

4

Procedimento experimental e redução de dados

Neste capítulo são apresentados os procedimentos de operação da seção de testes e a explicação detalhada do funcionamento dos interruptores de feixe, acompanhado da descrição da metodologia utilizada para a extração das informações estatísticas do escoamento através do processamento dos sinais destes sensores. Ao final do capítulo, também são definidos os conceitos estatísticos importantes para a redução e análise dos dados obtidos.

4.1.

Operação da seção de testes

A operação da seção de testes era iniciada ligando-se o inversor de frequência que controlava a rotação do compressor. Em seguida, a rotação era aumentada gradativamente, até atingir o valor adequado de velocidade superficial de gás de acordo com o mapa de padrões de fases. O circuito fechado de água era ligado e a vazão ajustada através dos inversores de frequência que controlavam as rotações das bombas principais e de retorno. Com as vazões de ar e água ajustadas, o escoamento permanecia em circulação entre 20 e 30 minutos antes da realização de quaisquer experimentos. O objetivo deste tempo de circulação era minimizar possíveis efeitos transientes provenientes da ligação dos equipamentos.

Realizados os procedimentos de ligação da seção de testes, iniciava-se a ligação do conjunto dos interruptores de feixe, do painel de *LED's*, da câmera e do computador que gerenciava e processava os dados através da interface construída no *LabView*[®]. As imagens do escoamento era então extraídas, seguindo-se a convenção de se retirar primeiro as imagens da velocidade da frente da bolha, segundo as imagens da traseira e por último as imagens da região contendo somente o pistão de líquido. As imagens e os dados de cada regime eram obtidos sempre no mesmo dia, sendo que o tempo de espera entre 20 e 30 minutos também era utilizado para a configuração da mudança de regime. Cerca de 3 a 4 regimes eram investigados por dia. Ao final dos experimentos, a seção de testes

era desligada sempre iniciando-se pelo sistema de escoamento de ar e depois pelo escoamento de água, com a finalidade de evitar possíveis danos ao compressor.

4.2.

Sistema de interruptores de feixe

A fim de se extrair informações estatísticas de diversos parâmetros importantes para a caracterização do escoamento intermitente e simultaneamente prover a sincronia necessária para a obtenção das imagens, foi utilizado um sistema de interruptores de feixe, com o objetivo de detectar a passagem do pistão de líquido. O sistema foi utilizado previamente na dissertação de *Fonseca Jr (2009)* inspirado na tese de doutorado de *Carpintero (2008)*. Uma discussão detalhada sobre o funcionamento deste sensor pode ser encontrada naqueles trabalhos.

Os interruptores de feixe consistiam, basicamente, de um conjunto emissor/detector fotossensível de um feixe de luz no espectro infravermelho, que emitiam um sinal de voltagem quando o feixe era interrompido. A *figura 4.1* ilustra esquematicamente a montagem em sequência dos três sensores utilizados.

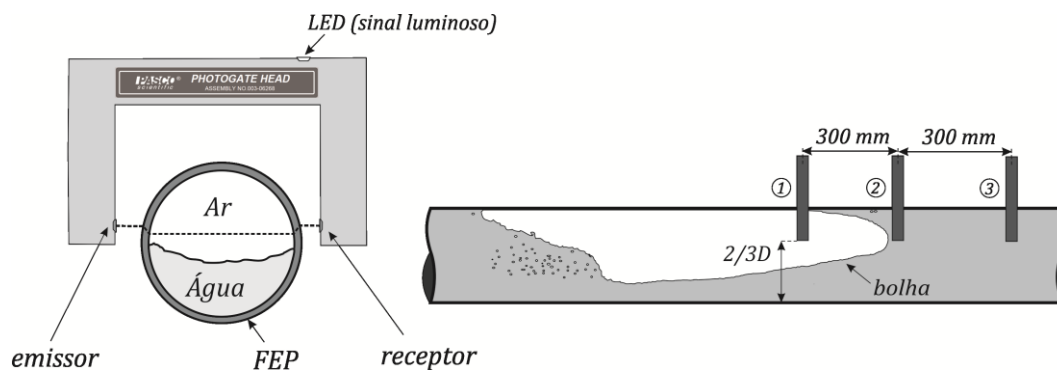


Figura 4.1 – Desenho esquemático da montagem do sistema de interruptores de feixe.

A detecção da passagem dos pistões de líquido era possível porque o feixe de luz infravermelha emitido pelo sensor não encontrava o dispositivo fotossensível receptor quando a fase líquida ocupava a região da tubulação compreendida entre o emissor e o detector do feixe. A tensão de saída de cada sensor mantinha seu valor lógico enquanto o feixe estivesse interrompido. Um circuito lógico do tipo "*OU exclusivo*" (*exclusive OR*) foi utilizado nos sinais dos sensores 1 e 2 com a finalidade de criar um pulso característico cada vez que uma frente ou traseira da bolha alongada estivesse entre os sensores. Sabendo-se a distância entre os sensores e medindo-se o intervalo de tempo de duração desse pulso, era possível então obter a velocidade da frente ou da traseira da bolha alongada. A largura do pulso era medida via *hardware* a uma taxa de 20 MHz, garantindo uma alta precisão na medição da velocidade. O sensor 3, localizado bem próximo a caixa de visualização, era utilizado para emitir o sinal de gatilho (*trigger*) para a câmera, no instante da passagem do pistão. A esse *trigger* foi adicionado um tempo de atraso, proporcional à velocidade medida pelos sensores 1 e 2.

Todo o fluxo de sinais era controlado via *software* através de uma interface construída no *software LabView*[®]. Para facilitar o processamento dos dados referentes à frente e à traseira da bolha alongada, um controle foi adicionado ao circuito, de modo que era possível, via *software*, escolher a medição ora da velocidade da frente da bolha, ora da velocidade da traseira, conforme a preferência. As vantagens dessa metodologia eram a obtenção de um sinal de disparo preciso e uma otimização do volume de dados adquiridos, uma vez que não era necessário a coleta dos sinais dos sensores em séries temporais

longas, para a posterior extração dos parâmetros de interesse do escoamento. Já a desvantagem, era não medir simultaneamente a velocidade da frente e da traseira de uma *mesma* bolha. No entanto, do ponto de vista estatístico, a medição separada da velocidade, não influenciam os resultados médios obtidos.

Problemas na utilização dos interruptores de feixe ocorreram devido a presença de bolhas de ar dispersas no escoamento. Algumas bolhas permitiam a passagem momentânea do feixe de luz, ocasionando medições equivocadas, sobretudo da velocidade da frente da bolha, onde ocorria uma intensa quantidade de bolhas dispersas de tamanhos variados. A *figura 4.2* ilustra de forma esquemática as consequências distintas deste problema sobre o sinal de saída dos sensores quando a frente ou a traseira da bolha eram detectadas.

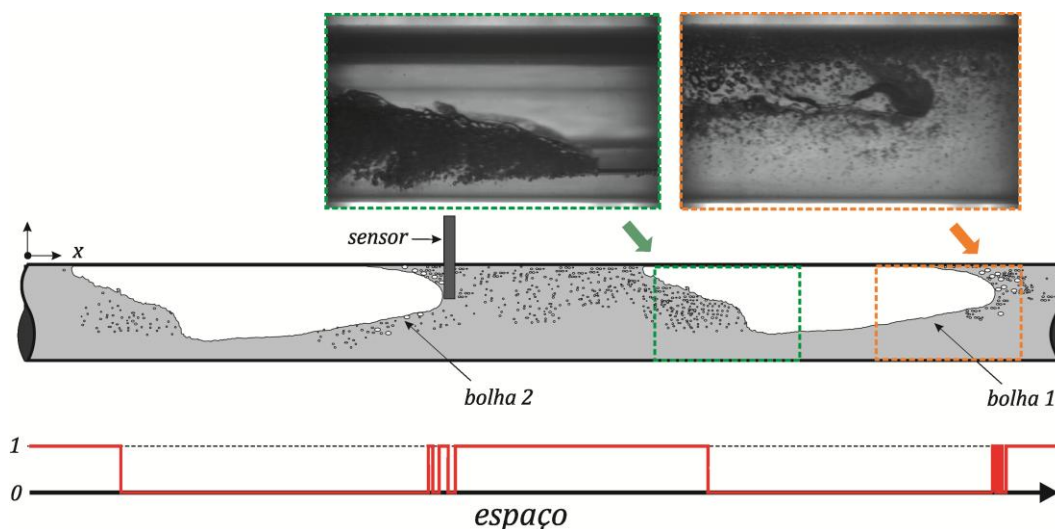


Figura 4.2 – Pulso característico do sensor na região da bolha alongada e do pistão de líquido: na vizinhança da frente da bolha, o pulso apresenta picos de alta frequência devido a quantidade variada de tamanhos de bolhas dispersas de ar.

Para minimizar o ruído gerado pelas bolhas dispersas sobre a medida de quantidades físicas, um filtro digital e um eletrônico foram projetados. Através da rotina de controle, criou-se, via *software*, um critério de seleção de dados válidos, no qual pistões de líquido com comprimento menores ou iguais a 3 *diâmetros* eram descartados. A nível eletrônico, projetou-se um filtro passa-baixa com frequência de corte de 200 Hz para remover altas frequências do sinal. Bons resultados foram obtidos para a velocidade da traseira. No entanto, o mesmo não

ocorreu nas medidas da velocidade da frente da bolha para elevadas velocidades superficiais de gás, devido aos diversos tamanhos de bolhas de ar presentes nas imediações dessa região. Este problema não é exclusivo do sensor. Woods e Hanratty (2006) reportaram um problema semelhante com sondas condutivas usadas a medição da espessura do filme de líquido. Naquele trabalho, o problema também foi atribuído a elevada quantidade de bolhas de ar dispersas no escoamento.

4.2.1. Cálculo dos parâmetros de interesse

Neste trabalho, houve particular interesse na medição da distribuição estatística da velocidade da frente e da traseira da bolha, do comprimento dos pistões de líquido e da bolha alongada e da frequência de passagem dos pistões.

Conforme descrito na seção 4.2, foram utilizados ao todo três sensores. Nos dois primeiros foi aplicada uma operação lógica "OU exclusiva" (XOR) e a largura do pulso resultante, denotada nesse texto por Δt_1 , foi medida. Como se tratou de uma diferença pequena, esta largura foi medida com uma taxa de aquisição elevada, com valor de cerca de 20 MHz, permitindo uma elevada precisão. Conhecida a distância Δd_{sensor} entre os sensores 1 e 2, e o intervalo de tempo Δt_1 , calculou-se a velocidade da frente ou da traseira da bolha através da seguinte equação:

$$u_i = \frac{\Delta d_{sensor}}{\Delta t_1}; i = B, T. \quad (4.1)$$

onde o índice i se refere à frente ou à traseira da bolha alongada ($i = B, T$, respectivamente).

Após a passagem pelos sensores 1 e 2, o pistão de líquido encaminhava-se ao sensor 3, que media o intervalo de tempo Δt_2 em que o feixe ficava interrompido. Como Δt_2 era substancialmente maior que Δt_1 , a contagem do intervalo Δt_2 era realizada via *software*, de modo que a precisão ficava da ordem de milésimos de segundo ($\pm 1ms$). Conhecidos Δt_2 e a velocidade u_i da frente ou da traseira, determinou-se o comprimento do pistão como sendo:

$$L_s = u_i \Delta t_2 \quad (4.2)$$

A interface construída permitia a medição de parâmetros a partir da velocidade da frente ou da traseira da bolha, de modo que era possível reconhecer o tempo entre eventos consecutivos como sendo o tempo de passagem de uma célula unitária. Esse tempo, denotado por Δt_3 , estava relacionado com a frequência de passagem da célula unitária conforme a equação:

$$f_s = \frac{1}{\Delta t_3} \quad (4.3)$$

Pelos mesmos motivos que Δt_2 , a largura deste pulso era medida com precisão de ± 1 milésimo de segundo.

A partir dos valores dos intervalos de tempo Δt_2 , Δt_3 e a velocidade u_i , era possível extrair o comprimento da bolha alongada como sendo a diferença entre o comprimento da célula unitária e o comprimento do pistão. A relação escrita em função das variáveis medidas assumiu a seguinte forma:

$$L_B = u_i (\Delta t_3 - \Delta t_2) \quad (4.4)$$

A figura a seguir ilustra esquematicamente os detalhes dos pulsos característicos obtidos por cada sensor.

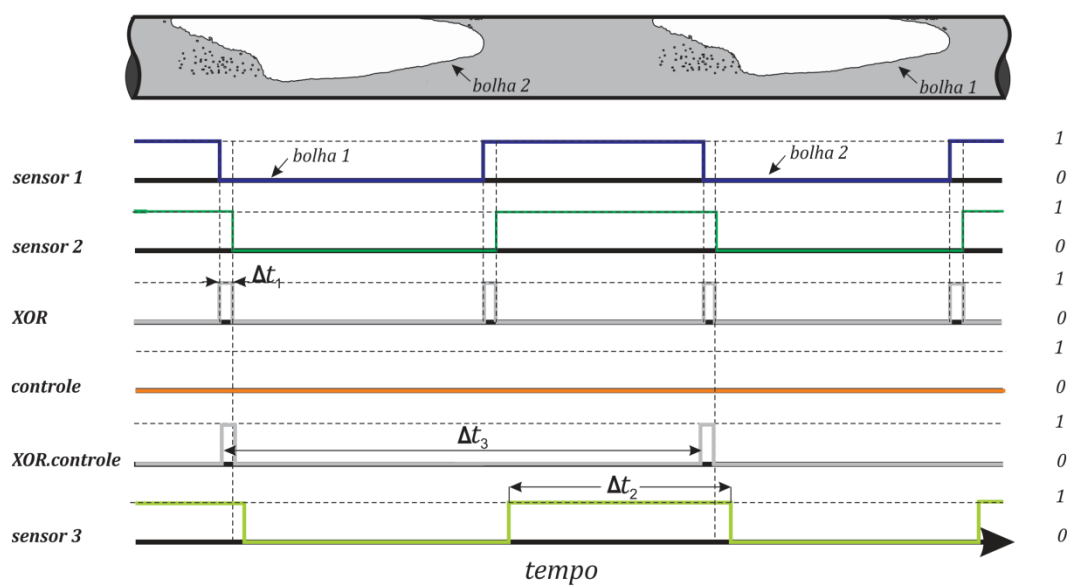
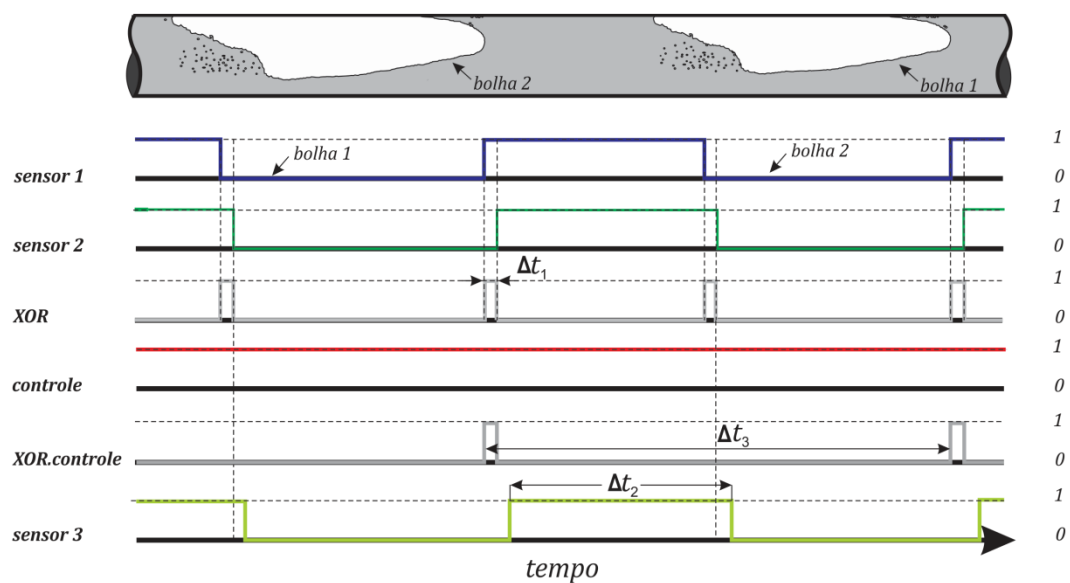


Figura 4.3 - Pulsos característicos dos sensores na detecção da passagem da frente e da traseira da bolha alongada.

Após a etapa de aquisição e cálculo dos parâmetros de interesse, a ocorrência de valores discrepantes ainda era possível. Com a finalidade de se estabelecer um intervalo de validade dos dados, foi desenvolvido um filtro. O filtro consistia em desprezar intervalos de tempo com valores fora da faixa compreendida entre o valor médio e mais ou menos *dois* desvios-padrão.

4.3. Algumas definições básicas de estatística

Devido a grande quantidade de dados obtidos, foi necessário a implementação de uma metodologia de processamento das informações coletadas, de modo a permitir a extração das informações mais relevantes de forma clara e concisa. Procurou-se o alcance deste objetivo com a utilização de ferramentas estatísticas básicas, visando à redução e análise dos dados. A seguir, estes conceitos são definidos.

4.3.1. Média

A *média aritmética* representa o valor mais provável de uma variável com comportamento aleatório e para uma amostra finita de tamanho N é definida como (Montgomery e Runger, 2003):

$$\bar{\chi} \equiv \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N \chi_k \quad (4.5)$$

Como o interesse deste trabalho envolveu a análise de uma grande quantidade de variáveis médias, a barra acima da variável foi omitida para a simplificação da notação ao longo de todo o texto.

4.3.2. Medidas de variação

Uma segunda propriedade importante que descreve um conjunto de dados numéricos é a *variação*. Variação é uma medida da quantidade de dispersão ao redor da tendência central. Duas maneiras geralmente utilizadas que efetivamente

levam em conta o modo como todos os valores nos dados estão distribuídos são a *variância* e sua raiz quadrada, o *desvio-padrão*. A variância de uma amostra é definida como

$$s^2 \equiv \frac{1}{N-1} \sum_{k=1}^N (\chi_k - \bar{\chi})^2 \quad (4.6)$$

sendo sua raiz quadrada, o denominado desvio-padrão, dado por:

$$s \equiv \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{k=1}^N (\chi_k - \bar{\chi})^2} \quad (4.7)$$

Outra medida de dispersão particularmente útil na comparação da variabilidade de dois ou mais conjuntos de dados, é o denominado *coeficiente de variação*, *C.V.*, definido como a razão entre o desvio-padrão e a média aritmética:

$$C.V. \equiv \left(\frac{s}{\bar{\chi}} \right) \times 100\% \quad (4.8)$$

O coeficiente de variação mede a dispersão dos dados relativa à média.

4.3.3.

Intervalos de confiança

Em estatística, um intervalo de confiança (*I.C.*), é um intervalo estimado que contém um determinado parâmetro estatístico da população com uma medida de confiabilidade. Ao longo deste trabalho, o intervalo de confiança para a média aritmética foi estimado com uma confiabilidade de 95 %. Para populações que se distribuem *normalmente*, esse intervalo pode ser estimado pela distribuição *t' de Student* na forma (Montgomery e Runger, 2003) :

$$\left(\bar{x} - t'_{N-1} \frac{s}{\sqrt{N}}; \bar{x} + t'_{N-1} \frac{s}{\sqrt{N}} \right) \quad (4.9)$$

onde t'_{N-1} é aproximadamente 1,96 com uma confiabilidade de 95 % para amostras com tamanho superior a 120. A razão $s/\sqrt{N}$, é comumente chamada de *erro padrão da média aritmética*.

Para populações cujo comportamento desvia-se consideravelmente da normalidade, é comum a utilização de estimativas do intervalo de confiança que não fazem quaisquer pressupostos com relação ao formato da população. Um dos mais difundidos métodos é o denominado *Bootstrap* (Efron, 1987). O método consiste basicamente na realização de reamostragens aleatórias da amostra inicial. Em seguida, faz-se uma distribuição das médias das reamostragens, cujo teorema do limite central garante a convergência para uma distribuição *normal* à medida que o número de reamostras aumenta (Montgomery e Runger, 2003). No presente trabalho, utilizou-se a rotina implementada no software *Minitab*® 15 para a extração de intervalos de confiança para a média aritmética com um confiabilidade de 95 %. Na rotina utilizada, os seguintes passos foram realizados:

1. Retirou-se uma amostra de tamanho N ;
2. Realizou-se uma reamostragem aleatória da amostra inicial selecionando n observações, com reposição;
3. Calculou-se a média de cada reamostragem;
4. Repetiu-se os passos 2 e 3 m vezes (onde $m = 1000$);
5. Elaborou-se a distribuição da médias das reamostragens;
6. Ordenou-se a distribuição da média das reamostragens, encontrando a faixa de valores que engloba 95 % dos dados ao redor do valor médio.

A seguir, é apresentada uma tabela resumindo os principais dados obtidos com velocidade superficial de líquido constante de $j_L = 0,5 \text{ m/s}$ e velocidade superficial de gás variando entre $j_G = 0,7 - 1,9 \text{ m/s}$. Esses dados foram medidos com a utilização do sistema de interruptores de feixe. A tabela contém os valores da velocidade média da traseira da bolha (u_T), do intervalo de confiança para esta medida ($u_T \text{ I.C. } 95 \%$), da incerteza experimental relativa ao valor médio ($\delta u_T/u_T$), da frequência e do comprimento do pistão de líquido médios e do comprimento

médio da bolha alongada, acompanhados dos respectivos intervalos de confiança e incertezas relativas. As incertezas experimentais foram estimadas de acordo com a metodologia proposta por *Moffat (1982)*. O parâmetro N mostrado na tabela, representa o total de amostras realizadas em cada caso.

Sub-matriz # 4 ($j_L = 0,5$ m/s, $j_G = 0,7 - 1,9$ m/s)										
ponto	j_L (m/s)	j_G (m/s)	u_t (m/s)	u_T I.C. 95 %	$\delta u_T/u_T$ (%)	N	f_s (Hz)	f_s I. C. 95 %	$\delta f_s/f_s$ (%)	N
1	0,5	0,7	1,680	(1,657;1,702)	0,329	381	0,437	(0,428;0,446)	0,039	376
2	0,5	0,9	1,976	(1,955;1,998)	0,329	387	0,462	(0,451;0,472)	0,040	384
3	0,5	1,1	2,162	(2,140;2,184)	0,330	385	0,478	(0,462;0,493)	0,039	380
4	0,5	1,3	2,433	(2,407;2,460)	0,328	383	0,440	(0,425;0,453)	0,036	375
5	0,5	1,5	2,704	(2,673;2,735)	0,328	390	0,402	(0,385;0,417)	0,030	402
6	0,5	1,7	3,097	(3,059;3,136)	0,323	380	0,434	(0,418;0,451)	0,035	388
7	0,5	1,9	3,388	(3,344;3,432)	0,324	417	0,440	(0,424;0,456)	0,035	424
ponto	j_L (m/s)	j_G (m/s)	L_s/D (-)	L_s/D I.C. 95 %	$\delta L_s/L_s$ (%)	N	L_B/D (-)	L_B/D I.C. (95 %)	$\delta L_B/L_B$ (%)	N
1	0,5	0,7	21,083	(20,465;21,772)	0,019	359	57,227	(55,74;58,70)	0,013	338
2	0,5	0,9	19,221	(18,548;20,016)	0,020	368	67,985	(65,97;70,00)	0,015	351
3	0,5	1,1	18,320	(17,675;18,978)	0,021	372	78,272	(75,44;81,11)	0,015	354
4	0,5	1,3	20,866	(20,040;21,683)	0,021	370	98,445	(94,66;102,23)	0,017	347
5	0,5	1,5	23,994	(23,023;25,000)	0,020	380	130,980	(125,18;136,78)	0,019	375
6	0,5	1,7	20,643	(19,794;21,545)	0,023	358	137,605	(131,75;143,46)	0,019	347
7	0,5	1,9	20,661	(19,848;21,451)	0,024	397	151,144	(145,04;157,25)	0,020	384

Tabela 4.1. – Valores médios, intervalos de confiança para as médias e incertezas relativas para os dados extraídos da sub-matriz 4.

4.3.4.

Critério de convergência para o tamanho das amostras

O número total de amostras retiradas para cada regime da matriz de testes foi definido de acordo com um critério de convergência para o *erro padrão* da média aritmética da velocidade da frente e da traseira da bolha. A medida que os dados eram obtidos, o *software* de controle calculava em tempo real o erro padrão das amostras e atualizava os valores na fila a cada *cinco* novas medidas. Quando o erro padrão apresentava pouca variação com o aumento do número de amostras, considerava-se que o tamanho das amostras tinha atingido um valor adequado para a construção dos intervalos de confiança. A figura a seguir ilustra os gráficos construídos em *LabView*[®] mostrando o comportamento da velocidade média da traseira da bolha e do respectivo erro padrão. Uma convergência em torno de 400 amostras foi obtida para a ampla maioria dos casos.

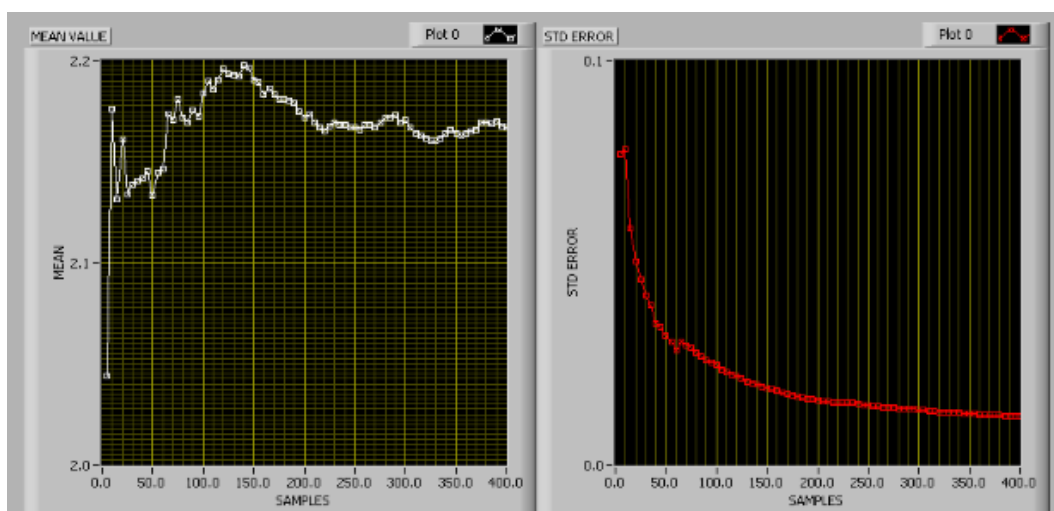


Figura 4.4 - Comportamento da velocidade média da traseira da bolha e do respectivo erro padrão da média com o aumento do número de amostras.

4.3.5.

Desvio médio absoluto

O desvio médio absoluto (*D.M.A.*) é um parâmetro rotineiramente utilizado para medir o quanto uma correlação é eficiente no ajuste de dados experimentais, sendo definido como (*Schubring, 2009*):

$$DMA = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n \left| \frac{\chi_{correl,k} - \chi_{exp,k}}{\chi_{exp,k}} \right| \times 100\% \quad (4.10)$$

onde χ_{exp} é o valor do dado experimental, χ_{correl} é o valor previsto pela correlação e n é o total dos dados experimentais. O desvio médio absoluto foi utilizado neste trabalho para comparar a eficiência de diferentes correlações na previsão da velocidade média da frente da bolha alongada.