

## 6

# Medição da Velocidade de Vento utilizando Fusão de Dados: Simulações

### 6.1

#### Introdução

Neste capítulo, apresentam-se as simulações computacionais do modelo de medição da velocidade do vento utilizando fusão de dados das medições independentes do Tempo de Trânsito (ToF) obtidas por meio das técnicas de Detecção de Limiar (TH) e Diferença de Fase (PD). Para este propósito, como visto no Capítulo III (análise e classificação das técnicas de fusão), utilizam-se duas técnicas de fusão de dados, tais como: (a) Fusão utilizando a Estimção de Máxima Probabilidade MLE, e (b) Fusão *fuzzy* utilizando operadores OWA com agregação parcial.

Como cada técnica de fusão utiliza uma representação adequada das incertezas associadas às medições do ToF, neste capítulo são apresentadas comparações dos resultados finais de fusão do Tempo de Trânsito (ToF), extraindo-se conclusões quantitativas e qualitativas de cada técnica utilizada.

### 6.2

#### Modelo de Medição da Velocidade do Vento

Um problema fundamental acerca de sistemas de medição que envolvem módulos de fusão de dados está na modelagem da arquitetura de processamento. Aqui, a principal questão consiste na escolha da etapa em que serão fundidos os dados. Uma regra básica do projeto deste tipo de arquiteturas é que a fusão de dados deve ser realizada o mais próximo possível da origem das fontes de informação, evitando assim a perda de informações na extração de atributos ou um processamento adicional. Este fato produz um aumento do custo computacional, mas, por outro lado, tem-se uma alta exatidão dos resultados de fusão [HALL, 2004]. Portanto, a seleção de uma arquitetura não é arbitrária, mas depende da disponibilidade das fontes de informação.

Levando-se em consideração os aspectos acima, na Figura 6.1 apresenta-se o modelo centralizado de fusão de dados para medição da velocidade do vento, cujos componentes são os seguintes:

- Meio de medição;
- Técnicas de medição do ToF;
- Fusão de dados;
- Função de Reconstrução.

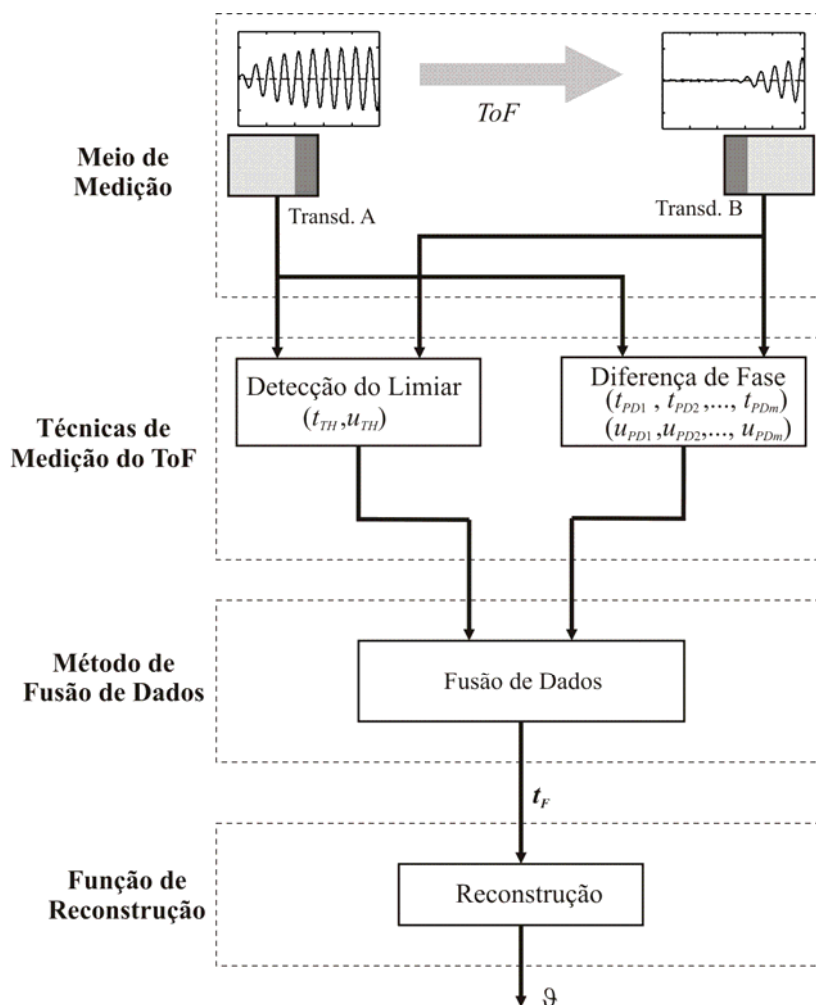


Figura 6.1. Modelo para Medição de Velocidade de Vento

- Meio de medição:* considera-se que o sinal ultra-sônico no transdutor receptor é afetado por uma incerteza aditiva (ruído) e por uma incerteza multiplicativa devida à atenuação do meio. O meio de propagação é modelado considerando-se um atraso de tempo determinado a partir das especificações da configuração dos transdutores.
- Técnicas de medição do ToF:* o princípio de operação deste tipo de aplicação é baseado na medição do Tempo de Trânsito (ToF) das ondas ultra-sônicas entre dois transdutores ultra-sônicos. Para este propósito, duas técnicas são utilizadas para a medição do ToF: Deteccção de Limiar (TH) e Diferença de Fase (PD).
- Fusão de Dados:* este modelo realiza a fusão de dados das informações do ToF obtidas por meio das técnicas de TH e PD, fornecendo um único valor de ToF de fusão. São

utilizadas duas técnicas de fusão de dados. A primeira está baseada no método de estimação de Máxima Probabilidade, que considera somente contribuições de incertezas aleatórias das grandezas medidas. A segunda está baseada nas relações de compatibilidade e operadores OWA com agregação parcial das informações, que considera contribuições de incertezas aleatórias.

- d) *Função de Reconstrução*: a estimação da velocidade do vento ( $\vartheta$ ) é encontrada através da função de reconstrução (Eq. 5.38), que realiza o mapeamento dos valores do ToF para velocidade do vento.

## 6.3

### Considerações de Projeto

Nesta seção são apresentadas considerações práticas para a especificação do modelo de medição da velocidade do vento utilizando técnicas de fusão de dados (Figura 6.1), tais como:

- Número de medições do ToF pela técnica da Diferença de Fase;
- Resolução de medição.

#### 6.3.1

#### Número de medições do ToF pela técnica da diferença de fase

Considerando-se o modelo de medição da velocidade do vento que utiliza os procedimentos de fusão de dados – onde é realizada uma medição do ToF pela técnica de Detecção de Limiar (TH) e “ $m$ ” medições do ToF pela técnica da Diferença de Fase (PD) – deseja-se estabelecer o tempo de resposta do sistema a fim de se obter o resultado do ToF final de fusão.

O número de medições do ToF pela técnica da Diferença de Fase,  $m$ , é vinculado ao tempo de resposta desejado da medição. O tempo de resposta de medição,  $t_m$ , pode ser determinado pelo tempo de resposta da medição de cada técnica, dado por:

$$t_m = t_{ToF(TH)} + t_{ToF(PD)} \quad (6.1)$$

em que  $t_m$  é o tempo de resposta de medição,  $t_{ToF(TH)}$  é o tempo usado pela técnica de TH, e  $t_{ToF(PD)}$  é o tempo usado pela técnica de PD.

O tempo usado pela técnica de TH pode ser expresso como a soma de “ $n$ ” comprimentos de onda ultra-sônica transmitidos desde o transdutor emissor até a detecção no transdutor receptor, mais o tempo eletrônico:

$$t_{ToF(TH)} = \frac{n}{f} + t^E \quad (6.2)$$

onde o número de comprimentos de onda “ $n$ ” pode ser determinado a partir da distância de calibração entre os transdutores ( $L$ ), a frequência do transdutor ultra-sônico ( $f$ ) e a velocidade do som ( $C$ ):

$$n = \frac{L \cdot f}{C} \quad (6.3)$$

O tempo usado pela técnica de PD está relacionado ao tempo necessário para a realização das medições das “ $m$ ” diferenças de fase entre o transdutor transmissor e o receptor, dada por:

$$t_{\text{ToF(PD)}} = \frac{m}{f} \quad (6.4)$$

Substituindo (6.2) e (6.4) em (6.1) o tempo de resposta de medição é:

$$t_m = t^E + \frac{n + m}{f} \quad (6.5)$$

onde  $t^E$  é o tempo de atraso eletrônico,  $n$  é o número de comprimentos de onda,  $m$  é o número de medições do ToF pela técnica de PD e  $f$  é a frequência de operação dos transdutores ultra-sônicos.

Para definir o tempo de resposta do sistema, define-se como parâmetro de projeto do modelo o tempo máximo de medição,  $t_{m\text{max}}$  ( $t_m \leq t_{m\text{max}}$ ):

$$t^E + \frac{n + m}{f} \leq t_{m\text{max}} \quad (6.6)$$

A partir de (6.6), pode se estabelecer uma relação para o número de medições do ToF pela técnica da Diferença de Fase, dada por:

$$m \leq (t_{m\text{max}} - t^E) f - n \quad (6.7)$$

Considerando-se que o máximo tempo de resposta de medição é definido para  $t_{m\text{max}} = 1$  ms, para uma distância de  $L = 10$  cm, temperatura  $T_k = 273,15$  K, frequência dos transdutores  $f = 40$  kHz, e tempo eletrônico  $t^E = 155,2$   $\mu$ s, o número máximo de medições do ToF pela técnica da Diferença de Fase PD é, segundo (6.7):

$$m \leq 21,7 \quad (6.8)$$

### 6.3.2

#### Resolução de medição

A resolução de medição é definida como a menor variação da grandeza que causa uma variação perceptível nos valores medidos. No caso de medição do ToF usando um contador e

um relógio, a menor resolução será o valor da grandeza representado por um pulso do relógio. Uma vez que a faixa de medição é limitada em  $2\pi$ , o período máximo de tempo que pode ser medido é um ciclo de onda, definido como  $\tau = 1/f$ . Dessa forma, supondo um período do pulso de relógio definido por  $\tau_{ck} = 1/f_{ck}$ , a resolução de medição (em m/s) é dada por:

$$r = \frac{\mathfrak{G}_{\max} \tau_{ck}}{\tau} = \frac{\mathfrak{G}_{\max} f}{f_{ck}} \quad (6.9)$$

A resolução em número de bits é:

$$R = \log_2 \left( \frac{\mathfrak{G}_{\max}}{r} \right) = \log_2 \left( \frac{f_{ck}}{f} \right) \quad (6.10)$$

A partir de (6.10), para um sistema de medição de velocidade de vento com resolução de  $R = 10$  bits e frequência de operação dos transdutores ultra-sônicos de  $f = 40$  kHz, temos que a frequência máxima de medição é dada por:

$$f_{ck} \geq 2^{10} \times 40 \text{ kHz} = 40,96 \text{ MHz} \quad (6.11)$$

## 6.4

### Avaliação das componentes de incerteza na estimação do ToF

Um aspecto importante do procedimento de medição da velocidade do vento está na estimação do ToF com alta exatidão e baixa incerteza. Entretanto, um problema típico relacionado com a estimação do ToF está no compromisso entre a resolução do relógio do sistema (*clock*) e a relação sinal-ruído (SNR). Este compromisso é particularmente difícil de ser alcançado, devido à atenuação do meio e a reflexões. Portanto, a maneira de se obter uma maior exatidão na estimação do ToF consiste em identificar completamente as diferentes contribuições de incertezas [ANDRIA, 2001].

Em sistemas de aquisição de dados, dois tipos principais de incertezas podem ser identificados: aleatórias e sistemáticas. A primeira deve-se ao ruído elétrico nos dispositivos semicondutores que são consideradas como incertezas aleatórias. A segunda fonte é o ruído de quantização, que particularmente pode ser considerado como uma incerteza sistemática se o sinal de entrada está em sincronismo com o relógio do conversor A/D. Entretanto, de um modo geral as grandezas de entrada no conversor A/D são aleatórias, portanto, neste trabalho considera-se que o ruído de quantização é uma incerteza aleatória com distribuição uniforme.

Em seguida, são analisadas e determinadas as contribuições das incertezas na medição do ToF obtida por meio das técnicas de TH e PD, para o modelo de medição da velocidade do vento (Figura 6.1), considerando-se as seguintes especificações:

- Frequência de operação dos transdutores:  $f = 40$  kHz;

- Frequência do relógio do sistema:  $f_s = 50$  MHz ( $T_s = 0,02$   $\mu$ s)
- Resolução do conversor A/D:  $R = 10$  bits;
- Amplitude máxima do sinal ultra-sônico:  $v_m = 1$  volt;
- Relação sinal-ruído:  $SNR = 40$  dB ( $u_A = 0,01$  volt);
- Nível de detecção do limiar:  $v_{TH} = 0,75$  volt;
- Tempo de atraso eletrônico:  $t^E = 155,2$   $\mu$ s;
- Tempo de resposta do sistema: 1 ms (equivalente a 40 períodos de onda).

### 6.4.1

#### Incertezas aleatórias do ToF devido à quantização para a técnica de TH

A influência de incertezas aleatórias na medição do ToF se deve principalmente à taxa de amostragem finita do sistema de aquisição de dados das ondas ultra-sônicas, isto é, restrições na frequência do relógio do sistema. Este efeito introduz incertezas devido à quantização na estimação do ToF, que podem ser analiticamente determinadas como função da frequência do relógio do sistema [ANDRIA, 2001].

Para a avaliação da incerteza aleatória na medição do ToF por meio da técnica de Detecção de Limiar (TH), considera-se que o sinal ultra-sônico no transdutor receptor (RX) é armazenado através de um sistema de aquisição digital de dados, cujo conversor analógico-digital (A/D) tem uma frequência de amostragem  $f_s$ . A representação da amostragem do sinal ultra-sônico no transdutor receptor é ilustrada na Figura 6.2.

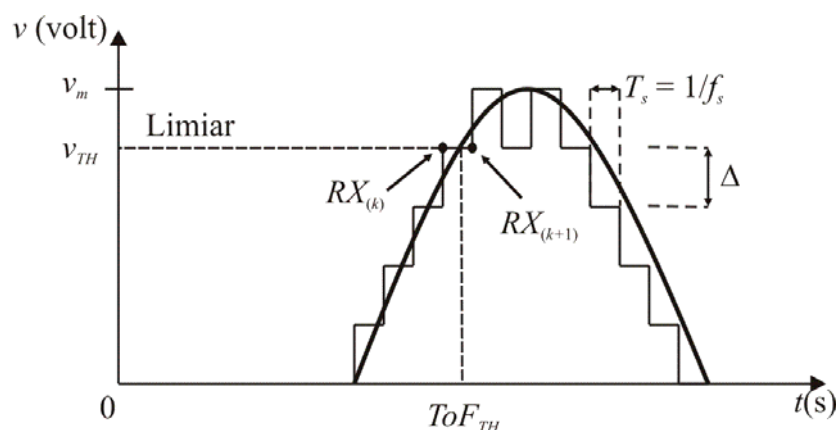


Figura 6.2. Aquisição digital de dados do sinal ultra-sônico no transdutor receptor.

De acordo com a representação da amostragem, a medição do ToF no domínio de tempo discreto é expressa da seguinte forma:

$$ToF_{TH} = kT_s + u_{ToF_{TH}} \quad (6.12)$$

onde  $k$  é um valor inteiro definido pelo contador do relógio do sistema desde o início da transmissão até a detecção da onda ultra-sônica por um valor de limiar pré-definido ( $v_{TH}$ ),  $T_s$  é o período de amostragem e  $u_{TH}^{quantização}$  é a incerteza aleatória na medição do ToF pela técnica de TH devido ao efeito da quantização.

O efeito da quantização é modelado por uma ruído aditivo, com distribuição uniforme em  $[-T_s/2, T_s/2]$ , cuja desvio padrão é definido por [KOLLAR, 1994]:

$$u_{TH}^{quantização} = \frac{T_s}{\sqrt{12}} \quad (6.13)$$

Para as especificações do modelo, a incerteza aleatória na medição do ToF para a técnica de TH devido ao efeito de quantização é dada por:

$$u_{TH}^{quantização} \subset [-T_s/2, T_s/2] = [-0,01\mu s; 0,01\mu s] \quad (6.14)$$

## 6.4.2

### Incertezas aleatórias do ToF devido ao ruído para a técnica de TH

Para este propósito, suponha-se que o sinal ultra-sônico no transdutor receptor sofre a influência do ruído aditivo,  $u_A$ , definido por:

$$v(t) = v_m \sin(\omega t) + u_A \quad (6.15)$$

Para a avaliação da incerteza aleatória na medição do ToF utilizando a técnica de Detecção de Limiar (TH), é possível definir que esta incerteza é proporcional à razão entre o nível de ruído aditivo,  $u_A$ , e a amplitude máxima do sinal no transdutor receptor,  $v_m$  [ANDRIA, 2001].

$$u_{ToF_{TH}} \propto \frac{u_A}{v_m} \quad (6.16)$$

Em muitos casos práticos, a equação (6.16) pode ser aproximada por [ANDRIA, 2001]:

$$u_{ToF_{TH}}^{ruído} = \frac{2 \cdot \alpha \cdot \tau}{\sqrt{2 \cdot SNR}} \quad (6.17)$$

onde  $\alpha$  é o valor percentual do valor máximo ( $v_m$ ) utilizado para definir o nível de detecção de limiar ( $v_{TH} = \alpha \cdot v_m$ ),  $\tau$  é o tempo de subida, definido como a diferença de tempo quando a forma de onda alcança 90 % e 10 % do valor final,  $\tau = t_{90\%} - t_{10\%}$ , e  $SNR$  é a relação sinal-ruído entre o valor máximo do sinal  $v_m$  e o nível do ruído aditivo  $u_A$ .

As equações (6.16) e (6.17) mostram que a incerteza aleatória do ToF utilizando a técnica de TH é proporcional ao nível de ruído aditivo e depende da interseção da forma de onda ultra-sônica recebida com o nível de limiar pré-definido,  $v_{TH}$  [ANDRIA, 2001].

Para as especificações do modelo, e para a avaliação da incerteza aleatória do ToF para a técnica de TH, calcula-se inicialmente:

$$t_{90\%} = \frac{1}{2\pi f} \arcsin(0,9) = 4,45 \mu\text{s} \quad (6.18)$$

$$t_{10\%} = \frac{1}{2\pi f} \arcsin(0,1) = 0,39 \mu\text{s} \quad (6.19)$$

$$\tau = t_{90\%} - t_{10\%} = 4,06 \mu\text{s} \quad (6.20)$$

Na Figura 6.3, ilustra-se a variação da incerteza aleatória na medição do ToF para a técnica TH (Eq. 6.17), considerando-se que  $SNR$  varia no intervalo de 20 a 60 dB,  $\tau = 4,06 \mu\text{s}$ , para níveis de detecção de limiar de  $\alpha = 75\%$  e  $80\%$  do valor máximo do sinal. Nesta figura, observa-se que com o aumento do  $SNR$  a incerteza aleatória do ToF para a técnica de TH diminui; consequentemente, tem-se uma melhor estimativa do ToF.

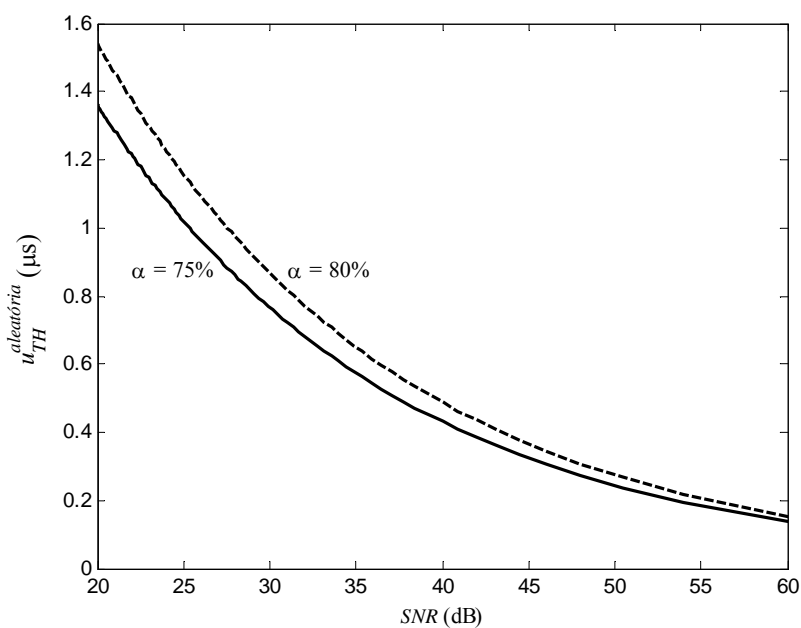


Figura 6.3. Variação da incerteza aleatória do ToF para a técnica de Detecção de Limiar (TH) para níveis de detecção de 75 % e 80% do valor máximo do sinal.

Para o valor de  $SNR$  de 40 dB ( $v_m = 1$  volt e  $u_A = 0,01$  volt) e um nível de detecção de limiar de 75 %, a incerteza aleatória na medição do ToF pela técnica de TH é:

$$u_{TH}^{ruído} = 0,43 \mu\text{s} \quad (6.21)$$



### 6.4.3

#### Incertezas aleatórias do ToF devido à quantização para a técnica de PD

Para a estimação do ToF por meio da técnica da Diferença de Fase (PD), considera-se que as ondas ultra-sônicas transmitida (TX) e recebida (RX) são armazenadas por um sistema de aquisição digital de sinais. Em seguida, realiza-se a medição da diferença de tempo,  $\Delta t$ , entre os sinais TX e RX, como ilustrado na Figura 6.4, em que  $t_{TX}$  e  $t_{RX}$  são as medições de tempo quando os sinais atravessam o nível de cruzamento por zero.

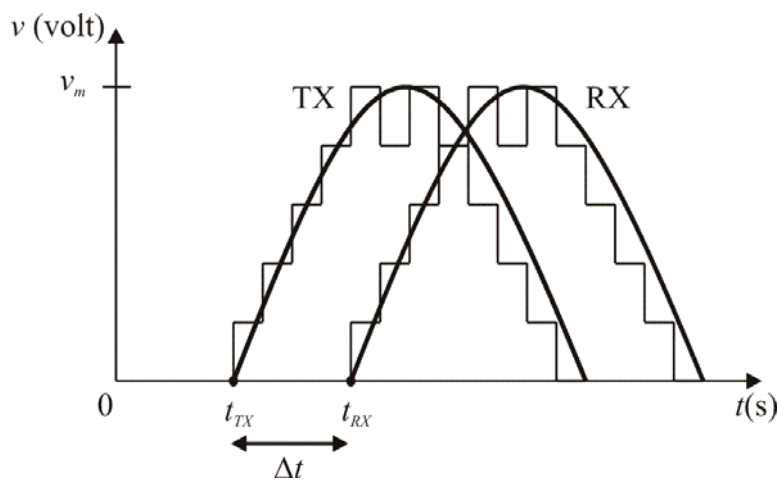


Figura 6.4. Aquisição digital dos sinais de transmissão (TX) e recepção (RX) para a medição da diferença de tempo  $\Delta t = t_{RX} - t_{TX}$ .

As medições de tempo,  $t_{TX}$  e  $t_{RX}$ , são realizadas no domínio de tempo discreto e as incertezas individuais são representadas por distribuições uniformes definidas por:

$$u_{t_{TX}} \subset [-T_s/2; T_s/2] \text{ e } u_{t_{RX}} \subset [-T_s/2; T_s/2] \quad (6.22)$$

A avaliação da incerteza aleatória do ToF por meio da técnica da Diferença de Fase é dada pela soma das incertezas individuais, definida por:

$$u_{\Delta t} = u_{t_{TX}} + u_{t_{RX}} \quad (6.23)$$

$$u_{PD}^{quantização} \subset [-T_s; T_s] \quad (6.24)$$

onde  $T_s$  é o período de amostragem.

Para as especificações do modelo, a incerteza aleatória na medição do ToF para a técnica de PD devido ao efeito de quantização é dada por:

$$u_{PD}^{quantização} \subset [-T_s; T_s] = [-0,02 \mu\text{s}; 0,02 \mu\text{s}] \quad (6.25)$$

#### 6.4.4

### Incertezas aleatórias do ToF devido ao ruído para a técnica de PD

Como explicado anteriormente, uma alta exatidão na estimação do ToF está relacionada a um valor alto do  $SNR$ , isto é, deve-se considerar o efeito do ruído aditivo ( $u_A$ ) sobre a forma de onda do sinal ultra-sônico no transdutor receptor, que produz um deslocamento de sua posição real, como ilustrado na Figura 6.5. Este deslocamento de posição pode ser atribuído à influência da incerteza aleatória na medição da diferença de fase entre os sinais ultra-sônicos transmitido e recebido.

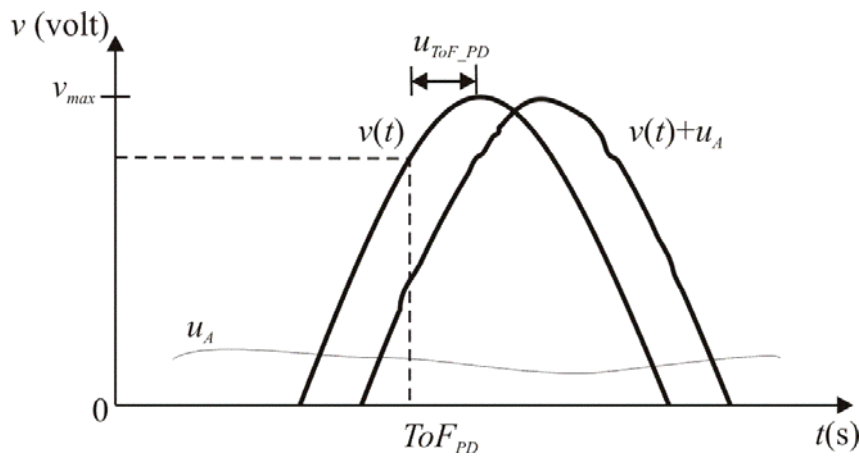


Figura 6.5. Influência do ruído na estimação do ToF.

Considerando-se que o espectro de frequência do sinal é de forma retangular ( $B$ ), a incerteza aleatória na estimação do ToF utilizando a técnica de PD é dada por [MINKOFF, 2002] e [SVILAINIS, 2008]:

$$u_{ToF_{PD}}^{ruído} \approx \frac{1}{1,8B(E/N_0)^{1/2}} \quad (6.26)$$

onde  $E$  é a energia do sinal  $v(t)$ ,  $N_0$  é a densidade espectral de potência do ruído Gaussiano aditivo e  $B$  é a largura de banda do sinal ( $B = f/2$ ).

A energia do sinal pode ser calculada por:

$$E = \int_{-\infty}^{\infty} v(t)^2 dt \quad (6.27)$$

onde  $v(t)$  é o sinal transmitido.

A densidade espectral da potência do ruído  $N_0$  pode ser obtida a partir da razão entre o desvio padrão do ruído e a largura de banda do sinal:

$$N_0 = \frac{u_A^2}{B} \quad (6.28)$$

Como  $SNR = v_m/u_A$ , a equação (6.28) pode ser escrita como:

$$N_0 = \frac{v_m^2}{SNR^2 B} \quad (6.29)$$

Substituindo (6.29) em (6.26) a incerteza aleatória do ToF para a técnica de PD é finalmente expressa por:

$$u_{PD}^{ruído} \approx \frac{SNR}{1,8v_m (BE)^{1/2}} \quad (6.30)$$

Para as especificações do modelo, a avaliação da incerteza aleatória do ToF utilizando-se a técnica de PD requer inicialmente a determinação da energia do sinal  $E$  para o trem de ondas contidas em 1 ms de transmissão (40 períodos de onda). A partir de (6.27):

$$E = \int_0^{40T} (v_{\max} \sin(2\pi ft))^2 dt = 0,5 \text{ m(volt}^2\text{-s)} \quad (6.31)$$

Na Figura 6.6, ilustra-se a variação da incerteza aleatória do ToF para a técnica PD (Eq. 6.30), considerando-se que o  $SNR$  varia no intervalo de 20 a 60 dB, para  $B = f/2 = 20$  kHz, e  $v_m = 1$  volt.

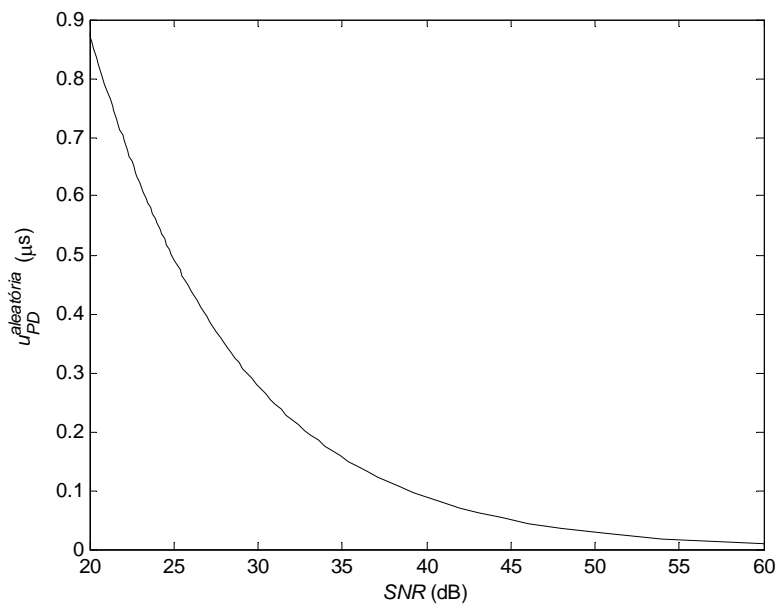


Figura 6.6. Variação da incerteza aleatória para a técnica da Diferença de Fase (PD).

Considerando-se um  $SNR$  de 40 dB ( $v_m = 1$  volt e  $u_A = 0,01$  volt), a incerteza aleatória do ToF utilizando-se a técnica de PD é:

$$u_{PD}^{ruído} = 0,1 \mu s \quad (6.32)$$

## 6.5

### Simulação do modelo utilizando algoritmos de fusão de dados

Como estudado no Capítulo III, existe uma ampla variedade de técnicas de fusão de dados, cuja aplicabilidade depende da aplicação específica. Para o modelo de medição da velocidade do vento (Figura 6.1), a questão reside em selecionar uma técnica adequada para a fusão de dados das medições do Tempo de Trânsito (ToF) obtidos por meio das técnicas de TH e PD. O sucesso da escolha da técnica de fusão está no completo entendimento dos algoritmos (conhecimento de estimacões *a priori*), representação das incertezas, disponibilidade das informações e recursos de cálculo disponíveis.

Neste cenário, foram escolhidas duas técnicas de fusão de dados: (a) fusão baseada na Estimacão de Máxima Probabilidade (MLE) e (b) fusão *fuzzy* baseada nas relações de compatibilidade e operadores OWA com agregacão parcial das informações. Ambas as técnicas foram selecionadas por serem técnicas de estimacão e inferência capazes de representar e utilizar o conhecimento *a priori* das medições do ToF – incertezas – fornecendo resultados de fusão com alta exatidão, confiáveis e com baixa incerteza.

Definem-se a seguir as especificacões do modelo considerando os resultados das seções 6.3 e 6.4, onde foram determinados o número de medições do ToF pela técnica de PD,  $m$ , e a freqüência do relógio do sistema,  $f_s$ , como também avaliadas as incertezas para as técnicas de TH e PD.

- Velocidade do vento:  $v = 10$  m/s;
- Freqüência de operacão dos transdutores ultra-sônicos:  $f = 40$  kHz;
- Freqüência do relógio  $f_s = 50$  MHz;
- Temperatura de operacão  $T_K \in [0; 40]$  °C;
- Distância entre os transdutores:  $L = 10$  cm;
- Ângulo de alinhamento dos transdutores:  $\theta = \pi/4$ ;
- Amplitude máxima do sinal ultra-sônico transmitido:  $v_m = 1$  volt;
- Atenuacão do meio:  $Att = 10\%v_m = 0,1$
- Incerteza multiplicativa:  $u_M = 0,001$  volt ( $SNR_M = 60$  dB);
- Incerteza aditiva:  $u_A = 0,01$  ( $SNR_A = 40$ dB);
- Incerteza aleatória na medição do ToF pela técnica de TH:  $u_{TH}^{ruído} = 0,43 \mu s$  ;
- Incerteza aleatória na medição do ToF pela técnica de PD:  $u_{PD}^{ruído} = 0,1 \mu s$  ;
- Incerteza devido a quantizacão pela técnica de TH:  $u_{TH}^{quantizacão} = [-0,01 \mu s; 0,01 \mu s]$ ;
- Incerteza devido a quantizacão pela técnica de PD:  $u_{PD}^{quantizacão} = [-0,02 \mu s; 0,02 \mu s]$ ;
- Nível de detecção de limiar:  $v_{TH} = 0,75$  volt;

- Tempo de atraso eletrônico:  $t^E = 155,2 \mu\text{s}$ ;
- Número de medições do ToF pela técnica de PD:  $m = 10$  (Eq. 6.8).

### 6.5.1

#### Fusão utilizando-se a estimação de máxima probabilidade (MLE)

O modelo de medição desenvolve um módulo de fusão de dados para a estimação do ToF, a partir das informações independentes de uma medição do ToF pela técnica de TH e  $m$  medições do ToF pela técnica de PD. Como estudado no Capítulo III, este método de estimação (MLE) combina as informações no ambiente probabilístico. Para este propósito, considera-se que as medições do ToF são representadas por funções de densidade de probabilidade com valor médio e desvio padrão conhecidos, e que as incertezas do tipo sistemáticas são totalmente compensadas.

A estimação do ToF utilizando o algoritmo de estimação de máxima probabilidade (MLE) combina as  $(m + 1)$  informações do ToF utilizando (3.6):

$$t_{MLE} = \alpha \cdot t_{TH} + \sum_{i=1}^m \beta_i \cdot t_{PDi} \quad (6.33)$$

onde  $t_{MLE}$  é o ToF estimado pelo método de fusão de dados MLE,  $t_{TH}$  é o ToF medido pela técnica de TH,  $t_{PDi}$  são as  $m$  medições do ToF pela técnica de PD,  $\alpha$  e  $\beta_i$  são os coeficientes de ponderação calculados por:

$$\alpha = \left\{ u_{TH}^2 \left( \frac{1}{u_{TH}^2} + \frac{1}{u_{PD1}^2} + \dots + \frac{1}{u_{PDm}^2} \right) \right\}^{-1} = \{ u_{TH}^2 \Gamma \}^{-1} \quad (6.34)$$

$$\beta_i = \left\{ u_{PDi}^2 \left( \frac{1}{u_{TH}^2} + \frac{1}{u_{PD1}^2} + \dots + \frac{1}{u_{PDm}^2} \right) \right\}^{-1} = \{ u_{PDi}^2 \Gamma \}^{-1} \quad (6.35)$$

$$\text{com } \Gamma = \frac{1}{u_{TH}^2} + \frac{1}{u_{PD1}^2} + \dots + \frac{1}{u_{PDm}^2},$$

onde  $u_{TH}$  é a incerteza aleatória do ToF pela técnica de TH,  $u_{PDi}$  é a incerteza aleatória do ToF pela técnica de PD.

A partir da análise de propagação de incertezas, realizado na Seção 3.5.1 (Eq. 3.45), a incerteza na estimação do ToF utilizando o método de fusão MLE é encontrada por:

$$\frac{1}{u_{MLE}^2} = \frac{1}{u_{TH}^2} + \frac{1}{u_{PD1}^2} + \dots + \frac{1}{u_{PDm}^2} \quad (6.36)$$

em que  $u_{MLE}$  é a incerteza na estimação do ToF pelo método de fusão MLE.

Considerando-se que as funções de densidade de probabilidade das medições do ToF usando a técnica de PD são todas iguais, isto é:  $u_{PD1} = u_{PD2} = \dots = u_{PDm}$ , a incerteza final de fusão utilizando o método MLE (6.36) é expressa por:

$$\frac{1}{u_{MLE}^2} = \frac{1}{u_{TH}^2} + \frac{m}{u_{PD}^2} \quad (6.37)$$

$$u_{MLE}^2 = \frac{u_{TH}^2 \cdot u_{PD}^2}{u_{PD}^2 + m u_{TH}^2} \quad (6.38)$$

Com a finalidade de se comparar a incerteza do ToF de fusão,  $u_{MLE}$ , com a incerteza obtida através da técnica de Diferença de Fase,  $u_{PD}$ , (que exibe uma menor incerteza do que a técnica de Detecção de Limiar), define-se o seguinte fator de redução de incertezas [VILLANUEVA, 2007a]:

$$\rho = \sqrt{\frac{u_{MLE}^2}{u_{PD}^2}} \quad (6.39)$$

Considerando-se  $u_{TH} = p \cdot u_{PD}$ , com  $p \geq 1$ , tem-se:

$$\rho^2 = \frac{u_{MLE}^2}{u_{PD}^2} = \frac{p^2}{1 + mp^2} \quad (6.40)$$

que pode ser aproximado por:

$$\rho^2 \cong \frac{1}{m}, \quad mp^2 \gg 1 \quad (6.41)$$

Na Figura 6.7 apresentam-se as curvas da redução do fator de incertezas ( $\rho$ ), considerando-se um ruído branco, com distribuição uniforme na frequência, para  $u_{TH} = u_{PD}$ ,  $u_{TH} = 2u_{PD}$  e  $u_{TH} = 5u_{PD}$  como função do número de medidas do ToF usando a técnica de PD,  $m$ . Pode ser observado que, à medida que o número de medições de  $t_{PD}$  aumenta, a incerteza de  $t_{TH}$  tem menor influência sobre a incerteza final [VILLANUEVA, 2007a].

Nas simulações foi considerado o ruído sendo introduzido antes do transdutor receptor para evitar que a detecção com o limiar seja feita de forma antecipada. Com isso o ruído presente na medição de TH e PD não é branco, mas modulado pela função de transferência do transdutor. Como resultado, a redução de incerteza (Eq. 6.41) pelo método MLE não corresponde à esperada, como apresentada na Figura 6.7.

Na seção 6.5.3 são apresentados os resultados de simulação da medição do ToF pela técnica de fusão MLE, realizando-se a comparação com os valores teóricos para diferentes velocidades do vento.

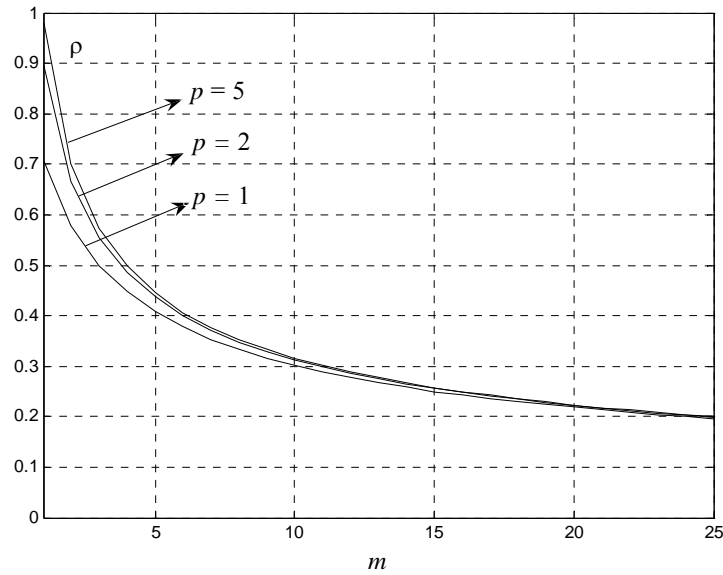


Figura 6.7. Curvas de  $\rho$  para  $p = 1, p = 2$  e  $p = 5$  ( $u_{TH} = pu_{PD}$ )

6.5.2

Fusão fuzzy utilizando-se operadores OWA com agregação parcial

Para o modelo de medição da velocidade do vento (Figura 6.1) que implementa o módulo de fusão de dados baseado nas relações de compatibilidade e operadores OWA com agregação parcial das informações deve-se realizar uma representação adequada das medições do ToF e suas incertezas associadas com base na Teoria da Evidência utilizando variáveis *random-fuzzy* (RFV) e aritmética intervalar, como estudado no Capítulo II.

Neste procedimento de fusão, inicialmente constroem-se as variáveis *random-fuzzy* (RFV) a partir das medições do ToF obtidas pelas técnicas de TH e PD, e das avaliações de incertezas aleatórias  $u_{TH}^{ruído}$ ,  $u_{PD}^{ruído}$ ,  $u_{TH}^{quantização}$  e  $u_{PD}^{quantização}$  (Eq. 6.14, 6.25, 6.21 e 6.32), como ilustrado na Figura 6.8.

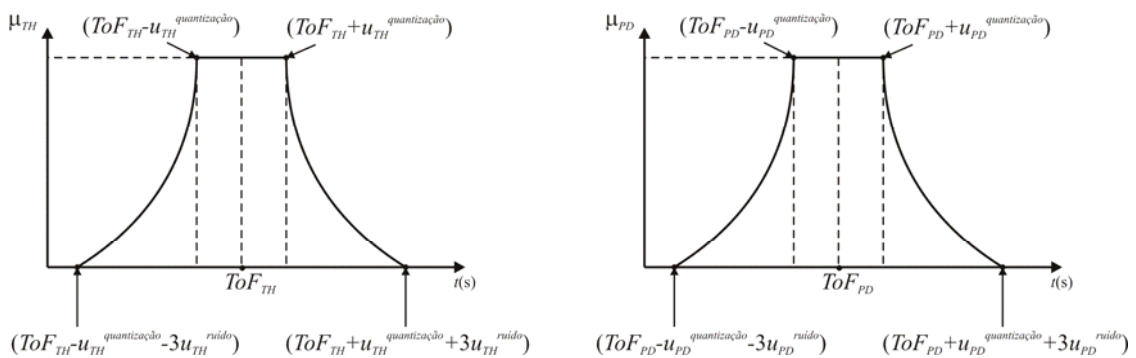


Figura 6.8. Construção das RFV a partir das medições do ToF obtidas pelas técnicas de TH e PD e das incertezas devido ao ruído aleatório e de quantização.

Considerando-se a velocidade do vento igual a 10 m/s, na Tabela 6.1 apresentam-se os valores dos parâmetros para as RFVs das medições do ToF para uma medição do ToF pela técnica de TH e  $m = 10$  medições do ToF pela técnica de PD ( $t_{TH}$ ,  $t_{PD1}$ , ...,  $t_{PD10}$ ).

Tabela 6.1. Valores do ToF, incertezas e parâmetros do RFV para as técnicas de TH e PD.

Técnica	ToF ( $\mu\text{s}$ )	$u^{\text{ruído}}$	$u^{\text{quantização}}$	Variáveis <i>Random-Fuzzy</i>
TH/ $X_1$	296,15 $\mu\text{s}$	0,38 $\mu\text{s}$	[-0,01; 0,01] $\mu\text{s}$	[295,00; 296,14; 296,16; 297,32] $\mu\text{s}$
PD <sub>1</sub> / $X_2$	295,64 $\mu\text{s}$	0,08 $\mu\text{s}$	[-0,02; 0,02] $\mu\text{s}$	[295,38; 295,62; 295,66; 295,90] $\mu\text{s}$
PD <sub>2</sub> / $X_3$	295,67 $\mu\text{s}$	0,08 $\mu\text{s}$	[-0,02; 0,02] $\mu\text{s}$	[295,41; 295,65; 295,69; 295,93] $\mu\text{s}$
PD <sub>3</sub> / $X_4$	295,63 $\mu\text{s}$	0,08 $\mu\text{s}$	[-0,02; 0,02] $\mu\text{s}$	[295,37; 295,61; 295,65; 295,89] $\mu\text{s}$
PD <sub>4</sub> / $X_5$	295,64 $\mu\text{s}$	0,08 $\mu\text{s}$	[-0,02; 0,02] $\mu\text{s}$	[295,38; 295,62; 295,66; 295,90] $\mu\text{s}$
PD <sub>5</sub> / $X_6$	295,62 $\mu\text{s}$	0,08 $\mu\text{s}$	[-0,02; 0,02] $\mu\text{s}$	[295,36; 295,60; 295,64; 296,88] $\mu\text{s}$
PD <sub>6</sub> / $X_7$	295,58 $\mu\text{s}$	0,08 $\mu\text{s}$	[-0,02; 0,02] $\mu\text{s}$	[295,32; 295,56; 295,60; 295,84] $\mu\text{s}$
PD <sub>7</sub> / $X_8$	294,67 $\mu\text{s}$	0,08 $\mu\text{s}$	[-0,02; 0,02] $\mu\text{s}$	[294,41; 294,65; 294,69; 294,93] $\mu\text{s}$
PD <sub>8</sub> / $X_9$	295,73 $\mu\text{s}$	0,08 $\mu\text{s}$	[-0,02; 0,02] $\mu\text{s}$	[295,47; 295,71; 295,75; 295,99] $\mu\text{s}$
PD <sub>9</sub> / $X_{10}$	295,66 $\mu\text{s}$	0,08 $\mu\text{s}$	[-0,02; 0,02] $\mu\text{s}$	[295,40; 295,64; 295,68; 295,92] $\mu\text{s}$
PD <sub>10</sub> / $X_{11}$	295,66 $\mu\text{s}$	0,08 $\mu\text{s}$	[-0,02; 0,02] $\mu\text{s}$	[295,40; 295,64; 295,68; 295,92] $\mu\text{s}$

A partir destas informações, utiliza-se o procedimento de fusão baseada em relações de compatibilidade e operadores OWA com agregação parcial, como visto no Capítulo III. Para este propósito, em seguida, determina-se, via (3.13), a relação de compatibilidade  $\mathbf{R}$ :

$$\mathbf{R}(X_1, X_2, \dots, X_{11}) = \min_{ij} \{r(X_1, X_2), \dots, r(X_i, X_j), \dots, r(X_{10}, X_{11})\} \quad (6.42)$$

$$\mathbf{R}(X_1, X_2, \dots, X_{11}) = [-0,06 \mu\text{s}; 0 ; 0,06 \mu\text{s}] \quad (6.43)$$

Para cada medição do ToF representada pelas variáveis *random-fuzzy*  $X_i$  (Tabela 6.1), realiza-se o mapeamento através da relação de compatibilidade  $\mathbf{R}$  (3.14) como:

$$\{X_1\}_R = X_1 \cap (X_2 \cap \mathbf{R}) \cap (X_3 \cap \mathbf{R}) \cap (X_4 \cap \mathbf{R}) \dots \cap (X_{10} \cap \mathbf{R}) \cap (X_{11} \cap \mathbf{R})$$

$$\{X_2\}_R = X_2 \cap (X_1 \cap \mathbf{R}) \cap (X_3 \cap \mathbf{R}) \cap (X_4 \cap \mathbf{R}) \dots \cap (X_{10} \cap \mathbf{R}) \cap (X_{11} \cap \mathbf{R})$$

$$\{X_3\}_R = X_3 \cap (X_1 \cap \mathbf{R}) \cap (X_2 \cap \mathbf{R}) \cap (X_4 \cap \mathbf{R}) \dots \cap (X_{10} \cap \mathbf{R}) \cap (X_{11} \cap \mathbf{R})$$

...

$$\{X_{10}\}_R = X_{10} \cap (X_1 \cap \mathbf{R}) \cap (X_2 \cap \mathbf{R}) \cap (X_3 \cap \mathbf{R}) \dots \cap (X_9 \cap \mathbf{R}) \cap (X_{11} \cap \mathbf{R})$$

$$\{X_{11}\}_R = X_{11} \cap (X_1 \cap \mathbf{R}) \cap (X_2 \cap \mathbf{R}) \cap (X_3 \cap \mathbf{R}) \dots \cap (X_9 \cap \mathbf{R}) \cap (X_{10} \cap \mathbf{R})$$

Para incorporar o operador OWA ao procedimento de fusão que utiliza relações de compatibilidade, o conjunto de variáveis  $\{X_1\}_R, \dots, \{X_{11}\}_R$  é ordenado de forma decrescente (de maior a menor valor). Adicionalmente, na Tabela 6.2, são apresentados os valores dos pesos de



ponderação do vetor  $W$  (de dimensão “ $m+1$ ”) do operador OWA, a partir da solução do problema de programação matemática (3.26) e (3.27).

Tabela 6.2. Pesos de ponderação OWA de dimensão  $(m + 1)$ .

$w_1$	$w_2$	$w_3$	$w_4$	$w_5$	$w_6$	$w_7$	$w_8$	$w_9$	$w_{10}$	$w_{11}$
0,014	0,019	0,025	0,034	0,046	0,061	0,082	0,11	0,147	0,196	0,262

Em seguida, realiza-se o mapeamento do conjunto ordenado de variáveis  $\{X_i\}_R$  com os pesos de ponderação, definido por:

$$\{X_i\}_W = \{X_j\}_R \cdot w_i \quad (6.44)$$

em que:  $\{X_i\}_W$  é o mapeamento através do operador OWA,  $i = 1, \dots, m+1$ ,  $j$  é o  $j$ -ésimo maior elemento do conjunto  $\{X_1\}_R, \dots, \{X_{11}\}_R$  (ordenado de maior a menor valor).

$$\{X_1\}_W = \{X_{j=1}\}_R \cdot w_1$$

$$\{X_2\}_W = \{X_{j=2}\}_R \cdot w_2$$

$$\{X_3\}_W = \{X_{j=3}\}_R \cdot w_4$$

...

$$\{X_{10}\}_W = \{X_{j=10}\}_R \cdot w_{10}$$

$$\{X_{11}\}_W = \{X_{j=11}\}_R \cdot w_{11}$$

Finalmente, realiza-se a agregação parcial das informações, definindo-se uma medida de confiança  $S(T)$ , a qual atribui uma confiança total para qualquer subconjunto de  $T = \{X_i\}_W$  de pelo menos duas medições, isto é, pelo menos duas medições do ToF estão corretas. A medida de confiança  $S(T)$  (3.36), é dada por:

$$\forall T \in 2^A, \quad S(T) = \begin{cases} 0 & \text{se } |T| < 2 \text{ (}|T| = 0 \text{ ou } |T| = 1)} \\ 1 & \text{se } |T| \geq 2 \text{ (}|T| = 2 \text{ ou } |T| = 11)} \end{cases} \quad (6.45)$$

em que o conjunto  $T$  tem os seguintes elementos  $\{X_1\}_W, \dots, \{X_{11}\}_W$ .

Deste modo, podem-se construir os subconjunto de  $T$  de 2 elementos definidos por:

$$T_1 = (\{X_1\}_W, \{X_2\}_W)$$

$$T_2 = (\{X_1\}_W, \{X_3\}_W)$$

$$T_3 = (\{X_1\}_W, \{X_4\}_W)$$

...

$$T_{55} = (\{X_{11}\}_W, \{X_{10}\}_W)$$

ou do conjunto total de 11 elementos:

$$T_{56} = (\{X_1\}_W, \{X_2\}_W, \{X_3\}_W, \{X_4\}_W, \{X_5\}_W, \{X_6\}_W, \{X_7\}_W, \{X_8\}_W, \{X_9\}_W, \{X_{10}\}_W, \{X_{11}\}_W)$$

Para cada um destes subconjuntos (considerando-se que pelo menos duas entradas são compatíveis), calculam-se os resultados parciais de fusão *fuzzy* utilizando o procedimento de

fusão baseado nas relações de compatibilidade e operadores OWA como descrito nos passos anteriores.

A partir dos resultados parciais de fusão, realiza-se a agregação final utilizando a medida de confiança  $S$ , determinando-se assim o resultado da fusão final  $F_{ROWAparcial}$ :

$$F_{ROWAparcial} = \max_{T_i \in 2^A} \{F_{ROWA}(T_i) \cap S(T_i)\} \quad (6.46)$$

em que o operador max corresponde à união *fuzzy*.

$$F_{ROWAparcial} = F_{ROWA}(T_1) \cup F_{ROWA}(T_2) \dots \cup F_{ROWA}(T_{55}) \cup F_{ROWA}(T_{56}) \quad (6.47)$$

Para esta simulação, tem-se como resultado que o valor médio (Eq. 3.46) é  $t_{ROWAparcial} = 295,69 \mu\text{s}$  e a incerteza padrão (Eq. 3.48) é  $u_{ToFROWAparcial} = 0,063 \mu\text{s}$ . Deste modo, o intervalo de confiança na estimação do ToF através da fusão *fuzzy* é de  $[295,62 \mu\text{s}; 295,75 \mu\text{s}]$ . A partir deste resultado, pode-se comprovar que o método de fusão *fuzzy* fornece resultados com baixa incerteza e mais confiáveis (comparado com a técnica de PD com incerteza  $0,08 \mu\text{s}$ ).

Na próxima seção são apresentados os resultados de simulação do modelo para um intervalo de velocidades de vento de 5 a 30 m/s.

### 6.5.3

#### Comparação dos resultados de simulação

Apresentam-se a seguir os resultados de simulação para a estimação do ToF e suas incertezas por meio dos procedimentos de fusão de dados MLE e *fuzzy*, para as velocidades da velocidade do vento de 5 a 30 m/s, considerando-se diferentes valores das incertezas aditivas  $u_A$  e multiplicativas  $u_M$ , com ruído branco modulado pelo transdutor receptor. A estimação do ToF e suas incertezas são obtidas a partir de uma medição do ToF pela técnica de TH e  $m = 10$  medições do ToF pela técnica de PD.

No primeiro grupo de simulações, considera-se que a incerteza aditiva,  $u_A$ , assume os valores  $\{0,02; 0,03; 0,04\} \mu\text{s}$ ; a incerteza multiplicativa é  $u_M = 0,001 \mu\text{s}$ . Os resultados das simulações são apresentados nas Tabelas 6.3, 6.4 e 6.5.

No segundo grupo de simulações, consideram-se os mesmos valores para  $u_A$  e  $u_M = 0,002 \mu\text{s}$ . Os resultados das simulações são apresentados nas Tabelas 6.6, 6.7 e 6.8.

Para efeitos de simulação, considera-se que a resolução do relógio do sistema (*clock*) é de  $0,01 \mu\text{s}$ .

Tabela 6.3. Valores de simulação do ToF e incertezas (em  $\mu\text{s}$ ) para o valor teórico, pelas técnicas de TH e PD, com procedimentos de fusão MLE e *Fuzzy* ( $u_A = 0,02 \mu\text{s}$  e  $u_M = 0,001 \mu\text{s}$ )

$\vartheta$ (m/s)	ToF <sub>Teórico</sub>	ToF <sub>PD</sub>	ToF <sub>MLE</sub>	ToF <sub>Fuzzy</sub>	$u_{\text{TH}}$	$u_{\text{PD}}$	$u_{\text{MLE}}$	$u_{\text{FUZZY}}$
5	298,82	298,81	298,81	298,80	0,32	0,07	0,04	0,06
10	295,70	295,69	295,69	295,69	0,39	0,08	0,05	0,06
15	292,64	292,63	292,63	292,63	0,38	0,08	0,05	0,06
20	289,64	289,63	289,64	289,64	0,34	0,07	0,03	0,06
25	286,70	281,71	286,70	286,70	0,34	0,07	0,03	0,06
30	283,83	283,81	283,81	283,80	0,44	0,07	0,04	0,06

Tabela 6.4. Valores de simulação do ToF e incertezas (em  $\mu\text{s}$ ) para o valor teórico, pelas técnicas de TH e PD, com procedimentos de fusão MLE e *Fuzzy* ( $u_A = 0,03 \mu\text{s}$  e  $u_M = 0,001 \mu\text{s}$ ).

$\vartheta$ (m/s)	ToF <sub>Teórico</sub>	ToF <sub>PD</sub>	ToF <sub>MLE</sub>	ToF <sub>Fuzzy</sub>	$u_{\text{TH}}$	$u_{\text{PD}}$	$u_{\text{MLE}}$	$u_{\text{FUZZY}}$
5	298,82	298,81	298,81	298,80	0,38	0,08	0,05	0,06
10	295,70	295,70	295,70	295,70	0,37	0,09	0,05	0,07
15	292,64	292,64	292,64	292,65	0,42	0,09	0,05	0,07
20	289,64	289,64	289,60	289,60	0,42	0,09	0,05	0,08
25	286,70	286,70	286,69	286,69	0,44	0,08	0,04	0,07
30	283,83	286,81	283,80	283,80	0,46	0,09	0,04	0,07

Tabela 6.5. Valores de simulação do ToF e incertezas (em  $\mu\text{s}$ ) para o valor teórico, pelas técnicas de TH e PD, com procedimentos de fusão MLE e *Fuzzy* ( $u_A = 0,04 \mu\text{s}$  e  $u_M = 0,001 \mu\text{s}$ ).

$\vartheta$ (m/s)	ToF <sub>Teórico</sub>	ToF <sub>PD</sub>	ToF <sub>MLE</sub>	ToF <sub>Fuzzy</sub>	$u_{\text{TH}}$	$u_{\text{PD}}$	$u_{\text{MLE}}$	$u_{\text{FUZZY}}$
5	298,82	298,81	298,81	298,83	0,49	0,09	0,06	0,07
10	295,70	295,70	295,69	295,73	0,50	0,10	0,06	0,07
15	292,64	292,64	292,64	292,67	0,44	0,11	0,06	0,08
20	289,64	289,65	289,65	289,66	0,49	0,09	0,04	0,08
25	286,70	286,70	286,70	286,68	0,40	0,09	0,04	0,08
30	283,83	283,81	283,81	283,77	0,41	0,10	0,05	0,07

Tabela 6.6. Valores de simulação do ToF e incertezas (em  $\mu\text{s}$ ) para o valor teórico, pelas técnicas de TH e PD, com procedimentos de fusão MLE e *Fuzzy* ( $u_A = 0,02 \mu\text{s}$  e  $u_M = 0,002 \mu\text{s}$ ).

$\vartheta$ (m/s)	ToF <sub>Teórico</sub>	ToF <sub>PD</sub>	ToF <sub>MLE</sub>	ToF <sub>Fuzzy</sub>	$u_{TH}$	$u_{PD}$	$u_{MLE}$	$u_{FUZZY}$
5	298,82	298,81	298,81	298,83	0,34	0,07	0,04	0,06
10	295,70	295,69	295,69	295,71	0,49	0,07	0,04	0,06
15	292,64	292,64	292,64	292,65	0,43	0,08	0,05	0,06
20	289,64	289,64	289,64	289,62	0,42	0,07	0,04	0,07
25	286,70	286,70	286,701	286,69	0,36	0,07	0,03	0,05
30	283,83	283,81	283,81	283,82	0,44	0,07	0,04	0,06

Tabela 6.7. Valores de simulação do ToF e incertezas (em  $\mu\text{s}$ ) para o valor teórico, pelas técnicas de TH e PD, com procedimentos de fusão MLE e *Fuzzy* ( $u_A = 0,03 \mu\text{s}$  e  $u_M = 0,002 \mu\text{s}$ ).

$\vartheta$ (m/s)	ToF <sub>Teórico</sub>	ToF <sub>PD</sub>	ToF <sub>MLE</sub>	ToF <sub>Fuzzy</sub>	$u_{TH}$	$u_{PD}$	$u_{MLE}$	$u_{FUZZY}$
5	298,82	298,81	298,81	298,83	0,44	0,085	0,0487	0,068
10	295,70	295,69	295,69	295,69	0,38	0,094	0,056	0,074
15	292,64	292,63	292,63	292,64	0,39	0,096	0,056	0,067
20	289,64	289,64	289,64	289,64	0,39	0,089	0,048	0,067
25	286,70	286,70	286,70	286,65	0,41	0,081	0,040	0,068
30	283,83	283,81	283,81	283,81	0,49	0,091	0,043	0,073

Tabela 6.8. Valores de simulação do ToF e incertezas (em  $\mu\text{s}$ ) para o valor teórico, pelas técnicas de TH e PD, com procedimentos de fusão MLE e *Fuzzy* ( $u_A = 0,04 \mu\text{s}$  e  $u_M = 0,002 \mu\text{s}$ ).

$\vartheta$ (m/s)	ToF <sub>Teórico</sub>	ToF <sub>PD</sub>	ToF <sub>MLE</sub>	ToF <sub>Fuzzy</sub>	$u_{TH}$	$u_{PD}$	$u_{MLE}$	$u_{FUZZY}$
5	298,82	298,80	298,80	298,82	0,40	0,09	0,05	0,07
10	295,70	295,69	295,69	295,72	0,47	0,10	0,06	0,08
15	292,64	292,64	292,64	292,66	0,38	0,11	0,07	0,08
20	289,64	289,64	289,64	289,63	0,39	0,10	0,05	0,08
25	286,70	286,69	286,69	286,66	0,43	0,09	0,05	0,08
30	283,83	283,81	283,80	283,79	0,46	0,10	0,05	0,08

A partir destes resultados, pode-se observar que, com o aumento dos valores quantitativos das incertezas  $u_A$  e  $u_M$ , tem-se um aumento nas incertezas das medições do ToF pelas técnicas de TH e PD ( $u_{TH}$  e  $u_{PD}$ ). Assim, tem-se um aumento na avaliação das incertezas com a utilização das técnicas de fusão de MLE e *fuzzy* ( $u_{MLE}$  e  $u_{fuzzy}$ ), embora estas apresentem menor incerteza do que as técnicas de TH e PD.

A partir a configuração que deu origem aos resultados apresentados na Tabela 6.8, apresentam-se na Tabela 6.9 os resultados da estimação da incerteza da velocidade do vento obtida por meio da técnica de PD e dos procedimentos de fusão de dados MLE e *fuzzy*, conforme (6.48) abaixo. Observa-se que uma melhor estimação do ToF pelas técnicas de fusão produz resultados da medição da velocidade do vento com menor incerteza, quando comparados com a obtida com a técnica de PD.

$$u_v \approx \frac{L}{\cos \theta \times ToF^2} u_{ToF} \quad (6.48)$$

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 *Fuzzy* ( $u_A = 0,04 \mu s$  e  $u_M = 0,002 \mu s$ ).

Velocidade (m/s)	$u_{ToF\_PD}$	$u_{ToF\_MLE}$	$u_{ToF\_FUZZY}$	$u_{9PD}$	$u_{9MLE}$	$u_{9Fuzzy}$
5	0,09	0,05	0,07	0,14	0,08	0,11
10	0,10	0,06	0,08	0,16	0,09	0,12
15	0,11	0,07	0,08	0,18	0,11	0,13
20	0,10	0,05	0,08	0,16	0,08	0,13
25	0,09	0,05	0,08	0,15	0,08	0,13
30	0,10	0,05	0,08	0,17	0,08	0,14

A partir destes resultados pode-se concluir que:

- Embora os resultados de simulação do ToF obtidos por meio dos procedimentos de fusão MLE e *fuzzy* sejam semelhantes, a diferença está no resultado da estimação da incerteza final de fusão. Observa-se que a incerteza pela técnica MLE é menor do que a incerteza pelo procedimento *fuzzy*, pois a fusão MLE considera apenas as influências das incertezas aleatórias da atenuação do meio e do ruído, enquanto que as incertezas sistemáticas são totalmente eliminadas ou compensadas. Entretanto, o procedimento de fusão *fuzzy* considera – de forma geral – as incertezas aleatórias da atenuação do meio, ruído e decorrentes do efeito de quantização. Com a fusão *fuzzy*, pode-se adicionar a contribuição de incertezas sistemáticas, evitando-se a sub-estimação do resultado da incerteza final.

- Quantitativamente, os procedimentos de fusão MLE e *fuzzy* aumentam a exatidão na estimação do ToF, comparada com as técnicas individuais de medição de TH e PD.
- Qualitativamente, os procedimentos de fusão MLE e *fuzzy* adotam as vantagens das técnicas de TH e PD quando utilizadas individualmente, produzindo resultados do ToF com menor incerteza, reduzindo a ambigüidade e aumentando a confiabilidade da medição, e, conseqüentemente, melhorando o desempenho operacional do modelo de medição.