

## Avaliação de Incertezas na Estimação do Tempo de Trânsito Ultra-sônico para Medição da Velocidade do Vento

Juan M. Mauricio Villanueva<sup>1</sup>, Sebastian Y. C. Catunda<sup>2</sup>, Ricardo Tanscheit<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, Brasil, jmauricio12@gmail.com

<sup>2</sup>Universidade Federal do Maranhão, São Luis, Brasil, catunda@dee.ufma.br

<sup>3</sup>Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, Brasil, ricardo@dee.ufma.br

**Abstract:** In this paper, a procedure for uncertainty evaluation of the Time-of-Flight (ToF) data acquisition system for wind speed measurement is presented. The assessment of uncertainties contributions associated data acquisition system parameters (system clock resolution) and time of flight variance, which is a property of the signal and depends strongly on the signal-to-noise ratio (SNR). To illustrate the procedure for uncertainties evaluation a case study is presented.

**Palavras-chave:** Aquisição de dados, transdutores ultra-sônicos, Tempo de Trânsito (ToF), avaliação de incertezas, velocidade do vento.

### 1. INTRODUÇÃO

Nas últimas décadas, tecnologias ultra-sônicas têm apresentado aprimoramentos significativos na medição de parâmetros de fluidos (velocidade, fluxo, etc) e aplicações em processos industriais e científicos vem ganhando aceitação progressiva. O princípio de funcionamento destas técnicas estão baseados na medição do Tempo de Trânsito (ToF – *Time of Flight*), que consiste em medir o tempo de propagação da onda ultra-sônica transmitida entre o transdutor emissor e receptor [1]. Entre as principais técnicas que utilizam este princípio estão a Detecção de Limiar e da Diferença de Fase.

Estas técnicas de medição ultra-sônicas são muito utilizadas por serem técnicas simples de implementar e por não requererem necessariamente a transmissão contínua de ondas, podendo ser projetados para operar com um baixo consumo de energia, o que é conveniente, por exemplo, para aplicações no setor de energia eólica, para a monitoração da velocidade do vento em florestas, áreas desertas, localizações marítimas, etc, em que a energia local não é disponível.

Um importante aspecto no desenvolvimento de instrumentos de medição ultra-sônicos, está na estimação do ToF com suficiente exatidão, que depende das especificações de projeto do instrumento tais como: (a) resolução do relógio do sistema digital, (b) resolução do conversor A/D, que esta relacionado diretamente à relação sinal-ruído (SNR) e (c) tecnologia de transdutores ultra-sônicos utilizados [2].

Além destas considerações, e a fim de realizar a estimação do ToF de uma forma correta, devem ser realizados estudos para a avaliação dos principais tipos de contribuições de incertezas presentes no processo de medição.

Considerando-se os aspectos que influenciam a estimação do ToF (exatidão e incerteza), este artigo tem como objetivo apresentar um procedimento analítico para a avaliação das principais contribuições de incertezas (aleatórias), das técnicas de Detecção de Limiar (TH) e Diferença de Fase (PD), relacionando-os com o projeto do sistema de medição ultra-sônico digital para medição da velocidade do vento.

### 2. DEFINIÇÕES PRELIMINARES

Entre os principais procedimentos para a medição da velocidade do vento utilizando técnicas ultra-sônicas, destacam-se aquelas baseadas no método do tempo de trânsito. O método do tempo de trânsito baseia-se na medição do tempo de propagação de um sinal ultra-sônico entre um transdutor transmissor  $T_A$  e um transdutor receptor  $T_B$ , alinhados com um ângulo especificado à direção do vento, como ilustrado na Figura 1. Este tempo de propagação ultra-sônico é definido como o Tempo de Trânsito (ToF – *Time-of-Flight*) e é utilizado para a determinação da velocidade do fluido  $\vartheta$ , mediante as expressões que relacionam os tempos de propagação dos sinais ultra-sônicos com as velocidades de propagação [3].

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

em que:  $ToF$  é o tempo de trânsito,  $\vartheta$  é a velocidade do vento,  $L$  é a distância entre os transdutores,  $\theta$  é o ângulo entre a propagação do vento e a direção da linha dos transdutores,  $C$  é a velocidade do som no ar parado, que varia principalmente com a temperatura. A dependência de  $C$  com a temperatura  $T_K$  (em Kelvin) é dada por [4]:

$$C = 20.074 \sqrt{T_K} \quad (2)$$

Deste modo, com o propósito de medição do Tempo de Trânsito (ToF), a continuação apresentam-se sucintamente, os métodos de Detecção de Limiar e Diferença de Fase.

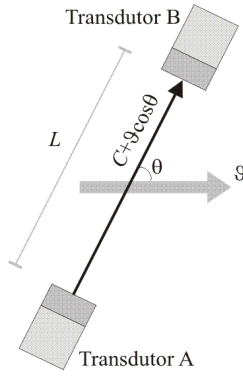


Figura 1. Configuração dos transdutores ultra-sônicos para medição da velocidade do vento.

### 2.1. Técnicas de Detecção de Limiar (TH)

Considerando-se a configuração dos transdutores ultra-sônicos da Figura 1, realiza-se a medição do ToF utilizando-se a técnica de detecção de limiar (TH – *Threshold Detection*). Este método consiste em transmitir um trem de ondas senoidais a partir do transdutor transmissor  $T_A$  e medir o tempo necessário para sua detecção (ToF) no transdutor receptor  $T_B$ , através da detecção de um nível de referência ou limiar, como ilustrado na Figura 2. Entretanto, o valor medido do ToF ( $t_{AB}^M$ ) não corresponde diretamente ao tempo de recepção, devido ao retardo imposto pela dinâmica dos transdutores. Conseqüentemente, o valor medido do tempo pode ser expresso como a soma do tempo de transmissão ( $t_{AB}$ ) com o tempo de detecção ( $t_{AB}^E$ ):

$$t_{AB}^M = t_{AB} + t_{AB}^E \quad (3)$$

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

$$v = \frac{1}{\cos \theta} \left( \frac{L}{t_{AB}^M - t_{AB}^E} - C \right) \quad (4)$$

### 2.2. Técnicas de Diferença de Fase (PD)

Para a configuração dos transdutores ultra-sônicos da Figura 1, a técnica da diferença de fase opera medindo a diferença de fase entre as ondas ultra-sônicas transmitidas e recebidas, como ilustrado na Figura 2. Para uma frequência de operação dos transdutores  $f$ , a fase instantânea no transmissor e receptor pode ser encontrada por  $\phi_{AB} = 2\pi f t_{AB}$ , e a velocidade do vento é dada por:

$$v = \frac{1}{\cos \theta} \left( \frac{2\pi f L}{\phi_{AB}} - C \right) \quad (5)$$

## 3. AVALIAÇÃO DAS COMPONENTES DE INCERTEZAS NA ESTIMAÇÃO DO TOF

Um aspecto importante do procedimento de medição da velocidade do vento utilizando técnicas ultra-sônicas, está na

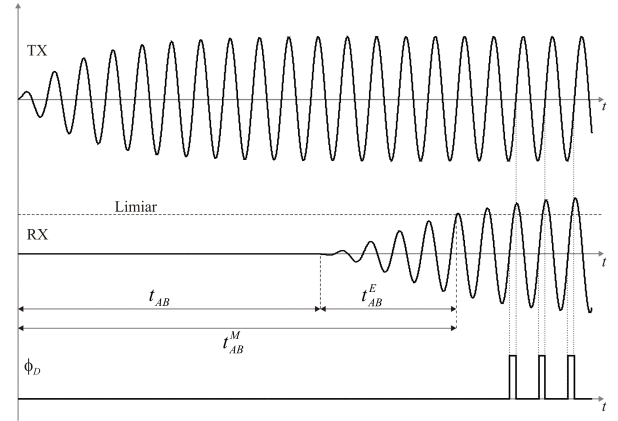


Figura 2. Medição do ToF utilizando a técnica de Detecção de Limiar (TH) e Diferença de Fase (PD).

estimação do ToF com alta exatidão e baixa incerteza. Entretanto, um problema típico relacionado com a estimação do ToF está no compromisso entre a resolução do relógio do sistema (*clock*) e a relação sinal a ruído (SNR). Este compromisso é particularmente dificultoso de ser alcançado, devido à atenuação do meio e reflexões. Deste modo a maneira de obter uma maior exatidão na estimação do ToF, consiste em identificar completamente as diferentes contribuições de incertezas e as relações com o sistema de aquisição ultra-sônico digital [5].

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

Sendo assim, em seguida, são analisadas e avaliadas as contribuições das incertezas devido ao ruído e ao efeito de quantização para as técnicas de TH e PD, respectivamente.

### 3.1. Incertezas devido ao ruído para a Técnica de TH

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

$$v(t) = v_m \sin(wt) + u_A \quad (6)$$

em que  $v_m$  é o nível máximo do sinal e  $w$  é a frequência do sinal ultra-sônico.

Para a avaliação da incerteza utilizando a técnica de detecção de limiar (TH), é possível definir que esta incerteza é proporcional a razão entre o nível de ruído aditivo,  $u_A$ , e a amplitude máxima do sinal no transdutor receptor,  $v_m$ .

$$u_{ToF_{TH}} \propto \frac{u_A}{v_m} \quad (7)$$

Em muitos casos práticos, a equação (7) pode ser aproximada por [5]:

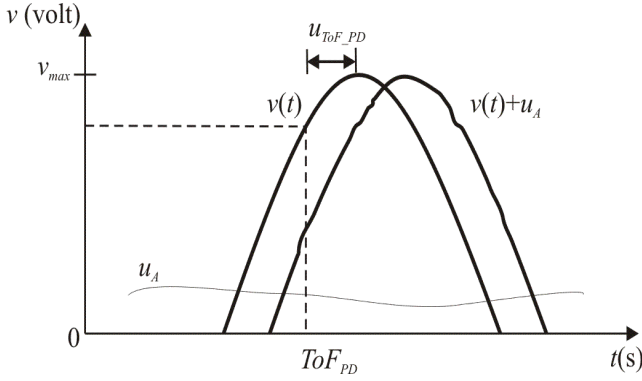


Figura 3. Influência do ruído na estimação do ToF.

$$u_{ToF_{TH}}^{ruído} = \frac{2 \cdot \alpha \cdot \tau}{\sqrt{2 \cdot SNR}} \quad (8)$$

em que:  $\alpha$  é o valor percentual do valor máximo ( $v_m$ ) utilizado para definir o nível de detecção de limiar ( $v_{TH} = \alpha \cdot v_m$ );  $\tau$  é o tempo de subida definido como a diferença de tempo quando a forma de onda alcança o 90 % e 10 % do valor final  $\tau = t_{90\%} - t_{10\%}$ ; e SNR é definido por:

$$SNR = \frac{v_m}{u_A} \quad (9)$$

sendo  $v_m$  o nível máximo do sinal e  $u_A$  o ruído aditivo Gaussiano.

As equações (7) e (8) mostram que a incerteza do ToF (devido ao ruído) utilizando a técnica de TH é proporcional ao desvio padrão do ruído e depende da interseção da forma de onda ultra-sônica recebida com o nível de limiar predefinido,  $v_{TH}$  [5].

### 3.2. Incertezas devido ao ruído para a Técnica de PD

Como explicado anteriormente, uma alta exatidão na estimação do ToF está relacionado a um valor alto do SNR, isto é, deve-se considerar o efeito do ruído aditivo ( $u_A$ ) sob a forma de onda do sinal ultra-sônico no transdutor receptor, que produz um deslocamento de sua posição real, como ilustrado na Figura 3. Este deslocamento de posição pode ser atribuído à contribuição da incerteza aleatória na medição da diferença de fase entre o sinal ultra-sônico transmitido e recebido.

Considerando-se que o espectro de frequência do sinal é de forma retangular ( $B$ ), a incerteza aleatória na estimação do ToF utilizando a técnica PD, pode ser encontrada por [6] e [7]:

$$u_{ToF_{PD}}^{ruído} \approx \frac{SNR}{1,8 v_m (BE)^{1/2}} \quad (10)$$

em que:  $E$  é a energia do sinal  $v(t)$ ,  $B$  é a largura de banda do sinal ( $B = f/2$ ),  $v_m$  é o valor máximo do sinal e SNR a relação sinal-ruído.

A energia do sinal pode ser calculada por:

$$E = \int_{-\infty}^{\infty} v(t)^2 dt \quad (11)$$

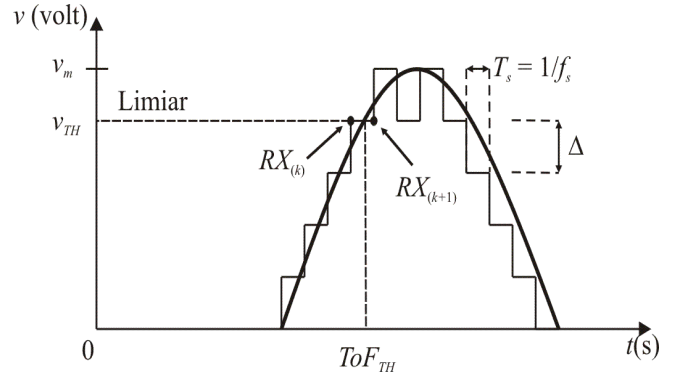


Figura 4. Aquisição digital de dados do sinal ultra-sônico no transdutor receptor.

em que:  $v(t)$  é o sinal transmitido.

### 3.3. Incertezas devido ao efeito de quantização para a Técnica de TH

A influência de incertezas aleatórias na medição do ToF se deve principalmente à taxa de amostragem finita no sistema de aquisição de dados das ondas ultra-sônicas, isto é, restrições na frequência do relógio do sistema. Este efeito introduz incertezas devido à quantização na estimação do ToF, que podem ser analiticamente determinados como função da frequência do relógio do sistema [5].

Para a avaliação da incerteza aleatória para a técnica de TH, considera-se um sistema de aquisição de dados no transdutor ultra-sônico receptor, cujo conversor analógico-digital (A/D) tem uma frequência de amostragem  $f_s$  e resolução de R bits. A representação da amostragem do sinal é ilustrada na Figura 4.

De acordo com a amostragem do sinal ultra-sônico, a determinação do ToF no domínio de tempo discreto, para a técnica de TH é expresso da seguinte forma:

$$ToF_{TH} = kT_s + u_{ToF}^{quantização} \quad (12)$$

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

O efeito da quantização é modelado por um ruído aditivo, com distribuição uniforme [8],

$$u_{ToF_{PD}}^{quantização} \subset [-T_s/2; T_s/2] \quad (13)$$

cujo desvio padrão é definido por:

$$\sigma = \frac{T_s}{\sqrt{12}} \quad (14)$$

### 3.4. Incerteza devido ao efeito de quantização para a técnica de PD

Para a estimação do ToF pela técnica da diferença de fase (PD), considera-se que as ondas ultra-sônicas transmitidas (TX) e recebidas (RX) são armazenadas através de um sistema de aquisição digital de sinais. Em seguida, realiza-se

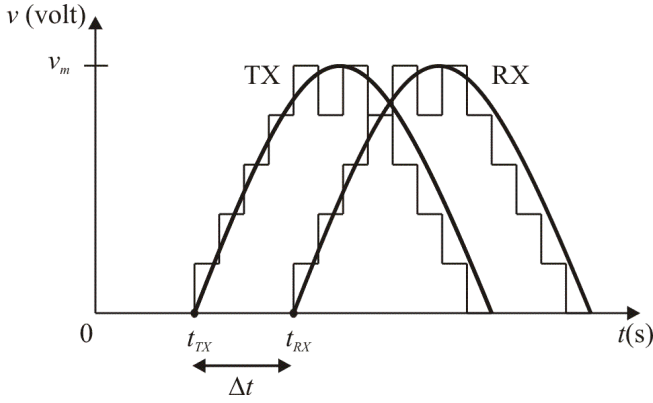


Figura 5. Aquisição digital dos sinais de transmissão (TX) e recepção (RX) para medição da diferença de tempo  $\Delta t = t_{RX} - t_{TX}$ .

a medição da diferença de tempo,  $\Delta t$ , entre os sinais TX e RX, como ilustrado na Figura 5, em que  $t_{TX}$  e  $t_{RX}$  são as medições de tempo quando os sinais atravessam o nível de cruzamento por zero.

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

$$u_{TX} \subset [-T_s/2; T_s/2] \text{ e } u_{RX} \subset [-T_s/2; T_s/2] \quad (15)$$

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

$$u_{\Delta t} = u_{ITX} + u_{IRX} \quad (16)$$

$$u_{ToF_{PD}}^{quantização} \subset [-T_s; T_s] \quad (17)$$

em que  $T_s$  é o período de amostragem.

#### 4. ESTUDO DE CASO

Nesta seção apresenta-se um estudo de caso de um sistema de medição digital do tempo de trânsito ultra-sônico para um instrumento de medição da velocidade do vento.

Este sistema utiliza a configuração dos transdutores ultra-sônicos como ilustrado na Figura 1, cujos sinais no transdutor transmissor e receptor são coletados através de um sistema de aquisição digital de dados. Na Tabela 1 descrevem-se as especificações do sistema de medição.

Tabela 1. Descrição das especificações do sistema

Componente	Descrição
Frequência de operação dos transdutores ultra-sônicos	$f = 40 \text{ kHz}$
Frequência do relógio (clock)	$f_s = 50 \text{ MHz}$
Nível máximo no transdutor receptor	$v_m = 1 \text{ volt}$
Nível de detecção do limiar	$v_{TH} = 0,75 \text{ volt}$

##### 4.1. Avaliação de incertezas devido ao ruído

Para operação deste sistema de medição, considera-se que o transdutor transmissor emite um trem de ondas ultra-sônicas com frequência de 40 kHz por um intervalo de

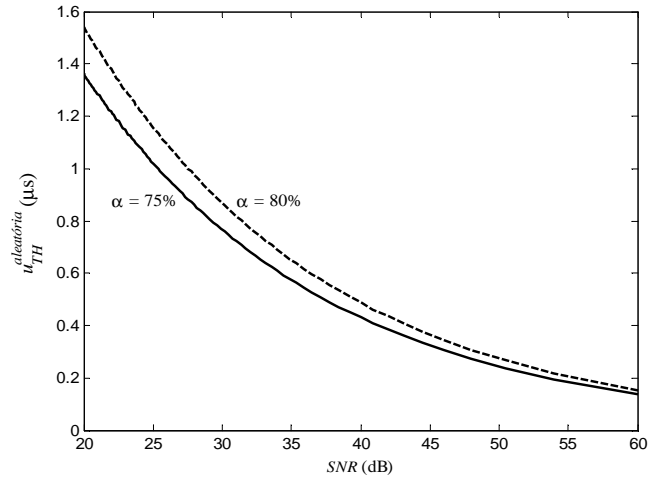


Figura 6. Variação da incerteza aleatória para a técnica de TH para níveis de detecção de 75 % e 80 % de  $v_m$ .

tempo de 1 ms, sendo um total de 40 ondas emitidas. A partir desta consideração, em seguida, determinam-se as contribuições das incertezas devido ao ruído e ao efeito de quantização para as técnicas de TH e PD, respectivamente.

A contribuição da incerteza aleatória do ToF utilizando-se a técnica de TH, é dada a partir de (8). Inicialmente determinam-se os valores de  $t_{90\%}$ ,  $t_{10\%}$  e  $\tau$ :

$$t_{90\%} = \frac{1}{2\pi f} \arcsin(0,9) = 4,45 \mu s \quad (18)$$

$$t_{10\%} = \frac{1}{2\pi f} \arcsin(0,1) = 0,39 \mu s \quad (19)$$

$$\tau = t_{90\%} - t_{10\%} = 4,06 \mu s \quad (20)$$

Na Figura 6, ilustra-se a variação da incerteza aleatória para a técnica de TH (Eq. 8), considerando-se um SNR no intervalo de 20 a 60 dB,  $\tau = 4,06 \mu s$ , para níveis de detecção de limiar de  $\alpha = 75\%$  e  $80\%$  de  $v_m$ . Para SNR de 40 dB, e um nível de detecção de limiar de 75 %, tem-se que a incerteza aleatória pela técnica de TH é de  $0,43 \mu s$ .

Para a determinação da contribuição da incerteza aleatória do ToF utilizando-se a técnica de PD, utiliza-se (10), em que inicialmente determina-se a energia do sinal  $E$ , para o trem de ondas contidas em 1ms de transmissão (40 períodos de onda), dada por (11):

$$E = \int_0^{40T} (v_{\max} \sin(2\pi ft))^2 dt = 0,5 \text{ m (volt}^2 \cdot \text{s)} \quad (21)$$

Na Figura 7, ilustra-se a variação da incerteza aleatória para a técnica de PD, considerando-se que o SNR varia no intervalo de 20 a 60 dB,  $B = f_s = 20 \text{ kHz}$ , e  $v_m = 1 \text{ volt}$ . Para SNR de 40 dB, tem-se que a incerteza aleatória pela técnica de PD é de  $0,1 \mu s$ .

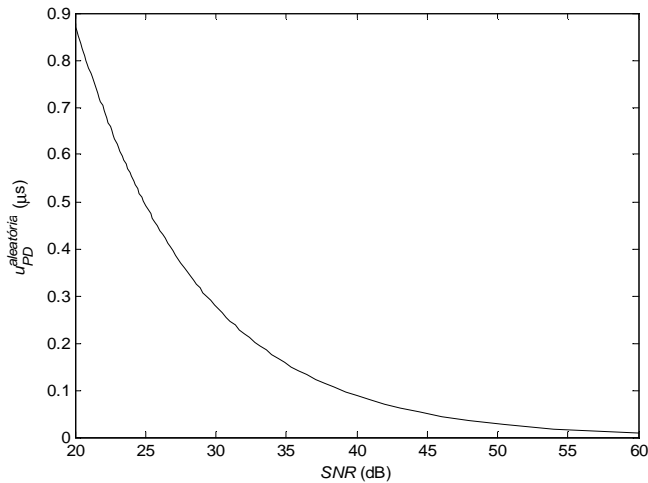


Figura 7. Variação da incerteza aleatória para a técnica de PD.

#### 4.2. Avaliação de incertezas devido ao efeito de quantização

A contribuição da incerteza aleatória devido ao efeito de quantização do ToF, utilizando-se a técnica de TH, é determinada a partir de (13):

$$u_{TH}^{quantização} \subset [-T_s / 2; T_s / 2] = [-0,01\mu s; 0,01\mu s] \quad (22)$$

A contribuição da incerteza aleatória devido ao efeito de quantização do ToF, utilizando-se a técnica de PD, é determinada a partir de (17):

$$u_{PD}^{quantização} \subset [-T_s; T_s] = [-0,02\mu s; 0,02\mu s] \quad (23)$$

### 5. CONCLUSÕES

Sistemas de aquisição para sinais ultra-sônicas permitem um processamento digital de forma fácil e flexível. Entretanto, a conversão de sinais ao domínio digital introduz incertezas na estimação do Tempo de Trânsito (ToF), as quais devem ser consideradas no processo de cálculo, a fim de não fornecer sobre-estimativas no resultado de medição do ToF.

Assim também, a partir dos resultados de simulação, pode-se concluir que a influência da incerteza aleatória para técnica de TH é maior que a influência da incerteza aleatória

para a técnica de PD, para a mesma faixa de variação do SNR.

Observou-se que a frequência do relógio do sistema têm uma influência direta na estimação das incertezas devido ao efeito da quantização para a estimação do ToF, isto é, a maior resolução do relógio do sistema menor influência das incerteza de quantização.

Assim também, foi verificado que com o aumento do SNR as incertezas devido a ruído diminuem, sendo esta uma relação direta com a frequência de amostragem do conversor A/D.

### AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à CAPES, CNPq / PADCT e FAPEMA, pelo apoio e incentivo recebido durante o período desta pesquisa.

### REFERÊNCIAS

- [1] P. Hauptmann, N. Hoppe and A. Puettmet, "Ultrasonic Sensors for Process Industry", IEEE Ultrasonic Symposium, Vol. 1, PP. 369-378, 2001.
- [2] T. Yeh, P.I. Espina, S.A and Osella, "An Intelligent Ultrasonic Flow Meter for Improved Flow Measurement and Flow Calibration Facility", IEEE Instrumentation and Measurement Technology Conference, Vol. 3, PP. 1741-1746, 2001.
- [3] R. Pallas-Areny and J. Webster, "Sensors and Signal Conditioning", 2nd Edition, John Wiley and Sons, 2001.
- [4] J.C. Kaimal and J.A. Businger, "A Continuous Wave Sonic Anemometer Thermometer", Journal of Applied Meteorology, Vol. 2, N° 1, PP. 156-164, 1963.
- [5] G. Andria, F. Attivissimo and N. Giaquinto, "Digital Signal Processing Techniques for Accurate Ultrasonic Sensor Measurement", Measurement, Vol. 30, pp. 105-114, 2001.
- [6] J. Minkoff, "Signal Processing Fundamentals and Applications for Communications and Sensing Systems", Artech House, 2001.
- [7] L. Svilainis and V. Dumbrava, "Sampling Parameters Optimization of the Data Acquisition for Ultrasonic Time of Flight Measurement", IEEE Information Technology Interfaces, pp. 785-790, 2008.
- [8] L. KOLLAR, "Bias of Mean Value Square Value Measurement based on Quantized Data", IEEE Trans. on Inst. and Measurement, Vol. 43, N° 5, pp. 733-739, 1994.