A. W. 2009, "Experimental Study on the Measurement of Two-Phase Flow Rate Using Pipe Vibration", 20th International Congress of Mechanical Engineering.
- Mandhane J.M., Gregory G. A. and Aziz K., 1974, "A Flow Pattern Map for Gas-liquid Flow in Horizontal Pipes," Int. J. Multiphase Flow 1, 537-53.

9. DIREITOS AUTORAIS

Os autores são os únicos responsáveis pelo conteúdo do material impresso incluído no seu trabalho.



VI CONGRESSO NACIONAL DE ENGENHARIA MECÂNICA
VI NATIONAL CONGRESS OF MECHANICAL ENGINEERING
18 a 21 de agosto de 2010 – Campina Grande – Paraíba - Brasil
August 18 – 21, 2010 – Campina Grande – Paraíba – Brazil

MEASUREMENT OF VOLUMETRIC FRACTIONS OF TWO-PHASE FLOW BASED ON ANALYSIS OF VIBRATION

Ranieri Ambrosio Merini, ramerini@petrobras.com.br
Antonio Lopes Gama, agama@vm.uff.br
Yan Barboza Bastos, yanbastos@hotmail.com
Paulo Henrique Azeredo Walter Filho, paulowalter@yahoo.com.br

UFF, Department of Mechanical Engineering, Rua Passo da Pátria 156, Niteroi, RJ - 24210-240

***Abstrac:** This paper proposes the development of a non-intrusive measurement system of volume fraction of two-phase flow gas-liquid based on vibration analysis. The method is to excite a conduit at high frequencies using an actuator and measure the vibration produced with accelerometers. Signs of excitement and response of the conduit are sent to a unit of signal processing functions to generate frequency response of the conduit. Correlations are established between the variation of natural frequencies of the conduit with the volume fraction of the phases of liquid and gas. Numerical and experimental results show that the method is capable of great sensitivity to variations in volume fraction of two-phase flow in different flow regimes.*

***Keywords:** two-phase flow, vibration analysis, volume fraction*