



Juan Moises Maurício Villanueva

**Fusão de Dados das Técnicas de Tempo de Trânsito
Utilizando Transdutores Ultra-Sônicos para Medição
da Velocidade do Vento**

Dissertação de Mestrado

Dissertação apresentada como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre pelo Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica do Departamento de Engenharia Elétrica da PUC-Rio.

Orientador: Prof. Ricardo Tanscheit

Rio de Janeiro

Abril de 2009



Juan Moises Maurício Villanueva

**Fusão de Dados das Técnicas de Tempo de Trânsito
Utilizando Transdutores Ultra-Sônicos para Medição
da Velocidade do Vento**

Tese apresentada como requisito parcial para obtenção do grau de Doutor pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica do Departamento de Engenharia Elétrica do Centro Técnico Científico da PUC-Rio. Aprovada pela Comissão Examinadora abaixo assinada.

Dr. Ricardo Tanscheit
Orientador

Departamento de Engenharia Elétrica – PUC-Rio

Dr. Sebastian Yuri Cavalcanti Catunda
UFMA

Dra. Marley Maria Bernades Rebuszi Vellasco
Departamento de Engenharia Elétrica – PUC-Rio

Dr. Marco Antonio Meggiolaro
Departamento de Engenharia Mecânica - PUC-Rio

Dr. Milton Brown Do Coutto Filho
UFF

Dr. Jorge Luís Machado do Amaral
UERJ

Prof. José Eugenio Leal
Coordenador Setorial do Centro
Técnico Científico

Rio de Janeiro, 02 de abril de 2009

Todos os direitos reservados. É proibida a reprodução total ou parcial do trabalho sem autorização da universidade, do autor e do orientador.

Juan Moises Maurício Villanueva

Graduado como Bacharel em Engenharia Eletrônica pela Universidad Nacional de Ingeniería (UNI, Lima Perú) em 2004, e Mestre em Automação e Controle pela (UFMA), em 2005.

Ficha Catalográfica

Maurício Villanueva, Juan Moises

Fusão de dados das técnicas de tempo de trânsito utilizando transdutores ultra-sônicos para medição da velocidade do vento / Juan Moises Maurício Villanueva ; orientador: Ricardo Tanscheit. – 2009.

126 f. ; 30 cm

Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2009.

Inclui bibliografia

1. Engenharia elétrica – Teses. 2. Medição de velocidade de fluidos. 3. Tempo de trânsito. 4. Transdutores ultra-sônicos. 5. Incertezas. 6. Propagação de incertezas. 7. Fusão de dados. 8. Teoria de conjuntos fuzzy. 9. Funções de reconstrução. I. Tanscheit, Ricardo. II. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Departamento de Engenharia Elétrica. III. Título.

CDD: 621.3

Agradecimentos

A Deus, em primeiro lugar, que me permitiu concluir com êxito mais esta importante etapa em minha vida.

Ao meus orientadores Professores Ricardo Tanscheit e Sebastian Yuri C. Catunda, pela orientação, apoio, incentivo e, sobretudo pela amizade, sem cuja paciência e dedicação não teria sido possível realizar este trabalho.

À Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro (PUC-Rio) e à Universidade Federal do Maranhão (UFMA), pelos auxílios concedidos.

À CAPES e ao CNPq pelo apoio financeiro concedido.

Aos Professores do Departamento de Engenharia Elétrica da PUC-Rio e do Departamento de Engenharia de Eletricidade da UFMA, pelos valiosos ensinamentos.

Aos meus colegas do Laboratório de Instrumentação Eletrônica e Automação (LIEA) da UFMA, pelo companherismo ao longo deste período.

Aos meus colegas do Laboratório de Inteligência Computacional (ICA) da PUC-Rio, pelo companherismo.

E de modo especial, a minha mãe Ruth Villanueva Nieves e meus irmão Carlos Cesar, Luis Moises e Blanca Milagros, pelo apoio ao longo deste período.

Resumo

Villanueva, Juan Moises Maurício; Tanscheit, Ricardo (Orientador). **Fusão de Dados das Técnicas de Tempo de Trânsito Utilizando Transdutores Ultra-Sônicos para Medição da Velocidade do Vento**. Rio de Janeiro, 2009. 126p. Dissertação de Mestrado – Departamento de Engenharia Elétrica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

A medição da velocidade de fluidos tem relevância considerável em aplicações industriais e científicas, nas quais medições com baixa incerteza são geralmente requeridas. Nesta tese, tem-se como objetivo projetar e modelar um sistema de medição de velocidade de vento utilizando fusão de dados das informações dos tempos de trânsito obtidas pelas técnicas de detecção de limiar e diferença de fase. Para este propósito, este trabalho é composto por duas partes principais. Na primeira parte, apresenta-se uma análise da propagação de incertezas das técnicas de detecção de limiar e diferença de fase considerando duas estruturas para a medição da velocidade do vento, e faz-se a comparação das faixas de medição e suas incertezas associadas para cada estrutura de medição. Na segunda parte deste trabalho, faz-se um estudo das técnicas de fusão de dados aplicadas a instrumentação e medição, identificando-se duas técnicas principais baseadas em: (a) estimação de máxima probabilidade (MLE – *Maximum Likelihood Estimation*), (b) relação de compatibilidade *fuzzy* e operadores OWA (*Order Weighted Average*) com agregação parcial. Em seguida, estas técnicas de fusão são aplicadas para a estimação do tempo de trânsito, considerando-se várias medições independentes do tempo de trânsito obtidas pelas técnicas de detecção de limiar e diferença de fase. Finalmente, realiza-se uma análise da incerteza quantificando-se a incerteza de cada medição sobre o resultado final de fusão. Apresenta-se um estudo de caso englobando estas duas partes do trabalho, desenvolvendo-se o projeto e modelagem de um instrumento de medição de velocidade do vento com baixa incerteza, considerando-se as incertezas associadas, e o uso de técnicas adequadas de fusão de dados para prover informações com maior exatidão e confiabilidade. Resultados experimentais são realizados em um túnel de vento de baixa velocidade com o objetivo de verificar a consistência dos estudos teóricos apresentados.

Palavras-chave

Medição de velocidade de fluidos, Tempo de Trânsito, Transdutores Ultra-sônicos, Incertezas, Propagação de Incertezas, Fusão de Dados, Teoria de Conjuntos *Fuzzy*, Funções de Reconstrução.

Abstract

Villanueva, Juan Moises Maurício; Tanscheit, Ricardo (Advisor). **Data fusion of time of flight techniques using ultrasonic transducers for wind speed measurement.** Rio de Janeiro, 2009. 126p. MSc Dissertation – Departamento de Engenharia Elétrica, Pontificia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

Flow speed measurement has considerable relevance in industrial and scientific applications, where measurements with low uncertainty are required. In this work, a system for wind speed measurement using ultrasonic transducers is designed and modelled. This system makes use of data fusion techniques for the time-of-flight estimation, combining independent information provided by the threshold detection and phase difference methods. For this purpose, this work consists of two main parts. The first part presents an analysis of uncertainty and error propagation concerning the threshold detection and phase difference techniques and considering two structures for the wind speed measurement. Measurement ranges and associated uncertainties are then compared for each of those structures. In the second part of this work, data fusion techniques applied to instrumentation and measurement are studied; two main techniques are singled out: (a) Maximum Likelihood Estimation (MLE), (b) Fuzzy compatibility relation and Order Weighted Average (OWA) operators with partial aggregation. These fusion techniques are then applied to the time-of-flight estimation, by considering several independent measurements obtained through the threshold detection and phase difference techniques. Finally, uncertainty analysis is carried out by quantifying the influence of each independent measurement on the global fusion result. A case study is also presented, where an instrument for wind speed measurements with low uncertainty is designed and modelled. Appropriate techniques of data fusion aimed at improving accuracy and reliability are considered. Experiments are performed in a wind tunnel in order to verify the consistency of the results in view of the theoretical studies.

Keywords

Flow-speed measurement, Time-of-Flight (ToF), Ultrasonic Transducers, Uncertainties, Propagation of Uncertainty, Data Fusion, Fuzzy Set Theory, Function Reconstruction.

Sumário

| | |
|--|----|
| 1. Introdução | 14 |
| 1.1. Motivação | 14 |
| 1.2. Objetivos | 19 |
| 1.3. Organização da Tese | 19 |
| 2. Medida de Incertezas: Fundamentos | 21 |
| 2.1. Introdução | 21 |
| 2.2. Teoria de Erros | 21 |
| 2.3. Teoria de Incertezas | 22 |
| 2.4. Teoria da Evidência | 25 |
| 2.5. Teoria de Possibilidades | 27 |
| 2.6. Variáveis <i>Fuzzy</i> em Instrumentação e Medição | 29 |
| 2.6.1. Procedimento para construir uma RFV | 29 |
| 2.6.2. Transformação de Probabilidade para Possibilidade | 31 |
| 2.7. Conclusão | 32 |
| 3. Técnicas de Fusão de Dados Aplicadas a Medição | 33 |
| 3.1. Introdução | 33 |
| 3.2. Fusão de Dados Aplicada a Medição: Estado da Arte | 34 |
| 3.3. Classificação de Algoritmos de Fusão de Dados | 36 |
| 3.3.1. Nível 1 – Fusão de Dados Quantitativos Redundantes | 37 |
| 3.3.2. Nível 2 – Fusão de Dados Quantitativos Complementares | 37 |
| 3.3.3. Nível 3 – Fusão de Dados Qualitativos | 38 |
| 3.3.4. Nível 4 – Fusão de Dados Quantitativos e Qualitativos | 38 |
| 3.4. Algoritmos de fusão de dados quantitativos redundantes aplicados a instrumentação e medição | 39 |
| 3.4.1. Fusão de dados utilizando o algoritmo de estimação de máxima probabilidade (MLE) | 39 |
| 3.4.2. Fusão de dados utilizando relações de compatibilidade | 41 |
| 3.4.3. Fusão de dados utilizando operadores OWA | 44 |
| 3.4.4. Fusão de dados baseada na Agregação Parcial das Informações | 46 |
| 3.5. Análise de Incertezas dos Resultados de Fusão | 48 |
| 3.5.1. Análise de Incertezas Tipo A | 49 |
| 3.5.2. Análise de Incertezas Tipo B | 50 |
| 3.6. Conclusão | 52 |
| 4. Medição de Velocidade de Fluidos usando Transdutores Ultra-sônicos | 53 |
| 4.1. Introdução | 53 |
| 4.2. Conceitos Básicos sobre Ondas e Transdutores Ultra-sônicos | 54 |
| 4.3. Medição de Velocidade de Fluidos utilizando Transdutores Ultra-sônicos | 55 |
| 4.3.1. Método Doppler | 55 |
| 4.3.2. Método do Tempo de Trânsito | 56 |
| A. Detecção de Limiar | 57 |
| B. Diferença de Fase | 59 |
| C. Técnicas de Correlação | 60 |
| D. Filtro de Kalman | 63 |
| 4.3.3. Comparação dos Métodos de Tempo de Trânsito | 65 |
| 4.4. Considerações Práticas do uso de Transdutores Ultra-sônicos | 66 |

| | |
|--|-----|
| 5. Análise de Estruturas de Medição de Velocidade de Fluidos pelo Tempo de Trânsito | 68 |
| 5.1. Introdução | 68 |
| 5.2. Estruturas para Medição de Velocidade de Fluidos | 68 |
| 5.2.1. Estrutura Sentido Único (SU) | 69 |
| 5.2.2. Estrutura Sentido Duplo (SD) | 70 |
| 5.3. Análise de Propagação das Incertezas | 71 |
| 5.3.1. Sensibilidade Devida ao Ruído e à Atenuação do Meio | 71 |
| 5.3.2. Análise da Variação da Diferença de Fase | 73 |
| 5.4. Faixa de Medição da Velocidade de Fluido para as Estruturas SU e SD | 76 |
| 5.5. Comparação das Incertezas da Velocidade para as Estruturas SU e SD | 77 |
| 5.6. Modelagem do Sistema de Medição de Velocidade de Fluidos utilizando Transdutores Ultra-sônicos | 81 |
| 5.6.1. Transdutores Ultra-sônicos | 82 |
| 5.6.2. Meio de Transmissão | 82 |
| 5.6.3. Técnicas de Medição de Detecção de Limiar e Diferença de Fase | 83 |
| 5.6.4. Reconstrução da Velocidade do Vento | 83 |
| 5.6.5. Incertezas Associadas ao Processo de Medição | 84 |
| 5.7. Estudos de Caso | 85 |
| 5.7.1. Determinação do Tempo Eletrônico (t^E) | 85 |
| 5.7.2. Verificação do Modelo | 87 |
| 5.8. Conclusão | 89 |
| 6. Medição da Velocidade de Vento utilizando Fusão de Dados: Simulações | 91 |
| 6.1. Introdução | 91 |
| 6.2. Modelo de Medição da Velocidade do Vento | 91 |
| 6.3. Considerações de Projeto | 93 |
| 6.3.1. Número de medições do ToF pela técnica da diferença de fase | 93 |
| 6.3.2. Resolução de medição | 94 |
| 6.4. Avaliação das componentes de incerteza na estimação do ToF | 95 |
| 6.4.1. Incertezas aleatórias do ToF devido à quantização para a técnica de TH | 96 |
| 6.4.2. Incertezas aleatórias do ToF devido ao ruído para a técnica de TH | 97 |
| 6.4.3. Incertezas aleatórias do ToF devido à quantização para a técnica de PD | 99 |
| 6.4.4. Incertezas aleatórias do ToF devido ao ruído para a técnica de PD | 100 |
| 6.5. Simulação do modelo utilizando algoritmos de fusão de dados | 102 |
| 6.5.1. Fusão utilizando-se a estimação de máxima probabilidade (MLE) | 103 |
| 6.5.2. Fusão <i>fuzzy</i> utilizando-se operadores OWA com agregação parcial | 105 |
| 6.5.3. Comparação dos resultados de simulação | 108 |
| 7. Medição da Velocidade do Vento em um Túnel de Vento utilizando Fusão de Dados: Resultados Experimentais | 113 |
| 7.1. Introdução | 113 |
| 7.2. Descrição do Experimento | 113 |
| 7.3. Procedimento Experimental | 115 |
| 7.4. Resultados Experimentais | 116 |
| 7.4.1. Determinação do tempo de atraso eletrônico | 116 |
| 7.4.2. Resultados experimentais utilizando o Túnel de Vento | 118 |
| 8. Conclusões e Trabalhos Futuros | 121 |
| 8.1. Conclusões | 121 |
| 8.2. Trabalhos Futuros | 122 |
| Referências | 123 |

Lista de símbolos e abreviações

| | |
|---------------------------|--|
| θ | Ângulo de alinhamento dos transdutores; |
| λ | Comprimento de onda; |
| DPV | Densidade de Potência do Vento; |
| ρ | Densidade do ar |
| ϕ | Diferença de fase instantânea; |
| L | Distância de separação entre os transdutores; |
| k_p | Fator de cobertura; |
| f | Frequência de operação dos transdutores ultra-sônicos; |
| f_s | Frequência de amostragem; |
| Bel | Função de credibilidade; |
| PDF | Função de densidade de probabilidade; |
| Pos | Função de possibilidade; |
| u_A | Incerteza aditiva; |
| u_M | Incerteza multiplicativa; |
| u_{ϑ} | Incerteza na medição da velocidade do vento; |
| u_{ToF} | Incerteza na medição do tempo de trânsito (ToF); |
| ε_{DPV} | Incerteza relativa da densidade de potência do vento; |
| ε_{ϑ} | Incerteza relativa da velocidade do vento; |
| SNR | Relação sinal-ruído; |
| SU | Configuração dos transdutores sentido único; |
| SD | Configuração dos transdutores sentido duplo; |
| t_{AB} | Tempo de propagação do sinal entre os transdutores A e B; |
| t_{BA} | Tempo de propagação do sinal entre os transdutores B e A; |
| t^E | Tempo de atraso eletrônico devido à dinâmica dos transdutores; |
| ToF | Tempo de trânsito; |
| T_K | Temperatura do meio (Kelvin); |
| ϑ | Velocidade do vento (m/s); |
| C | Velocidade do som (m/s). |

Lista de Figuras

| | |
|---|----|
| Figura 2.1. Intervalo de confiança..... | 24 |
| Figura 2.2. Intervalos de confiança associados a níveis de confiança requeridos..... | 25 |
| Figura 2.3. Caso de Ignorância Parcial: Representação das incertezas aleatórias e sistemáticas num intervalo de confiança..... | 26 |
| Figura 2.4. Decomposição de um número <i>fuzzy</i> em $m = 5$ níveis de pertinência..... | 28 |
| Figura 2.5. Variável <i>random-fuzzy</i> (RFV). | 29 |
| Figura 2.6. Variável <i>fuzzy</i> : a) intervalos de confiança iguais; b) intervalos de confiança variáveis..... | 30 |
| Figura 2.7. Construção de uma RFV: a) PDF de uma contribuição aleatória; b) Função de distribuição de possibilidades de contribuições aleatórias; c) Intervalos de confiança associados com efeitos sistemáticos ou caso de ignorância parcial; d) RFV completa.... | 31 |
| Figura 2.8. Transformação: a) Função de densidade de probabilidade; b) Função de distribuição de Possibilidades..... | 32 |
| Figura 3.1. Diagrama funcional de integração de múltiplos sensores..... | 35 |
| Figura 3.2. Diagrama de um sistema genérico de fusão de dados de 4º nível. | 39 |
| Figura 3.3. Fusão dos números <i>fuzzy</i> X_1 , X_2 e X_3 utilizando relações de compatibilidade. | 43 |
| Figura 3.4. Mapeamento utilizando relações de compatibilidade: $\{X_1\}_R$, $\{X_2\}_R$ e $\{X_3\}_R$ | 45 |
| Figura 3.5. Fusão dos números <i>fuzzy</i> X_1 , X_2 e X_3 utilizando relações de compatibilidade e operadores OWA..... | 46 |
| Figura 3.6. Fusão dos números <i>fuzzy</i> X_1 , X_2 e X_3 utilizando relações de compatibilidade, operadores OWA e agregação parcial. | 48 |
| Figura 3.7. Diminuição da incerteza final ($0,89\sigma$) utilizando o procedimento de fusão de estimação de máxima probabilidade (MLE). | 50 |
| Figura 3.8. Funções de pertinência normal, subnormal, convexo e não convexo. | 51 |
| Figura 3.9. Intervalo de confiança da medição. | 52 |
| Figura 4.1. Diagrama básico de um sistema de medição. | 53 |
| Figura 4.2. Princípio ultrasônico de medição de velocidade de fluidos baseado no efeito Doppler..... | 56 |
| Figura 4.3. Configuração dos transdutores ultrasônicos para medição de velocidade de fluidos baseado no método do Tempo de Trânsito..... | 57 |
| Figura 4.4. Medição do ToF utilizando a técnica de Detecção de Limiar (TH)..... | 59 |
| Figura 4.5. Medição do ToF utilizando a técnica da Diferença de Fase (PD)..... | 60 |
| Figura 4.6. Sinal ultrasônica transmitida x e recebida y | 62 |

| | |
|---|-----|
| Figura 4.7. Operação de correlação $R(x,y)$ | 62 |
| Figura 4.8. Processo de aquisição de sinais ultrasônicos | 64 |
| Figura 4.9. Pré-processamento do sinal ultrasônico para extrair a envoltória do sinal através da Transformada de Hilbert..... | 64 |
| Figura 4.10. Estimação do ToF utilizando o Filtro de Kalman. | 65 |
| Figura 5.1. Estruturas para medição de velocidade de vento em sentido único..... | 69 |
| Figura 5.2. Estruturas para medição da velocidade do vento em sentido duplo..... | 70 |
| Figura 5.3. Curvas de ρ para $u_M = u_A$, $u_M = 5u_A$ e $u_A = 5u_M$ ($v_p = v_d/v_m$)..... | 73 |
| Figura 5.4. Variação da Diferença de Fase medida em função da distância entre os transdutores $L = n\lambda$ ($n = 5, 10, 25$) e da velocidade do vento..... | 75 |
| Figura 5.5. Diferença de fase medida em função da velocidade do vento, para $L = 10\lambda$ | 75 |
| Figura 5.6. Faixa de medição da velocidade do vento como função da distância e temperatura, para as estruturas de medição SU e SD. | 77 |
| Figura 5.7. Variação das incertezas da medição da velocidade do vento para as estruturas SU e SD em função de θ | 80 |
| Figura 5.8. Modelagem do sistema de medição de velocidade de vento utilizando transdutores ultrasônicos..... | 82 |
| Figura 5.10. Procedimento de propagação das ondas ultra-sônicas no tempo. | 87 |
| Figura 5.11. ToF pela técnica de TH (t_{TH})..... | 88 |
| Figura 5.12. ToF pela técnica de PD (t_{PDi})..... | 88 |
| Figura 6.1. Modelo para Medição de Velocidade de Vento..... | 92 |
| Figura 6.2. Aquisição digital de dados do sinal ultra-sônico no transdutor receptor. | 96 |
| Figura 6.3. Variação da incerteza aleatoria do ToF para a técnica de Detecção de Limiar (TH) para níveis de detecção de 75 % e 80% do valor máximo do sinal. | 98 |
| Figura 6.4. Aquisição digital dos sinais de transmissão (TX) e recepção (RX) para a medição da diferença de tempo $\Delta t = t_{RX} - t_{TX}$ | 99 |
| Figura 6.5. Influência do ruído na estimação do ToF. | 100 |
| Figura 6.6. Variação da incerteza aleatoria para a técnica da Diferença de Fase (PD)..... | 101 |
| Figura 6.7. Curvas de ρ para $p = 1$, $p = 2$ e $p = 5$ ($u_{TH} = pu_{PD}$)..... | 105 |
| Figura 6.8. Construção das RFV a partir das medições do ToF obtidas pelas técnicas de TH e PD e das incertezas devido ao ruído aleatório e de quantização. | 105 |
| Figura 7.1. Perspectiva do túnel de vento de retorno fechado..... | 114 |
| Figura 7.2. Formas de onda no transdutor transmissor (TX) e receptor (RX). | 116 |
| Figura 7.3. Circuito para a transmissão ultra-sônica (TX)..... | 117 |
| Figura 7.4. Circuito para a recepção ultra-sônica (RX). | 117 |

Lista de Tabelas

| | |
|---|-----|
| Tabela 3.1. Classificação de algoritmos de fusão de dados em níveis crescentes de complexidade..... | 37 |
| Tabela 4.1. Comparação entre as técnicas de Tempo de Trânsito..... | 66 |
| Tabela 5.1. Tempo de Trânsito teórico t_{TH} | 86 |
| Tabela 5.2. Tempo de Trânsito simulado t_{TH}^M | 86 |
| Tabela 5.3. Tempo de atraso eletrônico t^E | 86 |
| Tabela 5.4. Procedimento para medição do ToF pela técnica de TH e PD para a estrutura SU. | 88 |
| Tabela 6.1. Valores do ToF, incertezas e parâmetros do RFV para as técnicas de TH e PD.. | 106 |
| Tabela 6.2. Pesos de ponderação OWA de dimensão $(m + 1)$ | 107 |
| Tabela 6.3. Valores de simulação do ToF e incertezas (em μs) para o valor teórico, pelas técnicas de TH e PD, com procedimentos de fusão MLE e <i>Fuzzy</i> ($u_A = 0,02 \mu s$ e $u_M = 0,001 \mu s$)..... | 109 |
| Tabela 6.4. Valores de simulação do ToF e incertezas (em μs) para o valor teórico, pelas técnicas de TH e PD, com procedimentos de fusão MLE e <i>Fuzzy</i> ($u_A = 0,03 \mu s$ e $u_M = 0,001 \mu s$)..... | 109 |
| Tabela 6.5. Valores de simulação do ToF e incertezas (em μs) para o valor teórico, pelas técnicas de TH e PD, com procedimentos de fusão MLE e <i>Fuzzy</i> ($u_A = 0,04 \mu s$ e $u_M = 0,001 \mu s$)..... | 109 |
| Tabela 6.6. Valores de simulação do ToF e incertezas (em μs) para o valor teórico, pelas técnicas de TH e PD, com procedimentos de fusão MLE e <i>Fuzzy</i> ($u_A = 0,02 \mu s$ e $u_M = 0,002 \mu s$)..... | 110 |
| Tabela 6.7. Valores de simulação do ToF e incertezas (em μs) para o valor teórico, pelas técnicas de TH e PD, com procedimentos de fusão MLE e <i>Fuzzy</i> ($u_A = 0,03 \mu s$ e $u_M = 0,002 \mu s$)..... | 110 |
| Tabela 6.8. Valores de simulação do ToF e incertezas (em μs) para o valor teórico, pelas técnicas de TH e PD, com procedimentos de fusão MLE e <i>Fuzzy</i> ($u_A = 0,04 \mu s$ e $u_M = 0,002 \mu s$)..... | 110 |
| Tabela 6.9. Valores de simulação da incerteza da velocidade do vento (em m/s) para a técnica de PD e usando os procedimentos de fusão MLE e <i>Fuzzy</i> ($u_A = 0,04 \mu s$ e $u_M = 0,002 \mu s$). | 111 |

| | |
|---|-----|
| Tabela 7.1. Valores experimentais das incertezas do ToF utilizando as técnicas de TH, PD, fusão MLE e fusão <i>fuzzy</i> , para a faixa de velocidade de vento de 2 a 10 m/s. | 119 |
| Tabela 7.2. Valores experimentais das velocidades do vento utilizando as técnicas de TH, PD, fusão MLE e fusão <i>fuzzy</i> , para a faixa de velocidade de vento de 2 a 10 m/s. | 120 |