

7

Medição da Velocidade do Vento em um Túnel de Vento utilizando Fusão de Dados: Resultados Experimentais

7.1

Introdução

Neste capítulo apresentam-se experimentos de laboratório realizados em um túnel de vento de baixa velocidade, com o objetivo de verificar a aplicabilidade e eficácia do procedimento de medição da velocidade do vento baseado em técnicas de fusão de dados. A fusão de dados é realizada a partir das informações do Tempo de Trânsito (ToF), obtidas por meio das técnicas de Detecção de Limiar (TH) e Diferença de Fase (PD), realizadas no domínio de tempo discreto (aquisição digital de sinais). Para tanto, devem-se considerar os efeitos das influências das incertezas devido ao ruído aleatório e do efeito de quantização. O algoritmo de fusão utilizado para combinar as informações do ToF é baseado nas relações de compatibilidade e operadores OWA (*Ordered Weighted Average*) com agregação parcial.

As seções a seguir dizem respeito à condução do experimento e à obtenção dos resultados.

7.2

Descrição do Experimento

Para realizar os experimentos de laboratório, foi utilizado um túnel de vento de retorno fechado projetado para ensaios estáticos da medição da velocidade do vento, como ilustrado na Figura 7.1. Este túnel de vento permite a simulação das principais características de ventos naturais. As dimensões do túnel são 1,66m×0,88 m×0,3 m. A velocidade máxima do escoamento de ar nesta câmara, com vento uniforme suave, é de 22 m/s (79 km/h) e as hélices do ventilador são acionadas por um motor elétrico de 0,55 HP/0,75 CV, 3400 rpm e 2 pólos.

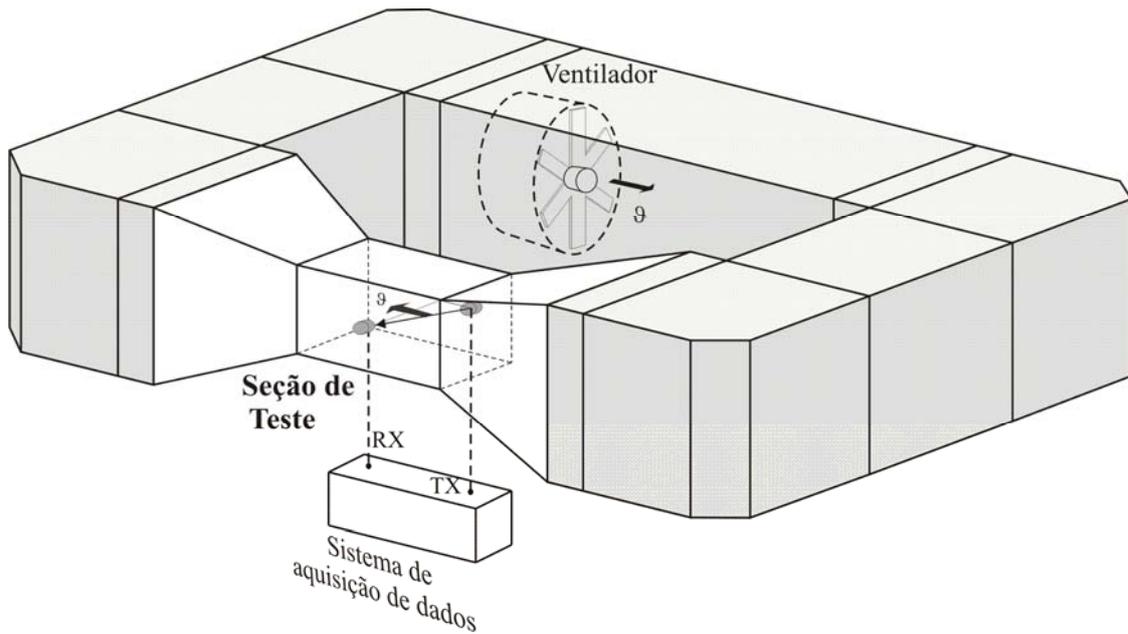


Figura 7.1. Perspectiva do túnel de vento de retorno fechado.

Em seguida são descritas as informações sobre a instalação dos transdutores ultra-sônicos, equipamentos eletrônicos e *software* utilizados para a aquisição digital dos sinais:

1. *Instalação dos transdutores ultra-sônicos*

- Transdutores ultra-sônicos de transmissão (TX) e recepção (RX), com frequência de operação de 40 kHz e largura de banda 6 kHz, instalados na seção de teste, com dimensões 11 cm×11 cm×28 cm (ver Figura 7.1);
- Ângulo de alinhamento entre os transdutores e o fluxo do ar de $\theta = \pi/3$;
- Distância entre os transdutores $L = 9,3$ cm.

2. *Sistema de Aquisição de Dados*

- Para a oscilação do transdutor transmissor (TX), utiliza-se um gerador digital de sinais da *National Instruments* NI PCI6251, com resolução de 16 bits, 1,25 MS/s de frequência de amostragem;
- Para o registro das formas de onda no transdutor transmissor (TX) e receptor (RX), utilizam-se os dois canais do osciloscópio digital Agilent DSO6032A, 300 MHz e 2 GSa/s, e 16 bits de resolução;
- Para o registro da temperatura dentro do túnel do vento, utiliza-se o Termômetro digital FLUKE 1502A com resolução de 0,001 °C;
- Para pré-definir a velocidade do motor do ventilador (velocidade do vento), utiliza-se um anemômetro a fio quente TESTO 425, utilizado como instrumento padrão para medição da velocidade do vento (ϑ) dentro do túnel de vento, com faixa de medição de 0 a 20 m/s e incerteza da medição de 0,5 m/s.

3. *Aplicativos computacionais*

- *Labview*: utilizado para a configuração da placa geradora de sinais NI PCI6251; gera-se um pacote de ondas senoidais com frequência de 40 kHz no transdutor transmissor (TX);
- *Matlab*: utilizado para a leitura dos sinais ultra-sônicos de transmissão (TX) e recepção (RX) a partir do osciloscópio digital; permite realizar o processamento computacional dos sinais ultra-sônicos para a estimação das medições e avaliação das incertezas do ToF.

7.3

Procedimento Experimental

O procedimento experimental compreende os seguintes passos:

1. Estabelecer um valor pré-definido da velocidade do fluxo do vento (variando a velocidade do motor do ventilador), utilizando como referência o instrumento padrão de medição da velocidade do vento (Anemômetro a fio quente TESTO 425);
2. Aguardar que o fluxo de ar se estabilize de modo a ler corretamente as grandezas medidas evitando as turbulências no processo de medição;
3. Gerar um pacote de 200 ondas senoidais, com frequência 40 kHz, utilizando a placa de geração digital de sinais NI PCI6251, com uma frequência de amostragem de 1,25 MHz. O tempo total para gerar estas ondas é de $t_1 = 200 \times (1/40 \text{ kHz}) = 5 \text{ ms}$;
4. Registrar as formas de ondas dos sinais nos transdutores ultra-sônicos de transmissão (TX) e recepção (RX), utilizando-se o osciloscópio digital Agilent DSO6032A. A janela de aquisição corresponde a 10 ms, com 250000 amostras, isto é, uma frequência de amostragem de 25 MHz ($T_s = 0,04 \mu\text{s}$).
5. Avaliar as influências das incertezas aleatórias devido ao efeito de quantização na medição do ToF para as técnicas de TH e PD, devido à frequência do relógio limitada do osciloscópio digital, utilizando as equações (6.14) e (6.24).
6. Realizar a estimação do tempo de trânsito (ToF), utilizando as técnicas separadas de TH (ToF_{TH}) e PD (ToF_{PD}), determinando-se as propriedades estatísticas destas medições (incertezas aleatórias): valor médio e desvio padrão.
7. Aplicar o procedimento de fusão de dados MLE e baseado nas relações de compatibilidade e operadores OWA com agregação parcial, para estimar o ToF de fusão (ToF_{MLE} e ToF_{Fuzzy}) e avaliar as incertezas finais de fusão.

7.4

Resultados Experimentais

O desempenho do procedimento de medição do tempo de trânsito baseado na técnica de fusão de dados foi investigado variando-se a velocidade do motor do ventilador do túnel de vento, para velocidades do vento de 2 a 10 m/s (estabelecidas através do instrumento de medição padrão – com incerteza de 0,5 m/s).

Inicialmente, determina-se o tempo de atraso eletrônico t^E , considerando-se a velocidade do vento zero, isto é, vento parado. Em seguida, para cada velocidade pré-definida (diferente de zero), são realizadas as medições do ToF pelas técnicas de TH e PD separadamente, para a estrutura SU. A partir destas medições, aplicam-se os procedimentos de fusão MLE e *fuzzy*. Finalmente, comparam-se as incertezas obtidas pelas técnicas de TH, PD e de fusão.

7.4.1

Determinação do tempo de atraso eletrônico

O tempo de atraso eletrônico é uma propriedade intrínseca dos transdutores ultra-sônicos que deve ser inicialmente determinada para compensar seu efeito na estimação do ToF quando utilizada a técnica da Detecção de Limiar (TH). Para tal fim, considera-se a fixação dos transdutores ultra-sônicos ao túnel de vento, posicionados na seção de teste (ver Figura 7.1), com ângulo entre os transdutores e a direção do fluxo de ar $\theta = 60,5^\circ$ e distância entre os transdutores $L = 9,3$ cm.

Os experimentos consistem em realizar 100 registros dos sinais no transdutor transmissor TX e receptor RX utilizando-se o sistema de aquisição digital de dados, para velocidade do vento zero (ar parado) com as mesmas condições de localização e temperatura. As formas de ondas típicas nos transdutores ultra-sônicos são ilustradas na Figura 7.2.

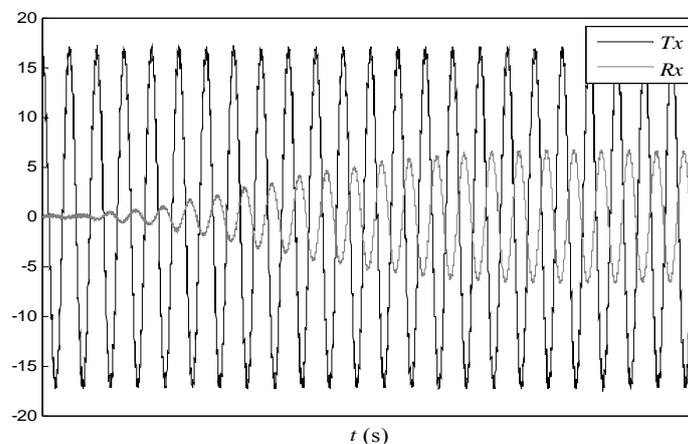


Figura 7.2. Formas de onda no transdutor transmissor (TX) e receptor (RX).

Deve-se observar que os níveis de tensão de RX e TX apresentados na Figura 7.2 foram obtidos implementando-se circuitos eletrônicos de condicionamento para a transmissão ultra-sônica (TX), como apresentado na Figura 7.3, e para a recepção ultra-sônica (RX), como ilustrado na Figura 7.4.

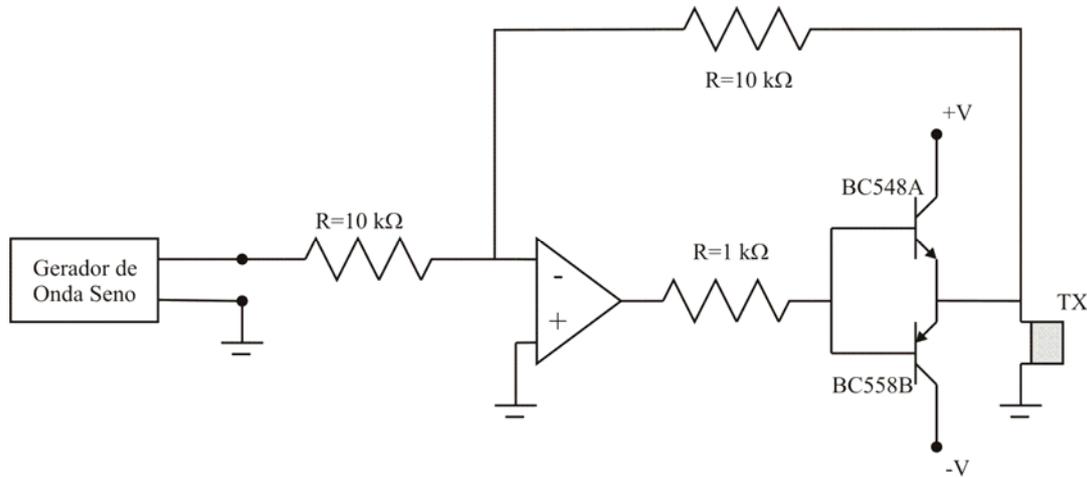


Figura 7.3. Circuito para a transmissão ultra-sônica (TX).

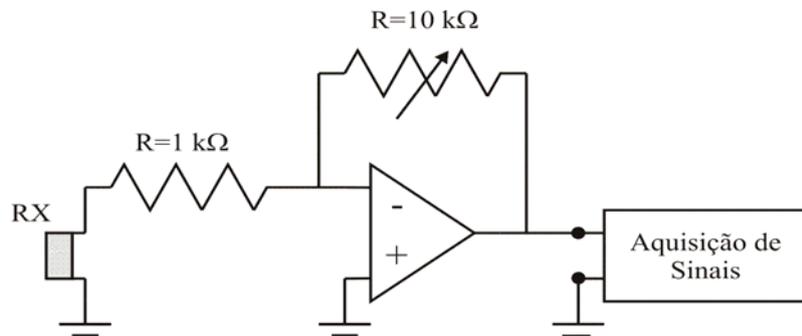


Figura 7.4. Circuito para a recepção ultra-sônica (RX).

A partir do registro destas informações, é possível determinar o valor médio do tempo de atraso eletrônico, dado por:

$$t^E = t^M - t_{AB} \quad (7.1)$$

onde t^E é o tempo de atraso eletrônico, t^M é o tempo medido desde a transmissão até a detecção do limar e t_{AB} é o Tempo de Trânsito em ar parado dado por:

$$t_{AB} = \frac{L}{C} \quad (7.2)$$

em que L é a distância entre os transdutores e C é a velocidade do som ($C = 20,074\sqrt{T_K}$).

A partir do processamento das informações coletadas, o tempo de atraso eletrônico foi calculado por:

$$t^E = 241,75 \mu\text{s} \quad (7.3)$$

Uma vez determinado este parâmetro, o sistema de medição da velocidade do vento pode ser utilizado para diferentes condições de operação de velocidades do vento e temperaturas, compensando seu efeito na estimação do ToF.

7.4.2

Resultados experimentais utilizando o Túnel de Vento

Nesta seção apresentam-se os resultados experimentais para a estimação das incertezas do tempo de trânsito para a medição da velocidade do vento na faixa de medição de 2 a 10 m/s. O processo de medição do tempo de trânsito é realizada utilizando-se o algoritmo de fusão MLE e *fuzzy* baseado nas relações de compatibilidade e operadores OWA com agregação parcial.

Como estudado nos capítulos anteriores, a medição do Tempo de Trânsito (ToF) é realizada através das técnicas de Detecção de Limiar (TH) e da Diferença de Fase (PD), as quais são influenciadas principalmente pelas incertezas aleatórias.

Deste modo, para cada velocidade do vento na faixa de variação de 2 a 10 m/s, foram realizados $N = 50$ experimentos, registrando-se as medições do ToF para uma medição do ToF pela técnica de TH e $m = 10$ medições do ToF pela técnica de PD, construindo-se, assim, o conjunto de medições do ToF (para cada velocidade do vento):

$$ToF_{TH}, ToF_{PD1}, ToF_{PD2}, \dots, ToF_{PD10} \quad (7.4)$$

onde ToF_{TH} é a medição do ToF pela técnica de TH e ToF_{PDi} são as medições do ToF pela técnica de PD ($i = 1, \dots, 10$).

Para esse conjunto de medições, determina-se a influência das incertezas aleatórias, extraíndo-se as propriedades estatísticas (valor médio e desvio padrão).

$$ToF_{TH} = \frac{\sum_{j=1}^N ToF_{TH(j)}}{N} \quad \text{e} \quad u_{ToF_TH} = \left(\frac{1}{N-1} \sum_{j=1}^N (ToF_{TH} - ToF_{TH(j)})^2 \right)^{\frac{1}{2}} \quad (7.5)$$

$$ToF_{PDi} = \frac{\sum_{j=1}^N ToF_{PDi(j)}}{N} \quad \text{e} \quad u_{ToF_PDi} = \left(\frac{1}{N-1} \sum_{j=1}^N (ToF_{PDi} - ToF_{PDi(j)})^2 \right)^{\frac{1}{2}} \quad (7.6)$$

$$i = 1, \dots, m \text{ e } j = 1, \dots, N, \text{ com } m = 10 \text{ e } N = 50$$

onde u_{ToF_TH} é a incerteza do ToF pela técnica de TH e u_{ToF_PD} é a incerteza do ToF pela técnica de PD.

A partir dos valores estimados de ToF, obtidos pelas técnicas de TH e PD, e de suas incertezas (7.5) e (7.6), aplica-se o procedimento de fusão MLE, cujos resultados experimentais são apresentados na Tabela 7.1.

No procedimento de fusão *fuzzy*, para a medição do ToF, consideram-se, além das incertezas aleatórias (7.5) e (7.6), as incertezas devido ao efeito de quantização (6.14) e (6.24), que, para uma taxa de amostragem limitada de $f_s = 25$ MHz ($T_s = 0,04$ μ s), são definidas pelos seguintes intervalos:

$$u_{TH}^{quantização} \subset [-0,02; 0,02] \mu\text{s} \quad (7.7)$$

$$u_{ToF_PD}^{quantização} \subset [-0,04; 0,04] \mu\text{s} \quad (7.8)$$

A partir dessas informações, constroem-se as variáveis *random-fuzzy* (RFV), para representar as medições do ToF e sua incerteza associada para as técnicas de TH e PD. Na Tabela 7.1 são apresentados os resultados experimentais das incertezas nas medições do ToF para as técnicas de TH, PD, fusão MLE e fusão *fuzzy*, para velocidades do vento de 2 a 10 m/s.

Tabela 7.1. Valores experimentais das incertezas do ToF utilizando as técnicas de TH, PD, fusão MLE e fusão *fuzzy*, para a faixa de velocidade de vento de 2 a 10 m/s.

Velocidade		Incertezas do ToF				
\mathcal{V}_{ar} (m/s)	Motor (rpm)	ToF (μ s)	u_{ToF_TH} (μ s)	u_{ToF_PD} (μ s)	u_{ToF_MLE} (μ s)	u_{ToF_Fuzzy} (μ s)
0	-	268,76	0,20	0,08	0,063	0,07
2	292	267,98	0,36	0,10	0,031	0,05
4	590	267,21	0,46	0,19	0,055	0,10
6	895	266,45	0,32	0,10	0,018	0,06
8	1195	265,69	0,24	0,10	0,028	0,06
10	1557	264,93	0,57	0,17	0,053	0,12

Na Tabela 7.2 são apresentados os resultados experimentais das estimações das incertezas das velocidades medidas para as técnicas de TH, PD, fusão MLE e fusão *fuzzy*, para velocidades do vento de 2 a 10 m/s.

Tabela 7.2. Valores experimentais das velocidades do vento utilizando as técnicas de TH, PD, fusão MLE e fusão *fuzzy*, para a faixa de velocidade de vento de 2 a 10 m/s.

Velocidade (m/s)	Incerteza na Medição das Velocidades			
	$u_{\vartheta TH}$ (m/s)	$u_{\vartheta PD}$ (m/s)	$u_{\vartheta MLE}$ (m/s)	$u_{\vartheta Fuzzy}$ (m/s)
0	0,51	0,05	0,16	0,18
2	0,93	0,25	0,08	0,12
4	1,19	0,49	0,13	0,26
6	0,83	0,26	0,04	0,15
8	0,63	0,26	0,07	0,15
10	1,51	0,45	0,14	0,31

A partir dos resultados experimentais pode-se verificar que:

- As incertezas para a técnica de PD são menores do que aquelas para a técnica de TH, comprovando-se, assim, os estudos teóricos realizados nos capítulos anteriores.
- As incertezas finais obtidas pelas técnicas de fusão MLE e *fuzzy* são menores que as incertezas individuais obtidas pelas técnicas de TH e PD, verificando-se a eficácia dos algoritmos de fusão de dados.
- As incertezas obtidas pela técnica de fusão *fuzzy* são maiores do que as incertezas de fusão MLE, isto devido à consideração – de uma forma geral – da presença de incertezas aleatórias devido à atenuação do meio, ruído e do efeito de quantização no sistema digital.

Com base nos resultados obtidos, pode-se observar que a aplicabilidade de procedimentos de fusão de dados baseados nas técnicas de estimação MLE (teoria de probabilidade) e de inteligência computacional (teoria de conjuntos *fuzzy*) para a estimação do tempo de trânsito produz resultados confiáveis e com baixa incerteza.