

# ALGORITMO HÍBRIDO PARA A REJEIÇÃO DO RUÍDO E ESTIMAÇÃO DO TEMPO DE TRÂNSITO ULTRASSÔNICO USANDO FILTRO DE KALMAN E DIFERENÇA DE FASE

DAIANA C. LUCENA<sup>1</sup>, JUAN M. M. VILLANUEVA<sup>2</sup>, WENDELL P. FARIAS<sup>3</sup>, BENEDITO A. LUCIANO<sup>4</sup>, RAIMUNDO C. S. FREIRE<sup>5</sup>

<sup>1</sup> Universidade Federal de Campina Grande / Instituto Federal da Paraíba  
R. Aprígio Veloso, 882 - Universitário, Campina Grande - PB, 58429-900  
E-mail: daiana.correia@cear.ufpb.br

<sup>2,3</sup> Universidade Federal da Paraíba  
Cidade Universitária, s/n - Castelo Branco III, João Pessoa - PB, 58051-085  
E-mails: jmauricio@cear.ufpb.br, wendell.pereira@cear.ufpb.br

<sup>4,5</sup> Universidade Federal de Campina Grande  
R. Aprígio Veloso, 882 - Universitário, Campina Grande - PB, 58429-900  
E-mails: benedito@dee.ufcg.edu.br, rscfreire@dee.ufcg.edu.br

**Abstract**— This work describes the use of the Extended Kalman Filter (EKF) to noise rejection applied to ultrasound signal in order to estimate the time of flight in wind speed measurements. Denoising proposed method used space state model to estimate ultrasound signal through parameters of amplitude, frequency and phase. An ultrasound propagation computational model was done and the noise applied to the receiver transducer signal has normal distribution and was variable. After signal filtering, the time of flight was estimated using phase difference technique, verified through simulation and experimental results. Experimental results was performed using a wind tunnel to estimate the time of flight, the proposed technique got good performance for low Signal to Noise Ratio (SNR), where conventional threshold and phase difference techniques should not be used due to the high noise level of the measuring medium.

**Keywords**— Extended Kalman Filter, Ultrasound Signal, Time of Flight, Denoising.

**Resumo**— Este trabalho descreve o desenvolvimento de uma metodologia para a rejeição do ruído (*denoising*) em ondas de ultrassom para aplicações na medição da velocidade do vento. O método proposto de *denoising* baseia-se no filtro de Kalman estendido que utiliza uma modelagem em espaço de estados para a estimação do sinal de ultrassom com parâmetros de amplitude, frequência e fase. Foi construído um modelo computacional de propagação de ondas de ultrassom, e usada para a aplicação da técnica proposta de filtragem do sinal de ultrassom e posterior determinação do tempo de transito usando a técnica de diferença de fase. Resultados experimentais foram realizados usando um túnel de vento para a estimação do tempo de transito, obtendo-se um bom desempenho da técnica proposta para baixos valores de relação sinal ruído (SNR), em que as técnicas convencionais de detecção de limiar e diferença de fase não podem ser aplicadas devido ao alto nível de ruído do meio de medição.

**Palavras-chave**— Filtro de Kalman Estendido, Sinal de Ultrassom, Tempo de Trânsito, Rejeição de Ruído.

## 1 Introdução

Transdutores ultrassônicos são amplamente utilizados para o desenvolvimento de sistemas de medição de nível, temperatura, velocidade do som, medição de fluxo, medição da velocidade do vento, volume, espessura, entre outros. O princípio de medição, baseia-se na estimação do tempo de trânsito (ToF – *time-of-flight*) que corresponde ao tempo de viagem da onda de ultrassom, desde a transmissão até a detecção. Este princípio de medição permite a realização de ensaios não destrutivos (NDT – *Non-Destructive Testing*) para diferentes ambientes de medições sem a intrusão do elemento sensor no meio de medição, inclusive em ambientes críticos para medição, com baixas e altas temperaturas, umidade extrema, chuva, nevoa, etc. Desta maneira, os sistemas de medição que utilizam transdutores ultrassônicos tornam-se robustos e de ampla abrangência quanto a sua aplicação (ANGELIS *et. al.*, 2015) (ANRI *et. al.*, 2015) (ANGRISANI, 2006).

Sistemas de medição e instrumentação geralmente sofrem a influência de ruídos, cujas fontes podem ser do tipo elétrico (aditivo ou multiplicativo), ruído térmico, etc. Por exemplo, em (LUCENA, 2017), foram definidas as considerações para a aquisição digital de sinais de ultrassom, para aplicações de anemômetros ultrassônicos, ou seja, medição da velocidade do vento. Nesse trabalho foram apresentados resultados da aquisição digital de sinais de ultrassom, e foi observada a presença de ruído para valores de frequências superiores a 20 kHz. O tratamento adequado do ruído em conjunto com procedimentos para a avaliação das incertezas proporciona estimações do tempo de trânsito e da velocidade do vento mais robustas.

O tratamento do ruído, usualmente é realizado por meio da implementação de filtros de banda estreita (analógicos e/ou digitais). Entretanto, esses filtros apresentam limitações no projeto principalmente por causa das restrições de construção física ou de implementação em *hardware* embarcado. Desta maneira, são utilizadas outras abordagens para o cancelamento do ruído, baseadas nas transformadas Wavelet (*denoi-*

sing), filtros adaptativos (algoritmo de *Widrow*) e filtro de Kalman. A transformada Wavelet apresenta um bom desempenho para separar o ruído do sinal principalmente para sinais não estacionários, entretanto a separação depende do nível de detalhe. Os filtros adaptativos modelam o ruído do ambiente tendo como desvantagens a determinação da ordem do filtro e a avaliação da convergência do algoritmo. De outro lado, o filtro de Kalman pode ser utilizado a partir do equacionamento em espaço de estado de sistemas lineares ou não lineares com a finalidade de realizar a filtragem de banda estreita (DEJHAN, 2002) (POSTALCLOGLU, 2005) (SALIS, 2013).

Usualmente o filtro de Kalman é utilizado para a estimação de estados de sistemas dinâmicos, realizando a medição indireta de uma grandeza de interesse, por meio das medições diretas a partir de sensores disponíveis. O algoritmo de filtro de Kalman realiza a estimação de estados de um sistema realizando a filtragem ótima do sinal de saída, eliminando o ruído por meio da inclusão de propriedades estatísticas tanto do sinal quanto do ruído. Usualmente, a rejeição do ruído de um sinal é realizada por meio do projeto de filtros definindo-se frequências de corte e ganhos na banda passante, preservando o sinal contido dentro da banda de passagem. Entretanto, o filtro de Kalman tem a vantagem de ser implementado para a rejeição de ruído em todo o espectro de frequência, já que a filtragem utiliza as características do ruído.

Outras aplicações de filtros de Kalman estão no fato de realizar a fusão de informações (combinações) para a estimação de variáveis com menor incerteza possível quando comparadas com as medições independentes (WALLSCHEID, 2017). Desde o ponto de vista computacional, o algoritmo de filtro de Kalman torna-se eficiente devido a que depende da amostra anterior e presente o que permite a menor ocupação de memória em um cenário de implementação digital.

Visando o desenvolvimento de um sistema para a rejeição de ruído, neste trabalho, será desenvolvido um algoritmo de filtragem do ruído de sinais de ultrassom baseado no filtro de Kalman estendido, uma versão que lineariza as equações de estado de forma que o filtro possa ser utilizado em sistemas não lineares. Para este propósito será desenvolvido um modelo em espaço de estados para a estimação da onda de ultrassom contida em um sinal com ruído. Serão apresentados resultados de simulação utilizando um modelo de propagação de sinais de ultrassom para a medição da velocidade do vento. Para efeitos de comparação serão utilizadas as técnicas convencionais de estimação do tempo de trânsito (ToF) tais como detecção de limiar e diferença de fase. Finalmente, serão apresentados resultados experimentais da medição da velocidade do vento usando um túnel de vento.

## 2 Técnicas de Estimação do ToF

Para determinação do tempo de trânsito (ToF) têm sido utilizado o método de diferença de tempo, que pode ser implementado por meio das técnicas de

detecção de limiar, diferença de fase, correlação cruzada, filtro de Kalman, transformada de Fourier e Wavelet. Em seguida serão apresentadas sucintamente as principais técnicas de medição do ToF:

### 2.1 Detecção de limiar

Na Figura 1 ilustram-se dois sinais de ultrassom, correspondentes ao transdutor transmissor (TX) e o sinal no transdutor receptor (RX). Na detecção de limiar, um valor de tensão é definido para identificar a detecção do sinal, sendo o tempo decorrido até que o sinal seja detectado ( $t^M$ ) dado por uma soma do tempo de trânsito ( $t$ ) com o atraso eletrônico ( $t^E$ ), imposto pela dinâmica dos transdutores, conforme a Figura 1. O ruído presente no meio provoca incertezas no intervalo de tempo correspondente ao limiar estabelecido e dificulta a determinação do tempo de atraso eletrônico. Além disso, nas medições, o tempo de atraso eletrônico varia conforme a velocidade do fluido ou distância para o obstáculo se modifica.

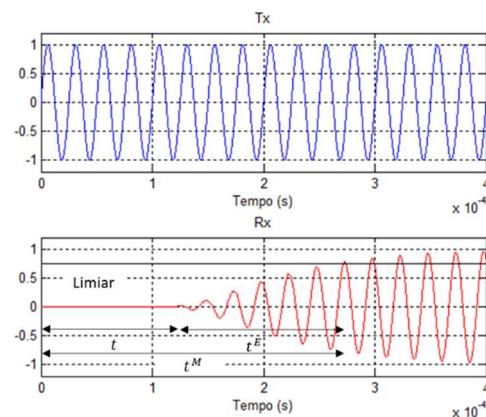


Figura 1. Técnica de detecção de limiar

### 2.2 Diferença de Fase

A técnica de diferença de fase obtém o tempo de trânsito a partir da diferença de fase entre os sinais de ultrassom transmitido (TX) e recebido (RX), conforme a Figura 2, sendo dada por  $\phi = 2\pi f t$ , onde  $f$  é a frequência de operação dos transdutores e  $t$  o tempo de trânsito. Para casos em que o tempo de trânsito do sinal de ultrassom é maior do que o intervalo de tempo correspondente a  $2\pi$ , é necessário o conhecimento do número de ondas (períodos) do sinal de ultrassom transcorridos da transmissão até a detecção.

No domínio do tempo a diferença de fase pode ser determinada por meio da diferença de tempo entre duas amostras sequenciais de pico ou de cruzamento por zero do transmissor e receptor. No domínio da frequência, a transformada de Fourier realiza o cálculo do tempo de trânsito através da identificação da diferença de fase entre o sinal do receptor e transmissor nos pontos correspondentes à máxima amplitude da transformada de Fourier dos sinais.

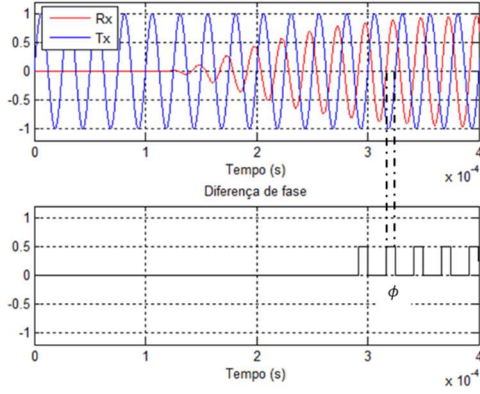


Figura 2. Técnica de diferença de fase

### 2.3 Correlação Cruzada e Transf. Wavelet

A técnica de correlação cruzada entre os sinais TX e RX calcula 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 RX começou a ser detectado. Nesse tipo de abordagem o ruído presente no meio pode interferir no valor obtido para o tempo de trânsito.

A transformada de Wavelet tem sido utilizada para filtragem do sinal de ultrassom, decompondo o sinal usando bancos de funções que dependem da Wavelet-mãe utilizada, cuja escolha determina a qualidade dos resultados. A partir do sinal filtrado é utilizada uma das técnicas que foram descritas para identificação do tempo de trânsito.

### 2.4 Filtro de Kalman

Em Ziarani (2004) 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 Angrisani (2006), foi descrito o filtro de Kalman estendido 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.

Em Villanueva (2013), 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 estimativas do ToF com baixa incerteza. A equação de medição foi atualizada com a amplitude do sinal recebido e o tempo de trânsito calculado por diferença de fase utilizando a transformada de Fourier.

## 3 Estimação da onda ultrassônica usando EKF

O filtro de Kalman é um filtro estatístico que estima o estado interno de um sistema dinâmico a partir de uma série de medidas ruidosas da saída do sistema. A estimação consiste no processo de inferir o valor de uma quantidade de interesse a partir de observações indiretas e imprecisas. Mediante o emprego de filtro de Kalman, o estado instantâneo de um sistema dinâmico pode ser estimado e descrito na forma de espaço de estados, perturbado por ruído através de medições relacionadas com esse estado mas corrompidas pelo ruído.

A representação por equações de estado 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:

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

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  $\sigma_w$ .

A medição do processo é descrita por:

$$y(k) = C(k)x(k) + v(k) \quad (2)$$

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 à medição, com média zero e desvio padrão  $\sigma_v$ .

Em vários casos a dinâmica de um sistema não é linear, e o Filtro de Kalman não pode ser aplicado para estimar os estados, nesses casos a dinâmica e/ou medição do processo pode ser não linear. 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 que captura momentos desejados (ao menos média e covariância) da distribuição original dos estados (BROWN; HWANG, 2004).

No algoritmo para o Filtro de Kalman são utilizados os vetores do estado e da medição ( $x(t)$  e  $y(t)$ ), dados em (3) e (4), em que  $w(t)$  representa o ruído associado aos estados e  $v(t)$  o ruído associado à medição, com média zero e covariância dada por  $Q$  e  $R$ , para atualização do estado em (5), 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 ( $y_k$ ).

$$x(t) = f(x, t) + w(t) \quad (3)$$

$$y(t) = g(x, t) + v(t) \quad (4)$$

$$\hat{x}_{k|k-1} = f(\hat{x}_{k-1}) \quad (5)$$

$$\hat{x}_{k|k} = f(\hat{x}_{k-1})G_k[y_k - g(f(\hat{x}_{k-1}))] \quad (6)$$

Para o cálculo do ganho do filtro de Kalman  $G_k$ , (6), é utilizado a propagação do erro de covariância e a atualização do erro de covariância dado em (7) e (8) respectivamente, tais expressões utilizam a série de Taylor para linearização das funções  $f$  e  $g$ .

$$G_k = P_{k,k-1}g(\hat{x}_k)^T \left[ g(\hat{x}_k)P_{k,k-1}g(\hat{x}_k)^T + R_k \right]^{-1} \quad (7)$$

$$P_{k,k-1} = f(\hat{x}_{k-1})P_{k,k}f(\hat{x}_{k-1})^T + Q_{k-1} \quad (8)$$

$$P_{k,k} = [I - G_k g(\hat{x}_k)]P_{k,k-1} \quad (9)$$

Uma configuração comum para medição de ToF utilizando transdutores ultrassônicos para medição de fluxo de ar consiste na configuração ilustrada na Figura 3, na qual o transdutor  $TX$  emite um trem de pulsos que é recebido pelo transdutor  $RX$ .

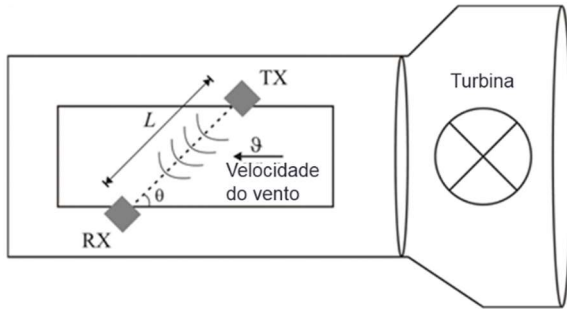


Figura 3. Configuração para medição da velocidade do vento.

Um ângulo diferente de  $90^\circ$  entre a direção de alinhamento dos transdutores e a direção do fluxo deve ser adotado, para evitar distúrbios nos sensores devido ao fluxo de ar. A velocidade do fluxo é dada por (9),

$$v = \frac{1}{\cos(\theta)} \left( \frac{L}{ToF} - C \right), \quad (10)$$

em que  $L$  é a distância percorrida pela onda ultrassônica e  $ToF$  o tempo de transito e  $C$  a velocidade do som que depende da temperatura ( $T_K$  em Kelvin), dada por  $C = 20,074\sqrt{T_K}$

Considerando o sinal recebido no transdutor receptor dado por  $u(t)$ , que pode ser composto por um sinal de ultrassom principal,  $y(t)$ , e uma soma de sinais ultrassônicos refletidos e atrasados e pelo ruído aditivo  $n(t)$ , é dado por:

$$u(t) = y(t) + \sum_{i=0}^{\infty} A_i(t) \text{sen}(\omega_i(t)t + \phi_i(t)) + n(t), \quad (11)$$

$$y(t) = A(t) \text{sen}(\omega(t)t + \phi(t)), \quad (12)$$

onde,  $A$ ,  $\omega$  e  $\phi$  são respectivamente a amplitude, frequência e fase do sinal de ultrassom principal,  $A_i$ ,  $\omega_i$  e  $\phi_i$  são a amplitude, frequência e fase dos sinais ultrassônicos refletidos;  $t$  o tempo e  $n$  o ruído aditivo.

O modelamento do sistema tem o objetivo de determinar os estados (parâmetros) do sinal de ultrassom extraído do sinal detectado no transdutor receptor,  $u(t)$ . Com este propósito é definida uma variável paramétrica composta pelos parâmetros da forma de onda senoidal  $\Psi(t) = [A(t), \omega(t), \phi(t)]$ .

$$y(t, \Psi(t)) = A(t) \text{sen}(\omega(t)t + \phi(t)). \quad (13)$$

Para extrair os parâmetros da forma de onda senoidal, é definida uma função de custo  $J_{(\Psi(t), t)}$ , que deve minimizar o erro quadrático entre o sinal medido  $u(t)$  e o sinal modelado  $y(t)$ .

$$J_{(\Psi(t), t)} = e^2(t) = (u(t) - y(t, \Psi(t)))^2. \quad (14)$$

O vetor paramétrico  $\Psi$  que minimiza a função de custo é estimado utilizando o método do gradiente, no qual o mínimo de uma função é oposta à direção do gradiente (ZIARANI; KONRAD, 2004),

$$\frac{d\Psi(t)}{dt} = -\mu \frac{\partial J_{(\Psi(t), t)}}{\partial \Psi(t)} = -\mu \frac{\partial e^2(t)}{\partial \Psi(t)}. \quad (15)$$

em que,  $e(t) = u(t) - y(t, \Psi(t))$  é o erro de aproximação entre o sinal medido,  $u(t)$ , e o sinal modelado  $y(t)$ , e  $\mu$  é uma matriz diagonal constante que controla a taxa de convergência do controle, com  $m_1$ ,  $m_2$ ,  $m_3$  sendo valores constantes, definida por (ZIARANI; KONRAD, 2004),

$$\mu = \begin{bmatrix} m_1 & 0 & 0 \\ 0 & m_2 & 0 \\ 0 & 0 & m_3 \end{bmatrix}. \quad (16)$$

Considerando os parâmetros da variável  $\Psi(t) = [A(t), \omega(t), \phi(t)]$ , (14) pode ser escrita como:

$$\begin{bmatrix} \frac{\partial \hat{A}(t)}{\partial t} \\ \frac{\partial \hat{\omega}(t)}{\partial t} \\ \frac{\partial \hat{\phi}(t)}{\partial t} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -m_1 & 0 & 0 \\ 0 & -m_2 & 0 \\ 0 & 0 & -m_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \frac{\partial e^2(t)}{\partial \hat{A}(t)} \\ \frac{\partial e^2(t)}{\partial \hat{\omega}(t)} \\ \frac{\partial e^2(t)}{\partial \hat{\phi}(t)} \end{bmatrix}. \quad (17)$$

A partir de (16), a equação de estado da amplitude é dada por:

$$\frac{\partial \hat{A}(t)}{\partial t} = -m_1 \frac{\partial e^2(t)}{\partial \hat{A}(t)} \quad (18)$$

$$= \mu_1 e(t) \text{sen}(\hat{\omega}(t)t + \hat{\phi}(t)),$$

em que,  $\mu_1 = 2m_1$ .

A equação de estado da frequência por:

$$\begin{aligned} \frac{\partial \hat{\omega}(t)}{\partial t} &= -m_2 \frac{\partial e^2(t)}{\partial \hat{\omega}(t)} \\ &= \mu_2 e(t) \hat{A}(t) \cos(\hat{\omega}(t)t + \hat{\Phi}(t)), \end{aligned} \quad (18)$$

em que,  $\mu_2 = 2m_2t$  é um valor constante devido a transformação de um sistema variável para invariável no tempo.

A equação de estado da fase por:

$$\begin{aligned} \frac{\partial \hat{\Phi}(t)}{\partial t} &= -m_3 \frac{\partial e^2(t)}{\partial \hat{\omega}(t)} \\ &= \mu_3 e(t) \hat{A}(t) \cos(\hat{\omega}(t)t + \hat{\Phi}(t)), \end{aligned} \quad (19)$$

em que,  $\mu_3 = 2m_3$  é um valor constante.

De (17), (18) e (19) o modelo do espaço de estados é dado por:

$$\begin{aligned} \dot{x}(t) &= f(x, t) + w(t) \\ y(t) &= g(x, t) + v(t), \end{aligned} \quad (20)$$

em que os estados do modelo são a amplitude  $x_1 = \hat{A}$ , frequência  $x_2 = \hat{\omega}$  e fase  $x_3 = \hat{\Phi}$ ;  $w_i$  é o ruído dos estados com média zero e desvio padrão  $\sigma_w$ ;  $v_i$  é o ruído das medições com média zero e desvio padrão  $\sigma_v$ .

A atualização da equação de medição do filtro de Kalman é feita com os valores de amplitude do sinal. As funções não lineares  $f(x, t)$  e  $g(x, t)$ , sendo  $\beta = x_2t + x_3$ , são dadas por:

$$f(x, t) = \begin{bmatrix} \mu_1(u - x_1 \text{sen}\beta) \text{sen}\beta \\ \mu_2 x_1(u - x_1 \text{sen}\beta) \text{cos}\beta \\ \mu_3 x_1(u - x_1 \text{sen}\beta) \text{cos}\beta \end{bmatrix}, \quad (21)$$

$$g(x, t) = [x_1 \text{sen}\beta]. \quad (22)$$

Em tempo discreto, sendo  $T_s$  o período de amostragem, as equações de estado são dadas por:

$$\begin{aligned} \dot{x}[t] &= f[x_k, k] + T_s w_k, \\ y[t] &= g[x_k, k] + T_s v_k. \end{aligned} \quad (23)$$

em que  $x_k$  é o vetor de estados do processo;  $y_k$  é o vetor de medições atual;  $w_k$  e  $v_k$  representam ruído gaussiano com desvio padrão  $Q_k$  e  $R_k$  respectivamente, não correlacionados entre si.

As funções  $f[x_k, k]$  e  $g[x_k, k]$  em tempo discreto  $kT_s$ , sendo  $T_s$  o período de amostragem e  $k$  variando de um até a quantidade de pontos do sinal, são dadas por:

$$f[x_k, kT_s] = \begin{bmatrix} x_1 + T_s u \text{sen}\beta_k - T_s x_1 \text{sen}^2\beta_k \\ x_2 + T_s x_1 u \text{cos}\beta_k - T_s x_1^2 \text{sen}\beta_k \text{cos}\beta_k \\ x_3 + T_s x_1 u \text{cos}\beta_k - T_s x_1^2 \text{sen}\beta_k \text{cos}\beta_k \end{bmatrix}, \quad (24)$$

$$g[x_k, kT_s] = [x_1 \text{sen}\beta_k], \quad (25)$$

em que,  $\beta_k = x_2[kT_s] + x_3$ .

Neste trabalho, o filtro de Kalman estendido foi utilizado para filtragem de ruído (*denoising*) de um sinal de ultrassom. 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. As técnicas de detecção de limiar e diferença de fase também foram utilizadas com o sinal de ultrassom original (sem aplicação do filtro de Kalman) para fins de comparação.

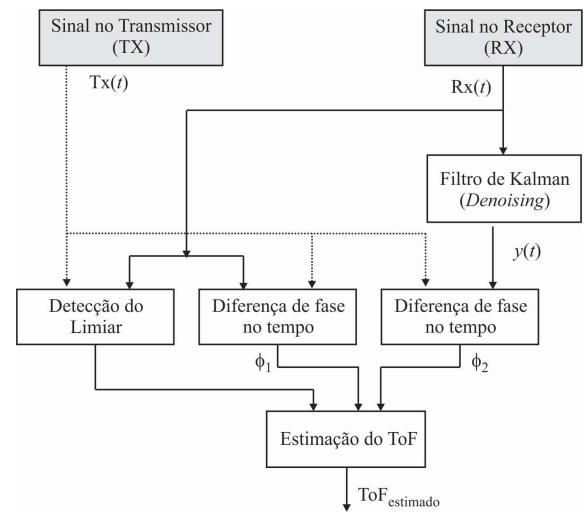


Figura 4. Fluxograma para a estimação do ToF.

## 4 Resultados

Nessa seção serão apresentados os resultados obtidos por meio de simulação utilizando o Matlab®/Simulink®, e resultados experimentais obtidos em um túnel de vento, tendo sido utilizado o modo de transmissão pulsado.

### 4.1 Resultados de 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  $v=10$  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:

$$ToF = \frac{L}{C + v \cos(\theta)} = 581,50 \mu\text{s} \quad (26)$$



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), sendo utilizado o valor de  $0,1 \times 10^{-6}$ . Finalmente, o sinal é recebido e somado com um ruído aditivo, que foi modificado de forma a obter diferentes relação sinal ruído para o sinal RX, como se ilustra na figura 5. Neste modelo foram usadas as frequências de amostragem de 800 kHz e 400 kHz.

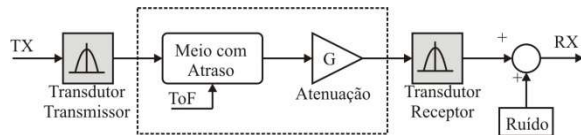


Figura 5. Diagrama de blocos da simulação.

Para efeitos de estimação do ToF a partir dos sinais TX e RX, foi considerado que o ruído aplicado teve uma distribuição normal e relação sinal ruído (SNR – *Signal to Noise Ratio*) variável. Para aplicação do ruído e cálculo do SNR foi considerado que o sinal do receptor teve seu início quando o valor de tensão atingiu 0,3 V.

O filtro de Kalman estendido descrito na seção 3 foi utilizado para filtragem do sinal do receptor e a seguir aplicada a técnica de diferença de fase no domínio do tempo, como estabelecido na figura 4. Desta maneira, uma vez detectado o sinal é aplicado algoritmo de estimação e filtragem do sinal recebido. Na figura 6, ilustra-se o efeito do filtro de Kalman sobre o sinal recebido, o filtro de Kalman passou a ser utilizado a partir do momento em que o sinal do receptor atingiu o valor normalizado de 0,7 V.

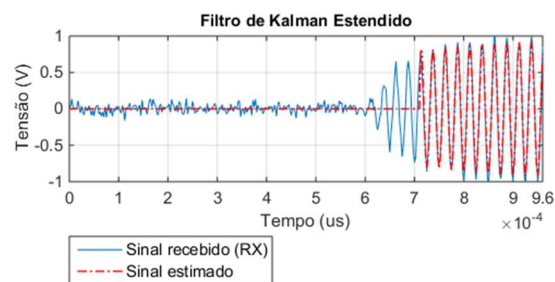


Figura 6. Estimação do sinal recebido (simulação), com a frequência de amostragem em 400 kHz.

A Figura 7 e 8 ilustram os valores estimados do tempo de trânsito em função das variações do SNR para as frequências de amostragem ( $f_s$ ) de 800 kHz e 400 kHz respectivamente. A estimação 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 estimação do ToF 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®.

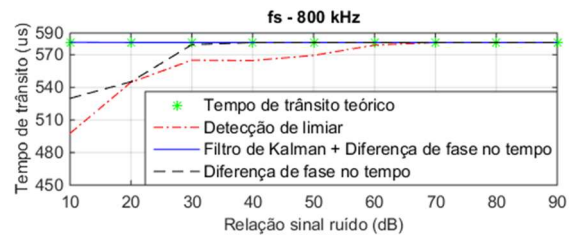


Figura 7. Variação do tempo de trânsito estimado com o SNR, para diferentes técnicas, com  $f_s = 800 \text{ kHz}$ .

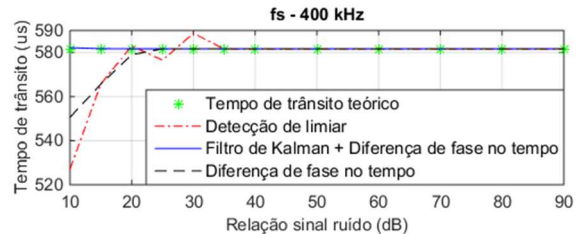


Figura 8. Variação do tempo de trânsito com o SNR, para diferentes técnicas, com  $f_s = 400 \text{ kHz}$ .

A Tabela 1 contém os valores obtidos para a estimação do tempo de trânsito para os diferentes valores de SNR da Figura 7. Na Tabela 2 contém o desvio padrão da estimação 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 (FK+DT) não teve o comportamento afetado, em simulação, para valores de baixo SNR, mantendo-se próximo do valor teórico ( $581,50 \mu\text{s}$ ).

Tabela 1. Tempo de trânsito.

SNR (dB)	Tempo de Trânsito ( $\mu\text{s}$ )		
	DL	DT	FK+DT
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 2. Desvio padrão.

SNR (dB)	Desvio padrão ( $\mu\text{s}$ )		
	DL	DT	FK+DT
10	26,583	1,4434	1,4434
15	17,601	1,4434	1,4434
20	18,265	1,4434	1,4434
25	10,541	1,4434	1,4434
30	26,583	1,4434	1,4434
35	17,601	1,4434	1,4434

#### 4.2 Resultados experimentais

Os resultados experimentais foram obtidos através da configuração de medição que utiliza um túnel de vento para geração de velocidades até 12 m/s, como ilustrado na figura 9. Entre os equipamentos utilizados estão o gerador de sinais Agilent 33220A, dois transdutores ultrassônicos com frequência de operação de 40 kHz, o anemômetro de fio quente TAFR 180, e a

unidade de aquisição de sinais Agilent U2331A com taxa de aquisição e resolução variáveis.

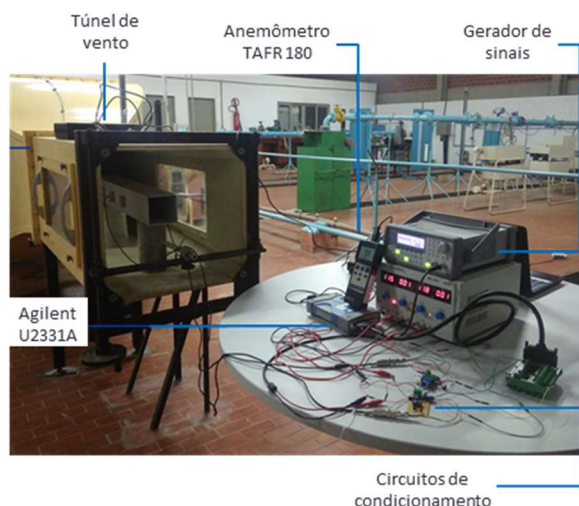


Figura 9. Setup de medição.

O Agilent U2331A é uma unidade para aquisição de dados cuja entrada analógica possui resolução de 12 bits, com uma taxa de amostragem máxima de 3 MSa/s quando utilizado apenas um canal e 1 Msa/s para mais de um canal. No caso de se utilizar 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  $\pm 0,05 \text{ V}$  a  $\pm 10 \text{ V}$ . 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 U2331A.

O transdutor de ultrassom TR40-10L, possui frequência central em  $40 \pm 1 \text{ kHz}$ , largura de banda de 5 kHz, sensibilidade de recepção de -70 dB, capacitância em  $1 \text{ kHz} \pm 20\%$  de 1900 pF, tensão eficaz máxima de alimentação 10 V, e temperatura de operação  $-40^\circ \text{ C}$  a  $85^\circ \text{ C}$ .

O anemômetro de fio quente TAFR 180 foi usado para realizar as medições da velocidade do vento e compara-las com as estimações por ultrassom. O TAFR tem escalas de 0,2 a 20 m/s com uma resolução de 0,1 m/s e 0,1 km/h, e a temperatura na faixa de  $0^\circ$  a  $50^\circ \text{ C}$ , com uma resolução de  $0,1^\circ \text{ C}$ .

No cenário utilizado para os resultados experimentais, a distância entre os transdutores foi de  $L=16,44 \text{ cm}$ , e o ângulo de  $\theta=\pi/4$ . Devido a que o ruído presente no meio não foi significativo para a rejeição do ruído por meio da aplicação do filtro de Kalman, para fins de validação foi adicionado um ruído gaussiano através da função *agwn* do Matlab®, simulando uma medição em um meio com diferentes níveis de ruído, desta maneira pode se ter o controle do SNR. Em outros cenários, tais como os que fazem a estimação da distância por meio da detecção da onda refletida, o ruído presente no sinal pode ser elevado, sendo nesses casos necessário a utilização de alguma técnica de filtragem.

O filtro de Kalman foi utilizado a partir de 0,7 V do sinal recebido normalizado. A Figura 10 mostra a estimação do sinal do transdutor receptor utilizando o filtro de Kalman para um SNR de 25 dB, sendo o cálculo do SNR realizado considerando todos os pontos do sinal recebido.

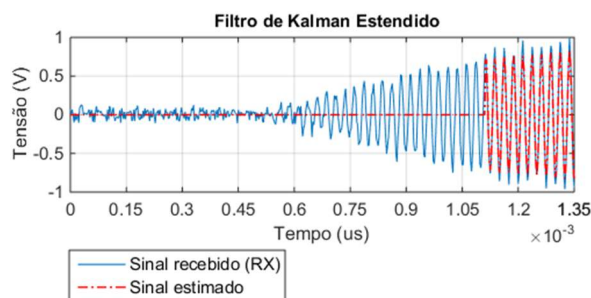


Figura 10. Estimação do sinal recebido (experimental).

A seguir o tempo de trânsito foi calculado (Figura 11), a partir da média de 10 simulações com três valores de diferença de fase e um de detecção de limiar cada, para diferentes valores de SNR, considerando o sinal recebido a partir de 0,03 V. A velocidade do vento no momento da medição foi de  $9,8 \text{ m/s}$  e valor teórico para o tempo de trânsito de  $481,26 \mu\text{s}$ . Pode-se observar que a técnica que utiliza filtro de Kalman com diferença de fase no domínio do tempo (FK+DT) não teve o comportamento afetado para valores de baixo SNR, enquanto as técnicas de detecção de limiar e diferença de fase apresentaram desempenhos inferiores.

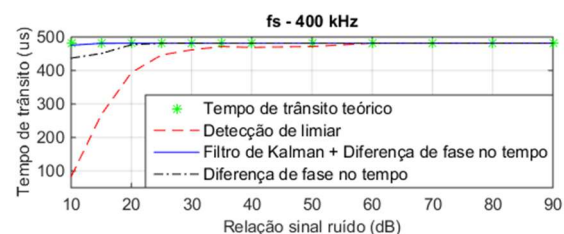


Figura 11. Variação do tempo de trânsito estimado com o SNR, para diferentes técnicas, com  $f_s = 400 \text{ kHz}$  (experimental).

A Tabela 3 mostra os valores obtidos para o tempo de transitio para os diferentes valores de SNR da Figura 11, com valores do desvio padrão na Tabela 4.

Tabela 3. Tempo de trânsito (experimental).

SNR (dB)	Tempo de Trânsito ( $\mu\text{s}$ )		
	DL	DT	FK+DT
10	82	536,75	575,50
15	267,50	550,75	581,00
20	393,50	576,75	581,25
25	446,25	581,25	581,25
30	461,50	581,50	581,50
35	471,50	581,25	581,25

Tabela 4. Desvio padrão (experimental).

SNR (dB)	Desvio padrão		
	DL ( $10^{-5}$ s)	DT ( $10^{-19}$ s)	FK+DT ( $10^{-19}$ s)
10	<b>6,6873</b>	<b>2,5039</b>	<b>2,5039</b>
15	<b>6,9893</b>	<b>2,5039</b>	<b>2,5039</b>
20	<b>4,4672</b>	<b>2,5039</b>	<b>2,5039</b>
25	<b>3,9201</b>	<b>2,5039</b>	<b>2,5039</b>
30	<b>2,5820</b>	<b>2,5039</b>	<b>2,5039</b>
35	<b>1,2910</b>	<b>2,5039</b>	<b>2,5039</b>

## 5 Conclusão

O filtro de Kalman estendido mostrou ser eficaz na filtragem (*denoising*) do sinal de ultrassom possibilitando maior precisão na estimação do tempo de trânsito em cenários com baixo SNR. A partir dos resultados de simulação foi observado um bom desempenho do filtro de Kalman para realizar a operação de filtragem e posteriormente a estimação do ToF.

A partir dos resultados experimentais, foi observado que o ruído do meio afeta a técnica de detecção de limar apresentando um bom desempenho a partir de um SNR de 60 dB. Já a técnica de diferença de fase teve um desempenho aceitável a partir de um SNR de 20 dB. Avaliando-se estes resultados, foi observado que a técnica proposta de *denoising* por filtro de Kalman em conjunto com a técnica de diferença de fase torna-se robusta para baixos valores de SNR. Este resultado valida a técnica proposta a qual pode ser utilizada em ambientes com altos níveis de ruído, tais como ruídos industriais.

Como trabalho futuro, pretende-se realizar a modificação do modelo de espaço de estados para realizar a rejeição do ruído em conjunto com a estimação indireta do ToF a partir da medição da amplitude do sinal.

## Agradecimentos

Ao Laboratório de Eficiência Energética e Hidráulica em Saneamento (LENHS) da UFPB pela disponibilização do túnel de vento para realização dos experimentos.

## Referências bibliográficas

- Angelis, A. D., Moschitta, A., Carbone, P., Ultrasound Based Positioning Using Time of Flight Measurements and Crosstalk Mitigation. IEEE International Instrumentation and Measurement Technology Conference, pp. 1865-1870, 2015.
- Angrisani, L., Baccigalupi A., Moriello R. S., 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.
- AMRI, K., WIRANATA, L. F., SUPRIJANTO, KURNIADI, D., Fluid Flow Velocity Measurement Using Dual-Ultrasonic Transducer by

Means of Simultaneously Transit Time Method. International Conference on Instrumentation, Communications, Information Technology, and Biomedical Engineering, Nov, 2015.

- Dejhan, K., Yimmun, S., Trirat, A., Cheevasuvit, F. TMS 320C31-based narrow-band noise rejection Kalman filter implementation. IEEE International Conference on Industrial Technology. Vol. 1, pp: 332-336, 2002.
- Lucena, D. C.; Freire R. C. S; Villanueva, J. M. M., Benedito, L. and Farias, W. P. Design considerations for ultrasonic signals acquisition. 2nd International Symposium on Instrumentation Systems, Circuits and Transducers (INSCIT), 2017.
- Postalçoglu S.; Erkan K.; Bolat E., D. Comparison of Kalman Filter and Wavelet Filter for Denoising. International Conference on Neural Networks and Brain . Vol. 2, pp: 951-954, 2005.
- Salis C. I; Malissovas A. M.; Bizopoulos P. A.; Tzallas A. T.; Angelidis P. A.; Tsalikakis D. G. Denoising simulated EEG signals: A comparative study of EMD, wavelet transform and Kalman filter. 13th IEEE International Conference on Bio-Informatics and BioEngineering, pp: 1-4, 2013.
- Villanueva, J. M. M., Catunda, S. Y. C., Freire, R. C. S., Costa, M. M., Ingaroca, N. S. C., Wind Speed Measurement based on Time of Flight Estimations using Extended Kalman Filter. IEEE Instrumentation and Measurement Technology Conference, pp. 1182-1187, 2013.
- Ziarani, A. K., Konrad, A., A method of extraction of nonstationary sinusoids. Signal Processing, Vol 84, pp. 1323-1346, 2004.
- Zheng Y.; Chen S.; Tan W.; Kinnick R.; J. Greenleaf F. Detection of tissue harmonic motion induced by ultrasonic radiation focusing pulse-echo ultrasound and kalman filter. IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control. Year: 2007, Volume: 54, Issue: 2. pp: 290 – 300, 2007.
- Wallscheid, O.; Böcker, J. Fusion of direct and indirect temperature estimation techniques for permanent magnet synchronous motors. IEEE International Electric Machines and Drives Conference (IEMDC), pp: 1-8, 2017.