

# 1

## Introdução

### 1.1

#### Motivação

A medição da velocidade do vento (fluidos) é de grande importância para diversas aplicações industriais e científicas tais como túneis de vento, aeroportos, estações meteorológicas, navegação de embarcações e estudos de instalação de turbinas eólicas, etc. Entre os principais instrumentos utilizados para a medição da velocidade do vento estão os anemômetros, os quais podem ser de diversos tipos: Rotacional, Tubo de Pressão, Deflexão, Termoelétricos e Ultra-sônicos. Suas principais características são.

- Os anemômetros rotacionais são os mais simples. São construídos, basicamente, por hélices que giram a uma velocidade angular proporcional a velocidade do vento que passa por elas. Este tipo de anemômetro pode ser formado por canecas semi-cônicas anexadas a um eixo horizontal de rotação. Sua principal desvantagem é estar em contato com o ar, obstruindo a passagem do fluxo de ar para medir a velocidade do vento. Além disso, este anemômetro também é pouco sensível a rajadas de vento de curta duração, devido a sua inércia.
- O Tubo de Pressão é um tipo de anemômetro que usa diferenças de pressão exercida pelo movimento das moléculas do ar em movimento, convertendo a energia cinética em energia potencial. A principal vantagem deste dispositivo é que pode ser construído a um custo muito reduzido, quando comparado aos demais anemômetros disponíveis. As principais desvantagens são a sua exatidão e resolução espacial, insuficientes para algumas aplicações.
- O anemômetro de deflexão pode ser construído facilmente, pois é formado apenas por uma chapa metálica em que um dos lados é livre e outro é preso à ponta do arco que a constitui. Seu funcionamento também é muito simples: basicamente o vento incide sobre a chapa metálica, a qual defletirá em função da magnitude da velocidade do vento. A incerteza deste dispositivo é muito grande quando comparada aos anemômetros comerciais.
- Os anemômetros termoelétricos baseiam-se na troca de calor para determinar a velocidade do fluido. Esta troca de calor é feita por meio de um fio ou filme condutor de calor e do próprio fluido medido. A velocidade do vento é proporcional à quantidade de calor retirada do fio ou filme quente. As vantagens deste anemômetro

são: não possuir partes móveis, ter um tamanho reduzido quando comparado com os anemômetros rotacionais, e apresentar maior sensibilidade para baixas velocidades do vento. No entanto, tais anemômetros são frágeis e seus parâmetros são muito sensíveis às partículas de poluição depositadas no fio, o que implica diretamente em recalibração e custo elevado.

- Os anemômetros ultra-sônicos operam com base no princípio de que o movimento das partículas do ar em movimento afeta a velocidade de uma onda acústica, com frequência ultra-sônica. Entre as principais características dos sistemas de medição baseados em técnicas ultra-sônicas estão: (a) não produzem perdas de pressão quando instalados no meio de medição, (b) não contaminam o fluido, (c) o procedimento de medição é não invasivo, (d) não causam desgaste algum e podem ser utilizado em aplicações com condições extremas de pressão e temperatura, (e) boa exatidão e resposta rápida [PÁLLAS-ARENY, 2001]. Estas características proporcionam um grande potencial para a realização de pesquisas teóricas e experimentais para medição de parâmetros de fluidos. Por estes motivos, escolheu-se o anemômetro ultra-sônico como objeto de estudo neste trabalho.

Em geral, um aspecto importante no projeto de sistemas de medição reside na definição da exatidão da medição e da incerteza associada. Na teoria de análise e propagação de incertezas, define-se o termo exatidão de medição como o grau de concordância entre o resultado de uma medição e um valor verdadeiro do mesurando. Deve-se destacar que o termo precisão não deve ser tomado como exatidão. Entende-se que o resultado de medição é a melhor estimativa do valor do mesurando, e que é associado a um parâmetro definido como a incerteza. O parâmetro pode ser, por exemplo, um desvio padrão (ou um múltiplo dele), correspondente a um nível de confiança estabelecido. Assim, a incerteza de medição caracteriza a dispersão dos valores que podem ser fundamentalmente atribuídos a um mesurando [INMETRO, 2007], [TAYLOR, 1997].

Nas últimas décadas, sistemas de medição de velocidade de fluidos baseados em técnicas ultra-sônicas evoluíram rapidamente, fazendo uso de tecnologias avançadas para a fabricação de transdutores ultra-sônicos, de técnicas de processamento de sinais e de estudos para a análise e propagação de incertezas. Diversas aplicações baseadas em transdutores ultra-sônicos podem ser desenvolvidas, entre elas a medição da velocidade de vento (ou fluidos), que apresenta relevância considerável em aplicações industriais e científicas. Por exemplo, pode-se destacar o setor de energia eólica, em que se requer o desenvolvimento de tecnologias de medição e instrumentação – para avaliação, monitoração e tomada de decisões – a fim de tornar competitiva esta forma de energia.

No setor eólico, a medição de velocidade do vento é frequentemente utilizada para a determinação do potencial eólico e efetuada por meio do cálculo da Densidade de Potência do

Vento ( $DPV$ ). A  $DPV$  é considerada como um parâmetro de avaliação para a instalação de turbinas para geração de energia elétrica [HUGLES, 2000], [CATUNDA, 2004], em que a expressão que relaciona o potencial eólico com a velocidade do vento é dada por:

$$DPV = \frac{1}{2} \rho \mathcal{V}^3 \quad (1.1)$$

em que  $\rho$  é a densidade do ar e  $\mathcal{V}$  é a velocidade do vento.

Na equação (1.1), se se considerar que a densidade do ar não varia significativamente com o tempo, pode-se observar que, para pequenas variações na velocidade do vento, têm-se variações significativas no potencial eólico ( $DPV$ ). Adicionalmente, nesta equação, realizando-se a análise e propagação de incertezas [TAYLOR, 1997], tem-se como resultado uma expressão que relaciona as incertezas do potencial eólico e da velocidade do vento, dada aproximadamente por:

$$\varepsilon_{DPV} \cong 3\varepsilon_{\mathcal{V}} \quad (1.2)$$

em que  $\varepsilon_{DPV}$  e  $\varepsilon_{\mathcal{V}}$  são as incertezas relativas do  $DPV$  e da velocidade do vento.

De acordo com a equação (1.2), pode-se observar que o grau de incerteza relativa do potencial eólico,  $\varepsilon_{DPV}$ , tem uma expectativa de ser três vezes maior do que o grau de incerteza relativa da velocidade do vento,  $\varepsilon_{\mathcal{V}}$ . Portanto, para tais aplicações, requer-se projetar um instrumento para medição da velocidade do vento com baixa incerteza, a fim de prover informações confiáveis sobre o potencial gerado a partir do vento para a geração de energia elétrica [CATUNDA, 2004].

Entre as principais técnicas para medição de velocidade de fluidos utilizando transdutores ultra-sônicos estão: (a) o método de Doppler, utilizado preferencialmente para fluidos líquidos e gasosos com partículas refletoras no meio e (b) o método do Tempo de Trânsito, utilizado principalmente para aplicações de fluidos líquidos e gasosos sem partículas refletoras no meio [PÀLLAS-ARENY, 2001]. No entanto, devido ao fato de que neste trabalho tem-se como objetivo a aplicação de técnicas para medição da velocidade do vento, faz-se uso do método do Tempo de Trânsito.

Apesar dos avanços em tecnologia ultra-sônica, as técnicas de medição de velocidade de fluidos baseadas no método do Tempo de Trânsito apresentam baixa exatidão, devido, principalmente, a: (a) amplitude do sinal transmitido, (b) atenuação do meio, (c) ruído aleatório e reflexões; e (d) baixa relação sinal a ruído (SNR) do sinal recebido [TONG, 2002]. Entretanto, estas técnicas de medição são muito utilizadas por serem técnicas simples de implementar e por não requererem necessariamente a transmissão contínua de ondas. Desta forma, sistemas de medição baseadas nas técnicas de Tempo de Trânsito podem ser projetados para operar com um baixo consumo de energia, o que é conveniente para aplicações em sistemas embarcados remotos, no setor de energia eólica, para a monitoração da velocidade do

vento em florestas, áreas desertas, localizações marítimas, etc., em que a energia local não é disponível [HAUPTMANN, 2001], [VILLANUEVA, 2008].

Um aspecto importante no projeto de instrumentos de medição, radica em realizar a estimação da incerteza que expressa a dispersão esperada da medição que é geralmente empregada para determinar as especificações do instrumento de medição e realizar a tomada de decisões com base nas grandezas medidas compatíveis com resultados do processo de aferição.

A escolha de um modelo apropriado para a quantificação de incertezas depende das características da informação disponível. Caso as medições sejam representadas através de distribuições de probabilidade conhecidas, a avaliação das incertezas é realizada por meio da teoria de probabilidade e processos estatísticos. Caso as medições apresentem informações imprecisas e não seja possível obter informações estatísticas, outras ferramentas devem ser consideradas, como por exemplo, aquelas baseadas em técnicas de inteligência computacional.

Existem duas principais razões para considerar o uso de técnicas de inteligência computacional em instrumentação e medição. Primeiramente, existe uma crescente demanda pela implementação de sistemas de instrumentação sofisticados com especificações de alta exatidão. Em segundo lugar, essas técnicas fornecem uma melhor descrição para a modelagem de incertezas, podendo representar contribuições de incertezas do tipo aleatórias e sistemáticas. Entre as técnicas de inteligência computacional, estratégias baseadas na teoria de conjuntos *fuzzy* (Teoria de Possibilidade e Matemática Intervalar) podem ser utilizadas adequadamente para a representação e avaliação das incertezas [ANNAMARIA, 1997], [LIMA, 2000], [REZNIK, 2004], [DO COUTTO, 2007], [FERRERO, 2007] e [PERTILE, 2008].

Ao se projetar um instrumento de medição de velocidade de vento, com característica de baixa incerteza de medição, componentes de erros e incertezas devem ser identificados, quantificados e minimizados. Assim, a análise da propagação de incertezas relacionadas ao processo de medição da velocidade do vento permite determinar as especificações de operação do instrumento de medição, tais como incerteza da medição, faixa de medição, variação do meio (principalmente temperatura), sensibilidade ao ruído e atenuação do meio.

Técnicas de fusão de dados podem ser utilizadas com o objetivo de reduzir as incertezas, aumentar a capacidade operacional dos instrumentos de medição e acrescentar confiança aos resultados medidos. O processo de fusão de dados combina informações com uma consideração apropriada das características de suas incertezas, de uma maneira consistente [KELLY, 1999].

Técnicas de fusão de dados compõem-se de um conjunto de métodos que utilizam dados provenientes de fontes de possível diferente natureza. Elas destinam-se a combinar tais dados para melhorar a qualidade da informação deles extraída. Os métodos comumente utilizados para a combinação de informações – provenientes de dados quantitativos (numéricos) – são

baseados em algoritmos que atribuem ponderações às informações disponíveis, como, por exemplo, procedimentos estatísticos de natureza Bayesiana, Filtro de Kalman e técnicas de inteligência computacional (lógica *fuzzy*, redes neurais artificiais, algoritmos genéticos, e sistemas especialistas) [WANG, 1994], [RUSSO, 1994], [MAYBECK, 1997], [MAHAJAN, 2001], [LUO, 2002], e [DO COUTTO, 2007]. Uma aplicação adequada destas técnicas de fusão de dados permite projetar instrumentos de medição com características desejáveis de baixa incerteza, robustos e confiáveis.

Diversas soluções de instrumentação para o projeto de um sistema de medição dizem respeito a instrumentação embarcada, com diversas aplicações industriais e científicas. Sistemas de instrumentação embarcados são concebidos para aplicações específicas, contendo em sua estrutura componentes de *hardware* e *software*. O *hardware*, composto por sensores, atuadores e funções de controle, é utilizado para interagir com o ambiente. O *software* controla as ações do *hardware* para realizar as funcionalidades requeridas [GASJKI, 1994].

Na primeira fase do projeto de um sistema de instrumentação embarcado, requer-se o desenvolvimento de um modelo apropriado para especificar as funcionalidades do sistema. Em seguida, deve-se descrever como o sistema será fabricado, isto é, transformar o modelo em uma arquitetura, especificando-se a quantidade e tipos de componentes, assim como as conexões entre eles [GASJKI, 1994]. Várias arquiteturas de sistemas embarcados podem ser consideradas nesta segunda etapa do projeto, compreendendo *hardware*, *software* e partes mistas, como, por exemplo, microcontroladores, processadores digitais de sinais (PDS), arquiteturas configuráveis baseadas em FPGAs (*Field Programmable Gate Arrays*) e estruturas de circuitos integrados para aplicações específicas – ASICs (*Application Specific Integrated Circuits*) [ALIPPI, 1999].

Um sistema de instrumentação embarcado geralmente opera realizando, em intervalos de tempo definidos, a leitura de dados a partir dos sensores e o processamento da informação, e finalmente fornece o resultado da medição ou envia sinais para os elementos atuadores. A duração da execução de cada tarefa deve ser especialmente considerada, de forma a se estabelecer um limite de tempo dentro do qual a resposta é fornecida e garantir as restrições de tempo definidas pelo sistema [GASJKI, 1994]. No caso do projeto de um sistema de instrumentação embarcado para a medição de velocidade de vento, a restrição imposta está relacionada ao tempo de resposta requerido para fornecer o resultado da estimativa da medição, isto é, o tempo necessário para coletar todas as informações necessárias a partir dos transdutores ultra-sônicos, processá-las utilizando técnicas de fusão de dados e fornecer o resultado da estimativa da velocidade do vento.

Neste trabalho, apresenta-se o desenvolvimento metodologias para medição do tempo de trânsito utilizando transdutores ultra-sônicos baseada em algoritmos de fusão de dados. A estimativa do tempo de trânsito com baixa incerteza permite projetar um instrumento de

medição embarcado para a medição da velocidade do vento com características desejáveis de alta exatidão. De forma avaliar os resultados das estimações utilizando algoritmos de fusão de dados, são realizados estudos apropriados de análise e propagação de incertezas.

## 1.2

### Objetivos

Os objetivos desta tese são:

- Propor um modelo de um sistema de instrumentação embarcado para medição de velocidade de vento baseado nas técnicas de fusão de dados;
- Efetuar uma análise dos diversos blocos funcionais de um sistema de instrumentação embarcado com relação à qualidade de medição da velocidade do vento, utilizando, neste caso, um modelo de simulação da propagação de ondas ultra-sônicas através do meio de medição;
- Implementação e avaliação de técnicas de medição do tempo de trânsito ultra-sônico baseadas em fusão de dados, analisando-se sua incerteza final em comparação com as medições individuais.

## 1.3

### Organização da Tese

Esta tese é dividida em oito capítulos e referências bibliográficas.

No Capítulo 2 é apresentada uma revisão geral sobre a teoria de erros, teoria de incertezas, teoria da evidência e teoria de possibilidade. Estuda-se a representação das medições e a avaliação das incertezas utilizando variáveis *random-fuzzy* (RFV).

No Capítulo 3 é apresentada uma revisão das técnicas de fusão de dados aplicadas a medição, especificamente as técnicas de fusão de dados quantitativos (numéricos) de natureza redundante, tais como: (a) estimacão de máxima probabilidade, (b) relações de compatibilidade *fuzzy*, (c) operador OWA (*Ordered Weighted Average*) e (d) agregação parcial das informações.

No Capítulo 4 é apresentada uma revisão dos métodos de medição de velocidade de fluidos usando transdutores ultra-sônicos, especificamente os métodos de Tempo de Trânsito e método Doppler.

No Capítulo 5 propõe-se o modelo para medição da velocidade do vento baseadas no método de Tempo de Trânsito utilizando transdutores ultra-sônicos. Realiza-se a simulação do

modelo, avaliando-se a contribuição das incertezas devido ao ruído e à atenuação do meio. Determina-se a faixa de medição da velocidade do vento.

No Capítulo 6 propõe-se o modelo para medição de velocidade de vento utilizando fusão de dados das técnicas de tempo de trânsito. São apresentados resultados utilizando o modelo de simulação desenvolvido no Capítulo 5, considerando-se diferentes valores de velocidades e incertezas.

No Capítulo 7 são apresentados resultados experimentais considerando-se a medição da velocidade do vento, utilizando-se o procedimento proposto, em um túnel de vento de baixa velocidade.

No Capítulo 8 são apresentadas as conclusões e sugestões para trabalhos futuros.