

4

Medição de Velocidade de Fluidos usando Transdutores Ultra-sônicos

4.1

Introdução

Um sistema é composto por uma combinação de elementos e subsistemas, necessários para a realização de uma ou mais funções específicas. Em instrumentação, a função de um sistema de medição pode ser definida como a quantificação numérica para uma propriedade ou qualidade de um objeto ou evento que está sendo descrito. Neste cenário, na Figura 4.1 apresentam-se os estágios gerais de um sistema de medição, assim como suas funções e operações específicas. Neste sistema, cada estágio participa da aquisição de informações do evento. Os sensores detectam os eventos físicos e realizam a transformação de dados de um domínio para outro. O estágio seguinte corresponde ao condicionamento de sinais, onde podem ser realizadas operações de amplificação e filtragem de sinais. A seguir, tem-se o estágio de processamento de sinais, onde podem ser realizadas operações matemáticas, assim como operações de fusão, combinação ou redução de dados. No estágio final, realiza-se a conversão de dados em sinais de saídas como uma representação final da medição [PÀLLAS-ARENY, 2001] e [FOWLER, 2004].

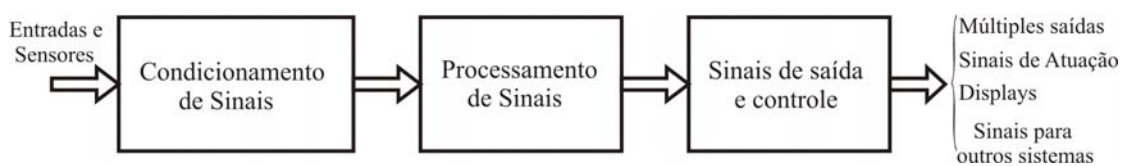


Figura 4.1. Diagrama básico de um sistema de medição.

A conversão das diferentes formas de energia aplicada a diversas áreas científicas e industriais requer que as grandezas nos processos sejam medidas, analisadas, controladas e monitoradas por meio de estruturas de medição apropriadas. No mercado industrial, entre as principais grandezas medidas estão a velocidade (fluxo) em fluidos, nível, pressão e temperatura. Estes quatro tipos de medição cobrem ao redor de 90% das aplicações em processos do mercado industrial [HAUPTMANN, 2001].

Especificamente, sistemas de medição de velocidade de fluidos requerem um instrumento que forneça valores com alta exatidão e baixa incerteza. Para este propósito,

diversas técnicas de medição de velocidade de fluidos que utilizam transdutores ultra-sônicos estão disponíveis, sendo aqueles baseados no método de Efeito Doppler e de Tempo de Trânsito os mais significativos.

Para o propósito de medição de velocidade de fluidos utilizando transdutores ultra-sônicos, apresentam-se sucintamente a seguir os conceitos básicos sobre ondas ultra-sônicas e transdutores ultra-sônicos. São também apresentadas as definições preliminares dos métodos de Efeito Doppler e Tempo de Trânsito. Estudam-se as comparações entre os métodos de Tempo de Trânsito. Finalmente, discutem-se as considerações práticas do uso de transdutores ultra-sônicos para sistemas de medição de velocidade em fluidos.

4.2

Conceitos Básicos sobre Ondas e Transdutores Ultra-sônicos

As ondas acústicas são normalmente definidas como vibrações em um meio que pode ser sólido, líquido ou gasoso, e são classificadas de acordo com suas frequências de propagação e sua periodicidade como:

- sônicas (audíveis pelos seres humanos): propagam-se com frequência entre 20 Hz e 20 kHz;
- infra-sônicas: propagam-se com frequências abaixo de 20 Hz;
- ultra-sônicas: propagam-se com frequências acima de 20 kHz.

As ondas ultra-sônicas são geradas ou introduzidas no meio de propagação através de um elemento emissor que vibra com uma frequência determinada. Existem vários métodos para gerar ondas ultra-sônicas, entre eles o piezolétrico, eletromagnético, laser, etc. Destes, o efeito piezolétrico é o mais utilizado, descoberto por Pierre e Jacques Curie em 1880 e consiste na variação das dimensões físicas de certos materiais sujeitos a campos elétricos, que produzem pressões gerando ondas acústicas. O contrário também ocorre, ou seja, a aplicação de pressões acústicas produz variações nas dimensões de materiais piezolétricos que provocam neles o aparecimento de campos elétricos. Portanto, um material piezolétrico pode transformar a energia elétrica alternada em oscilação mecânica e transformar a energia mecânica em elétrica.

Os principais materiais usados na fabricação dos transdutores piezolétricos são os cristais de quartzo, as cerâmicas piezolétricas, como o titanato de bário e o titanato de zirconato de chumbo (PZT), e polímeros flexíveis, como o polivinilo de flúor (PVDF).

Os transdutores ultra-sônicos podem atuar como transmissores ou como receptores, permitindo, em muitos casos, a simplificação dos projetos de circuitos de transmissão e recepção dos sinais ultra-sônicos [WEBSTER, 1999].

4.3

Medição de Velocidade de Fluidos utilizando Transdutores Ultra-sônicos

Nas últimas décadas, tecnologias ultra-sônicas têm apresentado aprimoramentos significativos na medição de parâmetros de fluidos (velocidade, fluxo) e o seu uso em diversas aplicações em processos industriais e científicos vem ganhando aceitação progressiva. As técnicas ultra-sônicas para medição de velocidade de fluidos oferecem uma vantagem potencial sobre as técnicas convencionais de medição: a instrumentação utilizada pode ser robusta e não invasiva, por exemplo. Entretanto, a exatidão na determinação da velocidade de fluidos depende do projeto do instrumento de medição e da tecnologia de sensores ultra-sônicos [YEH, 2001].

A idéia básica nos sistemas de medição de velocidade de fluidos que utilizam transdutores ultra-sônicos consiste em transmitir ondas ultra-sônicas a partir de um transdutor emissor; após a interação com o meio de propagação, estas ondas são recebidas no transdutor receptor. A partir do sinal recebido e levando em consideração o sinal transmitido, são realizadas as operações de processamento de sinais para a determinação da estimativa da velocidade do fluido [HAUPTMANN, 2001]. Para este propósito, são apresentados, em seguida, os métodos de Efeito Doppler e de Tempo de Trânsito.

4.3.1

Método Doppler

O Efeito Doppler consiste na alteração da frequência notada por um observador em virtude do movimento relativo de aproximação ou afastamento entre uma fonte de ondas e o observador. Para sistemas de medição de velocidade de fluidos baseados no Efeito Doppler, um sinal ultra-sônico contínuo é transmitido e ocorre uma variação em sua frequência quando o mesmo é refletido por um objeto que está se movendo em relação ao transmissor. Pode-se, então, medir a diferença entre as frequências dos sinais transmitido e recebido, denominada de desvio Doppler, para determinar a velocidade do fluido.

Na Figura 4.2 apresenta-se uma configuração dos transdutores ultra-sônicos para medição de velocidade de fluido baseado no Efeito Doppler, em que v representa a velocidade do fluido, T_A e T_B representam os transdutores ultra-sônicos para transmissão e recepção, respectivamente; estes transdutores formam um ângulo θ com o sentido do fluxo. Para um objeto refletor que está se movendo com a mesma velocidade do fluido, a variação da frequência é dada por [PÀLLAS-ARENY, 2001]:

$$f_D = f_T - f_R = 2f_T \frac{v}{C} \cos \theta \quad (4.1)$$

onde f_D é a diferença da frequência devido ao Efeito Doppler, f_T é a frequência do transmissor, f_R é a frequência do receptor e θ é o ângulo relativo entre a velocidade do refletor e a direção da propagação do som C .

Na equação (4.1), os valores de f_T , C e θ são constantes, podendo-se concluir que a diferença de frequência (f_D) é diretamente proporcional à velocidade do fluido v .

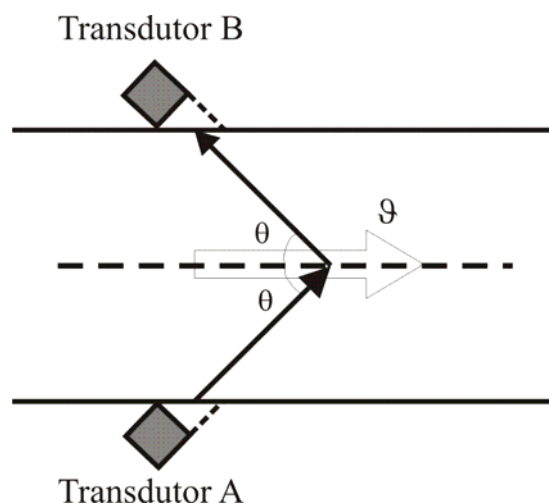


Figura 4.2. Princípio ultrassônico de medição de velocidade de fluidos baseado no efeito Doppler.

Qualquer substância que tem impedância acústica diferente do fluido (partículas suspensas no ar, bolhas de ar ou sólidos suspensos em líquidos) pode atuar como refletor e mudar a frequência de um sinal ultra-sônico de acordo com (4.1). As melhores reflexões ocorrem quando o tamanho do objeto refletor é maior que 10% do comprimento de onda acústico no fluido (λ).

O princípio ultra-sônico de medição baseado no Efeito Doppler é mais utilizado em fluidos líquidos ou gasosos com partículas suspensas, que têm maior capacidade de reflexão. Como o objetivo deste trabalho é a medição da velocidade do vento, optou-se pela utilização do método de medição baseado no Tempo de Trânsito, que é mais adequado para este tipo de aplicação.

4.3.2

Método do Tempo de Trânsito

O método do Tempo de Trânsito baseia-se na medição do tempo de propagação de um sinal ultra-sônico entre um transdutor transmissor T_A e um transdutor receptor T_B , alinhados

com um ângulo especificado à direção do vento, como ilustrado na Figura 4.3. A distância de separação entre os transdutores, L , é adequadamente estimada a partir da especificação da faixa de medição da velocidade do vento.

Este tempo de propagação ultra-sônico é definido como o Tempo de Trânsito (ToF – *Time-of-Flight*) e é utilizado para a determinação da velocidade do fluido ϑ , mediante as expressões que relacionam os tempos de propagação dos sinais ultra-sônicos com as velocidades de propagação [PÁLLAS-ARENY, 2001].

Considera-se neste trabalho que os transdutores ultra-sônicos têm contato direto com o fluxo de ar, evitando-se sub-estimações na medição do tempo de trânsito devido ao acoplamento com o material do meio de condução do fluxo de ar (duto).

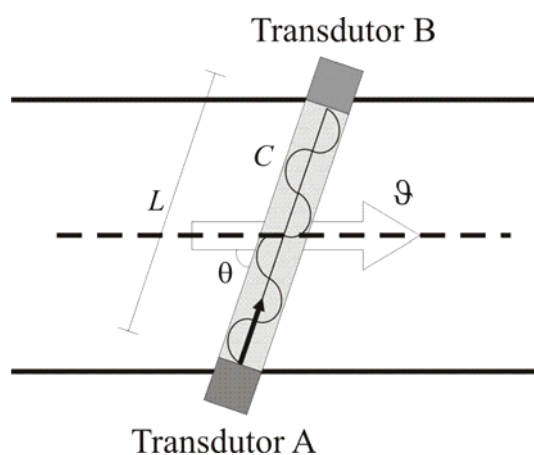


Figura 4.3. Configuração dos transdutores ultrasônicos para medição de velocidade de fluidos baseado no método do Tempo de Trânsito.

Para o propósito de medição do Tempo de Trânsito (ToF), apresentam-se sucintamente, nesta seção, as principais técnicas encontradas nas referências:

- A. Detecção de Limiar
- B. Diferença de Fase
- C. Correlação Cruzada
- D. Filtro de Kalman

A.

Detecção de Limiar

Considerando-se a configuração dos transdutores ultra-sônicos da Figura 4.3, realiza-se a medição do ToF utilizando-se a técnica de medição por diferença de tempo, também denominada técnica de Detecção de Limiar (TH – *Threshold Detection*). Este método consiste em transmitir um trem de ondas senoidais a partir do transdutor transmissor T_A e medir o

tempo necessário para sua detecção (ToF) no transdutor receptor T_B , através da detecção de um nível de referência ou limiar, como ilustrado na Figura 4.4. Entretanto, devido ao retardo imposto pela dinâmica dos transdutores, que inclui o tempo de emissão e a resposta transitória do transdutor receptor no tempo, o valor medido do ToF (t_{AB}^M) não corresponde diretamente ao tempo de recepção. Conseqüentemente, o valor medido do tempo pode ser expresso como a soma do tempo de transmissão (t_{AB}) com o tempo de detecção (t_{AB}^E):

$$t_{AB}^M = t_{AB} + t_{AB}^E \quad (4.2)$$

Uma aferição pode ser realizada de forma a determinar o tempo de detecção (t_{AB}^E) com velocidade do vento zero. Assim, a velocidade do vento para esta estrutura de medição, é dada por:

$$\mathfrak{V}_{TH} = \frac{1}{\cos \theta} \left(\frac{L}{t_{AB}^M - t_{AB}^E} - C \right) \quad (4.3)$$

em que \mathfrak{V}_{TH} é a velocidade do vento para a técnica de Detecção de Limiar (TH), L é a distância entre os transdutores, θ é o ângulo entre a propagação do vento e a direção da linha dos transdutores e C é a velocidade do som, que varia principalmente com a temperatura. A dependência de C com a temperatura T_K (em Kelvin) é dada por [KAIMAL, 1963]:

$$C = 20.074 \sqrt{T_K} \quad (4.4)$$

Considerando-se que os transdutores T_A e T_B podem transmitir e receber alternadamente, os tempos de trânsito no caminho direto ($A \rightarrow B$) e inverso ($B \rightarrow A$) podem ser determinados por:

$$t_{AB} = \frac{L}{(C + \mathfrak{V} \cos \theta)} \quad (4.5)$$

$$t_{BA} = \frac{L}{(C - \mathfrak{V} \cos \theta)} \quad (4.6)$$

em que t_{AB} e t_{BA} são os tempos de transmissão nos sentidos positivo e negativo do fluxo do vento.

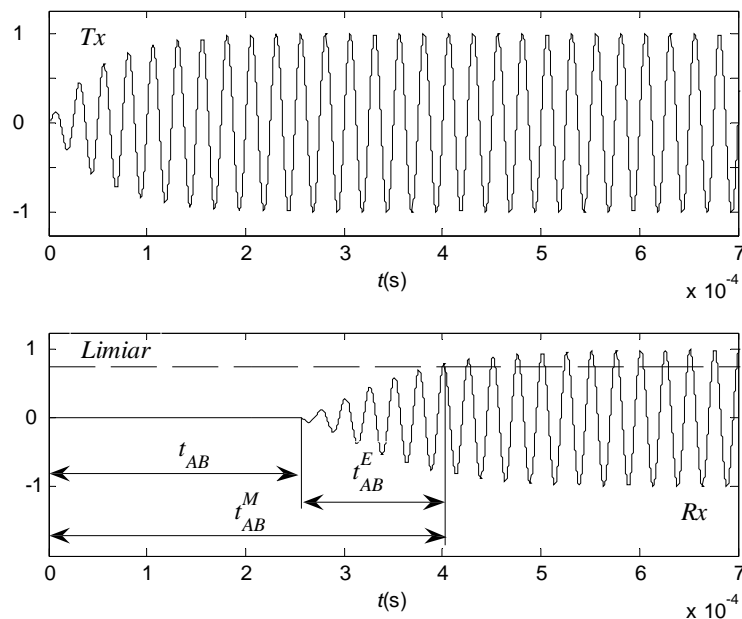


Figura 4.4. Medição do ToF utilizando a técnica de Detecção de Limiar (TH).

A partir da relação entre t_{AB} e t_{BA} (4.5 e 4.6), pode-se determinar a velocidade do fluido para a técnica de Detecção de Limiar (TH), sem que essa velocidade seja afetada por mudanças nas condições do meio (temperatura, pressão, viscosidade e densidade), ou seja, sem nenhuma influência da velocidade do som C , sendo dada por:

$$\mathfrak{S}_{TH} = \frac{L}{2 \cos \theta} \left(\frac{1}{t_{AB}} - \frac{1}{t_{BA}} \right) \quad (4.7)$$

B.

Diferença de Fase

Para a configuração dos transdutores ultra-sônicos da Figura 4.3, a técnica da Diferença de Fase (PD – *Phase Difference*), opera medindo a diferença de fase entre as ondas ultra-sônicas transmitidas e recebidas, como ilustrado na Figura 4.5. Para uma frequência de operação dos transdutores f , a fase instantânea no transmissor e receptor é dada por $\phi_{AB} = 2\pi f t_{AB}$, e a velocidade do vento é:

$$\mathfrak{S}_{PD} = \frac{1}{\cos \theta} \left(\frac{2\pi f L}{\phi_{AB}} - C \right) \quad (4.8)$$

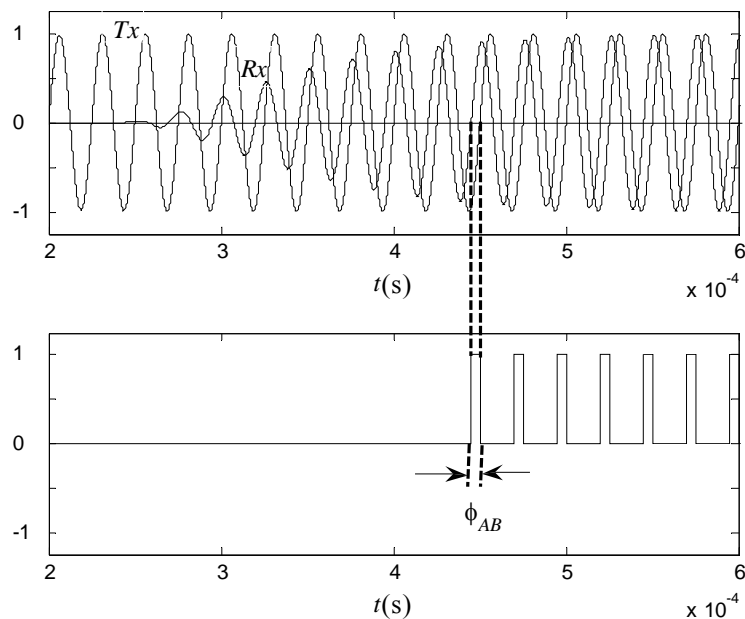


Figura 4.5. Medição do ToF utilizando a técnica da Diferença de Fase (PD).

A velocidade do vento pode também ser determinada medindo-se a diferença de fase entre dois sinais transmitidos em direções opostas. A diferença de fase aparece como consequência do acréscimo ou do atraso da propagação do sinal ultra-sônico causado pelo movimento do vento. A fase dos sinais recebidos em ambos os sentidos a uma frequência f de operação dos transdutores é definida como:

$$\phi_{AB} = 2\pi f t_{AB} \quad (4.9)$$

$$\phi_{BA} = 2\pi f t_{BA} \quad (4.10)$$

A partir das equações (4.9) e (4.10), a velocidade do vento para a técnica da diferença de fase considerando-se os sinais transmitidos em direções opostas é dada por:

$$\mathfrak{V}_{PD} = \frac{\pi f L}{\cos \theta} \left(\frac{1}{\phi_{AB}} - \frac{1}{\phi_{BA}} \right) \quad (4.11)$$

C.

Técnicas de Correlação

A correlação é uma operação entre duas seqüências, cujo objetivo consiste em medir a similaridade que existe entre elas, por meio da extração de informações que dependem da aplicação considerada. Neste caso, a informação de interesse é a estimação do tempo do trânsito (ToF). Para este propósito, consideram-se duas seqüências digitais $x(n)$ e $y(n)$ que se deseja comparar, em que $x(n)$ representa as amostras do sinal transmitido e $y(n)$, as amostras

do sinal no receptor. O sinal recebido apresenta um retardo temporal em relação ao sinal transmitido e é representado por:

$$y(n) = Ax(n - \tau) + w(n) \quad (4.12)$$

em que A é o fator de atenuação devido à trajetória do sinal transmitido $x(n)$ através do meio de propagação, τ é o retardo devido ao trajeto desde o transmissor até o receptor (ToF) e $w(n)$ representa o ruído aditivo captado no transdutor receptor e qualquer outra componente de ruído gerada pelos componentes eletrônicos e amplificadores do receptor.

Considerando-se as seqüências de transmissão e recepção, o problema consiste em determinar o atraso de tempo τ e, a partir deste resultado, a estimação da velocidade do vento (9). Para este propósito, utiliza-se a operação de correlação entre os sinais $x(n)$ e $y(n)$, em que o índice da posição do valor máximo do resultado da operação de correlação é relacionado à medição do tempo de trânsito τ [PROAKIS, 1995]. A correlação de duas seqüências é definida pela seguinte relação:

$$R(x, y) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} x(k)y(n+k) \quad (4.13)$$

Para exemplificar este procedimento, considera-se a configuração dos transdutores ultra-sônicos da Figura 4.3 com as seguintes especificações: $\vartheta = 10$ m/s, ângulo entre os transdutores $\theta = \pi/4$, frequência de operação dos transdutores $f = 40$ kHz, temperatura do fluido $T_K = 293,15$ K (25 °C), velocidade do som $C = 343,67$ m/s e distância entre os transdutores $L = 10\lambda$ (com $\lambda = C/f = 8,59$ mm). Para estas especificações, o valor do ToF teórico é dado por:

$$\tau = \frac{L}{(C + \vartheta \cos \theta)} = 244.96 \mu\text{s} \quad (4.14)$$

Considerando-se que o sinal ultra-sônico transmitido $x(n)$ é modelado pela seguinte equação [GUETBI, 1998]:

$$x(n) = \left(\frac{n}{3\gamma}\right)^3 \sin(2\pi ft) e^{\left(\frac{3-n}{\gamma}\right)} \quad (4.14)$$

em que f é a frequência de operação do transdutor ultra-sônico e $\gamma = 0,0001$, o sinal no transdutor receptor é dado por:

$$y(n) = x(n - \tau) \quad (4.15)$$

Considerando-se estas duas últimas equações, apresentam-se, na Figura 4.6, as formas de ondas dos sinais transmitido $x(n)$ e recebido $y(n)$ pelos transdutores ultra-sônicos. Na Figura 4.7, apresenta-se o resultado da operação de correlação $R(x, y)$, entre os sinais x e y . Neste

caso, o índice k que fornece o maior valor de $R(x, y)$ é relacionado à medição do ToF. Assim $k(R_{max}) = 1494$, e o valor do TOF medido é $\tau^* = 245 \mu\text{s}$.

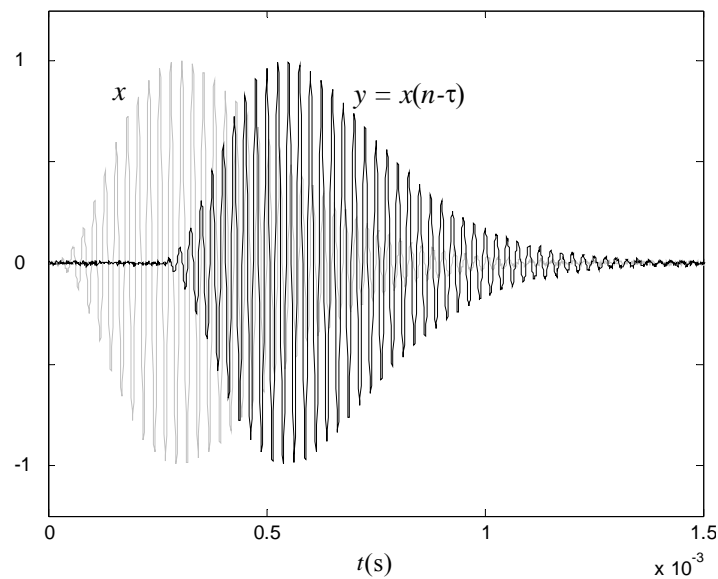


Figura 4.6. Sinal ultrassônica transmitida x e recebida y .

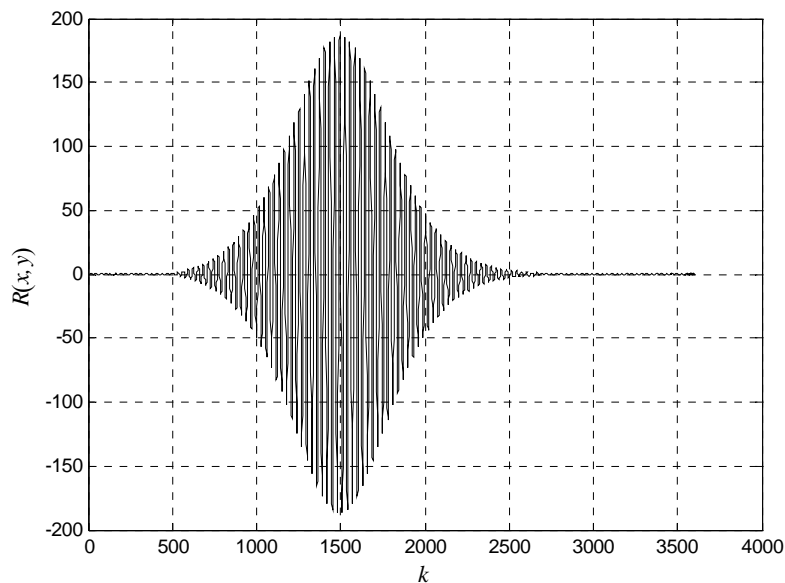


Figura 4.7. Operação de correlação $R(x,y)$.

Observa-se que, ao se realizar a operação de correlação, os sinais $x(n)$ e $y(n)$ devem ser inicialmente armazenados; isto traz alguma desvantagem, pois o sistema de medição requererá um grande espaço de armazenamento. Além disso, com a finalidade de aumentar a resolução no cálculo do ToF, técnicas de interpolação linear são aplicadas aos sinais $x(n)$ e $y(n)$,

aumentando o número de amostras em cada sinal. Este procedimento eleva o custo computacional requerido para o cálculo da operação de correlação.

D.

Filtro de Kalman

Outro método utilizado para estimação do Tempo de Trânsito (ToF) é baseado no Filtro de Kalman. Para este propósito, realiza-se a modelagem matemática da envoltória do sinal ultra-sônico recebido no transdutor receptor. A partir disto, utiliza-se o procedimento recursivo do Filtro de Kalman para a estimação de estados do conjunto de parâmetros que caracterizam a envoltória. Deste modo, a equação da envoltória é dada por [ANGRISANI, 2006]:

$$A(t) = A_0 \left(\frac{t - \tau}{T} \right)^\psi \exp \left(\frac{t - \tau}{T} \right) \quad (4.16)$$

em que A_0 é a amplitude do sinal ultra-sônico, ψ e T são parâmetros específicos do transdutor ultra-sônico e τ é o tempo de trânsito (ToF).

Considerando-se uma sequência de ondas ultra-sônicas de transmissão e recepção, o procedimento de medição do ToF baseado no Filtro de Kalman consiste nas seguintes etapas:

- a) *Aquisição de dados*: O primeiro passo deste procedimento consiste em realizar a conversão analógico-digital do sinal ultra-sônico, através de um sistema de aquisição de dados, como apresentado na Figura 4.8.
- b) *Pré-processamento de sinais*: Como o procedimento utiliza a envoltória do sinal ultra-sônico, operações de pré-processamento são requeridas. Para tal, calcula-se o módulo analítico (valor absoluto) do sinal ultra-sônico e extrai-se a envoltória deste último sinal por meio da Transformada Hilbert, como apresentado na Figura 4.9. A forma da envoltória está associada aos parâmetros da equação (4.16).
- c) *Estimação de parâmetros*: Para a estimação dos parâmetros (A_0 , ψ , T e τ), devem ser inicialmente estabelecidos os intervalos de variação e suas variâncias. Executa-se, a seguir, o procedimento recursivo baseado no Filtro de Kalman, determinando-se os parâmetros da envoltória definida em (4.16), entre eles o tempo de trânsito τ (ToF), como ilustrado na Figura 4.10.

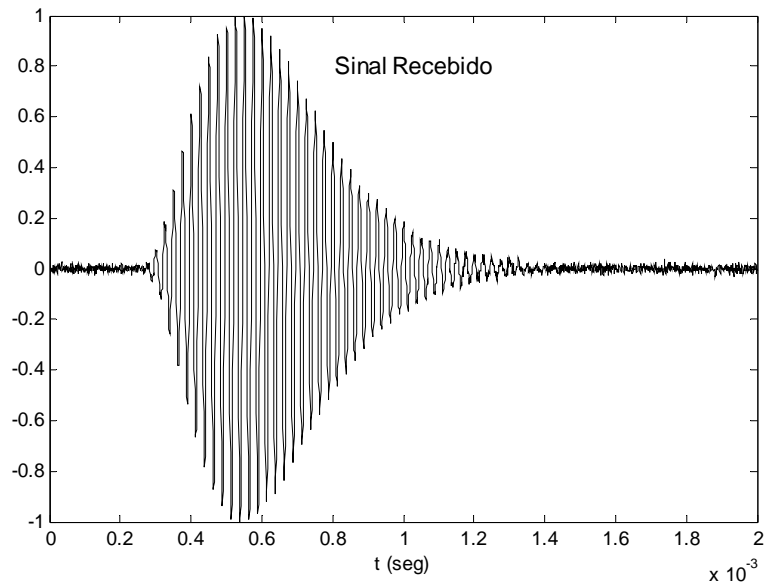


Figura 4.8. Processo de aquisição de sinais ultrasônicos

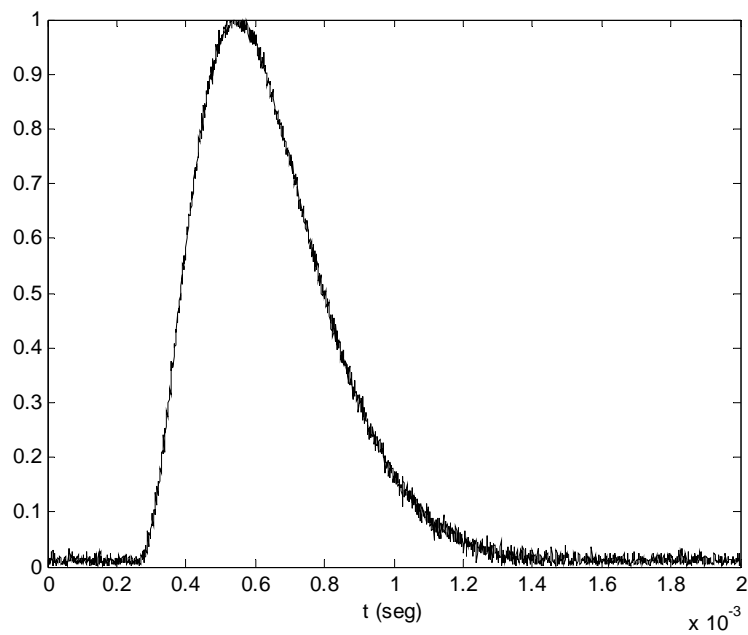


Figura 4.9. Pré-processamento do sinal ultrasônico para extrair a envoltória do sinal através da Transformada de Hilbert.

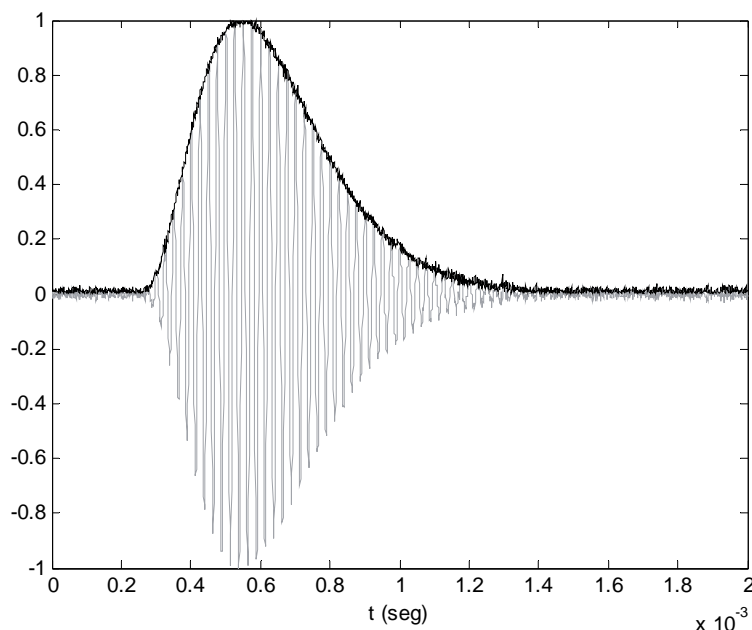


Figura 4.10. Estimação do ToF utilizando o Filtro de Kalman.

A vantagem principal desta abordagem é que a estimativa do ToF apresenta uma redução efetiva do desvio, assim como uma estimativa de parâmetros da envoltória de uma forma robusta e confiável. Entretanto, a desvantagem deste método reside na necessidade de aplicação de técnicas de processamento de sinais sofisticadas (Transformada de Hilbert) e o conhecimento a priori das estatísticas dos parâmetros a serem estimados.

4.3.3

Comparação dos Métodos de Tempo de Trânsito

A fim de salientar as vantagens e desvantagens dos métodos do Tempo de Trânsito apresentados na seção anterior, na Tabela 4.1 apresenta-se uma comparação entre eles, levando em consideração os seguintes parâmetros: processamento computacional e influência das incertezas.

A partir destas comparações, pode-se justificar o uso das técnicas da Detecção de Limiar e Diferença de Fase no projeto de um sistema de instrumentação para medição da velocidade do vento pela sua maneira simples de implementação e pelo baixo consumo de energia dos instrumentos, essencial para aplicações na área de energia eólica, em que os instrumentos de medição de vento são localizados em áreas isoladas (áreas desertas e florestas) para a monitoração e coleta de dados.

Tabela 4.1. Comparação entre as técnicas de Tempo de Trânsito.

Método	Processamento	Incertezas
Detecção de Limiar	Detecção do sinal a partir de um nível de limiar predefinido.	Influências na medição da temperatura só na estrutura no sentido único e na detecção do limiar.
Diferença de Fase	Medição da diferença de fase entre as ondas transmitida e recebida.	Influências na medição da temperatura só na estrutura no sentido único e na medição da diferença de fase.
Correlação Cruzada	Estimação da Correlação Cruzada utilizando técnicas de processamento de sinais.	Incertezas introduzidas devido às aproximações das técnicas de interpolação e da temperatura.
Filtro de Kalman	Estimação de parâmetros de forma recursiva e uso de técnicas de processamento de sinais.	Incertezas na estimação dos parâmetros e da temperatura.

4.4

Considerações Práticas do uso de Transdutores Ultra-sônicos

Hoje em dia, sob o ponto de vista de desempenho, transdutores ultra-sônicos são considerados uma importante ferramenta para a solução efetiva de aplicações industriais e científicas. Muitos exemplos podem ser encontrados em diferentes áreas, tais como: análise química, tratamento de águas residuárias, imagens médicas, navegação de robôs, medição de nível, e velocidade de fluidos, etc. Dependendo da aplicação específica, diferentes tipos de sistemas de medição e sensores são utilizados, entretanto, os problemas relacionados em cada caso são similares: reflexões e ecos, atenuação e espalhamento do feixe (*beam spreading*), presença de ruído e interferência, sensibilidade à temperatura e umidade, baixa resolução, entre outros [ANDRIA, 2001].

Um problema típico com a estimação do ToF refere-se ao compromisso existente entre a resolução do relógio do sistema e a relação sinal-ruído (SNR). A resolução finita do tempo do sistema introduz incertezas que podem ser reduzidas por meio de técnicas de interpolação, reduzindo-se assim o erro devido à resolução. Este compromisso é particularmente difícil de ser alcançado, pois as restrições podem trazer resultados opostos (detecção de níveis de amplitude de ecos curtos e grandes). Portanto, uma maneira de ganhar exatidão na estimação do ToF consiste em identificar completamente os diferentes componentes de erro e incertezas associados aos parâmetros típicos do sinal ultra-sônico propagado [GRIMALDI, 1995] e [ANDRIA, 2001].

Como o objetivo é projetar um instrumento para medição da velocidade do vento utilizando transdutores ultra-sônicos com uma incerteza de medição menor possível, no próximo capítulo é proposto e desenvolvido um estudo detalhado das fontes de propagação das incertezas na medição da velocidade do vento que utilizam as técnicas de medição do Tempo de Trânsito (ToF) de Detecção de Limiar (TH) e de Diferença de Fase (PD). Faz-se também uma avaliação de duas estruturas para medição da velocidade do vento, a fim de determinar as condições que proporcionam menor incerteza.