



Universidade Federal de Campina Grande
Centro de Engenharia Elétrica e Informática
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica

Tese de Doutorado

**MODELAGEM DINÂMICA EM ESPAÇO DE ESTADOS DE SINAIS DE ULTRASSOM PARA A
ESTIMAÇÃO DO TEMPO DE TRÂNSITO UTILIZANDO FILTRO DE KALMAN**

Daiana Correia de Lucena

Prof. Dr. Raimundo Carlos Silvério Freire
Orientador

Prof. Dr. Juan Moises Mauricio Villanueva
Orientador

Campina Grande - PB

Março de 2021

Universidade Federal de Campina Grande
Centro de Engenharia Elétrica e Informática
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica

**MODELAGEM DINÂMICA EM ESPAÇO DE ESTADOS DE SINAIS DE ULTRASSOM PARA A
ESTIMAÇÃO DO TEMPO DE TRÂNSITO UTILIZANDO FILTRO DE KALMAN**

*Tese de Doutorado apresentada ao Programa
de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da
Universidade Federal de Campina Grande
como parte dos requisitos necessários para
obtenção do grau de Doutor em Ciências no
Domínio da Engenharia Elétrica.*

Área de Concentração: Processamento da Informação

Daiana Correia de Lucena

Prof. Dr. Raimundo Carlos Silvério Freire
Orientador

Prof. Dr. Juan Moises Mauricio Villanueva
Orientador

Campina Grande - PB

Março de 2021

L935m Lucena, Daiana Correia de.
Modelagem dinâmica em espaço de estados de sinais de ultrassom para a estimação do tempo de trânsito utilizando filtro de Kalman / Daiana Correia de Lucena. – Campina Grande, 2021.
73 f. : il. color.

Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal de Campina Grande, Centro de Engenharia Elétrica e Informática, 2021.
"Orientação: Prof. Dr. Raimundo Carlos Silvério Freire, Prof. Dr. Juan Moises Mauricio Villanueva".

Referências.

1. Processamento da Informação. 2. Transdutores de Ultrassom. 3. Tempo de Trânsito. 4. Filtro de Kalman Estendido. 5. Velocidade do Vento. I. Freire, Raimundo Carlos Silvério. II. Villanueva, Juan Moises Mauricio. III. Título.

CDU 621.391(043)

AGRADECIMENTOS

Aos Professores Raimundo Carlos Silvério Freire e Benedito Antônio Luciano, pela orientação, contribuições técnicas e disponibilidade constante, que permitiram e foram fundamentais para o desenvolvimento desta tese.

Ao Professor Juan Moises Maurício Villanueva, pela orientação, amizade, conhecimentos transmitidos e dedicação em acompanhar todo o desenvolvimento do trabalho, contribuindo em todos os momentos. Também, pela disponibilização do espaço, onde foram realizados os experimentos, junto ao LENHS/UFPB (Laboratório de Eficiência Energética e Hidráulica em Saneamento).

Aos funcionários da COPELE (em especial à Angela Matias) e do DEE da UFCG.

Aos amigos que estiveram presentes durante o doutorado, contribuindo com incentivo e discursões, Maraiza Prescila, Marcos Bernardo (integrantes do LIMC - Laboratório de Instrumentação e Metrologia Científicas), Tatiana Pontual e Thamyres Tamulla. Em especial, a Jeane Souza pelo companheirismo e apoio recebido em todos os momentos e Priscilla Kadja, que foram essenciais e tornaram os cinco anos bem menos solitários. À Helder Nascimento e Gabriel Gutierrez pelo apoio e pelos momentos em que pude me ausentar do trabalho. Aos amigos que não foram citados, mas contribuíram de alguma forma para que eu pudesse finalizar esta tese.

De forma não menos importante, aos meus pais (Geraldo Lucena e Maria Correia), tia (Fátima Lucena), irmão (Euclides Correia) e sobrinha (Ana Luiza) pelo carinho e incentivo prestado durante esse período e durante o caminho que me fez chegar até aqui, compreendendo também os momentos de minha ausência. A hoje meu esposo (Wendell Farias), que esteve presente durante os cinco anos, pelo carinho, companheirismo, apoio técnico e discursões. Também foram essenciais para que eu pudesse obter este título.

RESUMO

Uma metodologia para estimação do tempo de trânsito em ondas de ultrassom com aplicação em medição da velocidade do vento é proposta baseado no filtro de Kalman estendido. A técnica proposta utiliza uma estimação de trechos do sinal de ultrassom para medição indireta do tempo de trânsito, a partir de medições da amplitude do sinal do transdutor receptor e do valor de inicialização do tempo de trânsito. Para inicialização do tempo de trânsito, etapa necessária ao uso do filtro Kalman, foi proposta uma metodologia que identifica um valor de limiar de tensão do sinal do transdutor receptor (a partir do qual é determinado o tempo de trânsito inicial) adequado a ser utilizado. Fundamentado neste método, foi construído um modelo computacional de propagação de ondas de ultrassom e procedimentos experimentais foram realizados usando um túnel de vento, com objetivo de aplicar o algoritmo com o Filtro de Kalman na medição indireta do tempo de trânsito. Entre as técnicas que são utilizadas para a medição do tempo de trânsito suas limitações se referem à faixa de medição restrita a um ciclo do sinal, necessidade de encontrar uma função matemática que descreva o sinal de ultrassom ou trechos dele e níveis de ruído do meio. Em simulação, o tempo de trânsito foi obtido com a técnica de diferença de fase no domínio do tempo após o uso do filtro de Kalman como etapa de filtragem utilizando trechos do sinal, em cenários com valores de relação sinal ruído (SNR) menores do que 35 dB, para os quais as técnicas convencionais de detecção de limiar e diferença de fase no domínio do tempo não podem ser aplicadas de forma direta. A técnica proposta com o filtro de Kalman estendido foi usado para medição indireta do tempo de trânsito, obtendo-se com resultados de simulação e experimental um bom desempenho da técnica proposta, com valores do tempo de trânsito com exatidão comparável com os obtidos com a técnica de diferença de fase no domínio da frequência, no entanto sem a restrição da faixa de medição limitada a 2π (um ciclo do sinal).

Palavras-chave: transdutores de ultrassom; tempo de trânsito; filtro de Kalman estendido; velocidade do vento.

ABSTRACT

Ultrasound transducers are applied in several systems to measure flow velocity, distance and surface wear, by estimating the ultrasound travel time, from its emission in the transmitting transducer to its detection in the receiving transducer (time of flight), presenting high speed response and good accuracy. Techniques based on time difference and signal processing have been used to time of flight estimation in order to reduce uncertainties. The beginning of signal detection in the receiving transducer for time of flight estimation is hampered by the noise levels of the medium, whose amplitudes are confused with the amplitudes that represent the signal detection.

A methodology for ultrasound time of flight estimation applied to wind speed measurement is proposed, based on the extended Kalman filter that uses an estimation of stretch of the ultrasound signal for time of flight indirect measurement, from measurements of the amplitude of the receiving transducer signal and the time of flight initialization value. For time of flight initialization, that is a necessary step to use the Kalman filter, was proposed a methodology that identifies a voltage threshold value of the receiving transducer signal (from which the initial time of flight is determined) to be used. Among the techniques that are used to measure the time of flight, its limitations refer to the measurement range restricted to a signal cycle, the need to find a mathematical function that describes the ultrasound signal or sections of it and middle noise levels. Based on this method, a computational model for the propagation of ultrasound waves was built and experimental procedures were performed using a wind tunnel, in order to apply the algorithm with the Kalman Filter in the time of flight indirect measurement. In simulation, the time of flight was obtained with the phase difference technique in the time domain after the use of Kalman filter as a signal filtering step, in scenarios with signal-to-noise ratio (SNR) values less than 35 dB, for which the conventional techniques of detection of threshold and phase difference in the time domain cannot be applied directly. The Kalman filter was used for time of flight indirect measurement, join as the methodology that identifies a proper voltage threshold value of the receiving transducer signal to be used, obtaining in simulation and experimental results a good performance of the proposed technique, with values of time of flight with accuracy comparable to those obtained with the difference technique in frequency domain, however without the restriction of measurement range limited to 2π (one signal cycle).

Keywords: ultrasound transducers; time of flight; extended Kalman filter; wind speed.

LISTA DE SIGLAS E SÍMBOLOS

\vec{C}_1 : vetor da velocidade de deslocamento da onda ultrassônica

\vec{C} : velocidade da onda ultrassônica com o ar parado (velocidade do som)

$\vec{\vartheta}$: velocidade do vento

L : distância entre os transdutores de ultrassom transmissor e receptor

θ : ângulo entre a direção de alinhamento dos transdutores de ultrassom e a direção do fluxo de vento

t^M : tempo medido no momento de detecção de limiar

t^E : tempo de atraso eletrônico

n : número de ciclos de onda

λ : comprimento de onda

f : frequência

ϕ : diferença de fase entre os sinais do transmissor e receptor

t_{MLE} : tempo de trânsito resultante da fusão de dados

α : incerteza associada à técnica de detecção de limiar

β : incerteza associada à técnica de diferença de fase

u_{TH} : incerteza da medição usando detecção de limiar

u_{PD} : incerteza da medição usando diferença de fase

w_k : ruído associado aos estados

v_k : ruído associado à medição

Q_k : matriz de covariância dos estados

R_k : matriz de covariância da medição

T_s : taxa de amostragem

$f[.]$: função que representa o processo

$g[.]$: função que representa a medição

ω : frequência de operação do transdutor de ultrassom

A : amplitude

ϕ : fase

ToF : tempo de trânsito

$u(t)$: sinal detectado no transdutor de ultrassom receptor

$y(t)$: sinal estimado pelo filtro de Kalman

σ : desvio padrão

y_k : medições atuais

P_k : matriz do erro de covariância ou matriz de covariância do processo

G_k : ganho do filtro de Kalman

\hat{x}_{k-1} : estados anteriores

$\hat{x}_{k|k-1}$: estados atuais

$ToFi$: valor inicial do tempo de trânsito no filtro de Kalman

k : número de iterações

GUM – *Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement* (Guia para a Expressão de Incerteza de Medição)

MLE - *Maximum Likelihood Estimation* (Estimação de Máxima Verossimilhança)

SNR – *Signal to Noise Ratio* (Relação Sinal Ruído)

ToF – *Time of Flight* (Tempo de Trânsito)

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 - Configuração de medição da velocidade do ar.	8
Figura 2.2 - Técnica de estimação do ToF: detecção de limiar.	10
Figura 2.3 - Identificação dos três cruzamentos por zero após a detecção de limiar.....	11
Figura 2.4 - Técnica de estimação do ToF: diferença de fase.	13
Figura 3.1 - Geração do sinal do transmissor no Simulink.	24
Figura 3.2 - Geração do sinal do receptor no Simulink.	24
Figura 3.3 - Fluxograma para o algoritmo proposto com o filtro de Kalman.....	27
Figura 3.4 - Obtenção do tempo de trânsito inicial para o algoritmo com o filtro de Kalman.	28
Figura 3.5 - Valores de amplitude máxima obtidos a cada 25 μ s do sinal do RX.....	29
Figura 3.6 - Valores de amplitude média das 200 aquisições.	29
Figura 3.7 - Valores mínimo e máximo atribuído aos pontos 24, 25 e 26 para as 200 aquisições.	30
Figura 3.8 - Valores mínimo e máximo atribuído aos pontos 37, 38 e 39 para as 200 aquisições.	31
Figura 3.9 - Filtragem de trecho de um sinal de ultrassom.....	33
Figura 3.10 - Seção de medição.....	34
Figura 3.11 - Configuração experimental para aquisição dos dados.	35
Figura 3.12 - Condicionamento do sinal do transdutor receptor.	36
Figura 3.13 - Condicionamento do sinal do transdutor transmissor.	36
Figura 3.14 - Sinais do transmissor e receptor com o sinal de excitação do transmissor desativado.	37
Figura 3.15 - Espectro do sinal do transdutor receptor.	37

Figura 3.16 - Histograma para o sinal do receptor.....	37
Figura 4.1 - Fluxograma para estimação do tempo de trânsito utilizando o filtro de Kalman como etapa de filtragem.	39
Figura 4.2 - Diagrama de blocos da simulação.....	40
Figura 4.3 - Estimação do sinal recebido (simulação), com a frequência de amostragem em 400 kS/s.	41
Figura 4.4 - Variação do tempo de trânsito com o SNR, para diferentes técnicas, com $f_s = 400$ kS/s.	41
Figura 4.5 - Estimação do tempo de trânsito.	43
Figura 4.6 - Comparação do filtro de Kalman com a técnica de diferença de fase no domínio da frequência com $\vartheta = 4$ m/s.....	44
Figura 4.7 - Comparação do filtro de Kalman com a técnica de diferença de fase no domínio da frequência com $\vartheta = 10$ m/s.....	44
Figura 4.8 - Comparação do filtro de Kalman com a técnica de diferença de fase no domínio da frequência com $\vartheta = 12$ m/s.....	45
Figura 4.9 - Atualização do desvio padrão associado ao tempo de trânsito (simulação).....	46
Figura 4.10 - Intervalo de tempo onde está localizado o valor a ser utilizado como limiar determinado a partir de aquisições do RX com a velocidade em 10 m/s.....	47
Figura 4.11 - Estimação do ToF usando o filtro de Kalman para $\vartheta=10$ m/s.	48
Figura 4.12 - Estimação do ToF usando o filtro de Kalman para $\vartheta=12$ m/s.	48
Figura 4.13 - Estimação do ToF usando o filtro de Kalman para $\vartheta=14$ m/s.	49
Figura 4.14 - Atualização do desvio padrão associado ao tempo de trânsito (experimental).49	
Figura 4.15 - Variação do ToF para 10 medições com a velocidade do vento em 10 m/s. Variação da velocidade do vento durante as medições: 10 m/s a 10,2 m/s.	50

Figura 4.16 - Variação do ToF para 15 medições com a velocidade do vento em 12 m/s. Variação da velocidade do vento durante as medições: 12 m/s a 12,2 m/s.	51
Figura 4.17 - Valores atribuídos ao tempo de trânsito inicial (ToF _i) no algoritmo do filtro de Kalman, com um fator de calibração F _c	53

LISTA DE TABELAS

Tabela 2-1 - Comparação entre as técnicas de estimação do tempo de trânsito.	19
Tabela 2-2 - Trabalhos relacionados ao tema por ordem cronológica.	20
Tabela 4-1 - Tempo de trânsito para as medições com frequência de amostragem em 400 kHz.	42
Tabela 4-2 - Desvio padrão para as medições com frequência de amostragem em 400 kHz.	42
Tabela 4-3 - Valores obtidos para o tempo de trânsito (simulação).....	45
Tabela 4-4 - Estimativa do ToF para as figuras Figura 4.11, Figura 4.12 e Figura 4.13.	50
Tabela 4-5 - Estimativa do ToF para a Figura 4.15.....	51
Tabela 4-6 - Estimativa do ToF para as figuras Figura 4.11, Figura 4.12 e Figura 4.13.	52
Tabela 4-7 - Valor médio e desvio padrão do ToF para 15 medições.....	53

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	1
1.1	MOTIVAÇÃO.....	3
1.2	OBJETIVOS	5
1.3	CONTRIBUIÇÕES.....	6
1.4	ORGANIZAÇÃO DO DOCUMENTO.....	6
2	TÉCNICAS DE ESTIMAÇÃO E CONFIGURAÇÃO PARA MEDIÇÃO DA VELOCIDADE DE FLUIDOS COM TRANSDUTORES DE ULTRASSOM.....	8
2.1	CONFIGURAÇÃO DO SISTEMA DE MEDIÇÃO DA VELOCIDADE DO VENTO USANDO TRANSDUTORES ULTRASSÔNICOS	8
2.2	TÉCNICAS PARA A MEDIÇÃO DO TEMPO DE TRÂNSITO.....	9
2.3	CONSIDERAÇÕES PARA AVALIAÇÃO DAS TÉCNICAS DE ESTIMAÇÃO DO TEMPO DE TRÂNSITO	21
3	TÉCNICA UTILIZADA PARA A ESTIMAÇÃO DO TEMPO DE TRÂNSITO	23
3.1	MODELAGEM COMPUTACIONAL DA PROPAGAÇÃO DO SINAL DE ULTRASSOM	23
3.2	MODELAGEM DO SISTEMA: MEDIÇÃO INDIRETA DO TEMPO DE TRÂNSITO	24
3.2.1	ESTIMAÇÃO DO TEMPO DE TRÂNSITO BASEADO NO FILTRO DE KALMAN ESTENDIDO.....	27
3.3	MODELAGEM DO SISTEMA: FILTRAGEM DO SINAL DE ULTRASSOM	33
3.4	BANCADA DE MEDIÇÕES	34
3.5	CONSIDERAÇÕES SOBRE A AQUISIÇÃO DE SINAIS DE ULTRASSOM	35
4	RESULTADOS.....	39
4.1	FILTRAGEM DO SINAL DE ULTRASSOM.....	39
4.1.1	SIMULAÇÃO.....	40
4.2	ESTIMAÇÃO DO TEMPO DE TRÂNSITO UTILIZANDO EKF (<i>EXTENDED KALMAN FILTER</i>).....	42
4.2.1	SIMULAÇÃO.....	43
4.2.2	EXPERIMENTAL	46
5	CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	55
	REFERÊNCIAS	57

1 INTRODUÇÃO

A medição da velocidade de fluidos usando transdutores ultrassônicos pode ser realizada pelo método do efeito *Doppler* ou da diferença de tempo. A utilização do efeito *Doppler* para medição da velocidade de fluidos é baseada na variação de frequência entre o sinal transmitido pelo transdutor e o sinal refletido pelo fluido, denominada de desvio *Doppler*, de forma que pode ser estabelecida uma relação entre a velocidade de fluxo e a variação na frequência entre as ondas transmitida e a refletida. Por outro lado, a técnica de diferença de tempo baseia-se na medição do tempo de trânsito (ToF - *Time-of-Flight*) que corresponde ao tempo de viagem do sinal de ultrassom desde a emissão da onda de ultrassom no transdutor transmissor até sua detecção no transdutor receptor. A técnica baseada no efeito *Doppler* é mais utilizada em fluidos líquidos ou gasosos com partículas suspensas, por conta da maior capacidade de reflexão, tendo sido descrita em aplicações biomédicas. Para medição de velocidade de fluidos sem partículas suspensas, a técnica do tempo de trânsito é mais adequada [1-2].

Na medição da velocidade do vento o instrumento utilizado é o anemômetro, que pode ser do tipo rotacional, pressão, deflexão, termoeletrônicos ou ultrassônicos.

Os anemômetros rotacionais são constituídos por hélices ou conchas que giram a uma velocidade angular proporcional a velocidade do vento. Nos anemômetros de pressão, as diferenças de pressão provocadas pelo movimento das moléculas do ar, através de um tubo contendo um fluido que varia seu nível em função da pressão, é utilizada para o cálculo da velocidade. Os de deflexão são formados por uma chapa metálica em que um dos lados é livre, de forma que o vento incide sobre a chapa metálica que deflete em função da velocidade do vento. Os três tipos citados precisam obstruir a passagem do fluxo de ar para a medição da velocidade, comprometendo a exatidão da medição da velocidade do fluxo [3].

Os anemômetros termoeletrônicos se baseiam na troca de calor para determinar a velocidade do fluido, por meio de um fio ou filme condutor de calor que é aquecido e exposto ao fluido a ser medido, sendo a velocidade proporcional à quantidade de calor retirada do fio ou filme quente, o que resulta em um alto tempo de resposta [3].

Por alguns anos, os sensores ultrassônicos foram tidos como uma segunda opção para a medição da velocidade do vento por conta de seu custo inicial e da larga aceitação dos sensores mecânicos por parte do mercado, que, no entanto, apresentam baixa velocidade de resposta e um custo de manutenção elevado em relação aos ultrassônicos. Os anemômetros mecânicos podem ser usados em uma situação que priorize uma alternativa de baixo custo, onde não seja necessário o armazenamento de dados e um ciclo de vida pequeno não seja problemático [4-6].

Nos anemômetros ultrassônicos o tempo de trânsito de uma onda mecânica, é utilizado para o cálculo da velocidade do fluido em movimento entre o transdutor transmissor e o receptor. Os transdutores ultrassônicos que funcionam baseados no princípio da piezo eletricidade, produz uma diferença de potencial proporcional a pressão mecânica a qual o material é submetido e vice versa.

Técnicas de medição baseadas em transdutores ultrassônicos têm se mostrado uma ferramenta eficaz para aplicações industriais e em laboratórios científicos, sendo aplicadas em sistemas de medição de distância, nível, volume, desgaste de superfícies e velocidade de fluidos, estabelecendo processos de medição não destrutivos com elevada velocidade de resposta, boa exatidão, baixa incerteza e com mínimo serviço de manutenção [2, 6-11].

Em sistemas de medição, a construção de modelos pode ser realizada para explicar o comportamento de sistemas a partir de suas entradas e saídas. O modelo obtido deve representar a saída do processo, que geralmente é determinado por meio de técnicas de minimização do erro quadrático, reduzindo a diferença entre a saída verdadeira e a estimada do processo. Os modelos no espaço de estados (que facilitam a observação e descrição de um processo) são descritos pelas equações de estado e de observação, que respectivamente, descrevem a dinâmica das variáveis de estado e associa variáveis observadas às de estado. Em modelos estocásticos as incertezas são modeladas na forma de variáveis aleatórias, admitindo a existência de componentes não observáveis de tendência e ruído, enquanto nos modelos determinísticos não são utilizadas incertezas. Os modelos expressos em espaço de estados permitem o uso do filtro de Kalman que possibilitam a estimação, a partir da série temporal da variável observável, de uma variável não observável, que neste trabalho é representada pelo tempo de trânsito.

O filtro de Kalman é um algoritmo usado para a estimação do estado interno de um sistema dinâmico (descrito no espaço de estados) a partir de uma série de medições ruidosas ou incertas. Nos casos em que a dinâmica de um sistema não é linear, duas variações do filtro de Kalman podem ser aplicadas: o filtro de Kalman estendido, que é baseado na aproximação com a série de Taylor, que transforma um sistema não linear em um linear. E o filtro de Kalman *unscented* utiliza a transformação *unscented* na qual amostras da medição com valores próximos são aplicados à função não linear da dinâmica do sistema e em seguida calculada a covariância ponto a ponto.

1.1 MOTIVAÇÃO

Sistemas de medição de velocidade de fluidos com transdutores ultrassônicos fazem uso de técnicas de processamento de sinais e estudos para análise e propagação de incertezas [12-13]. A exatidão e estabilidade da estimação do tempo de trânsito são afetadas pela interferência do meio e propagação de incertezas causadas por variações na temperatura. A estimação do tempo de trânsito pode ser feita por meio de técnicas convencionais tais como, detecção de limiar e diferença de fase no domínio do tempo, que apresentam alta sensibilidade ao ruído, variações da temperatura e umidade, ou com a utilização do processamento de sinais. Dentre as técnicas baseadas em processamento de sinais estão a correlação cruzada, diferença de fase no domínio da frequência (utilizando a transformada de Fourier), transformada Wavelet e filtro de Kalman [3-5, 14-20].

No domínio do tempo, a técnica de detecção de limiar é bastante afetada pelo ruído e dependente da taxa de amostragem, a técnica de diferença de fase apresenta uma menor sensibilidade ao ruído e à taxa de amostragem, com uma limitação da faixa de medição correspondente ao intervalo de tempo de um ciclo do sinal de ultrassom (2π). Enquanto a correlação cruzada é dependente da envoltória do sinal recebido no transdutor receptor, que deve ter a menor quantidade de picos possíveis mantidos no valor de máximo, em alguns casos é utilizado o sinal do transmissor, em outros um sinal de referência com o qual é feita a correlação. O início da detecção do sinal no transdutor receptor para estimação do tempo de trânsito é dificultado pelos níveis de ruído do meio, cujas amplitudes se confundem com as amplitudes que representam a detecção do sinal. [1, 3, 14, 18, 21-24].

A diferença de fase no domínio da frequência apresenta boa imunidade ao ruído, com a limitação da faixa de medição a um ciclo do sinal de ultrassom e exige a aquisição do sinal

do transmissor como também ocorre quando executada no domínio do tempo. A transformada Wavelet utiliza a decomposição do sinal do transmissor e receptor baseada em uma função que deve ter um formato semelhante ao sinal de ultrassom, alterações no formato do sinal provocadas pelo ruído comprometem a eficiência da técnica [3-4, 25-27].

O filtro de Kalman estendido foi utilizado em conjunto com a com a técnica de diferença de fase no domínio da frequência, reduzindo a incerteza associada a medição em [13]. Enquanto em [19] e [14], uma modelagem foi constituída com a envoltória do sinal do receptor para estimação do início da recepção do sinal de ultrassom com o filtro de Kalman *unscented* e estendido respectivamente. Um problema em se estimar a envoltória do sinal do receptor é que a região de início do sinal de ultrassom comumente se confunde com o ruído presente no meio, logo, esta técnica irá funcionar desde que haja uma distinção em valores de amplitude entre o ruído e o início do sinal.

Embora diversas técnicas já tenham sido desenvolvidas para a estimação do tempo de trânsito, características como nível de ruído nas diferentes regiões do sinal de ultrassom imposto pelo meio, limitações da faixa de medição (tal como na técnica de diferença de fase que está limitada a um ciclo do sinal) e necessidade de aquisição de ambos os sinais do transmissor e receptor de ultrassom, impõem limitações a cada uma das técnicas, criando espaço para o surgimento de novas pesquisas [11, 17, 24].

Neste trabalho é apresentada a estimação ou medição indireta do tempo de trânsito de um sinal de ultrassom utilizando o filtro de Kalman estendido, para medição da velocidade do vento, por meio da estimação de estados ou variáveis associadas a um trecho do sinal elétrico recebido no transdutor de ultrassom receptor, modelado como um sinal senoidal (com as variáveis de amplitude, fase e tempo de trânsito). Em uma análise inicial foi constituído um modelo com o filtro de Kalman para filtragem do sinal de ultrassom (utilizando como modelo do sinal de ultrassom a equação de uma onda senoidal com as variáveis de amplitude e fase), e aplicação da técnica de diferença de fase no domínio do tempo para estimação do tempo de trânsito. Enquanto para a medição indireta do tempo de trânsito com o filtro de Kalman, a modelagem foi construída por meio da equação de uma onda senoidal com um atraso, cujo atraso é equivalente ao tempo de trânsito desejado, tendo como variáveis a amplitude, fase e tempo de trânsito.

Os estados precisam ser inicializados no início do algoritmo e são estimados a partir da medição da amplitude do sinal elétrico do transdutor receptor. Como o modelo é constituído por uma onda senoidal com atraso com amplitude constante, que difere do formato do sinal recebido pelo transdutor receptor, o valor estimado para o tempo de trânsito (ou valor final) está contido sempre dentro do mesmo ciclo do sinal de ultrassom correspondente ao valor inicial da variável tempo de trânsito, cujo valor é determinado a partir da detecção de um limiar de tensão do receptor. Para determinação do limiar a ser utilizado é proposta uma metodologia para encontrar o melhor valor dentro de um conjunto de amostras (que representa uma etapa de calibração), de forma a evitar que o limiar seja detectado em ciclos diferentes do sinal de ultrassom para velocidades contidas em um intervalo de tempo correspondente a um mesmo ciclo.

Para a medição indireta do tempo de trânsito com o filtro de Kalman, a técnica proposta não restringe a faixa de medição a um ciclo do sinal (2π), reduz o erro relativo à quantização e reduz à atribuição de valores diferentes (considerando a velocidade constante) a um mesmo índice do sinal do receptor devido à presença do ruído (característico da detecção de limiar), não necessita da aquisição do sinal do transmissor e não é dependente do formato da envoltória do sinal do receptor.

Com a finalidade de validar os resultados, foram realizados modelos computacionais utilizando [®]Matlab/Simulink e contrastados com resultados experimentais obtidos por ensaios em um túnel de vento instalado no laboratório LENHS (Laboratório de Eficiência Energética e Hidráulica) da UFPB.

1.2 OBJETIVOS

O objetivo geral desta tese de doutorado consiste em realizar a estimação/medição indireta do tempo de trânsito (ToF) por meio de medições da amplitude do sinal recebido pelo transdutor receptor.

Os objetivos específicos deste trabalho são:

- Aplicar uma modelagem dinâmica em espaço de estados para descrever o sinal elétrico no transdutor de ultrassom receptor ou trechos dele;

- Estabelecer uma metodologia para inicialização do tempo de trânsito no algoritmo do filtro de Kalman para medição indireta, e realizar uma análise de sua eficácia. Definir a inicialização das demais variáveis utilizadas no modelo do sinal de ultrassom (amplitude e fase).
- Realizar a análise estatística da estimação produzida pelo filtro de Kalman, que inclui a influência da atenuação e do ruído aditivo do meio de propagação da onda de ultrassom;
- Apresentar resultados de simulação e experimentais do procedimento proposto e comparar com os valores esperado/teórico e com a técnica de diferença de fase no domínio do tempo e da frequência.

1.3 CONTRIBUIÇÕES

Nesta tese é apresentado um novo método para estimação do ToF, baseado no filtro de Kalman estendido e no uso de uma metodologia para inicialização do tempo de trânsito (variável presente no algoritmo do filtro de Kalman) embasado na detecção de um limiar de tensão, por meio da estimação de estados associados ao sinal elétrico do transdutor de ultrassom receptor, sem o uso da transformada de Hilbert [14] ou da técnica da diferença de fase [13]. Entre as principais contribuições dessa nova abordagem estão: a) o processamento do sinal é realizado apenas com o sinal do transdutor receptor, iniciando após a detecção de um limiar e finalizando em um valor mínimo de variância estabelecido previamente no algoritmo para o ToF; b) o algoritmo não depende do formato ou envoltória do sinal; c) a faixa de medição não é limitada a um ciclo do sinal (2π), como no caso da técnica de diferença de fase.

1.4 ORGANIZAÇÃO DO DOCUMENTO

Além deste capítulo de introdução, esta tese está organizada da seguinte forma:

- No Capítulo 2 são apresentados os conceitos relativos à medição da velocidade do vento e técnicas baseadas na diferença de tempo para estimação do tempo de trânsito.
- No Capítulo 3 é descrito o método proposto, com a inicialização do tempo de trânsito e utilização do filtro de Kalman para estimação;

- No Capítulo 4 são apresentados os resultados de simulação e experimental com o filtro de Kalman aplicado à medição indireta do tempo de trânsito;
- No Capítulo 5 são apresentados as conclusões e considerações finais.

2 TÉCNICAS DE ESTIMAÇÃO E CONFIGURAÇÃO PARA MEDIÇÃO DA VELOCIDADE DE FLUIDOS COM TRANSDUTORES DE ULTRASSOM

Nesse capítulo é apresentada a configuração para medição da velocidade do vento utilizando transdutores de ultrassom e as características das técnicas para estimação do tempo de trânsito descritas nas principais referências bibliográficas relacionadas com o tema da pesquisa.

2.1 CONFIGURAÇÃO DO SISTEMA DE MEDIÇÃO DA VELOCIDADE DO VENTO USANDO TRANSDUTORES ULTRASSÔNICOS

Os transdutores de ultrassom constituídos por material piezoelétrico, têm como característica desenvolver vibração de acordo com a tensão aplicada em seus terminais e gerar um potencial elétrico de acordo com a intensidade de vibração recebida, com resposta em frequência similar a um filtro passa faixa. O transmissor oscila ao receber um sinal elétrico, gerando ondas acústicas/mecânicas com oscilações amortecidas. As oscilações atravessam o meio de medição até alcançar o receptor que transforma a vibração mecânica em potencial elétrico baseado no efeito piezoelétrico.

Uma configuração para medição da velocidade do vento utilizando transdutores ultrassônicos é ilustrada na Figura 2.1, na qual pode ser representada por um túnel de vento, e dois transdutores ultrassônicos, sendo T_x o transdutor emissor e R_x o transdutor receptor. Um ângulo θ menor do que 90° deve ser estabelecido entre a direção de alinhamento dos transdutores e a direção do fluxo.

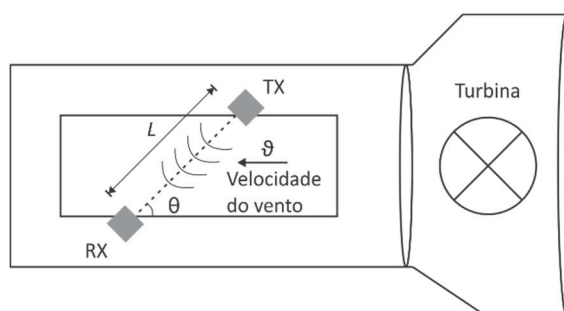


Figura 2.1 - Configuração de medição da velocidade do ar.

A velocidade de propagação da onda de ultrassom é a soma vetorial da velocidade do som no ar estático com a velocidade do ar em movimento, dada por:

$$\vec{C}_1 = \vec{C} + \vec{v}, \quad (2.1)$$

em que \vec{C}_1 , \vec{C} e \vec{v} são os vetores da velocidade de deslocamento da onda ultrassônica, a velocidade da onda ultrassônica com o ar parado (velocidade do som) e a velocidade do vento.

A velocidade de propagação C da onda sonora através de um fluido sofre a influência da temperatura T_K (em Kelvin), sendo dada por $C = 20,074\sqrt{T_K}$.

A velocidade de deslocamento do ultrassom pelo ar, pode ser calculado por:

$$C_1 = \frac{L}{ToF}, \quad (2.2)$$

em que L é a distância percorrida pela onda ultrassônica e ToF é o tempo de trânsito que correspondente ao tempo para que a onda ultrassônica viagem desde a emissão até sua detecção. De forma escalar, com v igual à velocidade do fluido, (2.1) pode ser escrita como:

$$\frac{L}{ToF} = C + v \cos(\theta), \quad (2.3)$$

$$v = \frac{1}{\cos(\theta)} \left(\frac{L}{ToF} - C \right). \quad (2.4)$$

De forma análoga, quando a projeção da velocidade do fluido sobre a direção de propagação do sinal de ultrassom estiver direção oposta, a velocidade é dada por:

$$v = \frac{1}{\cos(\theta)} \left(C - \frac{L}{ToF} \right). \quad (2.5)$$

Na expressão (2.4) pode-se observar que as incertezas relacionadas à temperatura (que influencia a velocidade do som), distância, e tempo de trânsito podem ser propagadas para a velocidade do vento, cuja avaliação pode ser realizada seguindo os procedimentos da Guia para a Expressão de Incerteza de Medição (GUM) disponibilizada pelo Instituto Nacional de Metrologia, Normalização e Qualidade Industrial - Inmetro [27].

2.2 TÉCNICAS PARA A MEDIÇÃO DO TEMPO DE TRÂNSITO

As técnicas para a estimação do tempo de trânsito são divididas naquelas baseadas na diferença de tempo: detecção de limiar e diferença de fase, e nas que utilizam o processamento de sinais discretos: diferença de fase no domínio da frequência, correlação

cruzada, transformada de Wavelet e filtro de Kalman. A seguir, serão descritos sucintamente técnicas de estimação do ToF.

DETECÇÃO DE LIMIAR

No contexto das técnicas que utilizam a diferença de tempo, a técnica de detecção de limiar consiste em transmitir um trem de ondas senoidais e medir o tempo necessário para sua detecção (ToF) no transdutor receptor, através da detecção de limiar, como ilustrado na Figura 2.2. O valor de tempo medido no momento de detecção de limiar (t^M) é expresso como a soma do tempo de trânsito (ToF) com o tempo de atraso eletrônico (t^E), e a velocidade do fluido pode ser calculada por (2.5).

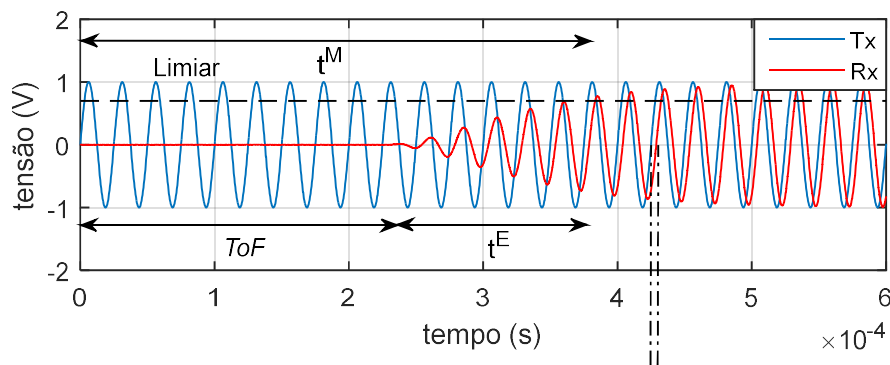


Figura 2.2 - Técnica de estimação do ToF: detecção de limiar.

O instante de tempo (t^M) onde ocorre a detecção de limiar pode ser alterado pelo ruído presente no meio e pela dinâmica da resposta transitória no transdutor receptor, que é alterada de acordo com a distância entre os transdutores e o obstáculo para medições de distância, e de acordo com a velocidade e temperatura do fluido para aplicações de medições da velocidade do vento.

Em [8, 18] para estimação do tempo de trânsito, foi proposto a utilização de uma sequência de tempos de pico utilizando duas frequências distintas (com uma diferença de 0,5 kHz) próximas à frequência de ressonância dos transdutores, para excitação do transmissor. A diferença de tempo entre os picos correspondentes a cada uma das duas frequências se torna constante após o tempo de resposta transitória do transdutor receptor (momento no qual o receptor passa a oscilar em sua frequência natural), sendo essa diferença de tempo utilizada para o cálculo do tempo de trânsito, com o objetivo de eliminar a variação da detecção de limiar causada pela alteração da resposta transitória no transdutor receptor. No

entanto, o ruído presente no meio pode alterar o tempo correspondente à detecção de picos do sinal, inviabilizando a utilização da técnica.

Em [29] foi proposta uma técnica para medição do fluxo de gás, com o objetivo de eliminar a variação no ponto de detecção de limiar, que provoca o adiantamento de um ciclo do sinal, causado pela atenuação da energia do sinal, flutuação do fluxo de gás, e mudança de temperatura e pressão do ambiente. Os valores de tempo correspondente a três cruzamentos consecutivos por zero após a detecção de limiar (que deve corresponder a um ponto no terceiro, quarto e quinto ciclo a partir da recepção do sinal, conforme a Figura 2.3) e amostras até cinco ciclos após o primeiro cruzamento por zero da medição atual e anterior são armazenados. A identificação do terceiro ciclo é feita utilizando um limiar obtido pela média dos valores de pico do segundo e terceiro ciclo, com o sinal normalizado. Para que isso seja possível é necessário que os níveis de ruído não se confundam com o início da recepção do sinal, o que nem sempre é viável em cenários experimentais.

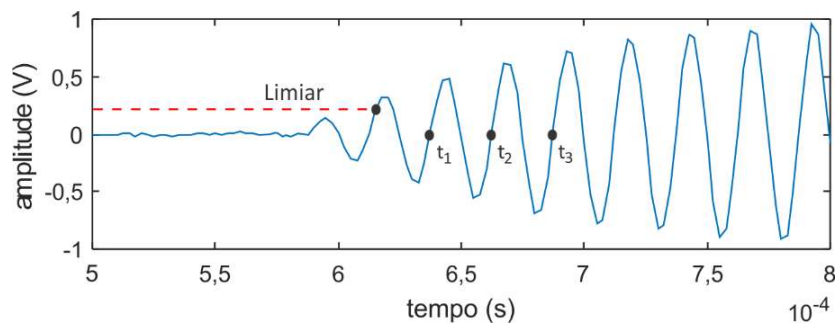


Figura 2.3 - Identificação dos três cruzamentos por zero após a detecção de limiar.

As amostras são utilizadas em operações matemáticas que resultam em três intervalos de tempo (t_1 , t_2 e t_3) a partir dos quais é determinado o tempo de trânsito (ToF), conforme (2.6) e (2.7).

$$R1 = \sum_{i=1}^N (S_1 - S_3)^2, R2 = \sum_{i=1}^N (S_1 - S_4)^2, R3 = \sum_{i=1}^N (S_2 - S_3)^2, \quad (2.6)$$

em que S_1 corresponde a sequência de amostras do sinal nos primeiros quatro ciclos após o primeiro cruzamento por zero da medição anterior, S_2 são as amostras do sinal nos primeiros quatro ciclos após o segundo cruzamento por zero da medição anterior, S_3 são as amostras do sinal nos primeiros quatro ciclos após o primeiro cruzamento por zero da medição atual e S_4 as amostras do sinal após o segundo cruzamento por zero da medição atual. O valor para o tempo de trânsito (t_1 , t_2 e t_3) é determinado pelo valor mínimo entre $R1$, $R2$ e $R3$, de acordo com (2.7).

$$T_{oF} = \begin{cases} t_2; \min(R1, R2, R3) = R1 \\ t_3; \min(R1, R2, R3) = R2 \\ t_1; \min(R1, R2, R3) = R3 \end{cases} \quad (2.7)$$

Essa técnica tem o objetivo de fazer com que a detecção do limiar não atrase o intervalo de tempo correspondente a um ciclo do sinal. Ainda assim, níveis de ruído presente no meio podem alterar o tempo correspondente à detecção dos cruzamentos por zero como também impossibilitar a identificação do terceiro ciclo após a recepção do sinal, inviabilizando a utilização da técnica.

DIFERENÇA DE FASE

Na técnica da diferença de fase, mede-se a diferença de fase entre as ondas ultrassônicas transmitidas e recebidas, como ilustrado na Figura 2.4. A fase instantânea no transmissor é $2\pi f t$, sendo t o tempo de trânsito e f a frequência de operação do transdutor ultrassônico. A diferença de fase a ser verificada entre o sinal transmitido e recebido é limitada a 2π , devendo ser calculado o número ciclos de onda (n) transcorridos desde a transmissão até a detecção no receptor, que depende da distância entre os transdutores e do comprimento de onda, dado por (2.8).

$$n = \frac{L}{\lambda} = \frac{C}{f}. \quad (2.8)$$

Sendo n o número de ciclos, a diferença de fase entre o sinal transmitido e recebido é dado por (2.9), e sendo θ o ângulo entre os transdutores, a velocidade do vento (ϑ) é dada por (2.11).

$$\phi = 2\pi n + 2\pi f t, \quad (2.9)$$

$$\vartheta = \frac{1}{\cos(\theta)} \left(\frac{L}{T_{oF}} - C \right), \quad (2.10)$$

$$\vartheta = \frac{1}{\cos(\theta)} \left(\frac{2\pi f L}{\phi} - C \right). \quad (2.11)$$

No domínio do tempo, por meio da detecção dos cruzamentos por zero, a técnica de diferença de fase pode ser implementada de forma analógica ou digital. Comparada à técnica de detecção de limiar, a técnica de diferença de fase apresenta menor incerteza, sendo imune as variações na resposta transitória do transdutor receptor causadas pela atenuação do meio de propagação [3, 17, 25].

No domínio da frequência, a transformada de Fourier pode ser aplicada para cálculo da diferença de fase entre os sinais do transmissor e receptor [23], por meio da representação dos sinais com magnitude e fase e cálculo da diferença de fase entre as amostras correspondentes ao valor de magnitude máxima do transdutor transmissor e do receptor, conforme em [3, 17, 25].

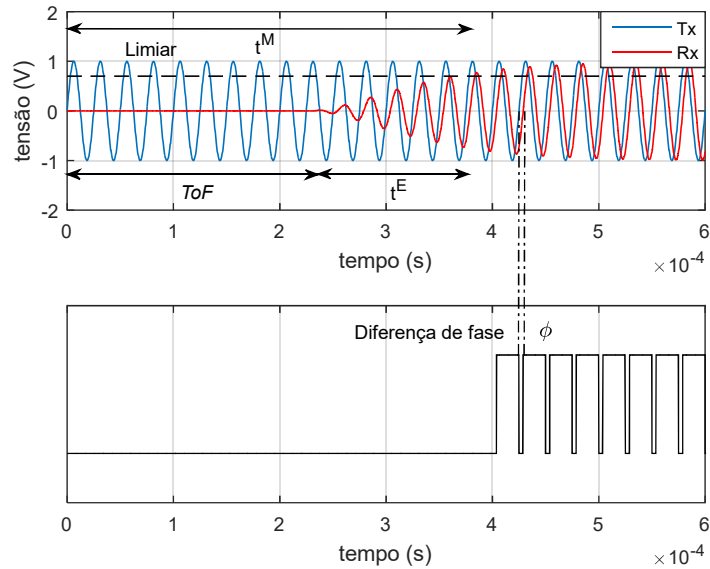


Figura 2.4 - Técnica de estimação do ToF: diferença de fase.

FUSÃO DE DADOS COM ESTIMAÇÃO DE MÁXIMA VEROSSIMILHANÇA

A análise e combinação de dados obtidos de medições podem ser utilizadas para a redução de incertezas. Em [1, 2] foi empregada a estimação de máxima verossimilhança (MLE *Maximum Likelihood Estimation*) com as técnicas de detecção de limiar e diferença de fase para a obtenção do tempo de trânsito.

$$t_{MLE} = \alpha t_{TH} + \sum_{i=1}^d \beta_i t_{PD}, \quad (2.12)$$

em que: t_{MLE} é o tempo de trânsito resultante da fusão de dados, t_{TH} e t_{PD} é o tempo de trânsito por detecção de limiar e diferença de fase respectivamente, d o número de medições por diferença de fase, α e β coeficientes relacionados à incerteza das técnicas dados por:

$$\alpha = \left[u_{TH}^2 \left(\frac{1}{u_{TH}^2} + \frac{1}{u_{PD_1}^2} + \frac{1}{u_{PD_2}^2} + \dots + \frac{1}{u_{PD_d}^2} \right) \right]^{-1}, \quad (2.13)$$

$$\beta_i = \left[u_{PD_i}^2 \left(\frac{1}{u_{TH}^2} + \frac{1}{u_{PD_1}^2} + \frac{1}{u_{PD_2}^2} + \dots + \frac{1}{u_{PD_d}^2} \right) \right]^{-1}, \quad (2.14)$$

em que u_{TH} , u_{PD} são as incertezas da medição por detecção de limiar e diferença de fase respectivamente. A incerteza da medição associada ao t_{MLE} (menor do que as incertezas individuais u_{TH} e u_{PD}), é dada por:

$$\frac{1}{u_{t_{MLE}}^2} = \frac{1}{u_{TH}^2} + \frac{1}{u_{PD_1}^2} + \frac{1}{u_{PD_2}^2} + \dots + \frac{1}{u_{PD_d}^2}. \quad (2.15)$$

CORRELAÇÃO CRUZADA

A técnica de correlação cruzada consiste na utilização de uma operação matemática, dada por (2.16), com os sinais do transdutor transmissor $x(n)$, e receptor $y(n + ToF)$, representado por um sinal atrasado no tempo no qual ToF é o tempo de trânsito, resultando em um valor numérico que indica o grau de similaridade entre dois sinais, sendo o ponto máximo da função de correlação, o local onde o sinal de ultrassom do receptor começou a ser detectado. Nesse tipo de abordagem o ruído presente no meio pode interferir no valor obtido para o tempo de trânsito.

$$R(x, y) = \frac{1}{K} \sum_{n=0}^{N-1} x(n)y(n + ToF), \quad (2.16)$$

em que N é a quantidade total de pontos dos sinais e K um fator igual à soma dos quadrados dos valores armazenados de x .

A aplicação desta técnica requer que todos os pontos dos sinais do transmissor e receptor sejam adquiridos, tendo um desempenho superior à detecção de limiar, e pode ser implementada no domínio do tempo ou da frequência. No domínio da frequência a operação de convolução é substituída por uma multiplicação. O sinal do transmissor pode ser substituído por um sinal de referência (em alguns casos tem sido utilizado o sinal do receptor em condições estáticas) com o qual o sinal do transdutor receptor será comparado. No entanto, é influenciada pela quantidade de picos do transdutor receptor que são mantidos no valor máximo, o que pode distorcer a estimação do tempo de trânsito. O intervalo em que o sinal do receptor é mantido em valor máximo (quando este intervalo é pequeno o sinal é

caracterizado como *chirp*), diminui com o aumento da largura de banda do transdutor e com a diminuição dos percursos variados percorrido pelo sinal de ultrassom do transmissor até o receptor. Uma técnica de interpolação foi utilizada em [20] para que o sinal do receptor tivesse a quantidade de picos com valor máximo reduzida, aproximando o sinal recebido com um sinal do tipo *chirp*. Enquanto em [15] foi proposta uma técnica utilizando correlação cruzada e diferença de fase, reduzindo a quantidade de picos com valor máximo e separando componentes do sinal recebido que percorreram caminhos variados.

De acordo com [21] a seleção do sinal de referência é essencial para obter resultados com maior exatidão utilizando correlação, o sinal de referência foi definido como a solução de uma oscilação forçada (dada em (2.17)), na qual a força externa é a onda acústica recebida pelo fluxo do meio.

$$\ddot{X}_{as} + 2\xi\omega_n\dot{X}_{as} + \omega_n^2X_{as} = U(t), \quad (2.17)$$

em que X_{as} é o sinal acústico, $\omega_n = 2\pi f_n$ a frequência natural do material piezoelétrico, ξ o coeficiente de amortecimento e $U(t)$ o sinal elétrico enviado pelo transdutor transmissor. A proposta apresentada neste trabalho é que sejam realizadas múltiplas medições da trajetória do sinal de ultrassom no meio de medição para que sejam determinados os parâmetros ω_n e ξ , após ser aplicado um filtro de média móvel ao sinal recebido. Sendo assim, um sinal de referência distinto é obtido para cada configuração/condições do meio de medição através de um grande número de aquisições. Neste trabalho foram apresentados resultados aplicados à medição do fluxo de líquido.

TRANSFORMADA DE WAVELET

A transformada Wavelet consiste na decomposição do sinal utilizando filtros passa baixa e passa alta, baseados na Wavelet-mãe ($\psi(t)$), que gera as bases a partir de fatores de deslocamento e escala ($\psi\left(\frac{t-u}{s}\right)$), dados por u e s respectivamente, e deve ter um formato semelhante ao sinal de ultrassom. Decompondo um sinal em diferentes escalas ou resolução, sendo uma alternativa à transformada de Fourier, utilizam-se janelas estreitas para altas frequências e janelas largas para baixas frequências, dando informações no domínio do tempo e da frequência [16, 26].

A transformada de Wavelet é aplicada aos sinais do transdutor transmissor e receptor, sendo o tempo de trânsito correspondente aos valores máximos da função resultante da

transformada do transmissor e receptor (Tw_x e Tw_y respectivamente), conforme (2.18), (2.19) e (2.20).

$$Tw_x(u) = \int_{-\infty}^{\infty} x(t)\psi^*\left(\frac{t-u}{s}\right) dt \quad (2.18)$$

$$Tw_y(u) = \int_{-\infty}^{\infty} y(t)\psi^*\left(\frac{t-u}{s}\right) dt \quad (2.19)$$

$$ToF = Arg \max [Tw_x(u) - Tw_y(u)] \quad (2.20)$$

em que, s é o fator de escala, u é o fator de deslocamento e $*$ representa o complexo conjugado.

Em medições que utilizam o eco do sinal de ultrassom, de acordo com [20], que apresenta como aplicação a detecção de falhas em superfícies, o ruído presente no meio se mistura com o sinal do receptor, e quando as bases Wavelet utilizadas são selecionadas de acordo com o sinal do receptor, é possível que o ruído afete a medição do tempo de trânsito. Uma análise da distribuição de energia do sinal do transmissor pode ser utilizada para definir as bases Wavelet, que nesse caso será compatível com o sinal de eco do transdutor receptor sem a presença de ruído.

FILTRO DE KALMAN

O filtro de Kalman é constituído por um conjunto recursivo de equações matemáticas, que com o uso da estatística, estima os estados de um processo/sistema dinâmico a partir de uma série de medidas da saída do sistema que podem estar corrompidas pelo ruído. A estimação consiste no processo de inferir o valor de uma quantidade de interesse a partir de observações indiretas e com incertezas. Empregando-se o filtro de Kalman, um estado instantâneo de um sistema dinâmico pode ser estimado e descrito na forma de espaço de estados, por meio de medições relacionadas com esse estado, mas corrompidas pelo ruído [30].

Em vários casos a dinâmica de um sistema não é linear, e o filtro de Kalman não pode ser aplicado diretamente sobre o modelo para estimar os estados. Duas variações do filtro de Kalman podem ser aplicadas para sistemas dinâmicos não lineares: o filtro de Kalman estendido, que é baseado na aproximação com série de Taylor, para a linearização um sistema não linear. E o filtro de Kalman *unscented* que utiliza a transformação *unscented* na qual são

escolhidos um número fixo de pontos sigma (dados pela média e covariância) que captura momentos desejados da distribuição original dos estados.

Para a implementação do filtro de Kalman, o sistema dinâmico de interesse é representado em espaço de estados que modela um sistema físico como um conjunto de entradas, saídas e variáveis de estado. A estimativa no filtro de Kalman é calculada mediante a reconstrução do vetor de estados, utilizando a estimativa do vetor de estado anterior, as entradas conhecidas e as saídas medidas, filtrando os ruídos do processo e da medida.

Sendo um sistema dinâmico descrito por:

$$x(k+1) = A(k)x(k) + w(k), \quad (2.21)$$

em que: $x(k)$ é o estado do sistema, $A(k)$ é a matriz que relaciona $x(k)$ e $x(k+1)$ e $w(k)$ é a matriz de covariância do ruído do processo, com média zero e desvio padrão σ_w . A medição do processo é descrita por:

$$y(k) = C(k)x(k) + v(k), \quad (2.22)$$

em que: $C(k)$ é uma matriz que relaciona $x(k)$ e $y(k)$, e $v(k)$ é a matriz de covariância do ruído associado a medição, com média zero e desvio padrão σ_v .

O algoritmo para o filtro de Kalman utiliza os vetores do estado e da medição ($x(t)$ e $y(t)$), (2.23) e (2.24), em que $w(t)$ representa o ruído associado aos estados e $v(t)$ o ruído associado a medição, com média zero e covariância dada por Q e R , para atualização do estado em (2.25), através do estado anterior $f(\hat{x}_{k-1})$, do ganho (G_k) que está relacionado as covariâncias Q e R e do vetor de medições atuais (y_k).

$$x(t) = f(x, t) + w(t), \quad (2.23)$$

$$y(t) = g(x, t) + v(t),$$

$$\hat{x}_{k|k-1} = f(\hat{x}_{k-1}), \quad (2.24)$$

$$\hat{x}_{k|k} = f(\hat{x}_{k-1})G_k[y_k - g(f(\hat{x}_{k-1}))]. \quad (2.25)$$

Em [31] foi utilizado o filtro de Kalman estendido para extração de sinais senoidais não estacionários e estimação de seus parâmetros (amplitude, fase e frequência), com análise experimental e aplicações em detectar variação de sinais biomédicos, estimação de ruído e controle de vibração e rejeição de distúrbios senoidais.

Em [32] foi descrito um método com efeito Doppler e filtro de Kalman para detecção de movimentos harmônicos em tecidos, descritos por uma onda senoidal e induzidos por força

de radiação de ultrassom. A técnica pode ser utilizada para estimar a velocidade de viagem de uma onda de cisalhamento (onda de ultrassom com direção perpendicular ao tecido), harmônica, pelo rastreamento das mudanças de fase durante a propagação, sendo aplicado à determinação da elasticidade e viscosidade de um tecido.

Em [14] foi descrito o filtro de Kalman *unscented* aplicado na medição de nível, ou de distância, baseado no tempo de trânsito com sensores ultrassônicos. O método foi aplicado ao sinal ultrassônico recebido, sendo construída uma envoltória para localização do início de recepção do sinal ultrassônico. A equação da envoltória para modelagem do sistema dinâmico, foi dada por:

$$A(kt_s) = A_0 \left(\frac{kt_s - \tau}{T} \right)^\alpha e^{\frac{kt_s - \tau}{T}}, \quad (2.26)$$

em que: A_0 é a amplitude máxima do sinal de ultrassom recebido, t_s o período de amostragem, k o número da amostra, α e T parâmetros que dependem dos transdutores de ultrassom e das condições de medição, e τ o tempo de trânsito.

O conjunto de variáveis $[A_0, \alpha, T, \tau]$ representa o vetor de estados x_k a ser estimado. Inicialmente o sinal do receptor de ultrassom é digitalizado e é aplicada a transformada de Hilbert para aproximação dos parâmetros do envelope a serem utilizados nas próximas etapas. A seguir se inicializa o filtro de Kalman utilizando os valores iniciais para os parâmetros (A_0, α, T, τ) obtidos com a transformada de Hilbert. O procedimento recursivo tem o critério de parada dado pelo módulo da diferença entre dois vetores de estados consecutivos que deve ser menor do que um determinado valor de limiar.

Em [13], foi utilizado o filtro de Kalman estendido para estimação do tempo de trânsito ultrassônico baseado na estimação de parâmetros de uma onda senoidal com atraso, em que o atraso corresponde ao tempo de trânsito ultrassom. O procedimento proposto apresentou melhoria da incerteza associada ao ToF. A equação de medição foi atualizada com a amplitude do sinal recebido e o tempo de trânsito, que foi calculado por diferença de fase utilizando a transformada de Fourier.

Por meio da revisão das técnicas existentes para a estimativa do tempo de trânsito, as vantagens e desvantagens da utilização de cada uma foram resumidas na Tabela 2-1.

Tabela 2-1 - Comparação entre as técnicas de estimação do tempo de trânsito.

TÉCNICA	CARACTERÍSTICAS
Detecção de limiar	A implementação é simples, no entanto, a localização do início da recepção do sinal de ultrassom é afetada pelo ruído e pelo fato da resposta transitória do transdutor variar com a mudança do tempo de trânsito.
Diferença de fase no domínio do tempo	A implementação é simples, apresenta menor incerteza quando comparada a detecção de limiar. Entretanto, o ruído e a frequência de amostragem utilizada podem comprometer a identificação da fase, e a faixa de medição é limitada a um ciclo do sinal (2π).
Fusão de dados	Reduz a incerteza quando comparada com a incerteza individual das técnicas utilizadas na fusão, das quais a exatidão da estimativa do tempo de trânsito é dependente.
Correlação cruzada	Realiza boa estimativa para o tempo de trânsito mesmo na presença de ruído, quando comparada as técnicas de detecção de limiar e diferença de fase no domínio do tempo. No entanto, é influenciada pela quantidade de picos do transdutor receptor que são mantidos no valor máximo e necessita que todo o sinal dos transdutores transmissor e receptor seja armazenado.
Transformada de Wavelet	A escolha da Wavelet-mãe determina a qualidade da estimação do tempo de trânsito, com custo computacional dependente da quantidade de escalonamento, e menor incerteza quando comparada às técnicas de detecção de limiar, diferença de fase no domínio do tempo e correlação cruzada.
Diferença de fase no domínio da frequência	Apresenta menor incerteza e maior custo computacional quando comparada as técnicas de detecção de limiar e diferença de fase no domínio do tempo, com a faixa de medição limitada a um ciclo do sinal (2π).
Filtro de Kalman	Apresenta boa estimativa dos parâmetros do envelope através da Transformada de Hilbert, que, no entanto, pode ter alterações nos valores em virtude do ruído. Necessita que as matrizes de covariância sejam inicializadas e que todo o sinal do transdutor receptor seja armazenado para o processamento do tempo de trânsito.

Os últimos trabalhos relacionados ao tema estão organizados na Tabela 2-2 por ordem cronológica evidenciando o desenvolvimento contínuo de técnicas de estimação do ToF que envolvem transdutores de ultrassom e filtro de Kalman.

No Capítulo 3 será mostrada e desenvolvida uma nova abordagem para a estimação do tempo de trânsito baseada na utilização do filtro de Kalman.

Tabela 2-2 - Trabalhos relacionados ao tema por ordem cronológica.

AUTORES	CARACTERÍSTICAS
Ziarani <i>et. al</i> (2004) [31]	Estimação de sinais senoidais não estacionários baseado na identificação de seus parâmetros (amplitude, frequência e fase) com filtro de Kalman.
Angrisani <i>et. al</i> (2006) [14, 19]	Modelagem de uma envoltória, obtida inicialmente com a transformada de Hilbert, para localização do início de recepção de um sinal ultrassônico com filtro de Kalman, aplicado à medição de distância. Necessita de todos os pontos do sinal do transdutor receptor para obtenção da envoltória e processamento do filtro.
Zheng <i>et. al</i> (2007) [32]	Utilização do filtro de Kalman para a filtragem do sinal de ultrassom com aplicação na área biomédica.
Villanueva <i>et. al</i> (2009) [1, 2]	Fusão de dados utilizando as técnicas de detecção de limiar e diferença de fase para estimação da velocidade do vento.
Jiang <i>et. al</i> (2011) [18]	Detecção de duas sequências picos do sinal do receptor, com frequências próximas, para compensação do transitório inicial do sinal de ultrassom recebido, que é dependente da distância percorrida, aplicado a medição de distância.
Costa <i>et. al</i> (2013) [3, 7]	Utilização transformada discreta de Fourier (DFT) para estimação do tempo de trânsito com transdutores de ultrassom, aplicado a medição da velocidade do vento.
Villanueva <i>et. al</i> (2013) [13]	Estimação do tempo de trânsito ultrassônico a partir da estimação de parâmetros de uma onda senoidal com filtro de Kalman aplicada a medição da velocidade do vento. Com medições da amplitude e tempo de trânsito por diferença de fase, proporcionando uma redução na incerteza do valor para o tempo de trânsito encontrado inicialmente com a técnica de diferença de fase.
Fang <i>et. al</i> (2018) [29]	Detecção de três cruzamentos consecutivos por zero após alcance de um limiar, e amostras do sinal até cinco ciclos após o primeiro cruzamento por zero de duas medições consecutivas foram manipuladas em uma função matemática, para eliminar a variação em um ciclo do sinal apresentada pela técnica de detecção de limiar, aplicado à medição de fluxo de gás.
Suñol <i>et. al</i> (2018) [21]	Seleção do sinal de referência a ser utilizado na técnica de correlação cruzada, definido como solução de uma oscilação forçada, na qual a força externa é a onda acústica recebida pelo fluxo do meio. Sendo um sinal de referência distinto obtido para cada setup/condições do meio de medição, por meio de um grande número de aquisições do sinal de receptor com aplicação de uma etapa de filtragem, aplicado à medição do fluxo de líquido.

2.3 CONSIDERAÇÕES PARA AVALIAÇÃO DAS TÉCNICAS DE ESTIMAÇÃO DO TEMPO DE TRÂNSITO

Incertezas para sistemas de medição expressam a dispersão esperada para uma medição em particular. Assim, a estimação da incerteza é geralmente empregada para determinar as especificações do instrumento/técnica de medição e realizar tomada de decisões baseado nas grandezas medidas compatíveis com os 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 de um sistema de medição sejam representadas mediante distribuições de probabilidade conhecidas, a avaliação das incertezas é realizada por meio da teoria de probabilidades e processos estatísticos. Caso as medições apresentem informações imprecisas e não seja possível obter informações estatísticas, estratégias baseadas na teoria de conjuntos *fuzzy* (funções de pertinência) e método de simulação de Monte Carlo podem ser utilizadas para representação e avaliação das incertezas [1, 2].

Conforme o GUM, disponibilizado pelo INMETRO, os componentes de incertezas de medidas são categorizados em incertezas do tipo A e do tipo B. As incertezas tipo A consideram que os modelos das medições sofrem influências somente do tipo aleatória, isto é, todas as incertezas de sistemas foram identificadas e compensadas. As incertezas tipo B consideram que as influências nas medições podem ser aleatórias ou sistemáticas. Na incerteza do tipo A, os componentes são avaliados a partir das distribuições estatísticas dos resultados de uma série de medidas e podem ser caracterizados por meio do desvio padrão experimental. Na avaliação de incertezas do tipo B, as incertezas podem ser avaliadas por métodos não convencionais, como, por exemplo, utilizando a teoria de conjuntos *fuzzy* ou o método de simulação de Monte Carlo [28, 33].

Uma incerteza do tipo B é frequentemente dada em forma de intervalos correspondentes a níveis de confiança. Portanto, para representar as incertezas da medição, pode-se utilizar o cálculo intervalar baseado na teoria de conjuntos *fuzzy*. Essa estratégia é uma boa alternativa para avaliação convencional de incertezas, sendo compatível com o GUM [28].

Outra forma de avaliação de incertezas em um sistema de medição é o método de simulação Monte Carlo. No método de simulação de Monte Carlo, o sistema físico é descrito em funções de densidade de distribuição de probabilidade, a partir das quais são feitas amostragens aleatórias. Esse processo é repetido inúmeras vezes e o resultado é obtido a partir de parâmetros estatísticos (média, desvio padrão, etc).

3 TÉCNICA UTILIZADA PARA A ESTIMAÇÃO DO TEMPO DE TRÂNSITO

Neste capítulo será descrita a técnica para a estimação do tempo de trânsito de um sinal de ultrassom, utilizando o filtro de Kalman estendido para medição da velocidade do vento. Para atingir este objetivo, o sinal elétrico no transdutor ultrassônico receptor foi modelado em espaço de estados como uma onda senoidal com um atraso equivalente ao ToF desejado.

O modelo computacional para propagação do sinal de ultrassom será descrito em 3.1. Em 3.2 e 3.3 será descrita a modelagem do sinal de ultrassom para medição indireta do tempo de trânsito com o uso do filtro de Kalman e uma modelagem com o objetivo de eliminar o ruído de trechos do sinal de ultrassom com os quais será utilizada a técnica de diferença de fase no domínio do tempo para estimação do tempo de trânsito. A dinâmica do processo tem como variáveis a amplitude, fase e tempo de trânsito para o primeiro modelo e amplitude e fase para o segundo. Nos dois casos, os estados serão estimados a partir da medição da amplitude do sinal recebido. Em 3.4 será apresentada a configuração utilizada para as medições e considerações sobre a aquisição do sinal de ultrassom.

3.1 MODELAGEM COMPUTACIONAL DA PROPAGAÇÃO DO SINAL DE ULTRASSOM

Dentre as características de um transdutor de ultrassom estão a frequência central e largura de banda, sendo para o modelo utilizado os valores de 40 kHz e 6 kHz, respectivamente. A partir destas informações é possível construir um modelo do transdutor de ultrassom dado por um filtro passa-faixa de segunda ordem do tipo *Butterworth*. A geração do sinal pode ser contínua ou pulsada. No caso de ser pulsada, esta forma de onda pode ser gerada pelo produto entre uma onda senoidal em 40 kHz e um gerador de pulsos, resultando em rajadas de sinais senoidais, como ilustrado na Figura 3.1.

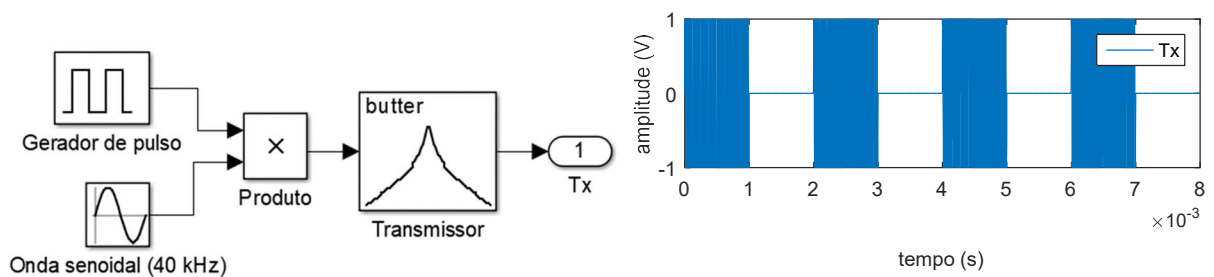


Figura 3.1 - Geração do sinal do transmissor no Simulink.

A estrutura do meio de transmissão, conforme a Figura 3.2, foi modelada por um bloco de atraso, que simula o atraso entre o sinal transmitido e recebido (tempo de trânsito). Na etapa de recepção do sinal está um filtro passa faixa de segunda ordem do tipo *Butterworth*, que foi usado para a modelagem do transdutor receptor, mais um valor aleatório para o ruído aditivo. O ruído aditivo é gerado a partir de uma distribuição aleatória normal com variância entre 0 e 1 e média 0, criada pelo bloco *Random Number* do *Simulink*, multiplicada por um ganho dado por μA . Outra forma de adicionar a influência do ruído aditivo é utilizar a função *awgn(x, snr)* do *Matlab*© para adicionar um ruído gaussiano aleatório [28] ao sinal dado em x (sinal do transdutor receptor), resultando em um sinal com valor da Relação Sinal Ruído (*Signal to Noise Ratio* – SNR) determinado pelo parâmetro *SNR* da função.

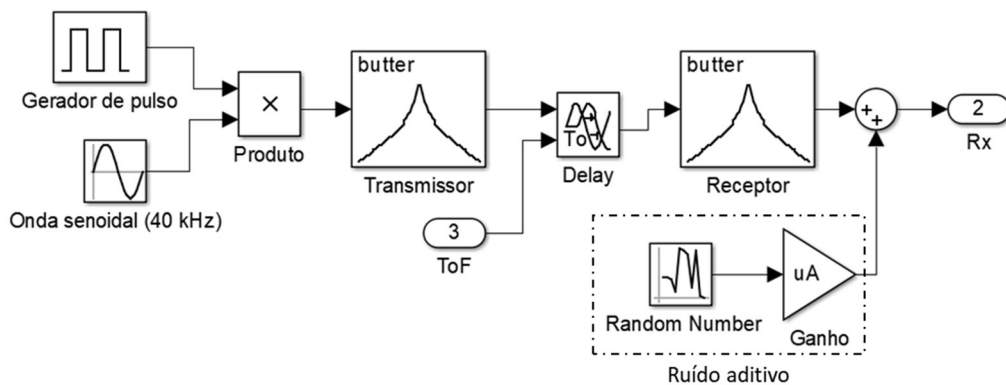


Figura 3.2 - Geração do sinal do receptor no Simulink.

3.2 MODELAGEM DO SISTEMA: MEDIÇÃO INDIRETA DO TEMPO DE TRÂNSITO

Nesta seção será descrito o modelo que foi utilizado para medição indireta do tempo de trânsito a partir de aquisições da amplitude do sinal no transdutor receptor.

Para implementação do algoritmo do filtro de Kalman são utilizadas as equações de estado e de medição dadas por (3.25) e (3.26) respectivamente, em que w_k representa o ruído

associado aos estados e v_k o ruído associado à medição, caracterizado como gaussiano, com média zero e covariância dada pelas matrizes Q_k e R_k [34, 35].

$$x_k = f[x_k, k] + T_s w_k, \quad (3.1)$$

$$y_k = g[x_k, k] + T_s v_k, \quad (3.2)$$

em que k é um número inteiro, T_s a taxa de amostragem, $f[.]$ e $g[.]$ as funções que representam o processo e a medição, respectivamente.

O algoritmo consiste em duas etapas, predição e atualização. Na predição o modelo do sistema é usado para calcular a estimativa a priori dos estados ($\hat{x}_{k|k-1}$) e o erro de covariância ($P_{k,k-1}$), relacionado à variância do estado anterior, podendo ser visto como uma medida da incerteza do estado estimado, representando a covariância do ruído do processo (Q_k) e a propagação de incerteza relacionada aos estados ($\hat{x}_{k|k-1}$). No início do algoritmo os valores de P vêm da estimação inicial dos estados.

$$\hat{x}_{k|k-1} = f(\hat{x}_{k-1}), \quad (3.3)$$

$$P_{k|k-1} = f(\hat{x}_{k-1})P_{k-1}f(\hat{x}_{k-1})^T + Q_k. \quad (3.4)$$

A atualização usa as estimativas anteriores calculadas na predição ($\hat{x}_{k|k-1}$ e $P_{k,k-1}$) para atualizar a estimativa posterior do estado ($\hat{x}_{k|k}$) e o erro de covariância ($P_{k,k}$). O ganho de Kalman (G_k) é calculado de forma a reduzir o erro de covariância posterior ($P_{k,k}$).

A linearização das funções f e g utilizando as séries de Taylor, caracteriza o Filtro de Kalman estendido. Nos casos em que os estados não possuem equação dinâmica, a função f é dada pelos próprios estados. O ganho determina o quanto a medição e a estimativa anterior contribuem para o cálculo dos estados. Se o ruído de medição for pequeno, a medição é mais confiável e contribui para o cálculo do estado atualizado mais do que a estimativa do estado anterior, e no caso oposto onde o erro na estimativa anterior é pequeno, a estimativa anterior é mais confiável e contribui mais para a atualização dos estados, isto é representado matematicamente em (3.5), (3.6) e (3.7), sendo \hat{x}_{k-1} a estimativa anterior e u_k a medição [31, 34].

$$G_k = P_{k,k-1}g(\hat{x}_k)^T [g(\hat{x}_k)P_{k,k-1}g(\hat{x}_k)^T + R_k]^{-1}, \quad (3.5)$$

$$\hat{x}_{k|k} = f(\hat{x}_{k-1})G_k [u_k - g(f(\hat{x}_{k-1}))], \quad (3.6)$$

$$P_{k,k} = [I - G_k g(\hat{x}_k)]P_{k,k-1}. \quad (3.7)$$

Na construção do modelo de propagação do sinal de ultrassom, considera-se que o sinal recebido no transdutor receptor dado por $u(t)$ (que pode ser descrito por uma onda senoidal com amplitude variável), é composto por um sinal de ultrassom principal, $y(t)$, e pelo ruído aditivo $v(t)$, dado por:

$$u(t) = y(t) + v(t), \quad (3.8)$$

$$y(t) = A(t)\text{sen}(\omega(t - ToF_k) + \phi(t)), \quad (3.9)$$

em que, A , ω , ϕ e ToF_k são respectivamente a amplitude, frequência, fase e tempo de trânsito do sinal de ultrassom principal, t o tempo e v o ruído aditivo. O valor de ω é determinado de acordo com o transdutor de ultrassom utilizado. A modelagem do sistema e aplicação do filtro de Kalman têm o objetivo de determinar os estados (parâmetros) do sinal de ultrassom extraído do sinal detectado no transdutor receptor, $u(t)$.

Os estados do modelo são a amplitude $x_1 = \hat{A}$, fase $x_2 = \hat{\phi}$ e tempo de trânsito $x_3 = ToF_k$; A atualização da equação de medição do filtro de Kalman é feita com os valores de amplitude do sinal.

A proposta deste método é estimar o vetor de estados dado por $x = [A, \phi, ToF_k]$ a partir das medições de amplitude do sinal do transdutor ultrassônico receptor, dado por $u(t)$. O algoritmo com do filtro de kalman exige a inicialização do vetor de estados $x = [A, \phi, ToF_k]$. O modelo de propagação do sinal de ultrassom utilizado considera que a amplitude (A) é um valor numérico e não uma função, portanto o modelo utilizado considera que o sinal é periódico, podendo ser válido para trechos do sinal em que há pouca variação da amplitude. Para que o tempo de trânsito seja obtido utilizando o modelo de propagação do sinal de ultrassom descrito, permitindo aplicar o filtro de Kalman a um trecho do sinal do receptor, foi desenvolvida uma metodologia para inicialização do tempo de trânsito pelo filtro de kalman. Considerando que os estados não possuem uma equação dinâmica, o ruído, w_k , associado à matriz de covariância Q é nulo, e a função $f[x_k, k]$ representa os próprios estados [14, 34].

Desta maneira, a equação dinâmica dada em (3.1) e (3.2), em que v_k é o ruído das medições com média zero e desvio padrão σ_v , pode ser representada por:

$$f[x_k, k] = \hat{x}_{k|k-1} = \hat{x}_{k-1}, \quad (3.10)$$

$$u_k = g[x_k, k] + T_s v_k. \quad (3.11)$$

3.2.1 ESTIMAÇÃO DO TEMPO DE TRÂNSITO BASEADO NO FILTRO DE KALMAN ESTENDIDO

A sequência para estimação dos estados x_k utilizando o filtro de Kalman estendido é dado de acordo com a Figura 3.3 (Fluxograma). A seguir será explorada cada etapa do fluxograma. As etapas iniciais consistem na inicialização do valor para o tempo de trânsito (descrita na seção A), amplitude e fase (descritos na seção B).

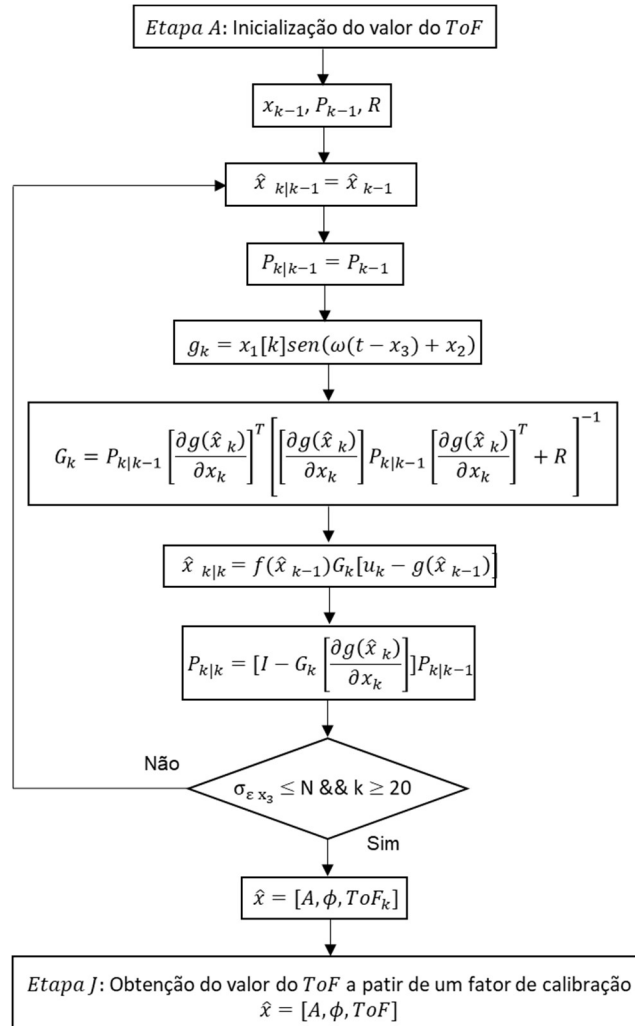


Figura 3.3 - Fluxograma para o algoritmo proposto com o filtro de Kalman.

A. Detecção de picos para inicialização do valor inicial para o tempo de trânsito

O valor inicial do ToF no filtro de Kalman ($ToFi$) é obtido a partir da detecção de um limiar estabelecido conforme a Figura 3.4. Para determinação do limiar foi realizada uma análise das variações nos valores máximos de cada ciclo do sinal do receptor em um conjunto de aquisições, de forma que para medições em velocidades que correspondem a um tempo de trânsito contido em um mesmo ciclo, a detecção o limiar ocorra sempre dentro do mesmo

ciclo. A determinação do valor de limiar para inicialização do filtro de Kalman constitui uma etapa de calibração.

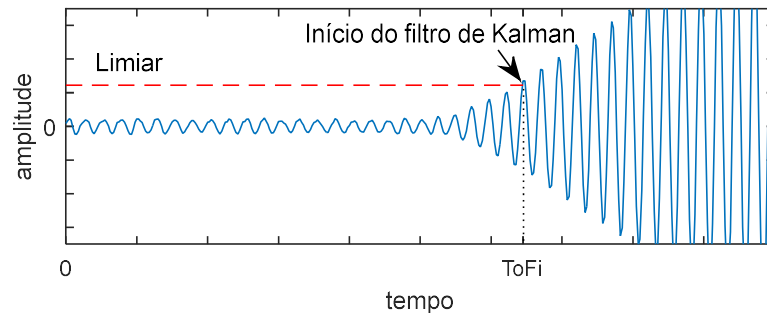


Figura 3.4 - Obtenção do tempo de trânsito inicial para o algoritmo com o filtro de Kalman.

A seguir será analisado o comportamento dos valores de amplitude máxima em cada ciclo do sinal do receptor para um conjunto de 200 aquisições, com o objetivo de determinar trechos do sinal de ultrassom que são propícios para estabelecer um valor de limiar a ser utilizado para a inicialização do tempo de trânsito.

Na Figura 3.5 são apresentados os 60 primeiros picos do sinal do receptor (RX) obtidos a cada intervalo de $25 \mu s$, que corresponde ao intervalo de tempo de um ciclo (ou período), para um conjunto de 200 aquisições em uma mesma velocidade. Ou seja, cada valor máximo foi obtido por meio das amostras contidas no intervalo de tempo correspondente a um ciclo do sinal. O intervalo total de tempo corresponde ao apresentado para o sinal do RX conforme a Figura 3.5. É possível observar uma menor variação nos valores de pico correspondentes entre as aquisições na região de início do sinal de ultrassom, cuja inclinação da curva é maior (entre $500 \mu s$ ou $20 \times 25 \mu s$ e $750 \mu s$ ou $30 \times 25 \mu s$) em relação à região de maior amplitude (entre $1250 \mu s$ ou $50 \times 25 \mu s$ e $1500 \mu s$ ou $60 \times 25 \mu s$). Enquanto na Figura 3.6 estão os valores médios para cada um dos pontos de amplitude máxima das 200 aquisições. Dentre os valores de amplitude média, os pontos pL correspondem a amostras situadas entre o $20 \times 25 \mu s$ e $30 \times 25 \mu s$, cujo valor decrescido do desvio padrão é maior do que todas as amostras anteriores e cujo valor acrescido do desvio padrão é menor do que todas as amostras posteriores, conforme (3.12):

$$pL - stdpL > V_{ma} \ \&\& \ pL + stdpL < V_{mp}, \quad (3.12)$$

em que:

$stdpL$: desvio padrão associado ao ponto pL ;

V_{ma} : maior valor dentre os pontos anteriores a pL ;

V_{mp} : menor valor dentre os pontos posteriores a pL .

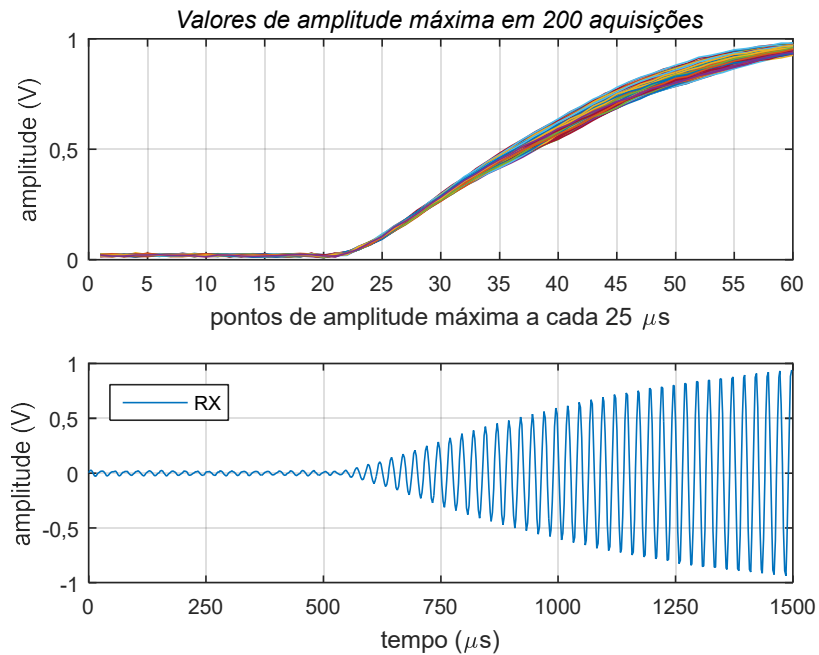


Figura 3.5 - Valores de amplitude máxima obtidos a cada 25 μs do sinal do RX.

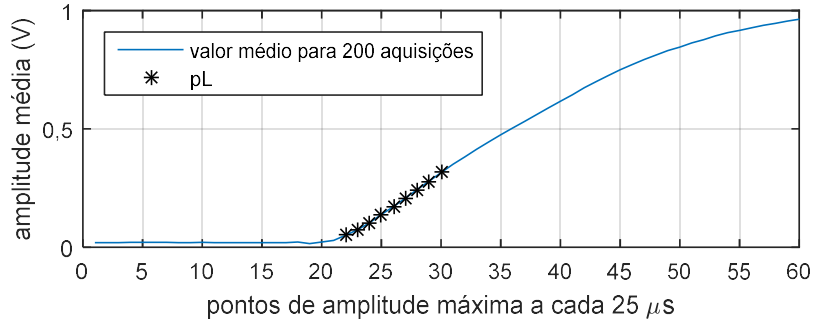


Figura 3.6 - Valores de amplitude média das 200 aquisições.

Esta análise garante que os pontos pL estão situados entre os valores de pico anterior e posterior para qualquer variação dentro do desvio padrão obtido para as 200 aquisições. As regiões das curvas com valores de amplitude máxima do sinal do receptor que têm maior inclinação ou os pontos para os quais a primeira derivada é maior são mais propícias para estabelecer um limiar de forma que para uma mesma velocidade, o ponto obtido ao se utilizar a detecção de um limiar esteja dentro de um mesmo ciclo do sinal.

Dessa forma é interessante que o valor escolhido como limiar esteja próximo ao início da recepção do sinal do RX (que pode ser estimado com os pontos pL), pois é a região que tem a maior inclinação da curva e menor variação nos valores de amplitude dentro de um

mesmo ciclo. O limiar (l_x) deve estar entre dois valores de pico consecutivos, tendo amplitude maior do que o valor de pico anterior (p_a) e menor ou igual ao valor de pico posterior (p_p) (3.13).

$$p_a < l_x \leq p_p \quad (3.13)$$

A partir de um conjunto de aquisições o valor determinado como limiar pode ser obtido pelo valor médio entre dois valores de pico consecutivos cuja diferença entre eles represente a menor diferença possível dentro do conjunto de aquisições. Na Figura 3.7 estão os valores de amplitude mínima e máxima contidos dentro dos ciclos correspondentes ao intervalo de tempo de $600 \mu s$ ($24 \times 25 \mu s$), $625 \mu s$ ($25 \times 25 \mu s$) e $650 \mu s$ ($26 \times 25 \mu s$) para um conjunto de 200 aquisições. Nesse intervalo do sinal do RX, conforme a Figura 3.7, podem ser utilizado como limiar os valores $l_1 = 0,08739$ e $l_2 = 0,1222$, obtidos de acordo com (3.14) e (3.15).

$$l_1 = \frac{0,08286 + 0,09192}{2} = 0,08739 \quad (3.14)$$

$$l_2 = \frac{0,1166 + 0,1278}{2} = 0,1222 \quad (3.15)$$

Na Figura 3.8 estão os valores de amplitude mínima e máxima para os pontos 37 ($925 \mu s$), 38 ($950 \mu s$) e 39 ($675 \mu s$) para o conjunto de 200 aquisições, a partir da qual se observa que não é possível estabelecer um limiar nessa região, de forma que a detecção desse limiar ocorra sempre dentro do mesmo ciclo do sinal de ultrassom para todas as aquisições, já que o valor escolhido deveria ser sempre maior do que o ponto de máximo do ciclo anterior e menor do que o ponto de máximo do ciclo posterior.

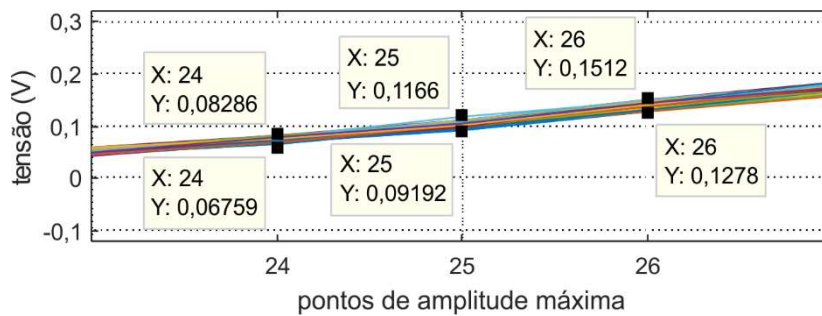


Figura 3.7 - Valores mínimo e máximo atribuído aos pontos 24, 25 e 26 para as 200 aquisições.

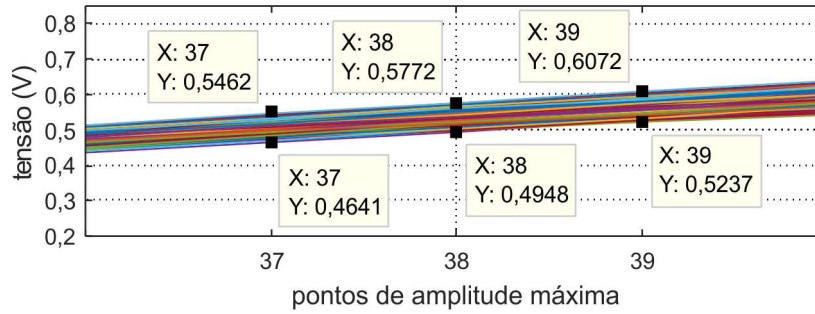


Figura 3.8 - Valores mínimo e máximo atribuído aos pontos 37, 38 e 39 para as 200 aquisições.

O valor para o tempo de trânsito encontrado com o algoritmo proposto utilizando o filtro de Kalman, descrito no fluxograma da Figura 3.3, está sempre dentro do mesmo ciclo do sinal do RX no qual está o valor de inicialização do tempo de trânsito. O ciclo do sinal do RX no qual se encontra o valor utilizado como limiar pode estar adiantado n ciclos do momento em que o sinal foi recebido pelo RX, já que o início do sinal do RX se caracteriza por ter amplitudes bastante parecidas com as amplitudes do ruído e por isso o valor escolhido como limiar deve estar localizado alguns ciclos após o início do sinal do receptor. Devendo ser efetuada uma calibração por meio de uma velocidade conhecida após a obtenção do ToF com o filtro de Kalman, para os casos em que o valor de amplitude escolhido como limiar não coincida com o início de recepção do sinal do RX.

B. Inicialização dos estados e matriz de covariância: a amplitude, fase e tempo de trânsito (x_1 , x_2 e x_3 respectivamente), matriz de covariância P_{k-1} (que representa a variância dos estados) e a matriz R , que representa o ruído associado à medição, são inicializados. O valor de limiar utilizado na detecção de picos do sinal recebido, é escolhido para a amplitude inicial, a fase é inicializada em zero e para o tempo de trânsito é atribuído o valor inicial obtido na técnica de detecção de picos. O valor inicializado para o tempo de trânsito deve ter uma diferença inferior a um ciclo (ou seja $1/f$, em que f é a frequência de operação dos transdutores), para o valor esperado/teórico do tempo de trânsito. A matriz de covariância P_{k-1} é obtida através do cálculo da variância dos valores iniciais das variáveis de estado obtidas em uma sequência de dez medições, o que funciona como uma calibração.

C. *Estimação do vetor de estados e do erro de covariância*: as variáveis de estado e a matriz de covariância do erro da medição são atualizadas.

$$\hat{x}_{k|k-1} = \hat{x}_{k-1}, \quad (3.16)$$

$$P_{k|k-1} = P_{k-1}. \quad (3.17)$$

D. *Atualização da equação de medição*: em que x_1 , x_2 e x_3 representam a amplitude, fase e tempo de trânsito respectivamente.

$$g_k = x_1[k] \text{sen}(\omega(t - x_3[k]) + x_2[k]). \quad (3.18)$$

E. *Linearização da equação de medição*: etapa que adequa o algoritmo para uso com sistemas não lineares.

$$\frac{\partial g(x_k)}{\partial x_k} = \frac{\partial g(x, k)}{\partial x} \Big|_{x=\hat{x}_{k|k-1}}. \quad (3.19)$$

F. *Cálculo do ganho de Kalman*

$$G_k = P_{k|k-1} \left[\frac{\partial g}{\partial x_k} \right]^T \left[\left[\frac{\partial g}{\partial x_k} \right] P_{k|k-1} \left[\frac{\partial g}{\partial x_k} \right]^T + R_k \right]^{-1}. \quad (3.20)$$

G. *Estimação a posteriori do vetor de estados com o uso das medições atuais*

$$\hat{x}_{k|k} = f(\hat{x}_{k-1}) + G_k [u_k - g(\hat{x}_{k-1})]. \quad (3.21)$$

H. *Estimação a posteriori da matriz de erro de covariância $P_{k|k}$*

$$P_{k|k} = \left[I - G_k \left[\frac{\partial g}{\partial x_k} \right] \right] P_{k|k-1}. \quad (3.22)$$

I. *Verificação do critério de parada*: verifica se a quantidade de interações do algoritmo (k) é maior do que 20 e se o erro de covariância da estimação para do tempo de trânsito (variável de interesse), dada por $\sigma_{\varepsilon_{x_3}}$, é inferior a um determinado valor N , conforme (3.23) em que o operador $\&\&$ significa “e”. O valor de k foi obtido observando a convergência do algoritmo. A variável $\sigma_{\varepsilon_{x_3}}$ é obtida através da matriz de erro de covariância P . Em caso positivo, a estimação dos estados é concluída, em caso negativo um novo *loop* é executado.

$$\sigma_{\varepsilon_{x_3}} \leq N \ \&\& \ k \geq 20. \quad (3.23)$$

J. *Obtenção do valor do ToF*

O valor encontrado para o ToF após a aplicação do algoritmo proposto no fluxograma da Figura 3.3 até a etapa $I (ToF_k)$, está contido dentro do mesmo ciclo correspondente ao ToF inicial ($ToFi$). A obtenção do ToF esperado (ToF) é feita por meio de um fator de calibração (Fc) estabelecido utilizando uma velocidade do vento conhecida, de acordo com (3.24).

$$ToF = ToF_k - Fc \quad (3.24)$$

O modelo proposto apresenta uma função para modelagem genérica, que não depende da envoltória do sinal do receptor e não tem a limitação em um ciclo do sinal para a faixa de medição. No entanto apresenta uma limitação relacionada aos níveis de ruído que não se observa tão eminente na técnica de diferença de fase. Os níveis de ruído para os quais a técnica não funcionaria não foram delimitados neste trabalho, tendo sido realizada apenas uma análise do ruído presente no meio de medição na seção 3.5. Para validação do procedimento proposto, será realizada a aquisição do sinal do receptor, e aplicação do algoritmo para determinar o tempo de trânsito.

3.3 MODELAGEM DO SISTEMA: FILTRAGEM DO SINAL DE ULTRASSOM

Nesta seção é descrita uma simplificação do modelo descrito na seção 3.1 que pode ser utilizado para filtragem de trechos/intervalos de um sinal de ultrassom (conforme Figura 3.9), por meio da estimação da amplitude e fase. O sinal de ultrassom recebido no transdutor receptor pode ser descrito por uma onda senoidal com amplitude variável dado por $u(t)$, composto por um sinal ultrassônico principal, $y(t)$ e pelo ruído aditivo $n(t)$, com $t \geq ToF$.

$$u(t) = y(t) + v(t), \quad (3.25)$$

$$y(t) = A(t)sen(\omega t + \phi(t)), \quad (3.26)$$

em que, A , ω , ϕ são respectivamente a amplitude, frequência e fase do sinal ultrassônico principal; t o tempo e v o ruído aditivo. O valor de ω é determinado de acordo com a frequência de operação do transdutor de ultrassom utilizado.



Figura 3.9 - Filtragem de trecho de um sinal de ultrassom.

Este modelo do sistema com aplicação do filtro de Kalman tem o objetivo de determinar os estados (parâmetros) de um trecho ou intervalo do sinal ultrassônico extraído do sinal detectado no transdutor receptor, $u(t)$, para eliminar o ruído e facilitar a aplicação de uma técnica para obtenção do tempo de trânsito. Os estados do modelo são a amplitude $x_1 = \hat{A}$ e a fase $x_2 = \hat{\phi}$. A atualização da equação de medição do filtro de Kalman é feita com os valores de amplitude do sinal do receptor.

A ideia principal da modelagem proposta é estimar o vetor de estados dado por $x = [A, \phi]$ a partir das medições de amplitude do sinal do transdutor ultrassônico receptor, dado por $u(t)$. Considerando que os estados não possuem uma equação dinâmica, o ruído, w_k , associado à matriz de covariância Q é nulo. A inicialização do sinal do receptor é perdida, no entanto o trecho do sinal que foi filtrado pode ser utilizado por uma outra técnica como a diferença de fase no domínio do tempo para obtenção do tempo de trânsito.

3.4 BANCADA DE MEDIÇÕES

Para realização das medições foi utilizado um túnel de vento de baixa velocidade capaz de produzir fluxos de ar na faixa de 0 a 15 m/s. Para os experimentos foram utilizados a unidade de aquisição de sinais Agilent U2331A, dois transdutores ultrassônicos TR40-10L dispostos em uma seção de medição retangular (Figura 3.10), o anemômetro de fio quente comercial TAFR 180, e o gerador de sinais Agilent 33220A, conforme a Figura 3.11.

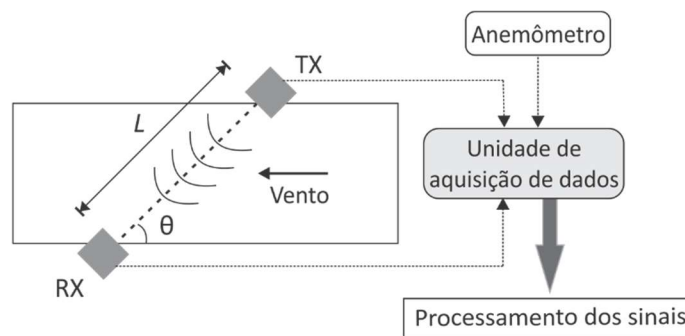


Figura 3.10 - Seção de medição.

A entrada analógica da unidade de aquisição de dados possui resolução de 12 bits, com uma taxa de amostragem máxima de 3 M amostras/s quando utilizado apenas um canal e 1 M amostras/s para mais de um canal. Caso seja utilizado mais de um canal, a taxa de amostragem máxima é dividida pela quantidade de canais. A entrada analógica atua com tensão de entrada na faixa de $\pm 0,05$ V a ± 10 V. Nos experimentos a frequência de amostragem

utilizada foi de 400 kHz, os sinais foram medidos no transdutor transmissor, e após o condicionamento do sinal recebido pelo transdutor receptor com a unidade de aquisição de sinais [36-37].

O transdutor de ultrassom utilizado possui frequência central em 40 ± 1 kHz, largura de banda de 3 kHz, sensibilidade de recepção de -70 dB, capacitância em 1 kHz $\pm 20\%$ de 1900 pF, tensão eficaz máxima de alimentação 10 V, e temperatura de operação -40° a 85°C . O anemômetro de fio quente foi usado para realizar as medições da velocidade do vento e compara-las com as estimações obtidas por meio da técnica proposta com os transdutores de ultrassom. O TAFR tem escalas de 0,2 a 20 m/s com uma resolução de 0,1 m/s, e a temperatura na faixa de 0° a 50°C , com uma resolução de $0,1^\circ\text{C}$ [38].



Figura 3.11 - Configuração experimental para aquisição dos dados.

No circuito de condicionamento foi utilizado o amplificador TL084, que na faixa de 1 kHz a 100 kHz apresenta como nível de ruído ao qual é submetido o sinal de entrada o valor de 16 nV/√Hz, com condições de teste na temperatura ambiente de 25°C e tensão de alimentação ± 12 V [39-40].

3.5 CONSIDERAÇÕES SOBRE A AQUISIÇÃO DE SINAIS DE ULTRASSOM

Com o objetivo de caracterizar as condições de ruído do meio de medição no qual foram realizadas as aquisições dos sinais dos transdutores de ultrassom, para medição da

velocidade do vento, foi realizada uma avaliação experimental do ruído presente no sinal de ultrassom do receptor.

Para análise do ruído presente no meio, foi realizada a aquisição do sinal gerado pelo receptor ultrassom com o transmissor ultrassônico sem fonte oscilante e o circuito de condicionamento de ambos alimentados. O circuito de condicionamento do receptor é composto por um amplificador no modo inversor, que utiliza o TL084, alimentado com ± 12 V, conforme ilustrado na Figura 3.12. O circuito de condicionamento do transmissor utiliza um *push-pull* conforme a Figura 3.13.

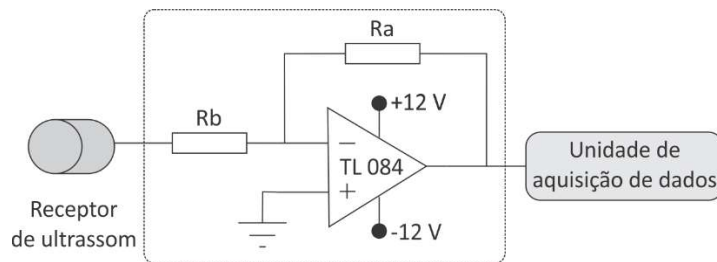


Figura 3.12 - Condicionamento do sinal do transdutor receptor.

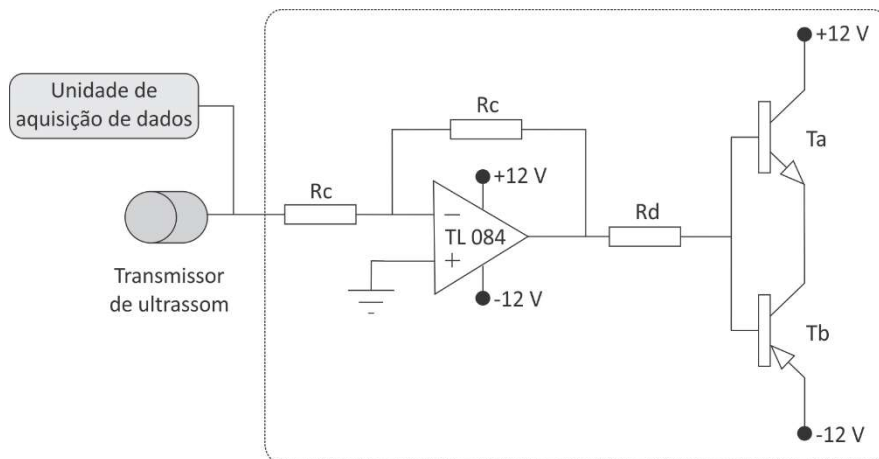


Figura 3.13 - Condicionamento do sinal do transdutor transmissor.

Na Figura 3.14 é ilustrado o sinal gerado no transdutor ultrassônico transmissor com a fonte oscilante desativada e os circuitos de condicionamento alimentados. O sinal elétrico no transmissor (Tx) possui um nível baixo de tensão e têm como fonte os ruídos presentes em circuitos elétricos, no receptor o sinal detectado é amplificado (Rx) e finalmente se realiza a aquisição com a unidade de aquisição de dados.

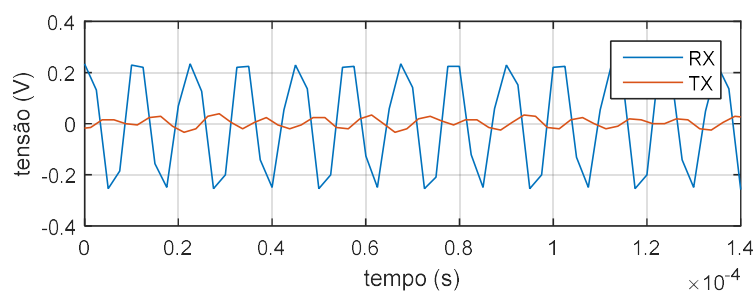


Figura 3.14 - Sinais do transmissor e receptor com o sinal de excitação do transmissor desativado.

Na Figura 3.15 é apresentado o espectro em frequência do sinal do receptor para um conjunto de 20 medições. O princípio de funcionamento do ultrassom, baseado no efeito da piezeletricidade, capta vibrações presentes no meio acima de 20 kHz, podendo explicar a distribuição de frequência obtida.

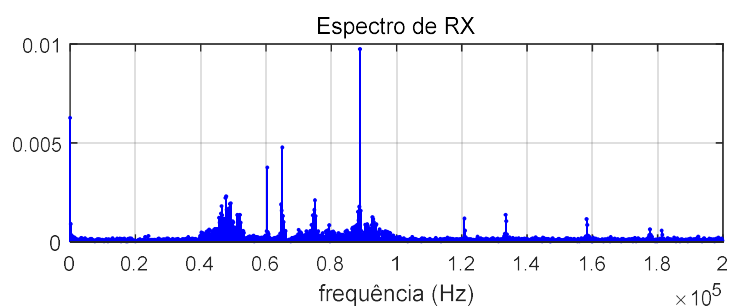


Figura 3.15 - Espectro do sinal do transdutor receptor.

Na Figura 3.16 é apresentado um histograma obtido a partir de um conjunto de 20 medições do sinal gerado pelo receptor. Para cada uma das 20 medições foram adquiridas 2000 amostras, totalizando 40.000 pontos que foram utilizadas para a construção do histograma.

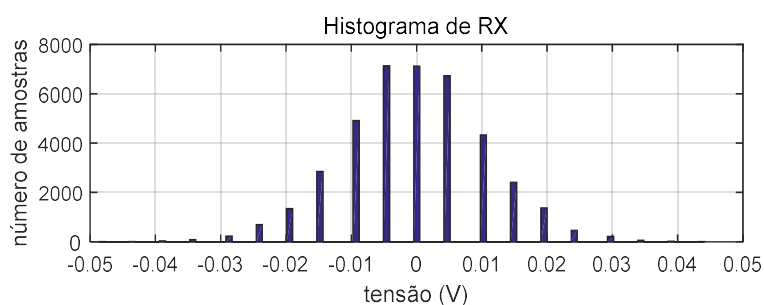


Figura 3.16 - Histograma para o sinal do receptor.

O teste estatístico de Jarque-Bera foi utilizado para verificar se o conjunto de amostras tem distribuição do tipo normal ou Gaussiana, obtendo resultado positivo. A distribuição normal ou gaussiana se caracteriza por ser simétrica e pela maior frequência amostral coincidir

com o valor da média, com 68,26% das amostras no intervalo de $\mu \pm 1\sigma$, 95,44% em $\mu \pm 2\sigma$ e 99,74% em $\mu \pm 3\sigma$, sendo μ a média e σ o desvio padrão. Tendo obtido 0,0109 V para o desvio padrão e 0 para média. A distribuição de probabilidade obtida para o ruído pode ser utilizada para os valores de variância da amplitude na matriz de covariância inicial dos estados e da medição dentro do algoritmo do filtro de Kalman.

4 RESULTADOS

Neste capítulo são apresentados os resultados do trabalho considerando dois cenários diferentes, a utilização do filtro de Kalman estendido como etapa de filtragem de parte do sinal de ultrassom (modelagem apresentada na seção 3.2), e para a estimação do tempo de trânsito (modelagem apresentada na seção 3.1).

4.1 FILTRAGEM DO SINAL DE ULTRASSOM

O filtro de Kalman estendido foi utilizado para filtragem de ruído (*denoising*) de um sinal de ultrassom, utilizando o modelo descrito na seção 3.2. Após a filtragem do sinal é realizada a estimação do tempo de trânsito por meio da técnica de diferença fase no domínio do tempo, como ilustrado na Figura 4.1. As técnicas de detecção de limiar e diferença de fase no domínio do tempo também foram utilizadas com o sinal de ultrassom original (sem aplicação do filtro de Kalman) para fins de comparação.

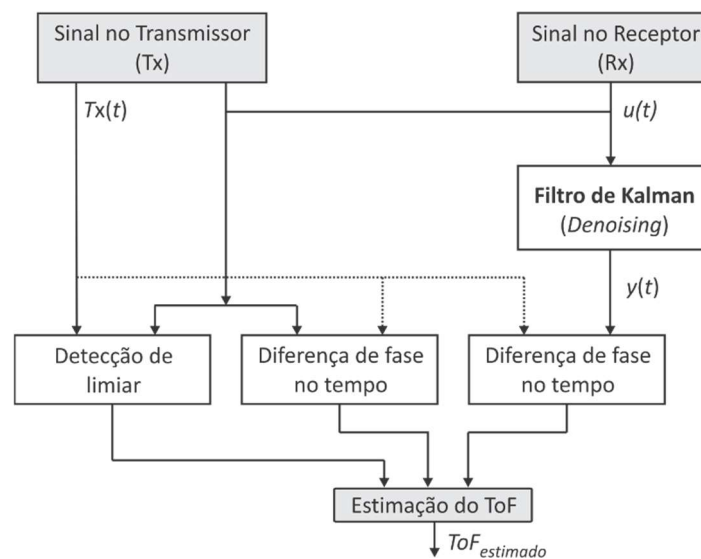


Figura 4.1 - Fluxograma para estimação do tempo de trânsito utilizando o filtro de Kalman como etapa de filtragem.

4.1.1 SIMULAÇÃO

Para obtenção de um modelo de medição com ultrassom, os transdutores foram modelados com base nas características de um transdutor ultrassônico, através de um filtro passa faixa com frequência central $f = 40$ kHz e largura de banda igual a 6 kHz. A distância entre os transdutores foi de $L = 0,2$ m, a velocidade do vento $\vartheta = 10$ m/s, e o ângulo entre os transdutores $\theta = \pi/3$. A partir da determinação dos parâmetros de simulação, foi obtida o ToF teórico, dado por:

$$ToF = \frac{L}{C + \vartheta \cos(\theta)} = 581,50 \mu\text{s} \quad (4.1)$$

O tempo de trânsito (ToF) calculado foi usado no modelo de simulação para introduzir um atraso do sinal TX. Em seguida o meio impõe a atenuação devido a distância de propagação e interação com o meio (impedância). Finalmente, o sinal é recebido e somado um ruído aditivo, obtendo-se o sinal RX, como se ilustra na Figura 4.2. Neste modelo foi usada a frequência de amostragem de 400 kS/s.

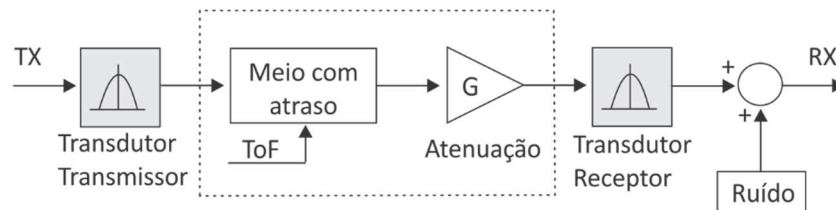


Figura 4.2 - Diagrama de blocos da simulação.

O filtro de Kalman estendido descrito na seção 3.2 foi utilizado para filtragem de um trecho/intervalo do sinal do receptor como estabelecido na Figura 4.3, e em seguida foi aplicada a técnica de diferença de fase no domínio do tempo e da frequência. Uma vez detectado o sinal (a partir de um valor de limiar estabelecido com o sinal normalizado, tendo sido utilizado o valor de 0,7) é aplicado a filtragem do sinal e o algoritmo para estimação do ToF. Na Figura 4.3 está o sinal recebido (linha contínua) e o sinal recebido após a filtragem com o filtro de Kalman (linha tracejada).

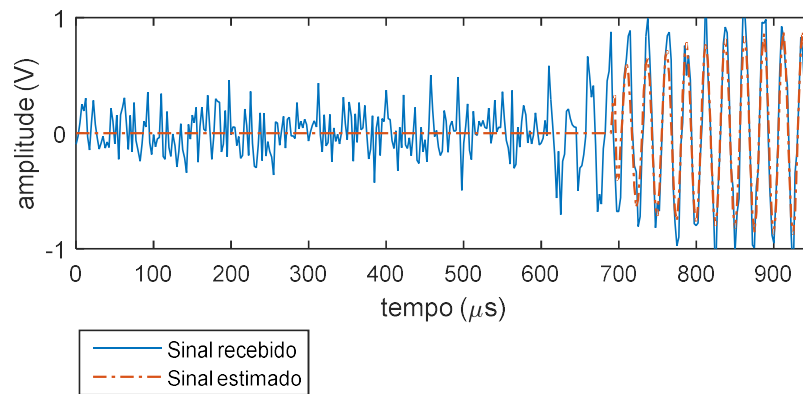


Figura 4.3 - Estimação do sinal recebido (simulação), com a frequência de amostragem em 400 kS/s.

O ruído aplicado ao sinal do RX teve distribuição normal e formou sinais com relação sinal ruído (SNR – *Signal do Noise Ratio*) variável. Os valores do SNR de 10 dB a 90 dB correspondem ao trecho do sinal do receptor correspondente a quinze ciclos após o valor de tensão ser maior do que 0,05 V. Na Figura 4.4 são apresentados os valores estimados do tempo de trânsito em função das variações do SNR para a frequência de amostragem (f_s) de 400 kS/s. A estimativa do ToF foi realizada utilizando as técnicas de detecção de limiar, diferença de fase no domínio do tempo e filtro de Kalman com diferença de fase no domínio do tempo. Nesta figura cada estimativa do ToF, cujo valor teórico é de 581,50 μ s, foi determinado por meio da realização da média de 10 simulações, cada uma com três valores de diferença de fase e um de detecção de limiar, do modelo construído usando Matlab®/Simulink®.

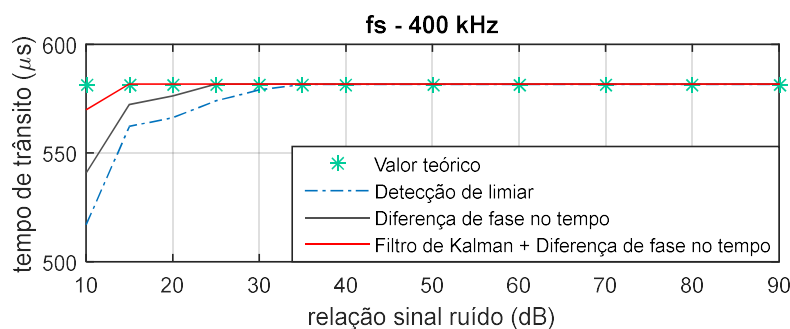


Figura 4.4 - Variação do tempo de trânsito com o SNR, para diferentes técnicas, com $f_s = 400$ kS/s.

Na Tabela 4-1 são apresentados os valores obtidos para a estimativa do tempo de trânsito para os diferentes valores de SNR da Figura 4.4. Na Tabela 4-2 são apresentados os desvios padrão da estimativa do ToF para cada valor de SNR. Pode-se observar que a técnica que utiliza filtro de Kalman em conjunto com a diferença de fase no domínio do tempo não

teve o comportamento afetado, em simulação, para valores de SNR menores do que 35 dB, mantendo-se próximo do valor teórico (581,50 μ s).

Tabela 4-1 - Tempo de trânsito para as medições com frequência de amostragem em 400 kHz.

SNR (dB)	Tempo de trânsito (μ s)		
	Detecção de limiar	Diferença de fase no domínio do tempo	Filtro de Kalman + Diferença de fase no domínio do tempo
10	527	550,58	582,17
15	565,75	565,67	581,75
20	583,00	579,00	581,67
25	576,5	581,67	581,67
30	588,75	581,67	581,67
35	581,50	581,67	581,67

Tabela 4-2 - Desvio padrão para as medições com frequência de amostragem em 400 kHz.

SNR (dB)	Desvio padrão do tempo de trânsito (μ s)		
	Detecção de limiar	Diferença de fase no domínio do tempo	Filtro de Kalman + Diferença de fase no domínio do tempo
10	26,583	7,2547	0,43033
15	17,601	14,417	0,26352
20	18,265	7,8744	$1,1428 \times 10^{-13}$
25	10,541	$1,1428 \times 10^{-13}$	$1,1428 \times 10^{-13}$
30	11,693	$1,1428 \times 10^{-13}$	$1,1428 \times 10^{-13}$
35	12,601	$1,1428 \times 10^{-13}$	$1,1428 \times 10^{-13}$

4.2 ESTIMAÇÃO DO TEMPO DE TRÂNSITO UTILIZANDO EKF (*EXTENDED KALMAN FILTER*)

O filtro de Kalman estendido foi utilizado para medição indireta do tempo de trânsito de um sinal de ultrassom, utilizando o modelo descrito na seção 3.1. De acordo com o diagrama de blocos mostrado na Figura 4.5, os estados são inicializados e é realizada as medições da amplitude do sinal do receptor, a partir da qual é estimada o tempo de trânsito. Na inicialização dos estados, A é dado pelo valor de limiar utilizado na detecção de picos do

sinal recebido, ϕ é a fase inicial do sinal dada por 0° , e $ToFi$ é o valor para o tempo de trânsito obtido pela técnica de detecção de picos descrita na seção 3.2.1. A técnica de diferença de fase no domínio da frequência foi utilizada para fins de comparação.

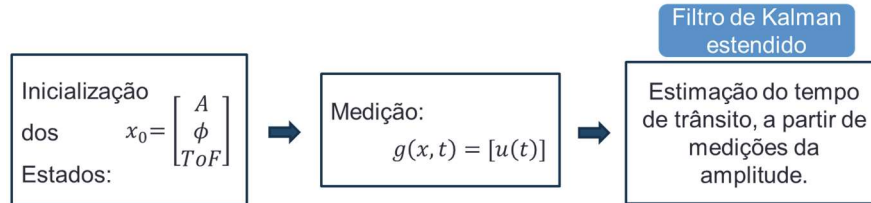


Figura 4.5 - Estimação do tempo de trânsito.

4.2.1 SIMULAÇÃO

Para os resultados de simulação, a distância entre os transdutores foi de $L = 0,2$ m, temperatura 29°C , o ângulo entre os transdutores e a direção de propagação do vento $\theta = \pi/3$, e o valor de limiar utilizado para início do algoritmo com o filtro de Kalman, com o sinal normalizado, foi de $0,7$. O modelo do sinal de ultrassom utilizado na simulação não se mostrou preciso a ponto de apresentar os mesmos problemas dos sinais obtidos de forma experimental com relação a detecção de um limiar para início do filtro de Kalman, que deve estar situado em um ponto sempre dentro de um mesmo ciclo do sinal do RX. Ou seja, o sinal reproduzido em simulação apresenta uma diferença entre as amplitudes máximas mais estável durante toda a envoltória do sinal do RX.

Nas Figura 4.6, Figura 4.7 e Figura 4.8 são apresentados o sinal detectado (RX) e o sinal estimado pelo filtro de Kalman ($y(t)$), com o comportamento das técnicas em cada iteração, para as velocidades de 4 m/s, 10 m/s e 12 m/s respectivamente. Observa-se que a partir de iteração 18, aproximadamente, o valor estimado para o tempo de trânsito pelo filtro de Kalman converge para o valor teórico.

Os resultados mostram valores próximos nas técnicas de diferença de fase e filtro de Kalman em comparação ao valor teórico, no entanto para velocidades maiores ou iguais a 12 m/s a técnica de diferença de fase apresenta um atraso de aproximadamente $25 \mu\text{s}$, mostrando que essas velocidades estão fora da faixa de medição de 2π característica da técnica de diferença de fase, enquanto a técnica proposta utilizando o filtro de Kalman estendido não apresentou esta limitação.

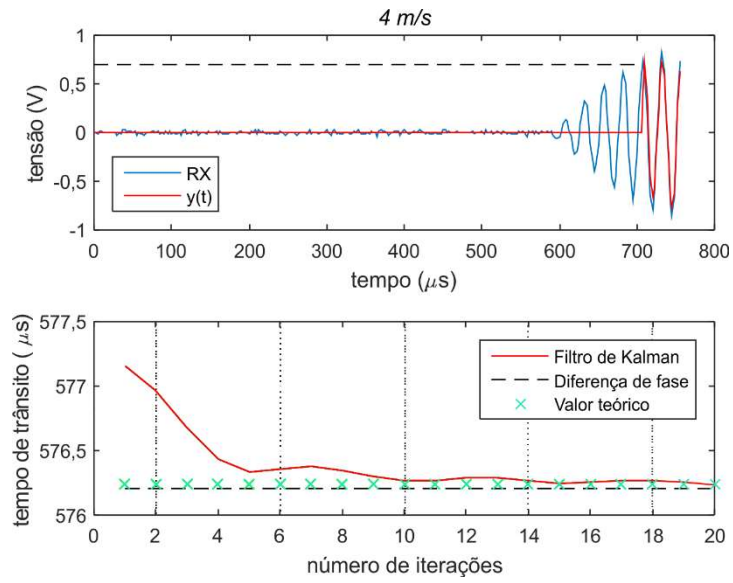


Figura 4.6 - Comparação do filtro de Kalman com a técnica de diferença de fase no domínio da frequência com $\vartheta = 4$ m/s.

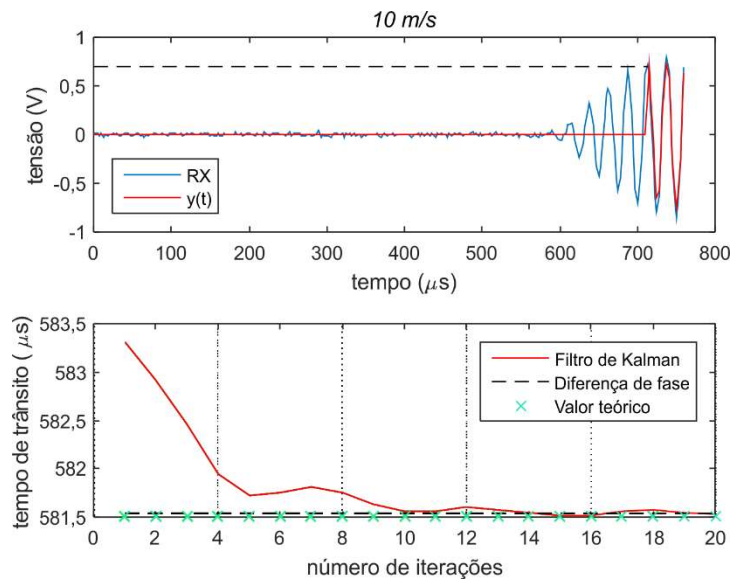


Figura 4.7 - Comparação do filtro de Kalman com a técnica de diferença de fase no domínio da frequência com $\vartheta = 10$ m/s.

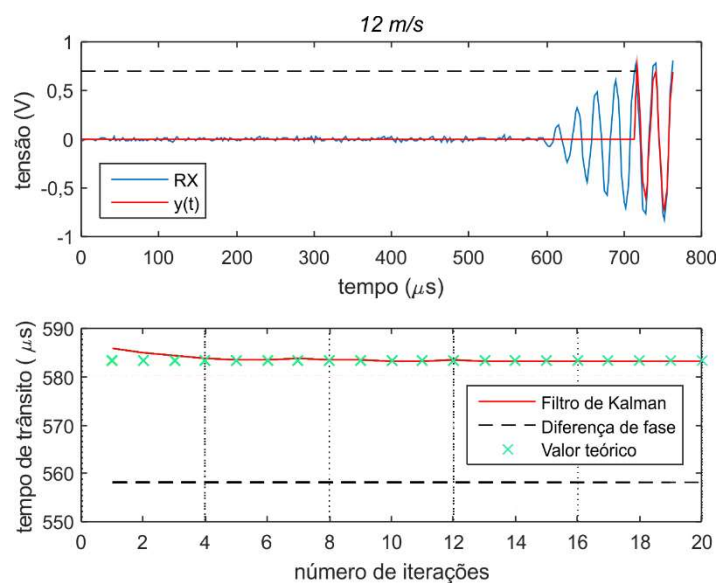


Figura 4.8 - Comparação do filtro de Kalman com a técnica de diferença de fase no domínio da frequência com $\vartheta = 12$ m/s.

Na Tabela 4-3 são apresentados os valores obtidos para o tempo de trânsito para valores de velocidade de 0 m/s a 12 m/s, utilizando as técnicas de diferença de fase no domínio da frequência e filtro de Kalman estendido. Para a velocidade de 12 m/s a técnica de diferença de fase apresentou um atraso de aproximadamente um ciclo do sinal ($25 \mu\text{s}$) em relação do valor teórico, o que não ocorreu com a técnica proposta utilizando o filtro de Kalman.

Tabela 4-3 - Valores obtidos para o tempo de trânsito (simulação).

Velocidade (m/s)	Tempo de trânsito (μs)		
	Valor teórico	Diferença de fase no domínio da frequência	Filtro de Kalman estendido
0	573,17	573,15	573,16
2	574,82	574,76	574,83
4	576,48	576,42	576,48
6	578,14	578,02	578,13
8	579,82	579,78	579,83
10	581,50	581,53	581,53
12	583,20	558,23	583,19

A cada iteração do algoritmo a matriz de covariância dos estados (P), dada em (4.2) que está diretamente relacionada ao desvio padrão da estimação dos estados, é atualizada. O número de iterações maior do que 20 e o desvio padrão associado à estimação do tempo de trânsito ($\sigma_{\varepsilon x_3}$) foi utilizado como critério de parada para o algoritmo, tendo sido estabelecido o valor de parada em $\sigma_{\varepsilon x_3} = 1,5$ ns. Os valores iniciais para o desvio padrão associado à amplitude, à fase e ao tempo de trânsito foram de $\sigma_{\varepsilon x_1} = 0,001$ V, $\sigma_{\varepsilon x_2} = 0,0001$ radianos e $\sigma_{\varepsilon x_3} = 5$ μ s respectivamente. Na Figura 4.9 é apresentada a atualização do desvio padrão associado ao tempo de trânsito obtido por meio da matriz P ($\sigma_{\varepsilon x_3}$) para a velocidade de 10 m/s (Figura 4.7).

$$P = \begin{bmatrix} \sigma_{\varepsilon x_1}^2 & 0 & 0 \\ 0 & \sigma_{\varepsilon x_2}^2 & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_{\varepsilon x_3}^2 \end{bmatrix} \quad (4.2)$$

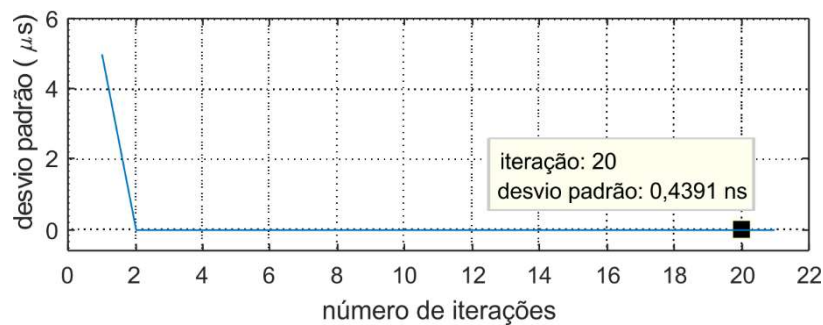


Figura 4.9 - Atualização do desvio padrão associado ao tempo de trânsito (simulação).

4.2.2 EXPERIMENTAL

Para os resultados experimentais, a distância entre os transdutores foi de $L = 0,1873$ m, o ângulo entre os transdutores e a direção de propagação do vento de $\theta = 1,1424$, e a temperatura foi obtida a cada aquisição e compensada no cálculo da velocidade do vento. Os valores para L e θ foram medidos inicialmente com um paquímetro e um medidor de ângulo digital, respectivamente, mas percebeu-se ser necessário realizar uma calibração desses valores justificada pelo fato de que o processo de medição de L e θ foi manual e a estrutura física onde estão dispostos os transdutores foi produzida de forma manual. As velocidades utilizadas foram de aproximadamente 10 m/s, 12 m/s e 14 m/s.

O valor de amplitude utilizado como limiar para inicialização do tempo de trânsito e do filtro de Kalman foi estabelecido previamente em 0,08739, com o sinal normalizado, sendo

parte de uma etapa de calibração, determinado a partir de aquisições do RX em uma mesma velocidade (neste caso foi utilizado 10 m/s), conforme descrito na seção 3.2.1. Na Figura 4.10 está o conjunto de 200 aquisições que foi utilizado para obtenção do valor de limiar 0,08739, que está no intervalo de tempo de $600 \mu s$ ($24 \times 25 \mu s$) a $625 \mu s$ ($25 \times 25 \mu s$), conforme a Figura 4.10.

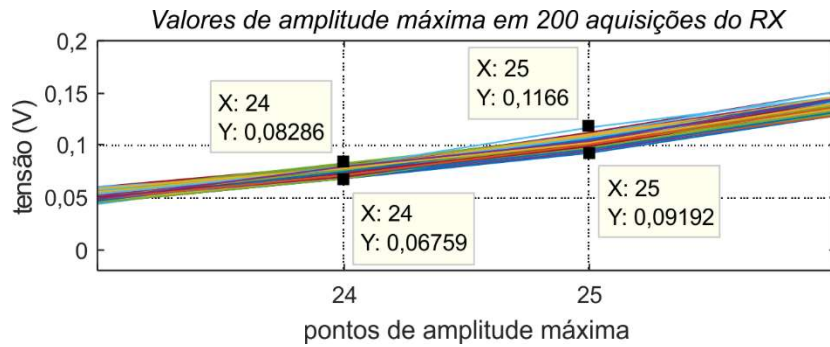


Figura 4.10 - Intervalo de tempo onde está localizado o valor a ser utilizado como limiar determinado a partir de aquisições do RX com a velocidade em 10 m/s.

Utilizando um conjunto de 200 aquisições do RX com a velocidade do vento em 10 m/s e 12 m/s com o valor de limiar estabelecido em 0,08739, observou-se que a detecção de limiar ocorreu sempre dentro de um mesmo ciclo do sinal. Na velocidade de 14 m/s, os sinais obtidos apresentaram um maior nível de ruído em relação a 10 m/s e 12 m/s, e para 200 aquisições, 25 não tiveram a detecção do limiar estabelecido em 0,08739 dentro do mesmo ciclo. Ao detectar o limiar em um ciclo diferente do esperado, o algoritmo com o filtro de Kalman irá estimar um tempo de trânsito com um avanço ou atraso correspondente a um ciclo do sinal de ultrassom.

A metodologia descrita na seção 3.2.1 poderia ser utilizada para estabelecer um valor de limiar e a seguir aplicar a detecção do limiar e um atraso correspondente a quantidade de ciclos do sinal de ultrassom transcorridos desde o início do sinal até a detecção do limiar, obtendo um valor para o tempo de trânsito. No entanto, a vantagem de se utilizar o algoritmo com o filtro de Kalman, é que o erro relacionado ao comportamento variável do ruído e à amostragem do sinal (dado por fs/fo , em que fs é a frequência de amostragem e fo a frequência central do transdutor de ultrassom, ou um múltiplo desse valor) é reduzido.

Nas Figura 4.11, Figura 4.12 e Figura 4.13 estão as estimações do ToF usando o filtro de Kalman a partir da detecção do pico do sinal do transdutor (RX), em que $y(t)$ é o sinal estimado, para os valores da velocidade do vento em aproximadamente 10 m/s, 12 m/s e 14

m/s. O valor esperado para o ToF foi obtido por meio da velocidade do vento medida com o anemômetro TAFR180, e conseqüentemente, tem uma incerteza associada a esse equipamento de medição.

A técnica de diferença de fase no domínio da frequência foi utilizada com a finalidade de comparação com o algoritmo proposto. A partir da detecção de pico, o algoritmo com o filtro de Kalman busca pelo tempo de trânsito correspondente a uma diferença de fase nula entre o sinal recebido e o sinal estimado.

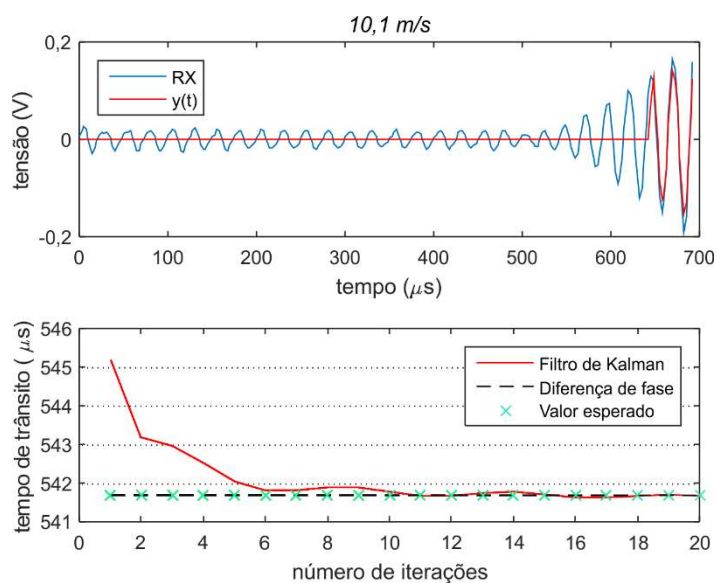


Figura 4.11 - Estimação do ToF usando o filtro de Kalman para $\vartheta=10$ m/s.

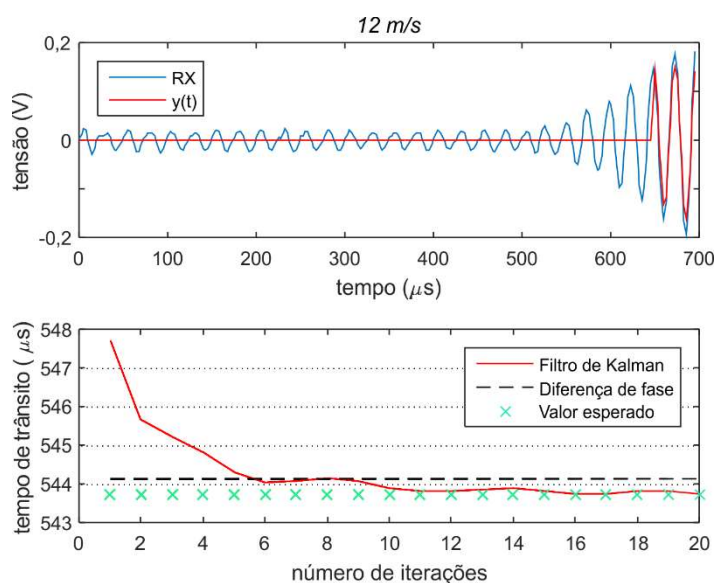


Figura 4.12 - Estimação do ToF usando o filtro de Kalman para $\vartheta=12$ m/s.

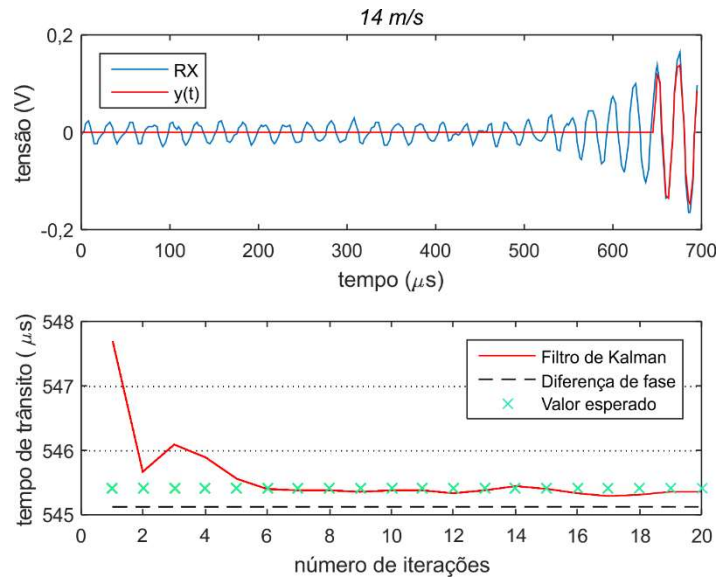


Figura 4.13 - Estimação do ToF usando o filtro de Kalman para $\vartheta=14$ m/s.

Na Figura 4.14 está a atualização do desvio padrão associado com o ToF a cada iteração do algoritmo para a medição da Figura 4.11, obtida através da matriz de covariância do erro da medição P . Observa-se a minimização e estagnação da covariância, indicando a convergência do algoritmo. O número de iterações maior do que 20 e o desvio padrão associado à estimação do tempo de trânsito ($\sigma_{\epsilon x_3}$) foi utilizado como critério de parada para o algoritmo, tendo sido estabelecido o valor de parada em $\sigma_{\epsilon x_3} = 1,5$ ns. Os valores iniciais para o desvio padrão associado à amplitude, à fase e ao tempo de trânsito foram de $\sigma_{\epsilon x_1} = 0,001$ V, $\sigma_{\epsilon x_2} = 0,0001$ radianos e $\sigma_{\epsilon x_3} = 5$ μs respectivamente.



Figura 4.14 - Atualização do desvio padrão associado ao tempo de trânsito (experimental).

Na Tabela 4-4 são apresentados os valores estimados do ToF utilizando a técnica de diferença de fase e filtro de Kalman para as medições da velocidade do vento da Figura 4.11, Figura 4.12 e Figura 4.13. Os valores expressam apenas uma medição para cada velocidade do vento.

Tabela 4-4 - Estimativa do ToF para as figuras Figura 4.11, Figura 4.12 e Figura 4.13.

Velocidade medida (m/s)	Tempo de trânsito (μs)		
	Valor esperado usando o anemômetro de fio quente	Diferença de fase no domínio da frequência	Filtro de Kalman estendido
10,1	541,68	541,67	541,67
12	543,73	544,13	543,79
14	545,42	545,13	545,32

Para cada velocidade do vento foi realizado um conjunto de aquisições, para as quais houve uma variação da velocidade do vento registrada com o anemômetro de até 0,2 m/s. Nas Figura 4.15 (com valores detalhados na Tabela 4-5) e Figura 4.16 são apresentadas as variações da técnica de diferença de fase e do filtro de Kalman para 15 medições, com a velocidade do vento em aproximadamente 10 m/s e 12 m/s respectivamente. A velocidade apresentada foi calculada considerando a temperatura média das 15 medições, sendo a variação da temperatura registrada pelo anemômetro foi de 30,5°C a 30,8°C e de 29,8°C a 30°C para a Figura 4.15 e Figura 4.16 respectivamente.

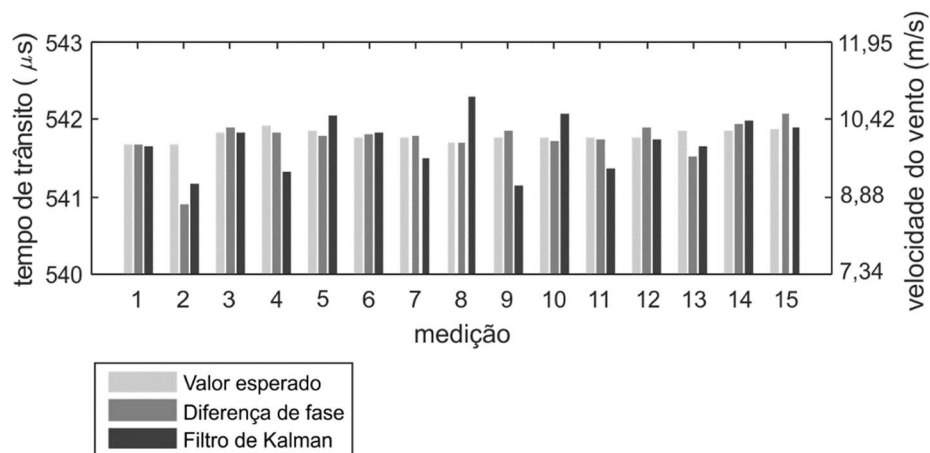


Figura 4.15 - Variação do ToF para 10 medições com a velocidade do vento em 10 m/s. Variação da velocidade do vento durante as medições: 10 m/s a 10,2 m/s.

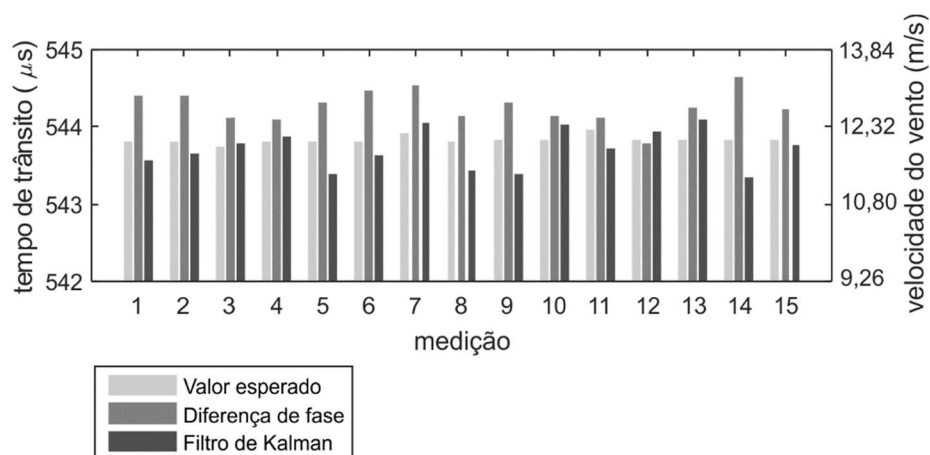


Figura 4.16 - Variação do ToF para 15 medições com a velocidade do vento em 12 m/s. Variação da velocidade do vento durante as medições: 12 m/s a 12,2 m/s.

Tabela 4-5 - Estimativa do ToF para a Figura 4.15.

Medição	Temperatura (°C)	Velocidade medida (m/s)	Tempo de trânsito (μs)		
			Valor esperado (μs)	Diferença de fase no domínio da frequência (μs)	Filtro de Kalman estendido
1	30,8	10,1	541,68	541,67	541,67
2	30,8	10,1	541,61	540,90	541,16
3	30,7	10,2	541,83	541,91	541,84
4	30,6	10,2	541,92	541,83	541,33
5	30,6	10,1	541,86	541,80	542,05
6	30,7	10,2	541,77	541,82	541,83
7	30,7	10,1	541,77	541,79	541,50
8	30,7	10,0	541,70	541,70	542,29
9	30,7	10,1	541,77	541,86	541,15
10	30,7	10,1	541,77	541,72	542,08
11	30,7	10,1	541,77	541,75	541,38
12	30,7	10,1	541,77	541,90	541,74
13	30,6	10,1	541,86	541,52	541,66
14	30,6	10,1	541,86	541,93	541,99
15	30,5	10,0	541,86	542,07	541,90

Tabela 4-6 - Estimativa do ToF para as figuras Figura 4.11, Figura 4.12 e Figura 4.13.

Medição	Temperatura (°C)	Velocidade medida (m/s)	Tempo de trânsito (µs)		
			Valor esperado (µs)	Diferença de fase no domínio da frequência (µs)	Filtro de Kalman estendido
1	29,9	12,1	543,80	544,41	543,57
2	29,9	12,1	543,80	544,41	543,66
3	29,9	12,0	541,73	544,13	543,79
4	29,9	12,1	543,80	544,09	543,87
5	29,9	12,1	543,80	544,31	543,40
6	29,9	12,1	543,80	544,47	543,62
7	29,7	12,0	543,92	544,55	544,05
8	29,9	12,1	543,80	544,15	543,44
9	29,8	12,0	543,83	544,32	543,39
10	29,8	12,0	543,83	544,13	544,02
11	29,8	12,2	543,96	544,12	543,71
12	29,8	12,0	543,83	543,79	543,94
13	29,8	12,0	543,83	544,26	544,10
14	29,8	12,0	543,83	544,66	543,36
15	29,8	12,0	543,83	544,24	543,76

Para o mesmo conjunto de medições em aproximadamente 12 m/s da Figura 4.16, caso seja efetuada apenas uma calibração (utilizando um fator F_c obtido por meio do valor esperado ($ToFe$) para uma das medições) com o valor de inicialização do tempo de trânsito ($ToFi$) no algoritmo do filtro de Kalman, de forma que:

$$F_c = ToFi - ToFe \quad (4.3)$$

Deve-se obter para algumas medições uma estimação do tempo de trânsito bem próximo do valor esperado (dada na Figura 4.17 por $ToFi - F_c$), sem o uso do algoritmo com o filtro de Kalman, conforme a Figura 4.17. No entanto em outras medições, para a mesma velocidade, o valor obtido estará distante do valor esperado devido ao erro relacionado ao comportamento variável do ruído e à amostragem ou quantização do sinal do receptor, que é eliminado pelo algoritmo com o filtro de Kalman ao igualar a fase entre o sinal estimado e o sinal do receptor.

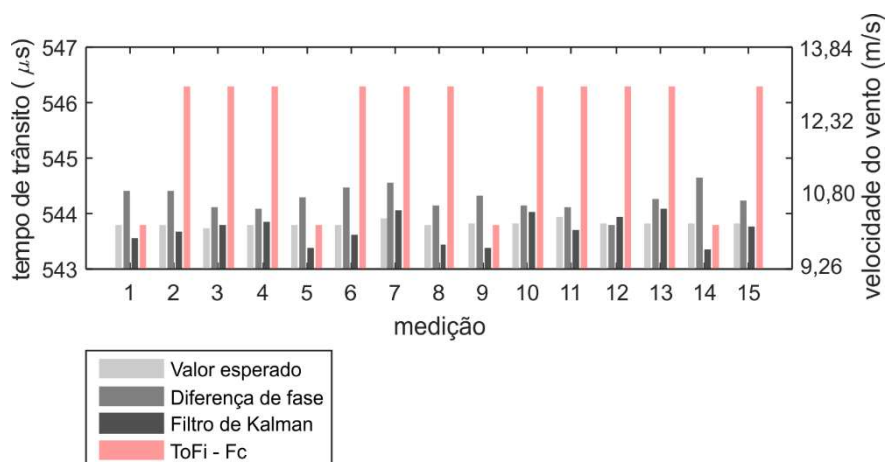


Figura 4.17 - Valores atribuídos ao tempo de trânsito inicial (ToFi) no algoritmo do filtro de Kalman, com um fator de calibração Fc.

Na Tabela 4-7 está a média e desvio padrão do ToF utilizando a técnica de diferença de fase e filtro de Kalman são apresentados para 15 medições, com a velocidade do vento aproximadamente em 10 m/s, 12 m/s e 14 m/s. Durante essas 15 medições, é válido ressaltar que a velocidade do vento e a temperatura adquirida pelo anemômetro tiveram uma variação de até 0,2 m/s e 0,3°C respectivamente, e o processo de estimação do ToF utilizando as técnicas de diferença de fase e filtro de Kalman é mais rápido do que a resposta do anemômetro.

Tabela 4-7 - Valor médio e desvio padrão do ToF para 15 medições.

Valor médio da velocidade medida (m/s)	Desvio padrão (m/s)	Valor esperado usando o anemômetro de fio quente		Diferença de fase no domínio da frequência		Filtro de Kalman estendido	
		Tempo de trânsito (µs)	Desvio padrão (µs)	Tempo de trânsito (µs)	Desvio padrão (µs)	Tempo de trânsito (µs)	Desvio padrão (µs)
10,10	0,054	541,79	0,075	541,74	0,266	541,70	0,344
12,05	0,064	543,82	0,052	544,27	0,216	543,71	0,251
14,06	0,083	545,44	0,065	545,76	0,275	545,12	0,771

O modelo para o sinal de ultrassom e algoritmo do filtro de Kalman utilizado para remoção do ruído se mostrou eficaz, mantendo o tempo de trânsito obtido com a técnica de

diferença de fase no domínio do tempo próximo ao valor esperado mesmo em condições com SNR menor do que 35 dB.

Com a técnica proposta para a medição indireta do tempo de trânsito obteve-se resultados próximo à técnica de diferença de fase e do valor esperado. A limitação da faixa de medição em um ciclo do sinal (2π), característica da técnica de diferença de fase, foi superada já que a inicialização do valor para o tempo de trânsito é feita com a técnica para detecção de picos descrita na seção 3.2.1, e não se faz necessário a aquisição do sinal do transdutor receptor.

No entanto, para sinais do receptor com níveis de ruído que não apresentem regiões com diferenças de amplitude entre os picos consecutivos que se mantenham estáveis (ou seja, mantenham um valor médio com desvio padrão pequeno dentro de um conjunto de medições), não é possível inicializar o tempo de trânsito (para utilização do filtro de Kalman) com a técnica descrita seção 3.2.1, o que representa uma desvantagem em relação à técnica de diferença de fase no domínio da frequência.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O modelo utilizado para filtragem (*denoising*) de trechos do sinal de ultrassom com o filtro de Kalman estendido, descrito por um sinal senoidal com as variáveis de amplitude e fase, mostrou ser eficaz possibilitando maior precisão na estimação do tempo de trânsito com a técnica de diferença de fase no domínio do tempo em cenários com valor do SNR menor do que 35 dB. A amplitude do sinal de ultrassom do receptor é variável ao longo do tempo, e não pode ser descrito por uma onda senoidal com amplitude constante, dessa forma, o modelo utilizado para filtragem deve ser aplicado apenas em trechos do sinal de ultrassom que possuam pouca variação de amplitude.

Para a medição indireta do tempo de trânsito, o modelo do sinal de ultrassom foi descrito por um sinal senoidal com os estados ou variáveis de amplitude, fase e tempo de trânsito, para utilização do filtro de Kalman, que atualiza os valores dos estados a partir de medições de amplitude do sinal do receptor. A inicialização dos estados e das matrizes de covariância do filtro de Kalman é fundamental para a convergência do algoritmo. A amplitude é inicializada com o valor do sinal do receptor a partir do qual o filtro passa a ser executado, e a fase em zero. Para inicialização do tempo de trânsito foi desenvolvida uma metodologia que possibilita a identificação de trechos do sinal do receptor nos quais é válido utilizar um valor de limiar, e realizar a detecção desse valor para inicialização do tempo de trânsito, de forma a não ter o atraso ou adianto de um ciclo do sinal do receptor para uma velocidade que corresponda a um mesmo ciclo do sinal de ultrassom. Após a inicialização dos estados, o algoritmo com o filtro de Kalman é responsável por igualar a fase do sinal estimado com o sinal do receptor.

A estimação do tempo de trânsito com o uso do filtro de Kalman em relação ao valor que poderia ser estimado apenas com a própria metodologia apresentada para a inicialização do tempo de trânsito com o uso de um fator de calibração, reduz o erro devido ao comportamento variável do ruído relacionado à amostragem ou quantização do sinal do receptor.

A técnica proposta para medição indireta do tempo de trânsito mostrou resultados de simulação e experimental próximos ao valor esperado e a técnica de diferença de fase no domínio da frequência, que se caracteriza pela menor interferência do ruído em relação à correlação cruzada ou à diferença de fase no domínio do tempo. A técnica perde a limitação da faixa de medição (restrita a 2π) imposta pela técnica de diferença de fase e necessita da aquisição apenas do sinal do receptor.

Em trabalhos futuros pode-se avaliar a relação entre as matrizes de covariância e a convergência do filtro de Kalman para o algoritmo proposto, uma implementação com o filtro de Kalman uncented e uma configuração de medição utilizando quatro transdutores de ultrassom para eliminar o efeito da incerteza relacionada à temperatura.

As contribuições dos resultados das pesquisas realizadas durante a execução deste trabalho podem ser verificadas nos seguintes artigos:

LUCENA, D. C.; FREIRE, R. C. S.; VILLANUEVA, J. M. M.; LUCIANO, B. A.; An Innovative Ultrasonic Time of Flight Method based on Extended Kalman Filter for Wind Speed Measurement, *Journal of Instrumentation*, pp. 1-14, 2020.

LUCENA, D. C., VILLANUEVA, J. M. M., FREIRE, R. C. S., LUCIANO, B. A., FARIAS, W. P. Design Considerations for Ultrasonic Signals Acquisition. 2nd International Symposium on Instrumentation Systems, Circuits and Transducers (INSCIT), pp. 1-6, 2017.

LUCENA, D. C., VILLANUEVA, J. M. M., FARIAS, W. P., LUCIANO, B. A., FREIRE, R. C. S. Algoritmo Híbrido para a Rejeição do Ruído e Estimação do Tempo de Trânsito Ultrassônico Usando Filtro de Kalman e Diferença de Fase. XXII Congresso Brasileiro de Automática (CBA), 2018.

REFERÊNCIAS

- [1] J. M. M. Villanueva, S. Y. C. Catunda e R. Tanscheit, "Maximum-Likelihood Data Fusion of Phase-Difference and Threshold-Detection Techniques for Wind-Speed Measurement," *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, vol. 58, pp. 2189-2195, July 2009.
- [2] J. M. M. Villanueva, *Fusão de Dados das Técnicas de Tempo de Trânsito utilizando Transdutores Ultra-sônicos para Medição da Velocidade do Vento*, Rio de Janeiro: Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, 2009.
- [3] M. M. Costa, R. C. S. Freire, S. Y. C. Catunda e J. M. M. Villanueva, "Wind speed measurement based on ultrasonic sensors using Discrete Fourier Transform," *IEEE International Instrumentation and Measurement Technology Conference*, pp. 499-504, 2013.
- [4] N. Castro, J. M. M. Villanueva, R. C. S. Freire e S. Y. C. Catunda, "Wind Speed Measurement Method Using Ultrasonic Sensors with Stationary Wavelet Transform," *IEEE International Instrumentation and Measurement Technology Conference*, pp. 1759-1763, 2012.
- [5] A. Rocchi, E. Santecchia, F. Ciciulla, P. Mengucci e G. Barucca, "Characterization and Optimization of Level Measurement by an Ultrasonic Sensor System," *IEEE Sensors Journal*, vol. 19, pp. 3077 - 3084, 2019.
- [6] E. S. F. C. P. M. a. G. B. A. Rocchi, "Characterization and Optimization of Level Measurement by an Ultrasonic Sensor System," *IEEE Sensors Journal*, vol. 19, pp. 3077 - 3084, 2019.
- [7] G. D. Angelis, A. Moschitta e P. Carbone, "Ultrasound Based Positioning Using Time of Flight Measurements and Crosstalk Mitigation," *IEEE International Instrumentation and Measurement Technology Conference*, 2015.
- [8] C.-M. Yang, S. B. Jiang, D.-Y. Lin, F.-M. Lu, Y.-M. Wu e T.-L. Yeh, "An Innovative Ultrasonic Time-of-Flight Measurement Method Using Peak Time Sequences of Different Frequencies - Part II: Implementation," *IEEE Transaction on Instrumentation and Measurement*, vol. 60, pp. 745-757, March 2011.
- [9] D. A. Kiefer, M. Fink e S. J. Rupitsch, "Simultaneous Ultrasonic Measurement of Thickness and Speed of Sound in Elastic Plates Using Coded Excitation Signals," *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control*, vol. 64, pp. 1744-1757, November 2017.
- [10] A. Belhedi, A. Bartoli, S. Bourgeois, V. Gay-Bellile, K. Hamrouni e P. Sayd, "Noise modelling in time-of-flight sensors with application to depth noise removal and uncertainty estimation in three-dimensional measurement," *IET Computer Vision*, vol. 9, nº 6, pp. 967-997, 2015.

- [11] J. C. Jackson, R. Summan, G. I. Dobie, S. M. Whiteley, S. G. Pierce e G. Hayward, "Time-of-flight measurement techniques for airborne ultrasonic ranging," *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control*, vol. 60, pp. 343 - 355, 2013.
- [12] M. O. Khyam, S. S. Ge, X. Li e M. R. Pickering, "Highly Accurate Time-of-Flight Measurement Technique Based on Phase-Correlation for Ultrasonic Ranging," *IEEE Sensors Journal*, vol. 17, pp. 434-443, 2017.
- [13] J. M. M. Villanueva, S. Y. C. Catunda, R. C. S. Freire e N. S. C. Ingaroca, "Wind Speed Measurement based on Time of Flight Estimations using Extended Kalman Filter," *IEEE Instrumentation and Measurement Technology Conference*, 2013.
- [14] L. Angrisani, A. Baccigalupi e R. S. Moriello, "A Measurement Method Based on Kalman Filtering for Ultrasonic Time-of Flight Estimation," *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, vol. 55, nº 2, pp. 442-448, 2006.
- [15] M. O. Khyam, M. Noor-A-Rahim, X. Li, C. Ritz, Y. L. Guan e S. S. Ge, "Design of Chirp Waveforms for Multiple-Access Ultrasonic Indoor Positioning," *IEEE Sensors Journal*, vol. 18, pp. 6375-6390, August 2018.
- [16] K. N. D. Grassi, R. C. S. Freire e J. M. M. Villanueva, "Evaluation of wavelet analysis performance in multiphase level measurement using ultrasonic sensors," *IEEE International Instrumentation and Measurement Technology Conference*, pp. 756-760, 2014.
- [17] D. Rosen e J. Jiang, "Fourier-Domain Shift Matching: A Robust Time-of-Flight Approach for Shear Wave Speed Estimation," *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control*, vol. 65, pp. 729-740, May 2018.
- [18] S. B. Jiang, C.-M. Yang, R.-S. Huang, C.-Y. Fang e T.-L. Yeh, "An Innovative Ultrasonic Time-of-Flight Measurement Method Using Peak Time Sequences of Different Frequencies: Part I," *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, vol. 60, pp. 735-744, March 2011.
- [19] L. Angrisani, A. Baccigalupe e R. Schiano Lo Moriello, "Ultrasonic Time-of-flight estimation through unscented Kalman filter," *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, vol. 55, pp. 1077-1084, 2006.
- [20] S. Shin, M.-H. Kim e S. B. Choi, "Ultrasonic Distance Measurement Method With Crosstalk Rejection at High Measurement Rate," *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, vol. 68, pp. 972 - 979, 2018.
- [21] F. Suñol, D. A. Ochoa e J. E. Garcia, "High-Precision Time-of-Flight Determination Algorithm for Ultrasonic Flow Measurement," *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2018.

- [22] R. Queiros, F. C. Alegria, P. S. Girão e A. C. Serra, "Cross-Correlation and Sine-Fitting Techniques for High-Resolution Ultrasonic Ranging," *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, vol. 59, pp. 3227 - 3236.
- [23] M. K. Yucel, S. Fateri, M. Legg, A. Wilkinson, V. Kappatos, C. Selcuk e T. Gan, "Coded Waveform Excitation for High-Resolution Ultrasonic Guided Wave Response," *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, vol. 12, pp. 257-266, 2016.
- [24] J.-D. Huang, C.-K. Lee, C.-S. Yeh, W.-J. Wu e C.-T. Lin, "High-Precision Ultrasonic Ranging System Platform Based on Peak-Detected Self-Interference Technique," *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, vol. 60, pp. 3775 - 3780, 2011.
- [25] M. M. Costa, *Medição da velocidade do vento utilizando transdutores ultrassônicos baseado na transformada de Fourier*, Campina Grande: Universidade Federal de Campina Grande, 2015.
- [26] G. Shi, X. Chen, X. Song, F. Qi e A. Ding, "Signal Matching Wavelet for Ultrasonic Flaw Detection in High Background Noise," *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control*, vol. 52, pp. 776-786, April 2011.
- [27] D. Grimaldi, "Time-of-flight measurement of ultrasonic pulse echoes using wavelet networks," *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, vol. 55, pp. 5-13, 2006.
- [28] JCGM, "IEC Guide 98-3:2008 - Guide to the expression of uncertainty in measurement," 2008. [Online]. Available: <http://www.bipm.org/en/publications/guides/gum.html>. [Acesso em 18 Mar 2017].
- [29] Z. Fang, L. Hu, K. Mao, W. Chen e X. Fu, "Similarity Judgment-Based Double-Threshold Method for Time-of-Flight Determination in an Ultrasonic Gas Flowmeter," *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, vol. 67, pp. 24-32, 2018.
- [30] M. F. H. M. Y. X. a. B. W. B. Feng, "Kalman Filter With Recursive Covariance Estimation - Sequentially Estimating Process Noise Covariance," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 61, pp. 6253 - 6263, 2014.
- [31] A. K. Ziarani e A. Konrad, "A method of extraction of nonstationary sinusoids," *Signal Processing*, vol. 84, pp. 1323-1346, 2004.
- [32] Y. Zheng, S. Chen, W. Tan, R. Kinnick e J. F. Greenleaf, "Detection of Tissue Harmonic Motion Induced by Ultrasonic Radiation Force Using Pulse-Echo Ultrasound and Kalman Filter," *IEEE Transaction on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control*, vol. 54, pp. 290-300, February 2007.
- [33] F. Santos, J. M. M. Villanueva, R. Gouveia e J. Silva, "Method of Monte Carlo simulation for the analysis of uncertainty for ultrasonic time-of-flight," em *Journal of Physics: Conference Series*, 2017.

- [34] V. A. Bavdekar, A. P. Deshpande e S. C. Patwardhan, "Identification of process and measurement noise covariance for state and parameter estimation using extended Kalman filter," *Journal of Process Control*, vol. 21, pp. 585-601, 2011.
- [35] D. S. A. B. K. R. P. Y. B.-S. a. D. L. K. L. Zhang, "On the Identification of Noise Covariances and Adaptive Kalman Filtering: A New Look at a 50 Year-Old Problem," *IEEE Access*, vol. 8, pp. 59362 - 59388, 2020.
- [36] Keysight, "Keysight Technologies U2300A Series USB Multifunction Data Acquisition Devices: Data Sheet," 2014. Disponível em: <<http://literature.cdn.keysight.com/litweb/pdf/5991-0566EN.pdf?id=2205049>>.
- [37] Keysight, "Keysight U2300A Series USB Multifunction Data Acquisition Devices: User Guide," 2016. Disponível em: <<http://literature.cdn.keysight.com/litweb/pdf/U2351-90002.pdf?id=867483>>.
- [38] Waitrony, "TR40-10: Data Sheet". Disponível em: <<https://www.digchip.com/datasheets/parts/datasheet/518/TR40-10-pdf.php>>.
- [39] Texas Instruments, "Application Report: Noise Analysis in Operational Amplifier Circuits in Measurement," 2007. Disponível em: <<http://www.ti.com/lit/an/slva043b/slva043b.pdf>>.
- [40] Texas Instruments, "TL08xx JFET-Input Operational Amplifiers: Data Sheet," 2015. Disponível em: <<http://www.ti.com/lit/ds/symlink/tl084.pdf>>.