

7 Extração de Dados Quantitativos

A técnica de medição desenvolvida e descrita nos capítulos anteriores produz como resultado a variação temporal da espessura de filme de líquido em posições axiais definidas ao longo do tubo. No caso do arranjo óptico longitudinal da técnica, a variação da espessura é determinada em uma dada posição axial, enquanto a versão estereoscópica da técnica produz informações sobre a variação temporal do filme em diversas posições ao longo da circunferência do tubo. A Figura 7.1 reproduz, a título de ilustração, um resultado típico da variação temporal da espessura de filme obtido pela técnica longitudinal e já apresentado no Capítulo 5.

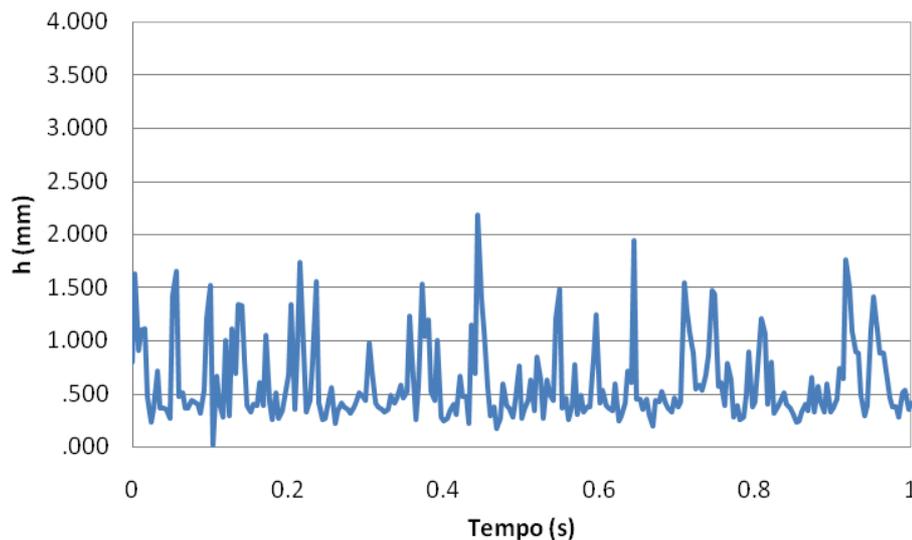


Figura 7.1 - Exemplo típico da variação temporal da espessura de filme líquido inferior determinado pelo procedimento de processamento de imagens desenvolvido ($U_{sl}=0,112$ m/s e $U_{sg}=20$ m/s).

Neste capítulo são descritos os procedimentos utilizados para extrair informações estatísticas e espectrais dos sinais de variação temporal da espessura do filme de líquido, como aqueles apresentados na figura anterior. Os resultados de espessura média e valor médio quadrático do filme de líquido,

determinação da velocidade de propagação das ondas, espectro de frequências do sinal de espessura e histograma serão apresentados no Capítulo 8.

7.1. Espessura Média do Filme de Líquido

A espessura média do filme de líquido foi determinada pela média temporal da espessura de filme, $h(t)$, para todo o registro do sinal capturado, de acordo com a equação:

$$\bar{h} = \frac{\sum_{i=1}^N h_i}{N} \quad (7.1)$$

onde, N é o número de imagens e h_i é a espessura de filme líquido medida em cada quadro capturado.

7.2. Média Quadrática da Espessura de Filme de Líquido – *RMS*

O valor médio quadrático da espessura do filme de líquido, valor *RMS*, foi determinado a partir do sinal de espessura de filme, $h(t)$, utilizando-se a equação:

$$h_{RMS} = \sqrt{\sum_{i=1}^N \frac{(h_i - \bar{h})^2}{N}} \quad (7.2)$$

7.3. Velocidade de Propagação das Ondas de Líquido

A velocidade das ondas do filme de líquido foi determinada a partir da correlação cruzada de dois sinais simultâneos de espessura de filme medidos em duas posições axiais espaçadas de uma distância, d_s , pré-determinada. A Figura 5.8 ilustra esquematicamente o posicionamento das duas sondas na imagem capturada. A velocidade da onda em m/s, v , é determinada pela razão entre o espaçamento entre as sondas de medição, d_s , e o tempo de trânsito das ondas, t . O tempo de trânsito é avaliado computando-se o atraso correspondente ao valor máximo da função de correlação cruzada dos sinais de espessura de filme capturados nas posições das duas sondas de medição (Bendat & Piersol, 1971).

Um exemplo típico de uma correlação cruzada entre os sinais de espessura de filme líquido capturados pelas duas sondas é ilustrado na Figura 7.2. Pode-se observar na figura a ocorrência de um pico de correlação bem definido, cuja posição na abscissa que representa o tempo, determina o atraso entre os sinais. É importante ressaltar que o tempo nos experimentos realizados é medido em número de quadros capturados pela câmera digital. Assim, para uma dada frequência de captura, f , o tempo de trânsito é obtido por,

$$t = \frac{n^q}{f} \quad (7.3)$$

onde, n^q representa o atraso entre os sinais dado em número quadros da imagem.

A resolução temporal na medição do atraso dos sinais através do máximo da função de correlação cruzada é dada, como mencionado, em quadros capturados. Nos experimentos realizados com o escoamento anular gás-líquido, os atrasos típicos verificados eram da ordem de alguns poucos quadros. Assim, uma incerteza de um quadro na medição do atraso produziria um nível de incerteza inaceitável na determinação dos tempos das ondas e, conseqüentemente, na determinação da velocidade de propagação destas ondas.

Para contornar este problema foi desenvolvida uma metodologia de cálculo que produz resoluções temporais menores que um quadro. Para isso, a função de correlação cruzada discreta entre os sinais era ajustada por uma curva Gaussiana. O ponto de máximo desta curva contínua podia então ser determinado com resolução sub-quadro. A linha contínua apresentada na Figura 7.2 representa o ajuste Gaussiano realizado pelos pontos da função correlação cruzada discreta obtida para aquele caso.

Os dados da Figura 7.2 podem ser usados para exemplificar o cálculo da velocidade de propagação das ondas do filme de líquido. No caso da figura, o valor máximo da função de correlação cruzada foi determinado como sendo igual a 4,7 quadros. Para a frequência de aquisição de imagens de 3000 Hz com o qual o experimento foi conduzido, este valor representa um tempo de trânsito, t , igual 1,57 ms. A velocidade de propagação das ondas é então obtida pela divisão da distância entre as sondas de 8,22 mm por este tempo de trânsito, resultando em 5,24 m/s.

A função de correlação cruzada foi calculada no presente trabalho utilizando-se a biblioteca do programa MATLAB®.

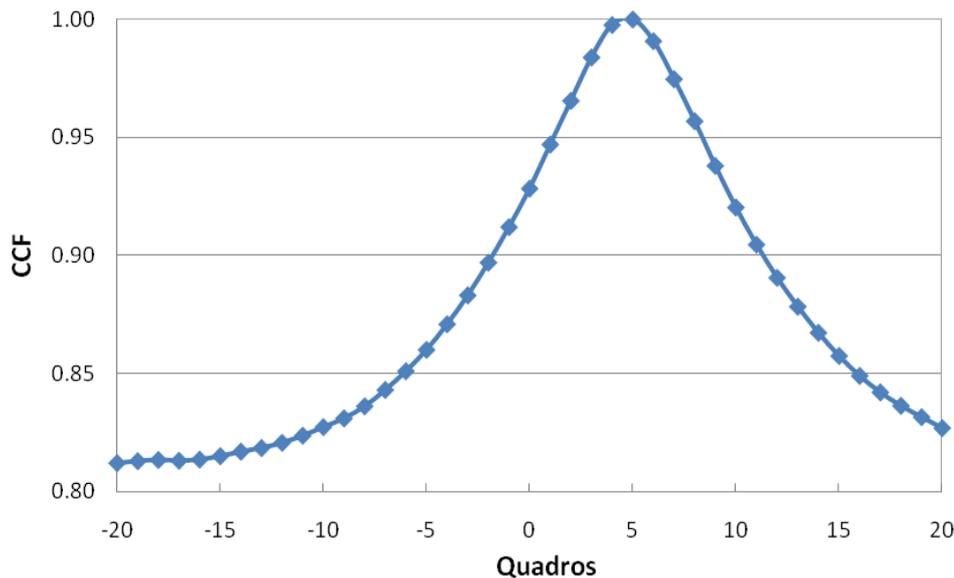


Figura 7.2 - Função de correlação cruzada da espessura de filme medida na posição das sondas 1 e 2 para $U_{sg} = 34 \text{ m/s}$ e $U_{sl} = 0.112 \text{ m/s}$. A linha contínua passando pelos pontos representa um ajuste por uma função Gaussiana.

7.4.

Espectro de Frequência do Sinal de Espessura do Filme de Líquido

As informações sobre o conteúdo espectral do sinal de espessura de filme de líquido foram obtidas pela determinação da densidade espectral de potência do sinal, *PSD* (Bendat & Piersol, 1971). Devido à limitação na memória das câmeras digitais empregadas e à natureza não periódica do sinal registrado, o resultado da *PSD* apresentou níveis de ruído que impossibilitariam a correta análise dos fenômenos físicos associados à dinâmica do escoamento. Para contornar este problema, foi utilizada uma técnica de janelamento do sinal original de espessura de filme. Esta técnica, conhecida como periodograma, consiste na subdivisão do sinal original em trechos sobre os quais são computados os espectros. Em seguida realiza-se uma média dos espectros calculados para cada janela, resultado em uma *PSD* significativamente mais suave.

O procedimento de janelamento é implementado pela multiplicação do sinal original por funções que assumem valor unitário no sub-intervalo de interesse e valor nulo fora deste intervalo. Existem diversas alternativas para a função de janelamento propostas na literatura (MATLAB, 2008 e Harris, 1978).

No presente trabalho utilizou-se uma função de *Hamming* caracterizada por apresentar extremidades suaves, com derivadas de maior ordem contínuas, juntamente com uma sobreposição entre elas de 50%, o que resultou em uma melhor suavização da *PSD*.

A suavização obtida com a utilização da técnica de periodograma produz resultados equivalentes àqueles adquiridos a partir da média amostral de diversos espectros oriundos de experimentos independentes. Este fato pode ser verificado com o auxílio da Figura 7.3. Esta figura apresenta o espectro do sinal original, o espectro obtido com o periodograma, e aquele obtido a partir da média de 16 espectros de experimentos independentes. Pode-se observar o nível excessivo de ruído no espectro do sinal original e o efeito suavizador produzido pela média dos 16 espectros. Também pode-se notar que o espectro obtido com a técnica de periodograma apresenta efeito equivalente àquele resultante da média dos 16 espectros, apresentando-se portanto como uma alternativa mais econômica do ponto de vista do esforço experimental requerido.

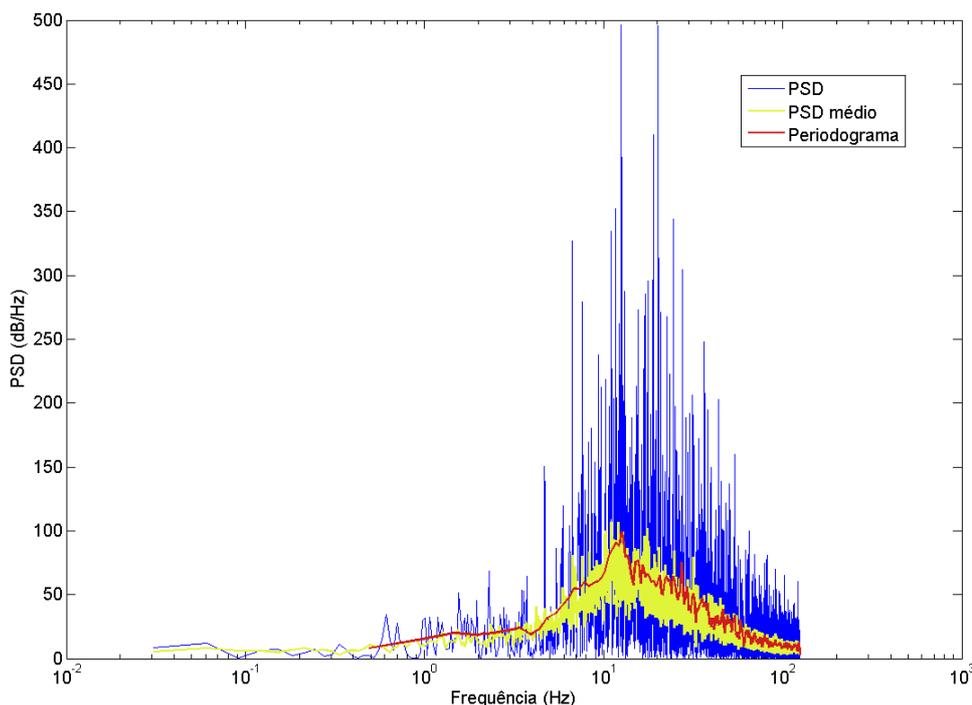


Figura 7.3 - Comparação entre os espectros do sinal original com aqueles obtidos pelo periodograma com 16 janelas de *Hamming* e pela média de 16 espectros de experimentos independentes para $U_{sg}=28$ m/s e $U_s=0,112$ m/s e seção de 15,8 mm.

Uma análise da Figura 7.3 mostra claramente que a metodologia de janelamento (periodograma) de fato aproxima de forma satisfatória a tendência esperada de suavização do espectro resultante, à medida que se aumenta o

número de ensaios independentes. Esta metodologia não causa grandes desvios em relação ao espectro real, e economiza de forma considerável o tempo gasto com a obtenção dos resultados. A densidade espectral de potência do sinal de espessura do filme de líquido de todos os experimentos longitudinais estudados no presente trabalho foi obtida empregando 128 janelas de *Hamming*.

7.5. Histograma da Espessura de Filme Líquido

Os dados de espessura de filme líquido medidos em função do tempo podem ser apresentados na forma de histogramas que indicam a probabilidade de ocorrência de diferentes faixas de espessura de filme de líquido. Um destes histogramas é mostrado na Figura 7.4, para o caso caracterizado por $U_{sg}=20\text{ m/s}$ e $U_{sl}=0.112\text{ m/s}$.

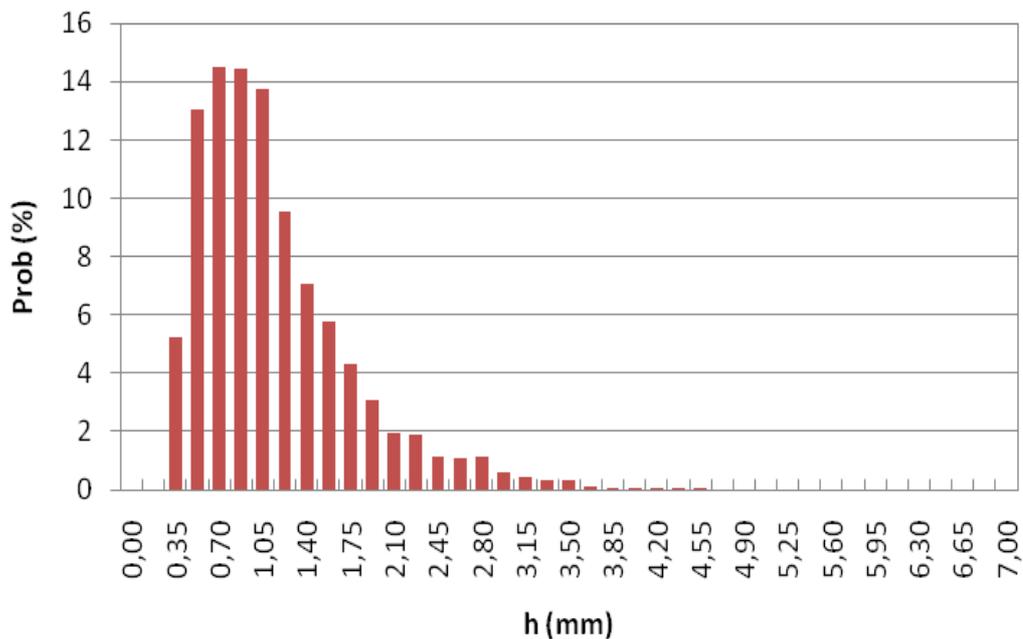


Figura 7.4 - Histograma da espessura de filme líquido para $U_{sg}=20\text{ m/s}$ e $U_{sl}=0.112\text{ m/s}$ e $D = 15,8\text{ mm}$.