

5º CONGRESSO BRASILEIRO DE PESQUISA E DESENVOLVIMENTO EM PETRÓLEO E GÁS



TÍTULO DO TRABALHO:

DETERMINAÇÃO EXPERIMENTAL DE PROPRIEDADES DO ESCOAMENTO GÁS-LÍQUIDO INTERMITENTE HORIZONTAL ATRAVÉS DE TÉCNICAS DE VISUALIZAÇÃO E TRATAMENTO DE IMAGENS

AUTORES:

Fernando A. Grangeiro Filho, Antonio C. Bannwart, Vanessa C. Bizotto, Natache A. Sassim

INSTITUIÇÃO:

Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP)

Este Trabalho foi preparado para apresentação no 5º Congresso Brasileiro de Pesquisa e Desenvolvimento em Petróleo e Gás- 5º PDPETRO, realizado pela a Associação Brasileira de P&D em Petróleo e Gás-ABPG, no período de 15 a 22 de outubro de 2009, em Fortaleza-CE. Esse Trabalho foi selecionado pelo Comitê Científico do evento para apresentação, seguindo as informações contidas no documento submetido pelo(s) autor(es). O conteúdo do Trabalho, como apresentado, não foi revisado pela ABPG. Os organizadores não irão traduzir ou corrigir os textos recebidos. O material conforme, apresentado, não necessariamente reflete as opiniões da Associação Brasileira de P&D em Petróleo e Gás. O(s) autor(es) tem conhecimento e aprovação de que este Trabalho seja publicado nos Anais do 5ºPDPETRO.

DETERMINAÇÃO EXPERIMENTAL DE PROPRIEDADES DO ESCOAMENTO GÁS-LÍQUIDO INTERMITENTE HORIZONTAL ATRAVÉS DE TÉCNICAS DE VISUALIZAÇÃO E TRATAMENTO DE IMAGENS

Abstract

Multiphase flow is very common in petroleum industry, oftentimes involving harsh environments and fluids. In the present work, a preliminary study using high speed filming (1000 fps) was used to determine some variables such as velocities, lengths and frequencies of elongated bubble and liquid slug. The experimental setup consists of a pump, a resistance, mass flow meters, thermocouples, a heat exchanger and an acrylic visualization section where the pictures were taken aided by a flash LED. The results show that more measures need to be taken in order to improve the results and reduce the standard deviation. Also, the technique can be used to improve or validate another technique, such as measurements with ultra-sound.

Introdução

Na indústria de petróleo é comum ocorrer escoamento multifásico do óleo combinado com água, gás e/ou areia. O conhecimento das características do escoamento auxilia desde o dimensionamento das plataformas e das linhas de produção até a escolha do mecanismo adequado de elevação (surgência, BCS, gás-lift).

No entanto, o escoamento multifásico é um fenômeno cuja análise é mais complexa do que a aplicada ao escoamento monofásico, quando processos correlatos são analisados. Os principais motivos para isso são:

- A presença de mais de uma fase no escoamento exige um número adicional de equações para o fechamento dos modelos matemáticos que expressam o fenômeno físico;
- No escoamento multifásico geralmente há uma distribuição espacial das fases, a qual não é conhecida a priori e é um fenômeno de difícil quantificação;
- Há mudanças de padrões de escoamento que dependem de características físicas e operacionais do sistema. Estes padrões alteram e/ou determinam os fenômenos de transferência interfacial, isto é, os processos de transferência de massa, de quantidade de movimento e energia entre as fases;
- As equações diferenciais que resultam das formulações são de difícil integração.

A visualização das imagens do escoamento multifásico do tipo *slug flow* tem como objetivo principal verificar a sua potencialidade para caracterização de escoamento bifásico. O uso de uma câmera rápida é uma técnica não intrusiva, e através desta foi possível obter a velocidade e o comprimento do pistão de ar e a frequência das bolhas. Posteriormente, a análise das imagens será feita juntamente com análise do ultra-som. Tratando-se de um estudo inicial, a técnica foi aplicada somente ao escoamento água-ar horizontal no padrão intermitente.

Metodologia

O escoamento bifásico intermitente horizontal foi gerado no aparato experimental localizado no Laboratório de Petróleo (LABPETRO) da UNICAMP (Figura 1).

A água proveniente dos reservatórios foi injetada na tubulação de aço galvanizado com 6 cm de diâmetro através de uma moto-bomba, onde a vazão mássica foi controlada através de um inversor de frequência e a temperatura controlada por um aquecedor de passagem de 40.000 W. Em seguida, a vazão mássica de água foi medida por um medidor do tipo *Coriollis*. Após o ponto onde a vazão de água foi medida, o ar comprimido foi injetado na tubulação e sua vazão mássica medida através de um elemento de fluxo laminar (ELF). A injeção de ar no circuito ocorreu através de um tubo de alumínio com pequenos furos ao longo de seu comprimento e espaçados igualmente, visando homogeneizar a mistura água-ar.

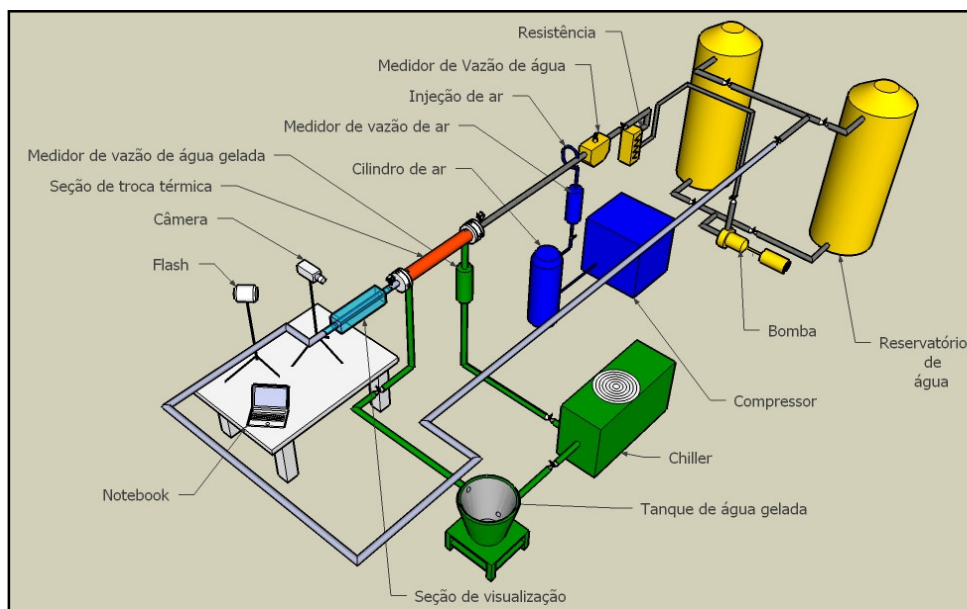


Figura 1. Aparato experimental usado para gerar e capturar as imagens do escoamento bifásico ar-água.

A mistura percorreu um trecho de 17,74 m a fim de garantir que o escoamento fosse completamente desenvolvido até entrar na seção de troca térmica composta por 2 tubos concêntricos, sendo o interno de cobre com 2 mm de espessura e diâmetro interno de 6,0 cm por onde a mistura água-ar fluiu, e o externo, de PVC, com espessura de 10 mm e diâmetro interno de 7,5 cm por onde a água gelada, proveniente do *Chiller*, cuja vazão mássica também foi medida por um medidor de vazão *Coriollis*, escoou e trocou calor com a mistura. Nessa seção de troca térmica foram medidas as temperaturas da entrada e da saída da seção através de termopares do tipo J, assim como a diferença de pressão e a pressão local, medidas por sensores de pressão.

Os sinais de todos os sensores de pressão e vazão, de 4 a 20 mA, foram enviados à um módulo de aquisição de sinais CompactDAQ da *National Instruments* composto por um módulo de corrente, NI9203, onde foi possível medir e adquirir os sinais dos medidores de pressão e vazão, e um módulo de tensão NI9219, onde foi possível adquirir os sinais dos termopares. Esses sinais foram amostrados em gráficos do *software Labview Signal Express* à uma taxa de 50 medidas por segundo para cada variável. O valor usado para fins de cálculo foi uma média aritmética de 500 pontos adquiridos em 10 segundos para cada variável.

Após a seção de troca térmica, a mistura passou pela seção de visualização composta por um tubo de acrílico com 6,0 cm de diâmetro envolvida por um trecho retangular de acrílico com 0,74 m de comprimento. Posicionada em frente à seção de visualização estavam a câmera digital *Motion ProX3* (Redlake), capaz de adquirir até 1500 quadros por segundo e luminária do tipo LED (Dantec Dynamics).

Foram feitos estudos em triplicata para cada um dos três pares de vazão ar-líquido e velocidades superficiais, conforme mostrado na Tabela 1.

As filmagens foram realizadas a uma taxa de 1000 quadros por segundo para obtenção da velocidade e do comprimento.

Tabela 1. Vazões de ar e líquido utilizadas no experimento.

Cenário	Vazão de ar (Kg/s)	Vazão de líquido (Kg/s)	Vsl (m/s)	Vsg (m/s)
1	0.0012	2.91	1.38	0.28
2	0.0019	2.04	0.98	0.54
3	0.0026	1.2	0.58	0.8

Processamento de imagens

Velocidade da bolha alongada

Para obter os parâmetros necessários das imagens foi usado o *software Image Pro*. O procedimento adotado para tratar as imagens foi:

- 1) Com a imagem da régua posicionada no centro da seção de visualização foi feita a calibração do software IMAGE PRO que permitiu a conversão de *pixels* para centímetros
- 2) Os quadros em que a frente da bolha de ar começava e terminava a serem mostrados na tela foram identificados.
- 3) No quadro em que a bolha começava a ser mostrada na tela foi medida a distância até o limite esquerdo da imagem como mostra a figura 2.a
- 4) No último quadro em que a bolha podia ser vista na tela era medida a distância da sua frente até o limite direito da imagem, onde a altura da posição a ser medida era a mesma da medida tomada no item 4, como mostra a figura 2.b

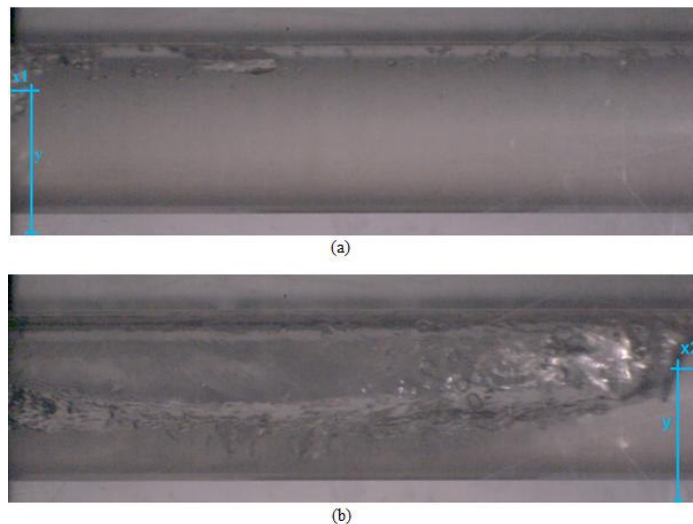


Figura 2. Medidas de comprimento (a) Após a bolha aparecer na imagem (b) Antes que a bolha deixe a imagem.

- 5) As distâncias calculadas nos itens 3 e 4 eram subtraídas da distância horizontal total da imagem que é fixa (23,05 cm)

$$\Delta s = 23,05 - x_1 - x_2$$

- 6) Como a câmera nomeia as imagens em ordem crescente de 0000 até 3915 então a diferença da numeração das imagens dividida pela frequência de aquisição da câmera (1000 quadros/segundo) foi usada para calcular o tempo que a bolha levou para percorrer o espaço calculado no item 5.

$$\Delta t = \frac{Quadro_{final} - Quadro_{inicial}}{1000}$$

- 7) Dividindo a distância medida no item 5 pelo tempo medido no item 6 foi possível calcular a velocidade da bolha. O procedimento descrito acima foi realizado para cada pistão de ar que pôde ser observado. A velocidade final de cada cenário foi obtida através da média aritmética das velocidades de cada bolha.

$$v = \frac{\Delta s}{\Delta t} = \frac{23,05 - x_1 - x_2}{(Quadro_{final} - Quadro_{inicial}) / frequência} = \frac{23,05 - x_1 - x_2}{(Quadro_{final} - Quadro_{inicial}) / 1000}$$

Comprimento da bolha alongada

Assumindo que a velocidade da bolha alongada é a velocidade média da bolha, foi fixado um ponto no limite direito da imagem no quadro em que a frente da bolha atinge esse limite. Então os quadros eram avançados até que a calda da bolha chegasse nesse ponto. Multiplicando a velocidade da frente da bolha pela diferença de quadros e dividindo pela frequência, foi possível calcular o comprimento da bolha.

$$\Delta S = v_{frente} \times \frac{Quadro_{final} - Quadro_{inicial}}{freq}$$

Velocidade do pistão de líquido

Para estimar a velocidade do pistão de líquido, foi considerado que a velocidade de uma bolha muito pequena, que era escolhida de forma aleatória, teria a mesma velocidade do líquido. Então, o mesmo procedimento adotado para identificar a velocidade da bolha alongado pistão de ar foi usado para estimar a velocidade dessa bolha.

Comprimento do pistão de líquido

Com a velocidade do pistão de líquido estimada, o tempo de passagem do pistão de líquido era determinado pela diferença de quadros entre o quadro em que um pistão de ar termina e o próximo inicia em um ponto fixo na imagem dividida pela taxa de aquisição da câmera. Então o tempo era multiplicado pela velocidade e o comprimento do pistão era encontrado. Nesse procedimento também foi assumido que o pistão de líquido escoava com velocidade constante.

Frequência das bolhas alongadas

Para estimar a frequência de bolhas, um ponto imaginário foi fixado na imagem e era realizada uma contagem de quantas bolhas passavam pelo ponto. Só eram consideradas para a contagem, bolhas completas. Então pela diferença de quadros entre a primeira e a última bolha que passava pelo ponto era possível saber a frequência. Logo,

$$f = \frac{Quantidade\ de\ bolhas\ inteiras}{tempo} = \frac{Quantidade\ de\ bolhas}{Quadro_{final} - Quadro_{inicial} / 1000}$$

Frequência unitária da bolha alongada

Uma célula unitária (Dukker e Hubbard, 1975) é composta por dois volumes de controle, sendo um relacionado ao filme de líquido e a bolha alongada e outro relacionado ao pistão de líquido conforme mostra a figura 3.

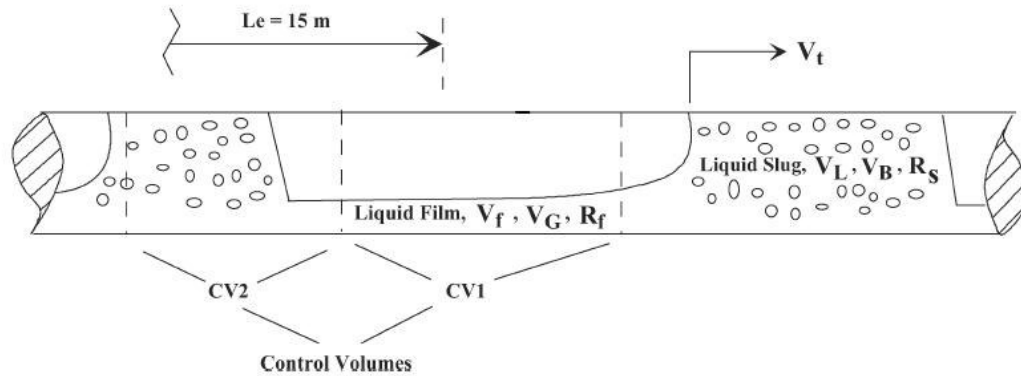


Figura 3. Modelo da célula unitária.

A frequência unitária da célula é o inverso do tempo levado entre o instante em que a frente de uma bolha alongada passa por um ponto até o instante em que a bolha seguinte passe pelo mesmo ponto.

Para validar os resultados obtidos através das filmagens, foi realizada uma comparação com o modelo hidrodinâmico proposto por Taitel e Barnea (1990) onde todos os parâmetros eram calculados em função da altura do filme de líquido através de integração numérica.

Segundo o modelo, a velocidade da bolha alongada é calculada por:

$$V_t = 1,2V_s + V_d$$

Onde V_d é diferença entre a velocidade do filme de líquido e a velocidade da bolha e V_s é a velocidade superficial do líquido somada à velocidade superficial do gás.

O comprimento do slug é calculado por:

$$L_p = \frac{U_t}{V_u} - L_f$$

Onde L_f é o comprimento do pistão de ar que está a sua frente e V_u é a frequência da célula unitária.

Incertezas

Para o cálculo das incertezas, o método utilizado foi proposto por Moffat, 1988. No método, uma variável V é determinada através de medidas das variáveis independentes x_i onde x_i é função de V .

O limite de incerteza, ΔV , pode ser estimado através do método da raiz quadrada da soma dos quadrados da expansão da série de Taylor da função f em torno do valor esperado V , truncada para os termos de primeira ordem, logo como a velocidade é calculada pelo quociente entre o espaço e o tempo,

$$\Delta V = \pm \sqrt{\left[\Delta \Delta s \left| \frac{\partial v}{\partial s} \right| \right]^2 + \left[\Delta \Delta t \left| \frac{\partial v}{\partial t} \right| \right]^2} = \pm \sqrt{\left(\Delta \Delta s \frac{1}{\Delta t}\right)^2 + (\Delta \Delta t \cdot s \cdot \ln(t))^2}$$

Analogamente:

$$\Delta s = \pm \sqrt{\left[\Delta \Delta v \left| \frac{\partial s}{\partial v} \right| \right]^2 + \left[\Delta \Delta t \left| \frac{\partial s}{\partial t} \right| \right]^2} = \pm \sqrt{(\Delta \Delta v \Delta t)^2 + (\Delta \Delta t \Delta v)^2}$$

Onde s e t são respectivamente a menor unidade de comprimento que pode ser medida através do software (0,001 m) e o tempo total de uma filmagem dividido pela quantidade de quadros (0,001 segundos).

Resultados e Discussão

Foi realizada uma média dos parâmetros obtidos em cada filmagem. A tabela 2 mostra as médias das velocidades obtidas nos três cenários.

Tabela 2. Velocidades da bolha alongada e do pistão de líquido.

Cenário	Vt (m/s)	Incerteza	Desvio Padrão (%)	Vl (m/s)	Incerteza	Desvio Padrão (%)
1	2.10	0.05	2.76	1.49	0.04	7.02
2	1.96	0.05	5.65	1.23	0.04	11.14
3	1.82	0.05	4.61	1.03	0.04	10.07

Nota-se da tabela 2 que à medida que a vazão do líquido é diminuída e a de ar aumentada, as velocidades do da bolha alongada e do pistão de líquido diminuem. Isso mostra que a vazão do líquido tem mais influência na velocidade do escoamento do que a vazão de ar.

Uma diminuição na vazão de líquido e um aumento na vazão de ar fazem com que as bolhas alongadas se tornem mais compridas, causando uma diminuição na frequência de ocorrência das bolhas alongadas, ou seja, como as bolhas se tornaram mais compridas, por um mesmo período de tempo, menos bolhas irão fluir. Essa relação pode ser observada nas tabelas 3 e 4.

Tabela 3. Comprimento da bolha alongada e do pistão de líquido.

Comprimento						
Cenário	Bolha alongada (m)	Incerteza	Desvio Padrão (%)	Pistão de Líquido (m)	Incerteza	Desvio Padrão (%)
1	0.34	0.01	20.9	0.58	0.02	62.61
2	0.97	0.01	19.72	0.51	0.02	31.26
3	2.79	0.01	4.92	0.56	0.02	11.88

Tabela 4. Frequência de passagem das bolhas.

Cenário	Frequência	%erro
1	2.31	5.13
2	1.48	5.83
3	0.93	5.73

Ainda da tabela 3, a porcentagem de erro das medidas de comprimento são bastante elevadas, o que mostra que por mais que sejam mantidas as condições do experimento, os comprimentos dos pistões variam muito. A porcentagem do erro em medidas do comprimento do slug foram elevadas, o

que mostra que o método escolhido para calcular essa variável pode não ter sido adequado já que a velocidade de uma bolha muito pequena era considerada igual à velocidade do pistão de líquido. Em alguns pistões de líquido, eram encontradas apenas bolhas de comprimento mais elevado, o que dificultava a medida da velocidade do pistão de líquido, já que quanto maior a bolha, maior a sua velocidade em relação ao líquido. A figura 4 mostra bolhas no pistão de líquido que caso fossem usadas para determinar a velocidade do pistão, o valor ia dar muito acima do esperado.

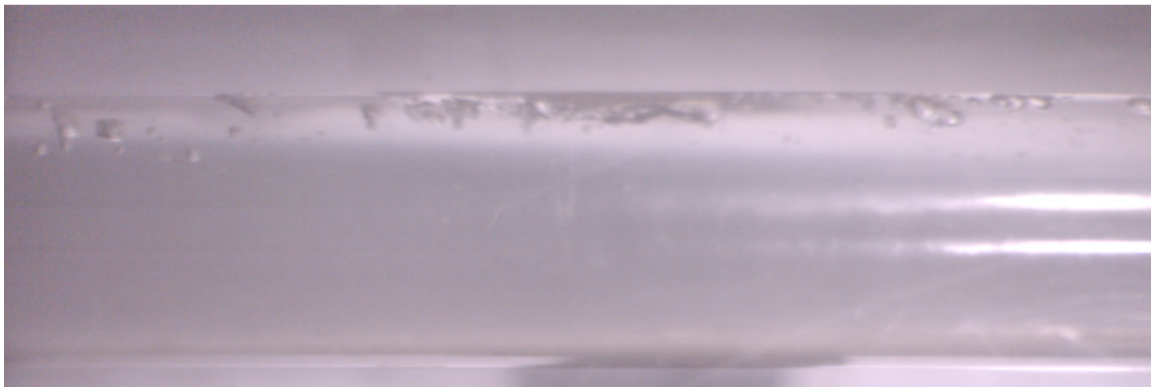


Figura 4. Pistão de líquido com bolhas de ar que impossibilita a medição da velocidade.

A figura 5 mostra um pistão escoando quando as vazões mássicas do ar e do líquido são respectivamente 0,0012 Kg/s e 2,91 Kg/s. O comprimento desse pistão medido através das imagens foi de 0,3 metros. O que é coerente com a imagem levando em consideração que a medida de uma lateral até a outra da imagem é de 0,24 metros e que uma pequena parte da calda da bolha alongada não coube na imagem.

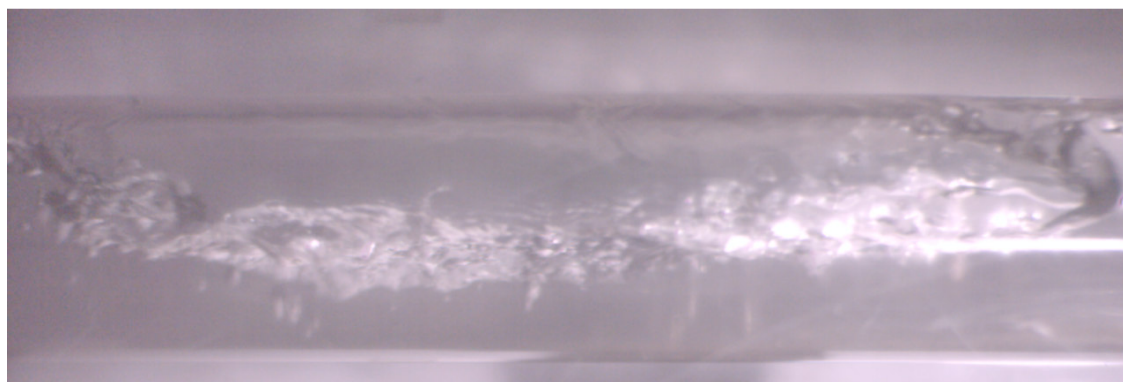


Figura 5. Bolha alongada que pode ser visualizada completamente pela técnica.

Comparando os dados obtidos do experimento com os dados obtidos através do modelo de Taitel e Barnea (1990), a diferença entre os dados foram significativas, provavelmente pelas considerações feitas pelo autor, como por exemplo, que o comprimento do pistão de ar não varia. A figura 6 mostra a diferença entre as velocidades calculadas pelo modelo e medidas experimentalmente para o cenário 3.

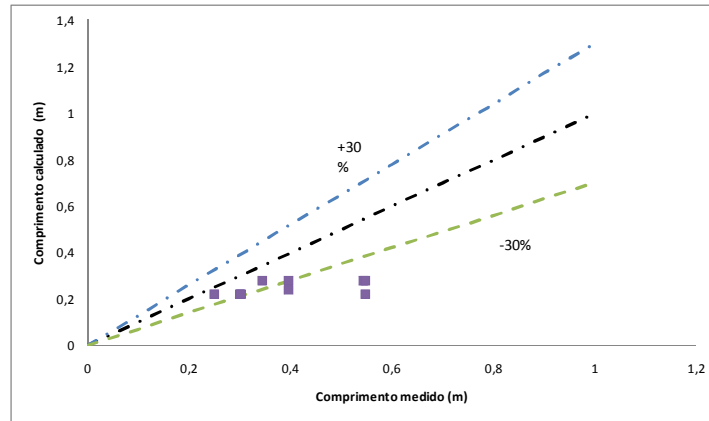


Figura 6. Velocidade medida x Velocidade calculada. (Cenário3)

Conclusões

Após esse estudo preliminar, é possível expandir a técnica para mais vazões de modo a proporcionar uma melhor validação da técnica.

A filmagem é uma metodologia que não consegue extrair muitas características do escoamento, mas pode ser utilizada como ferramenta para melhorar outras técnicas como o ultra-som que é uma técnica que será estudada em breve.

Para medidas de velocidades e comprimento da bolha alongada, a técnica se mostrou eficiente, porém para medir a velocidade e o comprimento do pistão de líquido os valores não foram muito bons devido à forma de como essas características (velocidade e comprimento) foram medidas. Porém, com essa técnica não existe outra forma de medir, já que é necessário enxergar o movimento do pistão e o mesmo é transparente.

Como o tempo de cada aquisição é de apenas 4 segundos, para tornar as medidas mais confiáveis é necessário aumentar a quantidade aquisição para cada ponto a fim de se ter uma medida mais confiável.

Agradecimentos

Os autores agradecem a CAPES pelo apoio financeiro.

Referências Bibliográficas

DUKLER, A. E., and HUBBARD, M. G., *A Model for Gas-Liquid Slug Flow in Horizontal and Near Horizontal Tubes*, Ind. Eng. Chem.Fundam., vol. 14, no. 4, pp. 337–347, 1975.

Franca F., Bannwart A., Camargo R., Gonçalves M. *Mechanistic Modeling of the Convective Heat Transfer Coefficient in Gas-Liquid Intermittent Flows*. Heat Transfer Engineering. 2008 Dec ;29(12):984-998.

MOFFAT R. Describing the Uncertainties in Experimental results. *Experimental Thermal and Fluid Science*. 1988 Jan ;1(1):3-17.

WALLIS, G. B. *One-dimensional Two-phase Flow*. McGraw-Hill Book Company.

TAITEL Y., BARNEA. *A Consistent Approach for Calculating Pressure Drop in Inclined Slug Flow*. Chemical Engineering Science. 1990 ;45(5):1199-1206.