

ALMEIDA, J. A. **Sistemas de Velocimetria por Imagens de Partículas**. Tese (Doutorado), Faculdade de Engenharia Mecânica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 1997.

ANICETO, P. H; **Desenvolvimento de Técnica Baseada em Fluorescência para Medição de Escoamento Bifásico em Regime de Golfada**. Dissertação de Mestrado — Departamento de Engenharia Mecânica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro. 2007.

BAKER, O., **Simultaneous Flow of Oil and Gas**, Journal of Oil and Gas. vol. 53, p-185, 1954.

BARROS, J.M. **Estudo Experimental do Escoamento Axial através de Região Anular com Rotação do Cilindro Interno**. Dissertação de Mestrado - Faculdade de Engenharia Mecânica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2007.

BENDIKSEN, K.H. **An experimental investigation of the motion of long bubbles in inclined tubes**. International Journal of Multiphase flow. Vol. 4, pp. 467-483, 1984.

BATHCELOR, G. K. **The Theory of Homogeneous Turbulence**. Cambridge, England:University Press, 1982.

BERTOLA, V. **Slug velocity profiles in horizontal gas-liquid flow. Experiments in Fluids**. Vol. 32, pp. 722-727, 2002.

BRILL, J. P.; SCHMIDT, Z.; COBERLY, W. A.; HERRING, J. D. & MOORE, D. W. **Analysis of two-phase tests in large-diameter flow lines in Prudhoe Bay Field**. SPE Journal, pp. 363-377, 1981.

CARPINTERO-ROGERO, E.; KROESS, B.; SATTELMAYER, T. **Simultaneous HS-PIV and shadowgraph measurements of gas-liquid flows in a horizontal pipe**. 13th Int. Symp. on Applications of Laser techniques to Fluid Mechanics, 2006

COOK, M. C. & BEHNIA, M. **Slug length prediction in near horizontal gas-liquid intermittent flow.** Chemical Engineering Science. Vol. 55, pp. 2009-2018, 2000.

COOK, M. C. & BEHNIA, M. **Film profiles behind liquid slugs in gas-liquid pipe flow.** A.I.Ch.E. Journal, Vol. 43, pp. 2180-2186, 1997.

COOK, M. C. & BEHNIA, M. **Bubble motion during inclined intermittent flow.** International Journal of Heat and Fluid Flow, Vol 22, pp. 543-551, 2001.

DHULESIA, BERNICOT & DEHEUELS. **Statistical analysis and modelling of slug lengths,** 5 th Int. Conference on Multiphase Production, 1991.

FABRE, J. ; LINÉ, A.. **Modeling of two-phase slug flow.** Annual Reviews Fluid Mech. Vol. 24, pp 21-46, 1992.

FAGUNDES NETTO, J. R. **Dynamique des poches de gaz isolées en écoulement permanent horizontal,** Tese de Doutorado - Institut National Polytechnique de Toulouse, 1999.

FAGUNDES NETTO, J. R.; FABRE, J.; PÉROSSON L.. **Shape of long bubbles in horizontal slug flow.** International Journal of Multiphase Flow, vol.1, pp. 1129-1160, 1999.

FERRÉ, D. **Ecoulements diphasiques á poches et à bouchons em conduite.** Tese de Doutorado - Ver. Inst. Fr. Pét., Vol. 34, pp.113-142, 1979.

FUJIWARA, A. et al. **Bubble deformation and flow structure measured by double shadow images and PIV/LIF.** Experiments in Fluids. Vol. 36. ed. Springer-Verlag, pp. 157-165, 2004.

GOMEZ, A. H. **Interaction hydrodynamique entre deux poches de gaz en tube.** Tese de Doutorado - Institut National Polytechnique de Toulouse, 2003.

GREGORY, G.A ; NICHOLSON, M.K. ; AZIZ, K. **Correlation of the liquid volume fraction in the slug for horizontal gas-liquid slug flow.** International Journal of Multiphase Flow. Vol. 1, pp. 33-39, 1978.

GREGORY, G.A ; NICHOLSON, M.K. ; AZIZ, K. **Intermittent two phase flow in horizontal predictive models.** The Canadian Journal of Chemical Engineering. Vol. 56, pp. 653-663, 1978.

GRESKOVICH, E.J.; SHRIER, A.L. **Slug Frequency in Horizontal Gas-Liquid Slug Flow**. Ind. Eng. Chem. Process Des. Develop. Vol. 11, Nº2, pp. 317-318, 1972.

HETSRONI, G., **Handbook of Multiphase Systems**,. Ed. Hemisphere-McGraw Hill. Bibliografia: p. 10.1-10.112. ISBN-10 00-702-8460-1, 1982.

HEWITT G.F. **Measurement of Two-Phase Flow** . Parameters-Academic Press, 1970.

HEYWOOD, N.I; RICHARDSON, J.F. **Slug flow of air-water mixtures in a horizontal pipe: Determination of liquid holdup by γ -ray absorption**. Chemical Engineering Science, Vol 34, pp 17-30, 1979.

HOLMAN,J.P. **Experimental Methods for Engineers**, McGraw Hill, 1984.

HOUT, R.; BARNEA, D.; SHEMER, L. **Translational velocities of elongated bubbles in continuous slug flow**. International Journal of Heat and Fluid Flow, Vol. 28, pp. 1333-1350, 2002.

HOUT, R.; SHEMER, L.; BARNEA, D. **Evolution of Hydrodynamic and Statistical Parameters of Gas-Liquid Slug Flow along Inclined Pipes**. Chemical Engineering Science, Vol. 58, pp. 115-133, 2003.

ISSA, R.I.; KEMPF, M.H.W. **Simulation of slug flow in horizontal and nearly horizontal pipes with the two-fluid model**. International Journal of Multiphase flow, Vol> 29 pp. 69-95, 2003.

KAWAJI, M. et al. **Study of liquid flow structure in horizontal cocurrent gas-liquid slug flow**. ANS Proc. 30th ASME/AICHE/ANS/AIAA National Heat Transfer Conference, 5-9 August, Portland, Oregon, pp. 79-88, 1995.

KAWAJI, M. **Two-phase flow measurements using a photochromic dye activation technique**. Nuclear Engineering and Design, Vol.184, pp. 379-392, 1998.

KVERNOLD, O. et al. **Velocity Distribution in Horizontal Slug flow**. International Journal of Multiphase flow, vol.10, nº. 4, pp. 441-457, 1984.

LEWIS, S.; FU, W.L.; KOJASOY, G. **Internal Flow structure description of slug pattern in a horizontal pipe.** International Journal of Heat and Mass Transfer, Vol. 45, pp. 3897-3910, 2002.

MANDHANE, J.M.; GREGORY, G.A. and AZIZ, K. **Flow-pattern map for gas-liquid flow in horizontal pipes,** International Journal of Multiphase Flow, Vol. 1, pp-537, 1974.

MOFFAT, R.J. **Contributions to the theory of single-sample uncertainty analysis.** ASME Journal of Fluids Engineering. Vol. 24, pp. 250-260, 1982.

NICKLIN, D. J. ; WILKES, J. O. ; DAVIDSON, J. F. **Two-phase flow in vertical tubes.** Trans. Instn Chem. Engrs. Vol. 40, pp. 61–68, 1962.

NOGUEIRA, S. et al. **Simultaneous PIV and pulsed shadow technique in slug flow: a solution for optical problems.** Experiments in Fluids, Vol. 35. ed. Springer-Verlag, pp. 598–609, 2003.

NYDAL, O.J.; PINTUS, S.; ANDREUSSI, P. **Statistical characterization of slug flow in horizontal pipes.** International Journal of Multiphase Flow, vol. 18, Nr3, pp. 439-452, 1992.

PRASSER, H. M.; BOETTGER, A; ZSCHAU, J. **A new electrode-mesh tomograph for gas-liquid flow.** Flow Measurement and Instrumentation, vol. 9, pp. 111-119, 1998.

PRATT, Willian, K. **Digital Image Processing (2º ed.).** John Wiley & Sons, Inc. New York, NY, 1991.

RAFFEL, M. et al **Particle Image Velocimetry – A Pratical Guide.** Second Edition, ed. Springer, ISBN 978-3-540-72307-0, 2007.

SAETHER et al. **The fractal statistics of liquid slug,** International Journal of Multiphase flow, Vol. 16, pp. 1117-1126, 1990.

SCHLICHTING, H. **Boundary Layer Theory,** McGraw-Hill, 1968.

SHARMA, S.; LEWIS, S.; KOJASOY G. **Local studies in horizontal gas–liquid slug flow.** Nuclear Engineering and Design, Vol. 184, pp. 305-318, 1998.

SHEMER, L.; and BARNEA, D. **Visualization of the instantaneous Velocity profiles in gas-liquid slug flow.** Physicochemical Hydrodynamics, Vol. 8, n.3, pp.243-253, 1987.

SHOHAM O. **Flow-pattern transition and characterization in gas-liquid two-phase flow in inclined pipes.** PhD dissertation, Tel Aviv U. Israel, 1982.

SPEEDING, P.L. and NGUYEN, V.T. **Regime Maps for Air-Water Two-Phase Flow.** Chem. Eng. Sci., vol 35, pp. 779-793, 1980.

TAITEL, Y.; BARNEA, D. **Two-phase slug flow.** Advances in Heat Transfer, Vol. 20, pp. 83–90, 1990.

TAITEL Y.; BARNEA D.; DUKLER, A. E., **A model for slug length distribution in gas-liquid slug flow.** International Journal of Multiphase flow, Vol. 19, pp. 829-838, 1993.

TSI Incorporated, **PIV System Reference Manual.** St Paul, EUA, 1997.

WALLIS, G. B. **One dimensional two-phase flow.** New York: Mc Graw-Hill, 1969.

Apêndice

A. Avaliação das incertezas de medição

O presente capítulo destina-se a apresentar a metodologia utilizada para estimativa da incerteza da vazão de líquido e da velocidade de deslocamento da bolha (u_t), durante a medição com o sistema de interruptores de feixe.

Nesta avaliação, foi adotada a metodologia comumente utilizada durante o estudo de propagação de incerteza, conforme visto no trabalho de Moffat 1982.

Considerando um resultado R de um experimento que dependa da medição de N grandezas independentes, x_i , cada uma delas com incerteza experimental δx_i . A incerteza do resultado, δR , pode ser avaliada como:

$$\delta R = \left\{ \left(\frac{\partial R}{\partial x_1} \delta x_1 \right)^2 + \left(\frac{\partial R}{\partial x_2} \delta x_2 \right)^2 + \dots + \left(\frac{\partial R}{\partial x_N} \delta x_N \right)^2 \right\}^{1/2} \quad \text{Eq. (A.1)}$$

Nesta equação, as derivadas parciais, $\frac{\partial R}{\partial x_i}$, representam a sensibilidade do resultado a cada variável medida.

A.1. Incerteza da vazão medida pelo rotâmetro.

A vazão de líquido é definida segundo a eq. (A.2):

$$Q_i = \frac{m}{\rho t} \quad \text{Eq. (A.2)}$$

Onde m é a massa medida na balança, ρ é a massa específica e t representa o tempo.

De acordo com a teoria proposta, a incerteza da vazão de líquido foi calculada pela seguinte equação:

$$\delta Q = \left(\left(\frac{\partial Q}{\partial m} \delta m \right)^2 + \left(\frac{\partial Q}{\partial t} \delta t \right)^2 \right)^{1/2} \quad \text{Eq. (A.3)}$$

Para este cálculo, a incerteza da massa específica do líquido foi desprezada. Derivando a eq. (A.2), em função da massa e do tempo, têm-se as equações A.4 e A.5 abaixo:

$$\frac{\partial Q}{\partial m} = \frac{1}{\rho t} \quad \text{Eq. (A.4)} \quad \text{e} \quad \frac{\partial Q}{\partial t} = -\frac{m}{\rho t^2} \quad \text{Eq. (A.5)}$$

A incerteza da balança utilizada na medida da massa, δm , e a incerteza do tempo, δt , foram assumidas como 0,01kg e 0,5 segundos respectivamente. Na tabela A.1, observa-se as incertezas envolvidas nas vazões medidas durante os testes.

Tabela A.1 – Estimativa da incerteza na medição de vazão.

Q teórica (l/h)	Q medida (l/h)	t (s)	∂Q (l/h)	$\frac{\partial Q}{Q}$ (%)
300	297	121.33	1.26	0.4%
400	401	89.67	2.27	0.6%
500	478	75.33	3.21	0.7%
700	676	53.23	6.39	0.9%
900	881	40.84	10.83	1.2%

A.2.

Incerteza da medição da velocidade de deslocamento da bolha e do pistão.

A velocidade de deslocamento da bolha foi medida com base na equação apresentada no capítulo 5, eq. (5.1), apresentada abaixo:

$$u_{ti} = \frac{L}{\Delta t} \quad \text{Eq. (A.6)}$$

$$\text{Onde: } \Delta t = t_2 - t_1 \quad \text{Eq. (A.7)}$$

É a diferença entre os tempos de passagem do nariz da bolha pelos sensores interruptores de feixe.

Inicialmente será feito o cálculo da incerteza do diferencial de tempo ($\delta \Delta t$), equação A.7. Para esta variável, a seguinte equação é válida:

$$\delta \Delta t = \left(\left(\frac{\partial t_1}{\partial t} \delta t \right)^2 + \left(\frac{\partial t_2}{\partial t} \delta t \right)^2 \right)^{1/2} \quad \text{Eq. (A.8)}$$

Desenvolvendo, chega-se a:

$$\delta\Delta t = (2\delta t^2)^{1/2} \quad \text{Eq. (A.9)}$$

A incerteza do tempo medido é o inverso da sua frequência de aquisição (1kHz), o que leva ao valor de 0,001s. Desta forma, a incerteza de Δt é de 0.00141s, o que representa cerca de 3% da diferença de tempo medida.

Voltando ao desenvolvimento da equação A.6 para o cálculo da incerteza, chega-se à seguinte equação, que pode ser aplicada tanto para a bolha quanto para o pistão de líquido.

$$\delta V = \left(\left(\frac{\partial V}{\partial L} \delta L \right)^2 + \left(\frac{\partial V}{\partial \Delta t} \delta \Delta t \right)^2 \right)^{1/2} \quad \text{Eq. (A.10)}$$

A derivada da velocidade em função da distância entre os canais e em função do tempo, são definidas pelas equações A.11 e A.12, respectivamente:

$$\frac{\partial V}{\partial \Delta t} = -\frac{L}{\Delta t^2} \quad \text{Eq. (A.11)}$$

$$\frac{\partial V}{\partial L} = \frac{1}{\Delta t} \quad \text{Eq. (A.12)}$$

A incerteza na medição na distância entre os canais, δL , foi adotada como 0.0005 metros. Na Tabela A.2 encontra-se a estimativa da incerteza associada à medição da velocidade do nariz da bolha (u_t), enquanto que na Tabela A.3, são apresentados os resultados da velocidade do pistão (V_p).

Tabela A.2 – Estimativa da incerteza na medição da velocidade da bolha.

Teste	u_t média (m/s)	Δt médio (s)	δu_t (m/s)	$\delta u_t / u_t$ (%)
1	1.27	0.0393	0.048	3.7%
2	1.44	0.0346	0.061	4.2%
3	1.53	0.0325	0.069	4.5%
4	1.58	0.0316	0.073	4.6%
5	1.76	0.0284	0.089	5.1%
6	1.95	0.0257	0.109	5.6%

Tabela A.3 – Estimativa da incerteza na medição da velocidade do pistão.

Teste	V_p média (m/s)	Δt médio (s)	δV_p (m/s)	$\delta V_p / V_p$ (%)
1	0.97	0.0513	0.029	2.9%
2	1.06	0.0472	0.034	3.2%
3	1.20	0.0418	0.042	3.5%
4	1.32	0.0380	0.051	3.9%
5	1.35	0.0369	0.054	4.0%
6	1.52	0.0330	0.067	4.4%

A.3.**Incerteza na medição do comprimento da bolha e do pistão.**

A determinação do comprimento da bolha e do pistão foi baseada de acordo com a equação A.13 apresentada abaixo:

$$L_{b,p} = V_{b,p} * \Delta t \quad \text{Eq. (A.13)}$$

Onde os índices subscritos **b** e **p** representam a bolha e o pistão respectivamente. Desenvolvendo esta equação para estimativa da incerteza dos comprimentos, tem-se a seguinte equação, que pode ser aplicada tanto para a bolha quanto para o pistão de líquido.

$$\delta L = \left(\left(\frac{\partial L}{\partial V_{b,p}} \delta V_{b,p} \right)^2 + \left(\frac{\partial L}{\partial \Delta t} \delta \Delta t \right)^2 \right)^{1/2} \quad \text{Eq. (A.14)}$$

A derivada do comprimento em função da do tempo de passagem interruptor de feixe e da velocidade, são definidas pelas equações A.15 e A.16, respectivamente:

$$\frac{\partial L}{\partial \Delta t} = V_{b,p} \quad \text{Eq. (A.15)}$$

$$\frac{\partial L}{\partial V_{b,p}} = \Delta t \quad \text{Eq. (A.16)}$$

A incerteza na medição da velocidade na medição do intervalo de tempo foram calculadas anteriormente. Na Tabela A.4 encontra-se a estimativa da

incerteza associada à medição do comprimento da bolha (L_b), enquanto que na Tabela A.5, são apresentados os resultados da incerteza do comprimento do pistão (L_p).

Tabela A.4 – Estimativa da incerteza na medição do comprimento da bolha.

Teste	L_b médio (m)	Δt médio (s)	δL_b (m)	$\delta L_b / L_b$ (%)
1	1.81	1.4174	0.067	3.7%
2	1.18	0.8154	0.050	4.2%
3	0.64	0.4198	0.029	4.5%
4	2.63	1.6947	0.123	4.7%
5	1.63	0.9280	0.083	5.1%
6	1.08	0.5547	0.061	5.6%

Tabela A.5 – Estimativa da incerteza na medição do comprimento do pistão.

Teste	L_p médio (m)	Δt médio (s)	δL_p (m)	$\delta L_p / L_p$ (%)
1	0.79	0.4556	0.013	1.7%
2	0.64	0.3337	0.011	1.8%
3	0.50	0.2607	0.011	2.2%
4	1.26	0.3507	0.018	1.4%
5	1.09	0.2851	0.015	1.4%
6	0.82	0.2511	0.017	2.1%