



Universidade Federal da Paraíba
Centro de Energias Alternativas e Renováveis
Departamento de Engenharia Elétrica

Felipe Augusto Oliveira dos Santos

Trabalho de Conclusão de Curso

Análises de Sensibilidade e Propagação de Incertezas na Estimação da Velocidade do Vento Utilizando Transdutores Ultrassônicos

João Pessoa - PB

Setembro de 2019

Felipe Augusto Oliveira dos Santos

Trabalho de Conclusão de Curso

Análises de Sensibilidade e Propagação de Incertezas na Estimação da Velocidade do Vento Utilizando Transdutores Ultrassônicos

*Trabalho de Conclusão de Curso submetido à
Coordenação de Curso de Graduação de En-
genharia Elétrica da Universidade Federal da
Paraíba como parte dos requisitos necessários
para a obtenção do grau de Bacharel em En-
genharia Elétrica.*

Área de Concentração: Controle e Automação.

Orientador: Prof. Dr. Juan Moises Mauricio Villanueva

João Pessoa - PB

Setembro de 2019

Catálogo na publicação
Seção de Catalogação e Classificação

S237a Santos, Felipe Augusto Oliveira Dos.

Análises de Sensibilidade e Propagação de Incertezas na
Estimação da Velocidade do Vento Utilizando
Transdutores Ultrassônicos / Felipe Augusto Oliveira
Dos Santos. - João Pessoa, 2019.

54 f. : il.

Orientação: Juan Moises Mauricio Villanueva.
Monografia (Graduação) - UFPB/CEAR.

1. Transdutores Ultrassônicos. 2. Medição da Velocidade
do Vento. 3. Tempo de Trânsito Ultrassônico. 4. Análise
de Sensibilidade. 5. Análise de Incertezas. I.
Villanueva, Juan Moises Mauricio. II. Título.

UFPB/BC

Felipe Augusto Oliveira dos Santos

Trabalho de Conclusão de Curso

Análises de Sensibilidade e Propagação de Incertezas na Estimação da Velocidade do Vento Utilizando Transdutores Ultrassônicos

*Trabalho de Conclusão de Curso submetido à
Coordenação de Curso de Graduação de En-
genharia Elétrica da Universidade Federal da
Paraíba como parte dos requisitos necessários
para a obtenção do grau de Bacharel em En-
genharia Elétrica.*

Trabalho aprovado em: João Pessoa - PB, / /

Dr. Juan M. Mauricio Villanueva,
UFPB
Professor Orientador

Dr. Alexsandro J. Virgínio dos
Santos, UFPB
Avaliador Interno

Dr. Cícero da Rocha Souto, UFPB
Avaliador Interno

MSc. José Neves Cruz, IFPE
Avaliador Externo

Dedico este trabalho ao meu pai que apesar de não estar mais entre nós, sempre permanecerá presente em minha trajetória.

Agradecimentos

Agradeço primeiramente aos meus pais, Núbia Maria e Gratuliano dos Santos, ao meu irmão, Igor Oliveira e a minha namorada, Paula Simões por todo o apoio dado. Com muito amor, esforço e união, permitiram que nada, nunca, me faltasse. Este trabalho só existe por causa deles.

Agradeço ao meu orientador Dr. Juan Villanueva, por esses anos de ensinamentos, apoio e mentoria, além da possibilidade de trabalhar junto à ele e poder aprender como um profissional competente deve servir de exemplo para com seus alunos, orientandos e colegas de profissão.

Agradeço aos amigos e colegas que estiveram presentes nos mais diversos momentos da minha graduação, e contribuíram assim, fortemente com este trabalho: Juliano Ronconi, Thiago Machado, Igor Vaz, Jonyelison Morais, Filipe Vidal, Bruno Osório, Matheus Farias, Isabelle Pessoa, Fábio Lisboa, João Salvio, Álvaro W., Isaac Emmanuel, Felipe Jubert, Márcio Roberto, Matheus Silveira e tantos outros. Foram muitos momentos de experiências boas e ruins e episódios vividos que jamais esquecerei e me ajudaram a ser a pessoa que sou hoje.

Amigos de intercâmbio que foram peça chave no meu amadurecimento e na minha primeira experiência morando em outro país, onde saí da minha zona de conforto e me aventurei em outro continente com intuito de obter uma maior bagagem profissional e pessoal: Gabriel Dias, Ronaldo Trento, Guilherme Monteiro, Marcos Rocha, Túlio Seike, Cassiano Sugiyama, Bernardo, Nataniel, Gusso, Nich e tantos outros. Obrigado pela melhor experiência da minha graduação.

Por fim, agradeço aos professores Carlos Alberto de Souza Filho, Nady Rocha e Waslon Terllizzie Araújo Lopes por ter tido a gratificação de estudar com eles, e assim, observar como bons professores realizam o nobre trabalho de ensinar e passar adiante o conhecimento adquirido.

“N3o existe um caminho para a felicidade. A felicidade 3 o caminho.”

Mahatma Gandhi

Resumo

A medição da velocidade do vento é uma quantidade usada em sistemas de energia eólica, testes aerodinâmicos, medição de vazão em plantas industriais e assim por diante. Anemômetros ultrassônicos são usados nestas aplicações quando alta precisão e tempos de resposta mais rápidos são necessários. O princípio da medição da velocidade do vento usando transdutores ultrassônicos é baseado na medição do tempo de trânsito ultrassônico (ToF), que é definido como tempo medido desde a transmissão de uma onda ultrassônica no transdutor emissor até a detecção no transdutor receptor, dado uma configuração com pares de transdutores, sendo um receptor e um emissor. No entanto, a temperatura ambiente influencia as variações da velocidade do som, o que, por sua vez, modifica a estimativa de ToF. Para este cenário, este trabalho tem como um dos objetivos realizar a análise da sensibilidade da velocidade do vento e do tempo de trânsito ultrassônico (ToF) considerando variações da temperatura no ambiente de medição. Foi utilizada uma configuração de medição da velocidade do vento com um par de transdutores ultrassônico, obtendo-se resultados de simulação de sensibilidades para velocidades de até 20 m/s e temperaturas até 200 °C. Além disso, as atividades desenvolvidas neste projeto também visam a avaliação das incertezas por meio do método de simulação Monte Carlo (SMC) no processo de medição da velocidade do vento. Para tal finalidade, inicialmente foi montado um modelo computacional para a estimação do tempo de trânsito ultrassônico. A estimação do tempo de trânsito ultrassônico encontra-se influenciada por fontes de ruídos de diferentes naturezas, como exemplo: elétrico, térmico, ruídos aditivos e multiplicativos. Portanto, este trabalho também teve como objetivo avaliar e mensurar as incertezas quando consideradas diferentes tipos de distribuições do ruído elétrico aditivo presente no meio de medição. Resultados de simulação a partir da construção do modelo computacional do sistema par ultrassônico transmissor/receptor usada para a medição da velocidade do vento são apresentados, assim como os resultados da avaliação de incertezas utilizando o método de simulação Monte Carlo considerando as influências do ruído do tipo Gaussiano, Triangular e Uniforme.

Palavras-chave: Transdutores Ultrassônicos. Anemômetros Ultrassônicos. Tempo de Trânsito Ultrassônico. Simulação Monte Carlo. Análise de Incertezas. Análise de Sensibilidade. Medição da Velocidade do Vento.

Abstract

Wind speed measurement is a quantity used in wind energy systems, aerodynamic tests, flow measurement in industrial plants and so on. Ultrasonic anemometers are used in these applications when high accuracy and faster response times are required. The principle of wind speed measurement using ultrasonic transducers is based on the ultrasonic time of flight (ToF) measurement, which is defined as the measurement time from the transmission of an ultrasonic wave on the emitting transducer to the detection on the receiving transducer, given a configuration with a pair of transducers, one receiver and one emitter. However, ambient temperature influences variations in the speed of sound, which in turn modifies the ToF estimation. For this scenario, this work aims to perform the sensitivity analysis of wind speed and ultrasonic time of flight (ToF) considering temperature variations in the measurement environment. A wind speed measurement configuration was used with a pair of ultrasonic transducers, obtaining sensitivity simulation results for speeds up to 20 m/s and temperatures up to 200 °C. In addition, the activities developed in this project also aimed to evaluate the uncertainties through the Monte Carlo simulation method (SMC) in the wind speed measurement process. In order to evaluate these uncertainties, a computational model was initially set up for the estimation of the ultrasonic time of flight. Its estimation is influenced by noise sources of different natures, such as electric, thermal, additive and multiplicative. Therefore, this work also had as objective to evaluate and measure uncertainties when considering different types of distributions of additive noise present in the measurement medium. Simulation results from the construction of the computational model of the ultrasonic transmitter/receiver system used to measure the wind speed presented, as well as the uncertainty evaluation results using the Monte Carlo simulation method considering the Gaussian noise influences, Triangular and Uniform.

Keywords: Ultrasonic Waves. Ultrasonic Transducers. Ultrasonic Anemometry. Ultrasonic Time of Flight. Monte Carlo Simulation. Propagation of Uncertainty. Sensitivity Analysis. Wind Speed Measurement.

Lista de ilustrações

Figura 1 – Ilustração da Propagação de Ondas Ultrassônicas Longitudinais	19
Figura 2 – Ilustração da Propagação de Ondas Ultrassônicas Transversais	20
Figura 3 – Ilustração do efeito Piezoelétrico	21
Figura 4 – Ilustração de um Anemômetro Ultrassônico Comercial	23
Figura 5 – Medição de Velocidade de Fluidos Baseado no Efeito Doppler	25
Figura 6 – Configuração para Medição de Velocidade de Fluidos Baseado no Mé- todo do Tempo de Trânsito	26
Figura 7 – Método da Diferença de Fase (PD)	27
Figura 8 – Ilustração da Detecção da Recepção de uma Onda Ultrassônica	28
Figura 9 – Técnica de Detecção de Limiar	29
Figura 10 – Desvio da Sensibilidade ao Longo da Faixa de Operação de um Sensor	32
Figura 11 – Efeitos da Perturbação: desvio de zero mais desvio de sensibilidade . . .	33
Figura 12 – Configuração de Medição	35
Figura 13 – Parametrização do modelo	37
Figura 14 – Diagrama de Blocos do Modelo de Medição para Transdutores Ultras- sônico	37
Figura 15 – Fluxograma para a estimação das FDP's do ToF para diferentes FDP's de ruído aditivo	40
Figura 16 – Distribuição Gaussiana	41
Figura 17 – Distribuição Triangular	41
Figura 18 – Distribuição Uniforme	42
Figura 19 – Sensibilidade como Função da Temperatura do Sensor	43
Figura 20 – Estimação da Velocidade do Vento baseada na Análise de Sensibilidade para $v = 10$ m/s	46
Figura 21 – Estimações da Velocidade do Vento baseadas na Sensibilidade para v $= 5, 10, 15$ e 20 m/s	48
Figura 22 – SNR por Desvio Padrão	50
Figura 23 – FDP do ToF usando ruído Gaussiano com $\sigma=0.3$ mV	50
Figura 24 – FDP do ToF usando ruído Uniforme com $\sigma=0.3$ mV	51
Figura 25 – FDP do ToF usando ruído Triangular com $\sigma=0.3$ mV	51

Lista de tabelas

Tabela 1 – Limite de variações na velocidade do vento devido à sensibilidade . . .	47
--	----

Lista de abreviaturas e siglas

ToF	Time of Flight
GUM	Guia de Avaliação e Expressão de Incertezas em Sistemas de Medição
SMC	Método de Simulação de Monte Carlo
FDP	Função Densidade de Probabilidade
SI	Sistema Internacional de Unidades
C	Velocidade do Som
S	Sensibilidade
SNR	Relação Sinal-Ruído
A	Amplitude
dB	Decibéis
T	Temperatura
L	Distância entre os Transdutores Ultrassônicos
M	Número de Simulações
P	Potência
TX	Transdutor Transmissor
RX	Transdutor Receptor
V	Tensão Elétrica
TH	Detecção de Limiar
PD	Diferença de Fase

Lista de símbolos

ϑ	Velocidade do Vento
	Ângulo entre a direção da velocidade do vento e os transdutores ultras- sônicos
σ	Desvio padrão
η	Ruído elétrico aditivo aleatório
∂	Derivada Parcial
ϕ	Fase instantânea
t_{AB}	Tempo de trânsito
t_M	Tempo medido com o método do limiar
t_E	Tempo eletrônico
T_s	Temperatura do Sensor
f	Frequência
f_D	Diferença da frequência devido ao Efeito Doppler

Sumário

1	INTRODUÇÃO	14
1.1	Objetivos Gerais	16
1.1.1	Objetivos Específicos	17
1.2	Organização do Trabalho	17
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	18
2.1	Ondas Sonoras	18
2.2	Propagação das Ondas Ultrassônicas	19
2.3	Transdutores Ultrassônicos	20
2.4	Anemometria Ultrassônica	21
2.5	Técnicas de Medição da Velocidade do Vento Utilizando Anemômetros Ultrassônicos	23
2.5.1	Efeito Doppler Ultrassônico	24
2.5.2	Tempo de Trânsito Ultrassônico	25
2.6	Guia de Avaliação e Expressão de Incertezas em Sistemas de Medição (GUM)	29
2.7	Sensibilidade	31
3	MATERIAIS E MÉTODOS	34
3.1	Configuração de Medição da Velocidade do Vento Utilizando Transdutores Ultrassônicos	34
3.2	Método de Simulação Monte Carlo para Estimação do ToF	38
3.3	Análise de Sensibilidade na Medição da Velocidade do Vento	42
4	RESULTADOS	45
4.1	Estimação da Velocidade do Vento baseada na Análise de Sensibilidade	45
4.2	Determinação da FDP do ToF para Aplicações na Medição da Velocidade do Vento	47
5	CONCLUSÃO	52
	Bibliografia	53

1 INTRODUÇÃO

A medição da velocidade dos ventos encontra uma gama ampla de aplicações em diversas áreas da ciência e engenharia, por exemplo, em projetos de parques eólicos torna-se importante observar o potencial dos ventos da região durante um tempo prolongado, erros nessa previsão podem ter enorme efeito sobre a energia produzida, bem como a rentabilidade do negócio; turbinas eólicas precisam ser compensadas de acordo com o vento, de maneira que as pás controladas garantam máxima eficiência; na meteorologia de aviação, o conhecimento exato das condições de ventos é essencial para a segurança das aterrissagens e decolagens entre outras aplicações.

Para se aferir a velocidade do vento são utilizados dispositivos conhecidos como anemômetros. Tais instrumentos realizam essa medição baseados em diferentes princípios de funcionamento. Os mais conhecidos são: o rotacional, termoelétrico e ultrassônico.

O anemômetro de rotação é constituído de copos ou hélices que são fixados a um eixo que permite sua rotação, seja na posição horizontal ou vertical. Assim, a velocidade do vento é obtida ao se avaliar a velocidade de rotação das hélices. Esta forma de medição não permite a determinação do sentido do vento, apenas a sua velocidade em módulo. Este tipo de equipamento é recomendado para a aferição de velocidades medias ou altas, já que existe uma inercia para que o mecanismo entre em funcionamento (HARTLEY, 1951). Devido ao fato desse tipo de anemômetro ser muito dependente de sua estrutura mecânica, existem alguns problemas em seu funcionamento, que são relatados no trabalho de Kaganov e Yaglom (1976), como a não linearidade na resposta e a influencia de ventos verticais nas medidas.

Já o anemômetro termoelétrico, também conhecido como anemômetro a fio quente, é baseado no aquecimento de um condutor elétrico que fica exposto ao vento a ser medido. Então, é avaliada eletronicamente a perda de calor do condutor devido à passagem do vento, aferindo a temperatura do condutor e do ambiente. Assim, mede-se a variação da corrente aplicada no condutor para que sua temperatura seja mantida constante. Este método de medição possui uma boa resposta para velocidades baixas e ventos turbulentos, contudo, por ser frágil, requer uma manutenção periódica ocasionada por possíveis partículas que possam ficar depositadas sobre o condutor, alterando assim a sua resposta.

Os anemômetros ultrassônicos medem a velocidade e a direção do vento em uma, duas ou três dimensões, com uma qualidade superior das estimações (resolução e frequência de medição). Por exemplo, em sistemas de energias renováveis com fonte eólica, são usados anemômetros ultrassônicos quando os requerimentos do projeto precisam da medição da velocidade do vento com alta exatidão e baixo tempo de resposta, com capacidade

para coletar picos ou rajadas de vento, assim como operação em ambientes extremos, desse modo, tais anemômetros tornam-se a melhor alternativa devido a sua maior exatidão, tempo de resposta consideravelmente menor que os demais e manutenção mínima em operação. No entanto, estes sistemas requerem a implementação de algoritmos baseados em técnicas de processamento de sinais, aumentando a complexidade do projeto. Sendo assim, este trabalho de conclusão de curso, irá abordar o estudo e análise dos anemômetros ultrassônicos para medição da velocidade do vento.

O princípio de operação dos transdutores ultrassônicos baseia-se na estimação do tempo de trânsito ultrassônico (ToF , *Time-of-Flight*), que é o tempo de viagem de uma onda ultrassônica, medido como o tempo decorrido a partir da emissão da onda até a detecção (considerando um par de sensores ultrassônicos transmissor-receptor) (VILLANUEVA et al., 2009). Para atender as especificações desses tipos de aplicações devem ser projetados sistemas de instrumentação baseados em transdutores ultrassônicos que incluam além do aprimoramento no projeto da instrumentação eletrônica, e os algoritmos de estimação do ToF , uma modelagem da propagação das ondas ultrassônicas no ambiente de medição a qual considere aspectos como atenuação do meio, ruído aditivo e multiplicativo, configuração de medição, posicionamento dos transdutores, etc.

A estimativa do tempo de trânsito (ToF) se torna complexo quando consideramos a influência de ruídos do meio que podem ser providas de diversas naturezas, tais como: ruídos elétricos, ruídos aditivos e multiplicativos, ruídos térmicos, etc. Assim, a influência do ruído na estimação do ToF afeta diretamente a exatidão da estimação da velocidade do vento. Dessa forma, no projeto de sistemas de medição onde se utilizam tais dispositivos, torna-se relevante a análise e propagação das incertezas no processo de medição e estimativa do ToF .

A incerteza de medição pode ser avaliada e expressa em diversas maneiras; duas delas são analisadas pelo Guia de Avaliação e Expressão de Incertezas em Sistemas de Medição (GUM) e o Método de Simulação de Monte Carlo (SMC). O GUM é utilizada para determinar a expressão matemática das incertezas no processo de medição. Entretanto, a mesma estabelece algumas limitações onde as incertezas devem advir de fontes aleatórias e com modelos de distribuição de probabilidades conhecidos. Além do mais, as incertezas sistemáticas devem ser eliminadas, compensadas ou nem mesmo existir. Por outro lado, o método de Simulação de Monte Carlo (SMC) nos permite construir uma função densidade de probabilidade (FDP) adquirindo os parâmetros estatísticos das variáveis estudadas. Adicionalmente, essas mesmas variáveis podem ter diferentes distribuições e não necessariamente apenas distribuições conhecidas. Com isso, torna-se possível realizar uma análise das incertezas com maior aprofundamento das influências das incertezas considerando-se diferentes tipos de distribuições, tais como: gaussiana, triangular e uniforme.

Além disso, a calibração e análise de sensibilidade deste tipo de instrumentos é um aspecto importante e constitui a base para a avaliação de desempenho na conversão da energia eletroacústica e melhoria das características dos transdutores ultrassônicos (FAN et al., 2014). A medição de sensibilidade pode ser entendida como uma medida da saída de variação do instrumento que ocorre quando há uma variação na quantidade de entrada. A sensibilidade é geralmente avaliada em laboratórios científicos de metrologia durante procedimentos de calibração de instrumentos e sob condições ambientais controladas (como temperatura, pressão, etc.). No entanto, essas características estáticas do instrumento de medição podem variar quando há variações nas condições ambientais, como a temperatura. Tais mudanças nas condições ambientais afetam os instrumentos de duas maneiras: conhecimento do *zero drift* ou viés e o desvio de sensibilidade. Desta forma, é de interesse na fase de projeto de sistemas de medição realizar a estimação da magnitude dessas mudanças, que são definidas como a sensibilidade à perturbações (MORRIS, 2001; BRIGNELL E WHITE, 1996). *Zero drift* descreve o efeito onde a leitura zero de um instrumento é modificada por uma mudança nas condições do ambiente. Isso também causa um erro sistemático que existe em todo o intervalo do instrumento. O viés é geralmente compensado por um processo de calibração. Por outro lado, a sensibilidade define a variação da sensibilidade do instrumento de medição em função da variação das condições ambientais que alteram o comportamento dos parâmetros do instrumento, com a conseqüente modificação do ganho da medição.

Dado este cenário, este trabalho tem o objetivo de construir um modelo para a medição da velocidade do vento baseado na estimativa do ToF ultrassônico. Neste modelo serão considerados modelos de ruídos com probabilidades de distribuição do tipo Gaussiana, Uniforme e Triangular. Para a avaliação das incertezas sobre a estimação do ToF e sua propagação para a medição da velocidade do vento, foi utilizado o Método de Simulação de Monte Carlo. Além de apresentar a modelagem dinâmica dos anemômetros ultrassônicos, também foi desenvolvido um procedimento para a análise de sensibilidade na estimativa de ToF e estimação da velocidade do vento, considerando variações na temperatura ambiente e velocidade do vento propriamente dito.

1.1 Objetivos Gerais

Este trabalho de conclusão de curso tem como objetivo geral analisar as relações entre as formas que podem ser atribuídas à função de densidade de probabilidade do ruído elétrico aditivo (fdp) e a estimação do tempo de trânsito ultrassônico (*ToF*), além de realizar a análise da sensibilidade da velocidade do vento e do tempo de trânsito ultrassônico considerando variações da temperatura no ambiente de medição.

1.1.1 Objetivos Específicos

- Modelar um sistema utilizando transdutores ultrassônicos a partir do princípio de medição da velocidade do vento com base na estimação do tempo de trânsito ultrassônico (*ToF*. – *Time-of-Flight*).
- Implementar a Simulação de Monte-Carlo para determinar as distribuições de probabilidade do tempo de trânsito considerando diversas formas de ruído elétrico aditivo.
- Analisar as distribuições do ruído e do tempo de trânsito para concluir a relação entre a velocidade e o tempo de trânsito ultrassônico.
- Identificar as relações entre a velocidade do vento e a temperatura no ambiente de medição a partir de variações na mesma com base na análise de sensibilidade.
- Observar a existência de variações na sensibilidade do tempo de trânsito ultrassônico (*ToF*) associada à variações de temperatura no meio de medição.

1.2 Organização do Trabalho

Além deste capítulo, o trabalho está organizado da seguinte forma:

- Capítulo 2: Fundamentação Teórica. Neste capítulo são apresentados os conceitos relevantes para o entendimento do trabalho.
- Capítulo 3: Materiais e Métodos. Neste capítulo são apresentadas as ferramentas utilizadas e a metodologia adotada no desenvolvimento do projeto.
- Capítulo 4: Resultados: Nesse capítulo são apresentados e discutidos os resultados do trabalho.
- Capítulo 5: Conclusão: Aqui são apresentadas as conclusões do trabalho.

Ao fim do documento são apresentadas as referências.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Este capítulo apresenta os principais conceitos e fundamentos envolvidos no trabalho proposto, no intuito de prover maior embasamento teórico ao que será explanado posteriormente. Serão aqui descritos os conceitos envolvendo ondas sonoras, a propagação das ondas ultrassônicas, transdutores ultrassônicos, a anemometria ultrassônica, definições e conceitos sobre as técnicas de medição da velocidade do vento utilizando tais anemômetros, além de uma explanação sobre o guia de avaliação de incertezas em sistemas de medição (GUM) e uma breve fundamentação teórica sobre sensibilidade.

2.1 Ondas Sonoras

A acústica é a parte da Física que estuda o som, bem como seus fenômenos e suas propriedades. Ela também é a responsável pelo estudo das ondas sonoras ultrassônicas.

As ondas sonoras são manifestações mecânicas, isto é, vibrações moleculares que, basicamente, vibram em duas direções com relação à sua propagação. Trata-se da perturbação de um meio deformável e elástico que, de forma geral, é caracterizada pelo transporte de energia e quantidade de movimento sem o transporte de matéria, propagando-se em todas as direções, desde que as propriedades elásticas do meio sejam iguais em todos os seus pontos (HALLIDAY, 1996).

Pode-se considerar que a onda sonora viaja através do meio impulsionada pelas forças que agem entre os átomos do meio. No momento em que uma onda alcança certa partícula de um determinado meio, ela movimenta essa partícula, transferindo-lhe energia cinética e energia potencial.

A vibração das moléculas do meio pode ser percebida em forma de som. Tais ondas sonoras podem ser classificadas quanto ao seu número de ciclos por unidade de tempo, isto é, sua frequência, basicamente, podem ser classificadas em três diferentes tipos ondas: as ondas sônicas, infrassônicas e ultrassônicas.

As ondas sônicas são aquelas perceptíveis ao ouvido humano e que se propagam com frequências entre 20 Hz a 20 kHz. As ondas infrassônicas são todas as ondas mecânicas que se propagam a uma frequência inferior a 20 Hz, portanto não perceptíveis ao ouvido humano. As ondas ultrassônicas, por sua vez, são ondas mecânicas que se difundem a uma frequência superior a 20 kHz, também não perceptíveis ao ouvido humano.

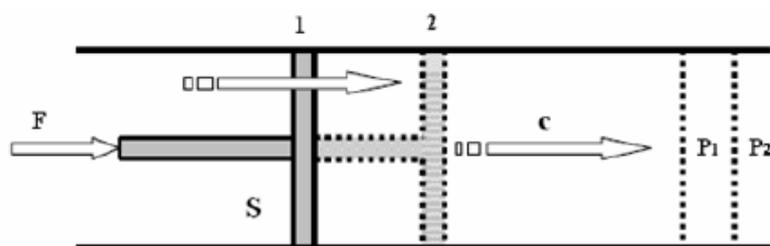
2.2 Propagação das Ondas Ultrassônicas

As ondas sonoras e ultrassônicas propagam-se através da matéria, de modo que ao alcançarem uma superfície de dois meios diferentes, parte da onda é refletida, parte é refratada e parte é absorvida. No momento em que as ondas ultrassônicas se propagam, assim como qualquer onda acústica, os átomos que a compõe são forçados a um movimento vibratório em torno de sua posição de equilíbrio. Existem vários padrões de vibração em um nível atômico, mas isto é irrelevante à acústica e aos testes com ondas ultrassônicas, tendo somente relevância em partículas que contenham muitos átomos (PINTO, 2006).

Quando as partículas de um meio se deslocam de sua posição de equilíbrio, sua força de restauração (força eletrostática) interna aumenta. Esta força de restauração interna entre as partículas, combinadas com sua inércia, conduzem ao movimento vibratório de um ambiente. As vibrações recebidas pelo meio, por sua vez, são transmitidas às partículas vizinhas, até que a energia mecânica disponível neste processo, que diminui a cada transmissão, não ocasione mais vibrações que sejam perceptíveis (SANTOS, 2005). A vibração das partículas limita-se ao redor de sua posição de equilíbrio, sem, no entanto, se deslocar como um todo, ou seja, apesar de vibrarem, as partículas não acompanham o deslocamento da propagação das ondas ultrassônicas.

Quanto à relação entre a direção da perturbação (vibração) e da propagação das ondas sonoras, pode-se fazer a seguinte classificação: ondas longitudinais e ondas transversais. As ondas longitudinais são ondas mecânicas em que o sentido de vibração das moléculas do meio em que se encontram é paralelo ao sentido de propagação da própria onda, isto é, nestas ondas, a vibração de suas moléculas está na mesma direção de sua propagação. Este tipo de onda pode ser gerado a partir do arranjo ilustrado na Figura 1.

Figura 1 – Ilustração da Propagação de Ondas Ultrassônicas Longitudinais



Fonte: Adaptada de (PINTO, 2006)

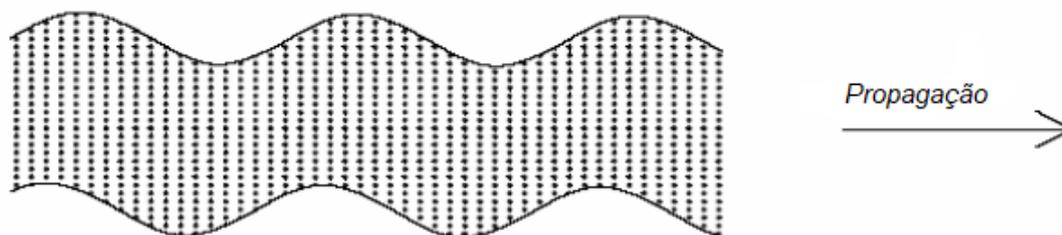
A partir da Figura 1, pode-se verificar que o pistão S é impulsionado através de uma força F, a qual o faz vibrar entre as posições 1 e 2. Este tipo de movimento acaba criando rarefações e compressões P1 e P2 contínuas que se propagam pelo fluido ao longo do tubo da figura 1, transportando energia pelo seu curso.

A transmissão de pressões no meio de uma massa fluida, conforme contida no ar-

ranjo ilustrado na Figura 1, não é instantânea, pois leva um determinado tempo para onda percorrer determinada distância, o que configura certa velocidade de deslocamento que é, na verdade, igual à velocidade C de propagação da onda sonora no respectivo meio, além de uma determinada temperatura. Assim, a velocidade do som no ar, a uma temperatura de 20 °C, é igual a 344 m/s ou 1238,4 km/h. Em virtude de seu efeito compressivo, as ondas longitudinais podem se propagar em meios que sejam sólidos, líquidos e gasosos (ALMEIDA, 2004).

As ondas ultrassônicas transversais são aquelas em que a direção de vibração das partículas que compõem o meio de propagação da referida onda é transversal, enquanto que a direção de propagação da onda é longitudinal, ou seja, as partículas deste tipo de onda sempre vibram em direção perpendicular ao sentido de propagação das ondas. As ondas do tipo transversais não se propagam em meios que sejam gasosos ou líquidos, pois em tais meios não há ligações mecânicas. Está ilustrado na Figura 2, um exemplo da propagação de uma onda do tipo transversal, pode-se observar nesta figura que as moléculas que compõem o meio de propagação vibram na direção vertical, enquanto a direção de propagação desta onda está no sentido horizontal.

Figura 2 – Ilustração da Propagação de Ondas Ultrassônicas Transversais



Fonte: Adaptada de (PINTO, 2006)

As ondas ultrassônicas do tipo longitudinal têm velocidade de propagação maior que as ondas ultrassônicas do tipo transversal, isto é, as ondas longitudinais são duas vezes mais rápidas que as ondas transversais.

2.3 Transdutores Ultrassônicos

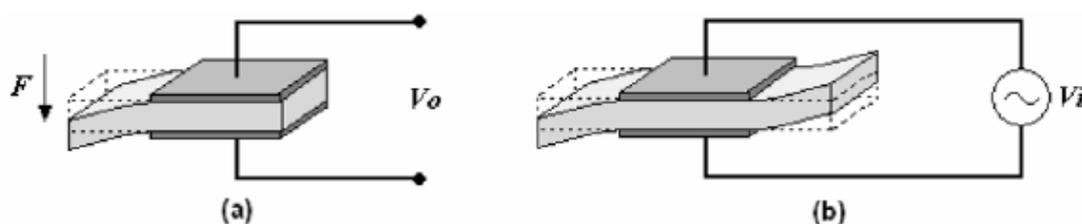
Como apresentado anteriormente, as ondas mecânicas são oscilações em um meio que pode ser gasoso, líquido ou sólido, e são classificadas de acordo com suas frequências de propagação, por exemplo, no caso das ondas ultrassônicas, tais frequências se encontram acima de 20 kHz.

Existem diversos métodos de geração de ondas ultrassônicas, como através de material piezoelétrico, eletromagnético e laser. Destes, o material com características piezoelétricas é o mais utilizado, descoberto em 1880, por Jacques e Pierre, consiste no

fenômeno da mudança de características físicas de determinados materiais quando sujeitos à um campo elétrico, assim como a criação do mesmo quando o material é sujeito à uma deformação (ROSEN, 1992). Tal efeito é chamado de efeito piezoelétrico.

Basicamente, a geração de eletricidade por materiais piezoelétricos é devido à compressão sobre os mesmos. O efeito é descrito como a interação eletromecânica entre a força mecânica e o estado elétrico em diversos tipos de materiais como polímeros e cerâmicos. A Fig. 3 ilustra o comportamento de um material piezoelétrico. Onde a interação tensão mecânica-elétrica ou vice-versa pode ser observada.

Figura 3 – Ilustração do efeito Piezoelétrico



Fonte: Adaptada de (SANTOS, 2018).

Os transdutores piezoelétricos mais comumente utilizados são construídos a partir de cristais de quartzo ou materiais cerâmicos piezoelétricos, como o titanato de bário e o titanato de dezirconato de chumbo, assim como polímeros flexíveis, como o polivinilo de flúor. Os transdutores ultrassônicos podem funcionar como receptores ou como transmissores, tornando, em muitos casos, possível a simplificação de circuitos de transmissão e recepção de sinais ultrassônicos (WEBSTER, 1999).

A piezo eletricidade se aplica nas mais diversas áreas como em conversões de pressão, força, aceleração, tensão utilizando o efeito direto (efeito mecânico \rightarrow efeito elétrico), vibrações utilizando o efeito reverso (efeito elétrico \rightarrow efeito mecânico), etc.

2.4 Anemometria Ultrassônica

Os anemômetros são dispositivos amplamente utilizados para medir direção e velocidade dos ventos, sendo normalmente aplicados em túneis de vento, aeroportos, estações meteorológicas, navegação de pequenas embarcações e estudos de instalação de turbinas eólicas, este termo deriva de uma palavra grega: “anemos” que significa vento. As técnicas para medição da velocidade do vento se desenvolveram bastante desde o século XV. Hoje, várias são as técnicas de medição e os tipos de anemômetros encontrados, como: anemômetros rotacionais, termoelétricos, ultrassônicos, tubos de Pitot, entre outros.

Anemômetros termoelétricos possuem tempos de resposta rápidos, ou seja, é possi-

vel obter a velocidade do vento instantaneamente com este tipo de transdutor. Entretanto, tais equipamentos são extremamente frágeis, pois são constituídos de um filamento muito fino de metal, geralmente tungstênio, que deve ficar exposto ao vento para poder efetuar suas medições. Portanto, estes dispositivos são utilizados apenas em aplicações muito específicas, como por exemplo a caracterização de ventos turbulentos.

Já os anemômetros de rotação são dispositivos basicamente mecânicos com pequenas partes móveis. Tais partes, com o passar do tempo, sofrem muita influência de intempéries, maresia e poeira, afetando enormemente suas medições. Logo, para serem utilizados no monitoramento dos ventos por um longo período de tempo, são necessárias manutenções frequentes com o intuito de que suas medições não percam confiabilidade e precisão. Como exemplo prático, pode-se citar o trabalho de Lihua e Dawei (2014), em que o anemômetro ultrassônico se mostrou mais eficiente que o rotacional na determinação de parâmetros para sistemas de geração eólicos, devido a sua rápida resposta (não há inércia) e ser praticamente livre de manutenção.

A mesma necessidade de manutenção existente para os anemômetros rotacionais, aplica-se aos tubos de Pitot, uma vez que estes transformam velocidade do vento em pressão e, para isto, o vento deve atravessar um orifício estreito. Normalmente, após longos períodos de exposição, este tubo é obstruído por detritos frequentemente encontrados em ventos provenientes de lugares amplamente abertos. Por conta disso, anemômetros baseados em tubo de Pitot também não são os mais indicados para monitoramento da velocidade do vento por longos períodos de tempo.

Devido a estas características, é consenso que os anemômetros ultrassônicos são os mais indicados quando é necessário o monitoramento da velocidade do vento nas condições supracitadas. Isto porque esses instrumentos, caso expostos por longos períodos de tempo à umidade e a temperatura, não perdem, ou pelo menos, perdem a uma taxa ínfima sua sensibilidade, confiabilidade e exatidão.

Anemômetros ultrassônicos trabalham explorando um princípio conhecido: o movimento das partículas do ar em movimento afeta a velocidade de uma onda acústica, com frequência ultrassônica (PINTO, 2006).

A onda sonora é emitida do transmissor e depois disso é recebida no sensor receptor. O tempo necessário para que o sinal ultrassônico saia do transmissor até alcançar o receptor é dependente da velocidade de deslocamento do ar em movimento no espaço entre o transmissor e o receptor. Este tempo, medido entre as transmissões dos sinais ultrassônicos, é chamado de tempo de trânsito, abreviado por *ToF*, do inglês: *Time-of-Flight*.

Apresenta-se na Figura 4 um exemplo de anemômetro ultrassônico comercial, nela percebe-se claramente o conjunto de sensores ultrassônicos na cabeça do anemômetro. Tais dispositivos são formados por pelo menos um par de transdutores ultrassônicos,

os quais são constituídos de um material que reage com uma diferença de potencial no momento em que são expostos a pressões mecânicas e vice versa, através do fenômeno da piezeletricidade. Assim, estes transdutores são capazes de gerar sinais ultrassônicos bem como os receber e funcionar como anemômetros para a medição da velocidade de vento. Devido a sua estrutura com 2 pares de transdutores, além da medição da velocidade do vento, também é possível identificar sua direção.

Figura 4 – Ilustração de um Anemômetro Ultrassônico Comercial



Fonte: Tecnal (Site).

Diante de tudo que foi apresentado, em suma, suas principais vantagens são: boa exatidão, resposta sistêmica rápida (depende do tempo gasto pelo deslocamento da onda ultrassônica e mais atrasos eletrônicos que são geralmente muito pequenos), não mantém contato e nem obstrui o fluxo do fluido medido, possui linearidade em uma grande faixa de frequência. Além disso, os anemômetros ultrassônicos não possuem partes móveis, além de poder ser usado para vários tipos de fluido.

Dentre essas e outras vantagens, escolheu-se o anemômetro ultrassônico para ser o objeto de estudo deste trabalho.

2.5 Técnicas de Medição da Velocidade do Vento Utilizando Anemômetros Ultrassônicos

Nos últimos anos, novos aprimoramentos estão sendo apresentados para tecnologias ultrassônicas, em relação à medição do fluxo de fluidos, em consequência, diversas aplicações estão sendo progressivamente mais aceitas em processos industriais e científicos. As vantagens da utilização da medição ultrassônica é que a instrumentação pode

ser robusta e não invasiva, porém, a exatidão na determinação da velocidade de fluidos depende do projeto do instrumento e da tecnologia dos sensores (YEH, 2001).

Existem, basicamente, dois métodos para o uso da tecnologia ultrassônica para a estimação da velocidade do vento. Apesar da ênfase deste trabalho ser dada à medição da velocidade do vento, as referidas técnicas podem perfeitamente ser empregadas para outras aplicações, como medição de distâncias, por exemplo. As duas técnicas são a: Medição do fluxo do fluido por efeito Doppler ultrassônico e a medição do fluxo do fluido por tempo de trânsito ultrassônico.

2.5.1 Efeito Doppler Ultrassônico

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

Na Figura 5 apresenta-se uma configuração dos transdutores ultrassônicos para medição de velocidade de fluido baseado no Efeito Doppler, em que v representa a velocidade do fluido, T_A e T_B representam os transdutores ultrassônicos para transmissão e recepção, respectivamente; estes transdutores formam um ângulo θ com o sentido do fluxo. Para um objeto refletor que está se movendo com a mesma velocidade do fluido, a variação da frequência é dada por (PÁLLAS-ARENY, 2001):

$$f_D = f_T - f_R = 2f_T \frac{v}{C} \cos(\theta) \quad (2.1)$$

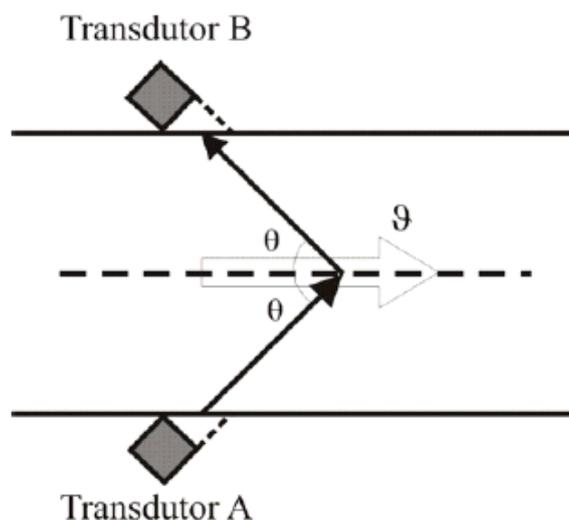
onde f_D é a diferença da frequência devido ao Efeito Doppler, f_T é a frequência do transmissor, f_R é a frequência do receptor e θ é o ângulo relativo entre a velocidade do refletor e a direção da propagação do som C .

Na equação 2.1, os valores de f_T , C e θ são constantes, podendo-se concluir que a diferença de frequência (f_D) é diretamente proporcional à velocidade do fluido v .

Qualquer substância que tem impedância acústica diferente do fluido (partículas suspensas no ar, bolhas de ar ou sólidos suspensos em líquidos) pode atuar como refletor e mudar a frequência de um sinal ultrassônico de acordo com a equação 2.1.

A técnica utilizando o princípio do efeito Doppler é mais usual em fluidos líquidos e gasosos com partículas em suspensão, que têm maior capacidade refletiva (VILLANUEVA, 2007b). Supondo um ambiente de medições, onde o ar apresenta baixa concentração de

Figura 5 – Medição de Velocidade de Fluidos Baseado no Efeito Doppler



Fonte: Autor.

partículas em suspensão, utilizou-se o método baseado no Tempo de Trânsito, detalhado na seção seguinte, que se mostra mais adequado.

2.5.2 Tempo de Trânsito Ultrassônico

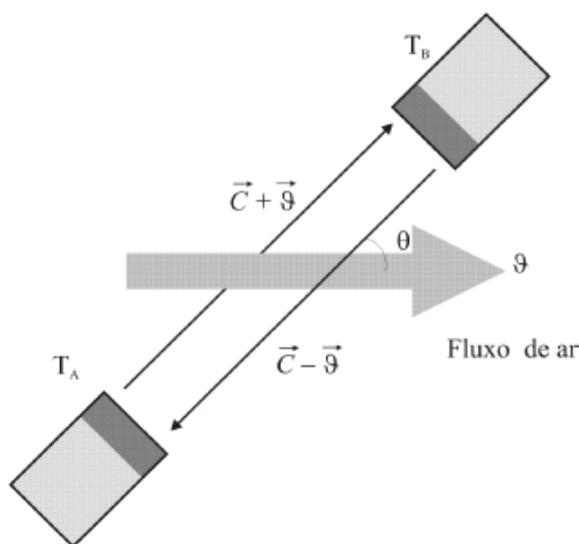
A técnica de medição da velocidade do vento pelo tempo de trânsito é uma das técnicas mais utilizadas para a estimação da velocidade de fluidos. Esta técnica, basicamente, funciona através da estimação do tempo em que uma onda ultrassônica leva para sair do transmissor e chegar ao receptor. Este tempo é chamado de tempo de trânsito e varia em função da velocidade do fluido aumentando ou diminuindo dependendo da configuração utilizada, ou seja, se a onda ultrassônica é transmitida no sentido do fluxo do fluido ou no sentido contrário.

Um sistema que utiliza o método do tempo de trânsito, basicamente, é constituído por um par de transdutores dispostos conforme ilustrado na Figura 6, em que C é a velocidade do som em uma dada temperatura, v é a velocidade do fluido nesta mesma temperatura e a distância entre os transdutores L é fixada e determinada a partir da especificação da faixa de medição da velocidade.

Este tempo de propagação ultrassônico é definido como o Tempo de Trânsito (ToF , Time-of-Flight) e é utilizado para a determinação da velocidade do fluido v , mediante as expressões que relacionam os tempos de propagação dos sinais ultrassônicos com as velocidades de propagação (PÀLLAS-ARENY, 2001).

Existem vários métodos que podem ser usados para se determinar o tempo de trânsito ultrassônico, tais como detecção de limiar, diferença de fase e métodos que utili-

Figura 6 – Configuração para Medição de Velocidade de Fluidos Baseado no Método do Tempo de Trânsito



Fonte: Autor.

zam processamento digital de sinais, e que exigem certo poder computacional, como o da correlação cruzada e o filtro de Kalman.

A técnica da correlação cruzada, por exemplo, é largamente usada em algumas aplicações comerciais e funciona através da correlação entre a energia contida nos sinais ultrassônicos transmitidos e os sinais ultrassônicos recebidos. Porém, observa-se que, ao realizar a operação de correlação, os sinais correlacionados devem ser inicialmente armazenados; isto traz alguma desvantagem, pois o sistema de medição requererá um grande espaço de armazenamento. Além disso, com a finalidade de aumentar a resolução no cálculo do ToF, técnicas de interpolação linear são aplicadas aos sinais correlacionados, aumentando o número de amostras em cada sinal. Este procedimento eleva o custo computacional requerido para o cálculo da operação de correlação.

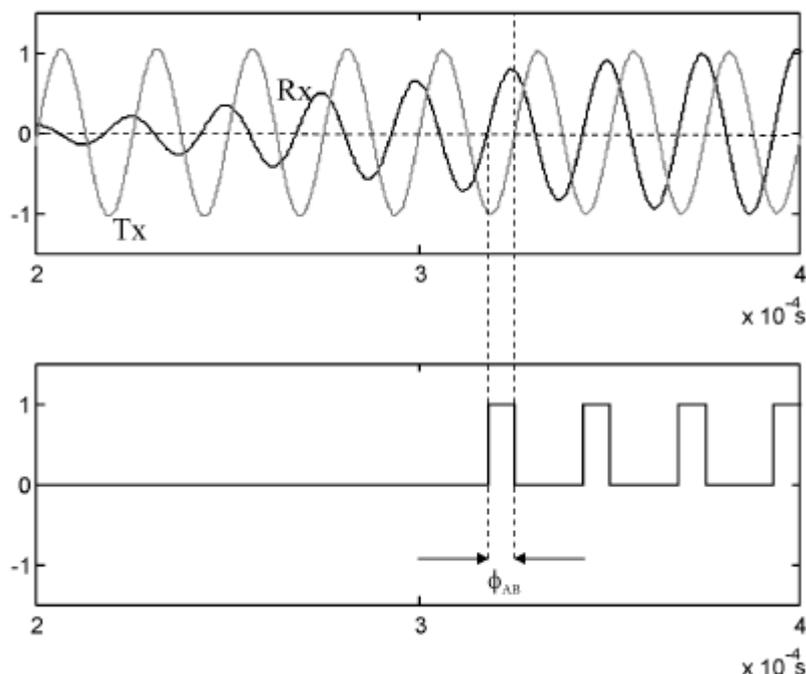
Já o método baseado no Filtro de Kalman, realiza a modelagem matemática da envoltória do sinal ultrassônico recebido no transdutor receptor. A partir disto, utiliza-se o procedimento recursivo do Filtro de Kalman para a estimação de estados do conjunto de parâmetros que caracterizam a envoltória. A vantagem principal desta abordagem é que a estimação do ToF apresenta uma redução efetiva do desvio, assim como uma estimação de parâmetros da envoltória de uma forma robusta e confiável. Entretanto, a desvantagem deste método reside na necessidade de aplicação de técnicas de processamento de sinais sofisticadas (Transformada de Hilbert) e o conhecimento a priori das estatísticas dos parâmetros a serem estimados.

A técnica da Diferença de Fase (PD – Phase Difference), opera medindo a diferença de fase entre as ondas ultrassônicas transmitidas e recebidas, como ilustrado na Figura 7.

Para uma frequência de operação dos transdutores f , a fase instantânea no transmissor e receptor é dada por $\phi_{AB} = 2\pi ft$, e a velocidade do vento é:

$$\vartheta_{PD} = \frac{1}{\cos(\theta)} \left(\frac{2\pi fL}{\phi_{AB}} - C \right) \quad (2.2)$$

Figura 7 – Método da Diferença de Fase (PD)



Fonte: Adaptado de (LIMEIRA, 2015).

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

$$\phi_{AB} = 2\pi ft_{AB} \quad (2.3)$$

$$\phi_{BA} = 2\pi ft_{BA} \quad (2.4)$$

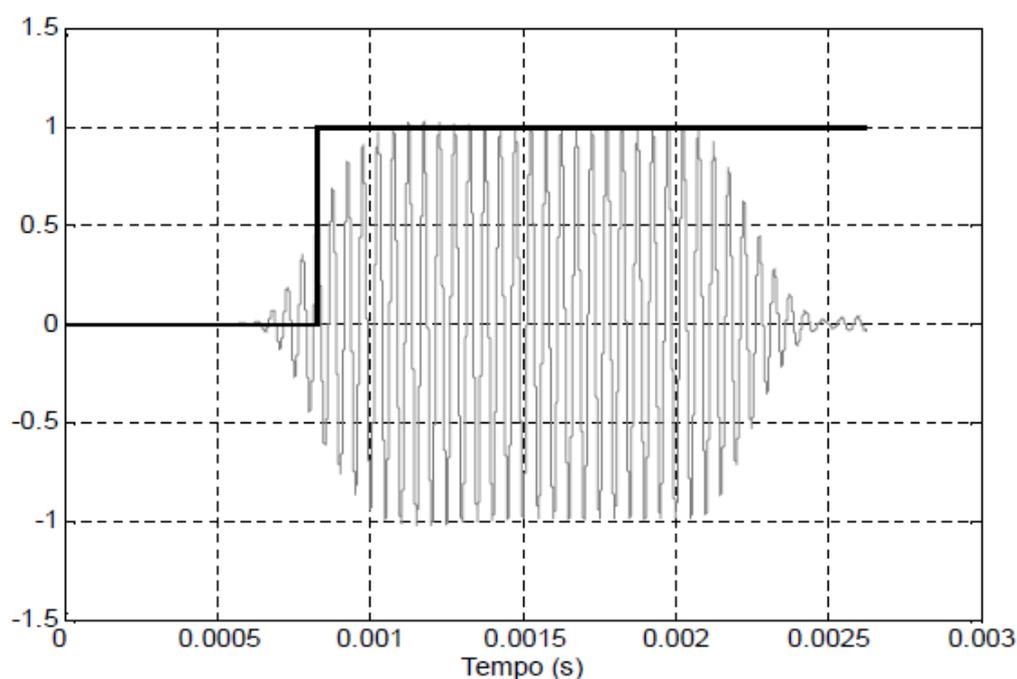
A partir das equações 2.3 e 2.4, a velocidade do vento para a técnica da diferença de fase considerando-se os sinais transmitidos em direções opostas é dada por:

$$\vartheta_{PD} = \frac{\pi fL}{\cos(\theta)} \left(\frac{1}{\phi_{AB}} - \frac{1}{\phi_{BA}} \right) \quad (2.5)$$

O método da diferença de fase tem como principais vantagens a menor suscetibilidade a ruídos e o fato de ser imune à variação de atenuação do meio de propagação. Porém, esta técnica de medição não se faz válida para toda a faixa de medição de velocidade do vento, ou seja, existe uma velocidade máxima medida que deve ser considerada quanto a sua interpretação e uso.

Por fim, o Método da Detecção do Limiar (TH – Threshold Detection) funciona, basicamente, através da comparação do nível da amplitude da onda ultrassônica recebida com um limite pré-estabelecido ou um valor de tensão de referência (*threshold*), de modo que quando este limiar é ultrapassado pela amplitude da onda ultrassônica recebida, identifica-se a sua recepção. Este momento está ilustrado nos gráficos da Figura 8, em que a curva tipo senoidal representa o sinal recebido e a tipo degrau, a detecção de limiar. Observa-se claramente que, a partir de um determinado momento o degrau muda de estado indicando a chegada da onda ultra-sônica recebida.

Figura 8 – Ilustração da Detecção da Recepção de uma Onda Ultrassônica



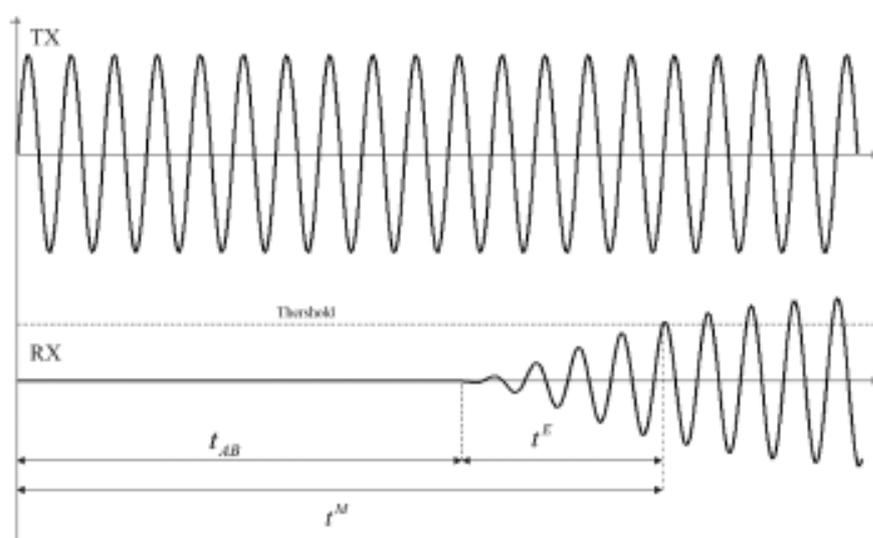
Fonte: Adaptador de (PINTO, 2006)

De forma mais detalhada, este método trabalha com a marcação do tempo de trânsito (ToF), utilizando-se contadores digitais, desde sua transmissão até sua detecção no sensor receptor. A contagem dos contadores é gerenciada pela amplitude da onda ultrassônica recebida de tal modo que, no momento em que a onda recebida ultrapassa o nível pré-estabelecido a contagem, que foi iniciada no momento da transmissão da onda, é finda. Através da marcação deste tempo, chega-se ao tempo de trânsito (TONG, 2001).

O transdutor ultrassônico receptor não apresenta uma resposta instantânea da recepção do sinal transmitido devido a suas características dinâmicas, isto significa que o tempo medido pelos contadores através do limiar não corresponde, exatamente, ao tempo de trânsito ToF (t_{AB}), como se ilustra na Figura 9. Pode-se definir o tempo medido com o método do limiar como sendo (t_M). Assim, o tempo de medição (t_M) é a soma do tempo de trânsito (t_{AB}) com o tempo necessário para a detecção do sinal recebido (t_E) (KAIMAL E BUSINGER, 1963). Contudo, faz-se necessário a aferição de (t_E) para que se determine o atraso eletrônico do circuito de recepção. Com isso, o tempo de trânsito é calculado por:

$$t_{AB} = t_M - t_E \quad (2.6)$$

Figura 9 – Técnica de Detecção de Limiar



Fonte: Adaptado de (SANTOS, 2019)

O atraso eletrônico não causa problemas sérios uma vez que este tipo de erro é sistemático e pode ser aferido para uma velocidade de vento igual a zero. Porém, a detecção do limiar é bastante sensível a variações do sinal recebido, o qual pode ser contaminado por ruído e sofrer variações devido a mudanças das características do meio de medição. Essas não linearidades podem introduzir erros na detecção do limiar ou, ainda, podem fazer perder um ciclo de onda de recepção.

2.6 Guia de Avaliação e Expressão de Incertezas em Sistemas de Medição (GUM)

Quando se relata o resultado de medição de uma grandeza física deve-se sempre dar alguma indicação quantitativa da qualidade do resultado, de forma que aqueles que o

utilizam possam avaliar sua confiabilidade. Sem essa indicação, resultados de medição não podem ser comparados, seja entre eles mesmos ou com valores de referência fornecidos numa especificação ou numa norma. É, portanto, necessário que exista um procedimento que seja de pronta aplicação, fácil compreensão e ampla aceitação para caracterizar a qualidade de um resultado de uma medição, isto é, para avaliar e expressar sua incerteza.

O conceito de incerteza como um atributo quantificável é relativamente novo na história da medição, embora erro e análise de erro tenham sido, há muito, uma parte da prática da ciência da medição ou metrologia. É agora amplamente reconhecido que, quando todos os componentes de erro conhecidos ou presumidos tenham sido avaliados e as correções adequadas tenham sido aplicadas, ainda permanece uma incerteza sobre quão correto é o resultado declarado, isto é, uma dúvida acerca de quão corretamente o resultado da medição representa o valor da grandeza que está sendo medida.

Da mesma forma como o uso quase universal do Sistema Internacional de Unidades (SI) trouxe coerência a todas as medições científicas e tecnológicas, um consenso mundial sobre a avaliação e expressão de incerteza de medição permitiria que o significado de um vasto espectro de resultados de medições na ciência, engenharia, comércio, indústria e regulamentação fosse prontamente compreendido e apropriadamente interpretado.

Nesta era de mercado global, é imperativo que o método para avaliar e expressar incerteza seja uniforme em todo o mundo, de forma tal que as medições realizadas em diferentes países possam ser facilmente comparadas.

O método ideal para avaliar e expressar a incerteza do resultado de uma medição deve ser universal, isto é, o método deve ser aplicável a todas as espécies de medição e a todos os tipos de dados de entrada usados nas medições. Além disso, a grandeza real usada para expressar a incerteza deve ser:

- internamente consistente: deve ser diretamente derivável dos componentes que para ela contribuem, assim como ser independente de como estes componentes estejam agrupados, ou da decomposição de componentes em subcomponentes;
- transferível: deve ser possível usar diretamente a incerteza avaliada para um resultado como um componente na avaliação da incerteza de outra medição na qual o primeiro resultado é utilizado.

Sendo assim, em muitas aplicações industriais e comerciais, assim como nas áreas da saúde e segurança, é frequentemente necessário fornecer um intervalo em torno do resultado de medição com o qual se espera abranger uma grande fração da distribuição de valores, que poderiam razoavelmente ser atribuídos à grandeza sujeita à medição. Assim, o método ideal para avaliar e expressar incerteza de medição deve ser capaz de fornecer

prontamente tal intervalo, em particular um intervalo com probabilidade da abrangência ou nível da confiança que, de uma forma realista, corresponda ao nível requerido.

Diante disso, este guia estabelece regras gerais para avaliar e expressar a incerteza de medição, regras essas que podem ser seguidas em vários níveis de exatidão e em muitos campos de atuação, do chão de fábrica à pesquisa fundamental. Os princípios deste Guia são aplicáveis, portanto, a um amplo espectro de medições, incluindo aquelas necessárias para:

- manter o controle da qualidade e a garantia da qualidade na produção;
- respeitar e fazer cumprir leis e regulamentos;
- conduzir pesquisa básica, pesquisa aplicada e desenvolvimento na ciência e na engenharia;
- calibrar padrões e instrumentos e executar ensaios no contexto de um sistema nacional de medição de forma a obter rastreabilidade a padrões nacionais;
- desenvolver, manter e comparar padrões físicos de referência, nacionais e internacionais, incluindo materiais de referência.

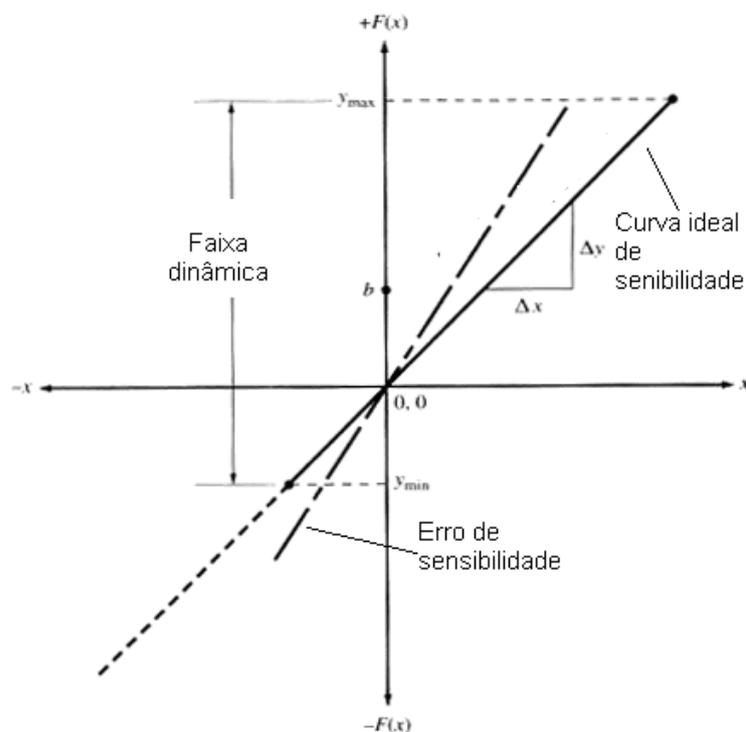
2.7 Sensibilidade

Sensibilidade é uma taxa de variação definida quando o sinal de saída muda de acordo com as mudanças no sinal de entrada. Em outras palavras, é dito como uma medida da mudança na saída do instrumento que ocorre quando a variável de entrada que está sendo medida muda através de um determinado valor.

Portanto, a sensibilidade de um transdutor indica qual deve ser a variação menor da intensidade da grandeza medida que o sensor pode detectar, ou seja, a menor variação da grandeza medida que cause uma alteração sensível do sinal elétrico de saída. Este sinal pode ser uma tensão, uma corrente, uma resistência ou ainda uma frequência. A maneira como a sensibilidade é expressa depende tanto do que está sendo medido como também do tipo de sinal de saída. Por exemplo, um sensor de pressão que tem uma sensibilidade de 50 mV/V/mmHg é um sensor que produz uma variação de 50 mV no sinal de saída por V de excitação a cada milímetro de mercúrio que a pressão varia.

Na prática, os sensores não apresentam a mesma sensibilidade em toda a faixa de grandezas que podem medir. Por exemplo, um sensor pode ser mais sensível numa faixa central de valores que mede e menos sensível nas faixas extremas. Esta característica pode ser mostrada num gráfico como o dado na figura 10.

Figura 10 – Desvio da Sensibilidade ao Longo da Faixa de Operação de um Sensor



Fonte: Instituto NCB (Site).

Matematicamente, a sensibilidade S de uma função de resposta y em relação a uma variável de entrada específica u é dada por:

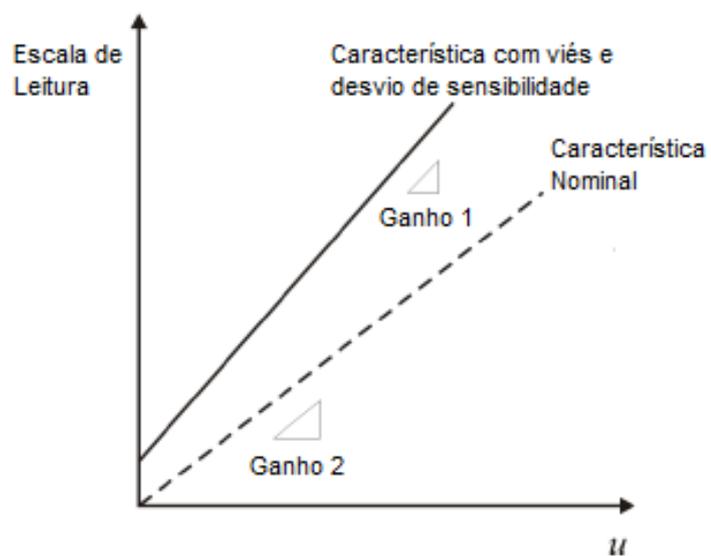
$$S_u^y = \frac{\partial y}{\partial u} \quad (2.7)$$

A partir da avaliação de sensibilidade, podemos ver os efeitos da sensibilidade à perturbação, conforme ilustrado na Fig. (11), com a presença de *bias* e a mudança de ganho na medição. Desta forma, é desejável que um instrumento de medição exiba características de alta sensibilidade e, se possível, uma sensibilidade constante (PALLAS-ARENY E WEBSTER, 2001).

É importante mencionar que a sensibilidade de um instrumento não diz nada sobre a qualidade do instrumento em si. Isso é tipicamente estabelecido pela exatidão e precisão do mesmo. A sensibilidade é uma quantidade absoluta, portanto vale ressaltar que a sensibilidade real é uma função do dispositivo de medição e do ambiente em que a medição está sendo feita.

Observe que a análise de sensibilidade se torna útil para uma variedade de propósitos, como: teste de robustez dos resultados de um modelo ou sistema na presença de incerteza, maior entendimento das relações entre variáveis de entrada e saída em um sistema ou modelo, além da redução de incertezas identificando as entradas que as causam

Figura 11 – Efeitos da Perturbação: desvio de zero mais desvio de sensibilidade



Fonte: Adaptado de (SANTOS, 2019)

de forma significativa.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo serão abordados os processos realizados para produção deste trabalho, desde a explanação sobre a configuração de medição utilizada, como também o método de simulação de Monte Carlo para estimação do ToF, além da análise de sensibilidade na medição da velocidade do vento.

Os transdutores considerados neste trabalho têm frequência central de 40 kHz e podem ser modelados como filtros passa-faixa de segunda ordem, cuja largura de banda considerada é de 6 kHz. Estes transdutores podem operar tanto como transmissores como receptores, de acordo com a metodologia empregada na medição da velocidade do fluido em questão.

3.1 Configuração de Medição da Velocidade do Vento Utilizando Transdutores Ultrassônicos

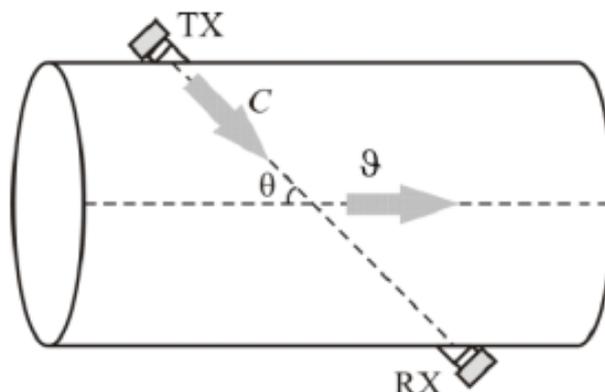
Na Fig. 12 ilustra-se a configuração para estimar a velocidade do vento usando um par de transdutores ultrassônicos. O ângulo θ define a posição dos transdutores que são medidos em relação à linha de direção da velocidade do vento ϑ . O transdutor do transmissor opera a uma frequência de 40 kHz e emite uma onda mecânica que passa pelo meio e interage com o fluxo de ar (vento). Essa interação com o meio introduz uma atenuação do sinal devido à impedância do meio. Quando o transdutor receptor detecta o sinal ultrassônico, ele realiza uma mudança de um domínio de energia mecânica para energia elétrica. Finalmente, é adicionado ao sinal elétrico recebido um ruído aditivo aleatório.

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

$$\vec{C} = \vec{C}_0 \pm \vec{\vartheta} \quad (3.1)$$

em que \vec{C} , \vec{C}_0 e $\vec{\vartheta}$ são respectivamente: a velocidade do deslocamento da onda ultrassônica, velocidade do som com o ar parado e a velocidade do vento (com todas estas grandezas dadas em m/s). O sinal de “ \pm ” varia em função do sentido do fluxo, de tal modo que se usa o sinal “+” quando o sentido da onda sonora é o mesmo da velocidade do vento e o sinal de “-” quando o sentido de propagação da onda sonora é contrário ao sentido de propagação do vento. Sabe-se que a velocidade de deslocamento das partículas do ar pelo ultrassom pode ser calculada por:

Figura 12 – Configuração de Medição



Fonte: Autor.

$$\vec{C} = \frac{L}{ToF} \quad (3.2)$$

em que L é a distância entre os transdutores ultrassônicos e ToF é o tempo de trânsito ultrassônico. Pode-se simplificar a equação vetorial 3.1 escrevendo:

$$C = C_0 \pm v \cos \theta \quad (3.3)$$

Fazendo-se a substituição da equação 3.2 na equação 3.3, tem-se que, a partir da configuração de medição, a estimação da velocidade do vento é definida pela seguinte expressão:

$$v = \frac{1}{\cos(\theta)} \left(\frac{L}{ToF} - C_0 \right) \quad (3.4)$$

Por meio da equação 3.4, pode-se calcular a velocidade de um fluido conhecendo-se o tempo de trânsito ToF e a velocidade do som com o ar parado C_0 , dada em m/s. Em que θ é o ângulo formado entre a direção de deslocamento do fluido e o eixo de alinhamento entre os sensores de transmissão e recepção, conforme ilustrado na Figura 12.

O problema com a estimação da velocidade do vento utilizando-se a equação 3.4 é a necessidade de se determinar C_0 , uma vez que esta variável não é constante e varia principalmente em função da compressibilidade e da densidade do meio. No caso específico do ar a compressibilidade e a densidade são funções principalmente da temperatura do meio. Desta forma, a velocidade do som no ar parado depende meramente da temperatura do meio em que se encontra. Esta inter-relação entre a velocidade do som no ar parado C_0 e a temperatura T_s , em Kelvin (K), pode ser dada por:

$$C = 20.074\sqrt{T_s} \quad (3.5)$$

A partir da Eq. 3.5, a velocidade do vento pode ser calculada sem a necessidade de determinação de C_0 , apenas medindo-se o tempo de trânsito em apenas um sentido.

Com isso, a partir do modelo de medição da Fig. 12, sabe-se que os sinais de transmissão dos transdutores ultrassônicos podem ser modelados como ondas senoidais com frequência equivalente à frequência de operação dos transdutores, dada por:

$$V_{TX}(t) = A_0 \sin(\omega \times t) \quad (3.6)$$

Onde A_0 é a amplitude do sinal transmitido, ω é a frequência em rad/s, t é o tempo e V_{TX} é a tensão elétrica nos terminais dos transdutores ultrassônicos.

Para os transdutores de recepção ultrassônica Rx , o sinal de tensão elétrica é modelado pela seguinte expressão:

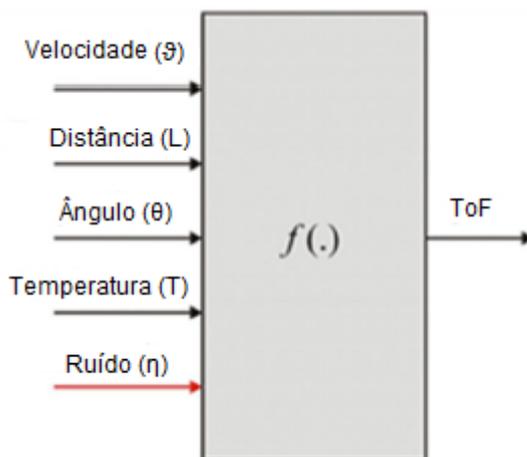
$$V_{RX}(t) = A \sin(\omega \times (t - ToF) + \phi) + \eta \quad (3.7)$$

Onde temos que: A é a amplitude do sinal recebido, ToF é o tempo de trânsito da onda ultrassônica, ϕ é a fase instantânea do sinal, V_{RX} é a tensão nos terminais do receptor ultrassônico e η é o ruído elétrico aditivo aleatório introduzido pelo meio.

Com isso, a técnica de detecção de limiar pode ser usada para estimar o tempo de trânsito ultrassônico (ToF), como foi apresentado na Figura 9. No entanto, a estimação por este método pode exibir algumas mudanças em sua função densidade de probabilidade (fdp) devido a parametrização do modelo e aos tipos de ruído presente no meio de medição, como ilustrado na Figura 13. A análise e construção de uma função densidade de probabilidade do ToF pode ser realizada usando o método de Simulação de Monte Carlo (SMC) que é utilizada na avaliação da propagação de incertezas como indicado no suplemento 1 para o GUM, onde o mesmo demonstra alguns processos para encontrar possíveis resultados associados a sua distribuição, sua respectiva probabilidade de ocorrência e seus momentos estatísticos. Para determinação da função densidade de probabilidade foram utilizados três diferentes tipos de distribuições para o ruído, sendo elas: Gaussiana, Uniforme e Triangular.

Neste modelo, a saída ToF é a principal variável a ser estimada enquanto que as outras variáveis independentes são as entradas do modelo, sendo elas: a velocidade do vento (v), a distância entre os transdutores ultrassônicos (L), ângulo entre os transdutores e a direção do vento (θ), temperatura do meio de medição (T) e um ruído aditivo (η). Esta parametrização do modelo nos permite determinar a propagação das incertezas combinadas pela seguinte expressão:

Figura 13 – Parametrização do modelo



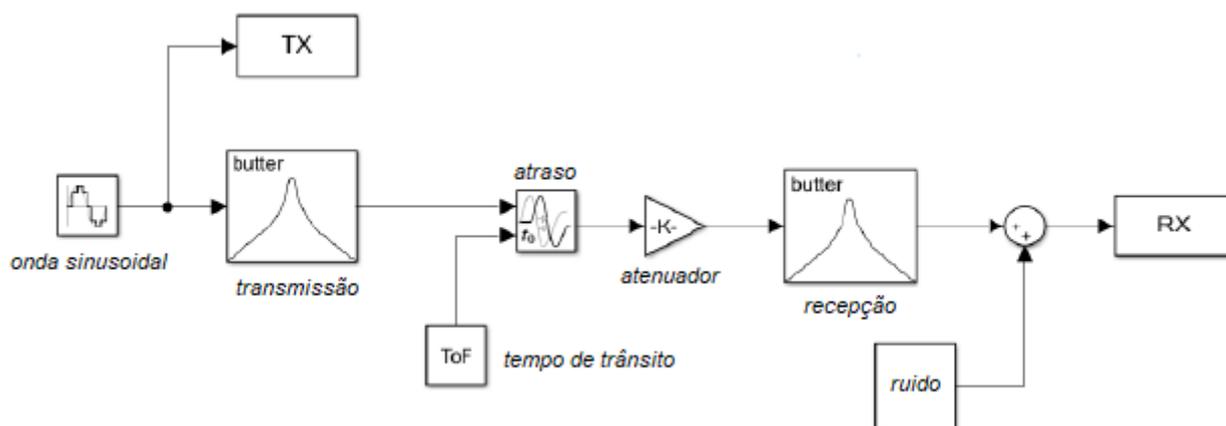
Fonte: Autor.

$$ToF = f(L, C, v, \theta) + \eta \quad (3.8)$$

$$f = \frac{L}{C + v \cos \theta} \quad (3.9)$$

Na Fig. 14 ilustra-se a construção do modelo de propagação do sinal ultrassônico usando MATLAB / SIMULINK ©.

Figura 14 – Diagrama de Blocos do Modelo de Medição para Transdutores Ultrassônico



Fonte: Autor

Neste modelo os transdutores ultrassônicos de transmissão e recepção foram modelados usando filtros passa-faixa de ordem 2 com frequência central em 40 kHz, o transmissor Tx, representado pelo bloco *transmissão*, consiste em um sinal modelado como uma onda sinusoidal que é transmitida pelo meio onde interage com o fluxo de ar, representado

pelo bloco *atraso + atenuador*, onde a atenuação possui tempo de atraso equivalente ao *ToF* teórico dado pela Eq. (3.10). Em seguida o transdutor receptor detecta o sinal recebido pelo bloco *recepção*, que por sua vez, é acrescido de um ruído aditivo de natureza aleatória, representado pelo bloco *ruído*, atenuando assim, o sinal detectado utilizando as técnicas de medição para determinar o *ToF*.

$$ToF = \frac{L}{C + v \cos(\theta)} \quad (3.10)$$

3.2 Método de Simulação Monte Carlo para Estimação do ToF

É possível avaliar e expressar as incertezas de medição através de diversos métodos, dentre eles pode-se propor a análise pela guia de avaliação e expressão de incertezas em sistemas de medição-GUM e análise pela Simulação de Monte Carlo (SMC). A Guia para a Expressão da Incerteza de Medição (GUM) é utilizada para determinar uma expressão matemática das incertezas em um processo de medição. Entretanto em casos especiais, como quando a incerteza é grande ou assimétrica e quando as correlações entre as diferentes medições são de difícil caracterização, os métodos analíticos podem não ser adequados. O GUM trabalha basicamente com a propagação das incertezas, em que cada uma das incertezas das grandezas de entrada é caracterizada por parâmetros convenientes e a propagação das incertezas é tratada analiticamente, frequentemente envolvendo aproximações que em alguns casos podem não ser aceitáveis, como ressaltado no próprio GUM.

Nestes casos pode-se recorrer a métodos numéricos, dentre os quais o Método de Monte Carlo. Usando este método a incerteza de uma medição é obtida através da propagação das distribuições que caracterizam as distribuições das grandezas de entrada. A partir da distribuição da grandeza de saída se pode obter sua incerteza. O Método de Monte Carlo permite determinar uma distribuição das incertezas e a partir dessa distribuição, extrair o valor médio e o desvio padrão. Além de que, as variáveis poderiam ter diferentes distribuições e não necessariamente gaussianas. Com isso, é preferível a utilização do método de Monte Carlo para a avaliação da incerteza de medição.

Para fim de aprimoramento dos resultados da Simulação de Monte Carlo, foi configurado um gerador de números aleatórios com a capacidade de gerar distribuições do tipo Gaussiana, Triangular e Uniforme, com valor médio e desvio padrão conhecidos, os quais estão diretamente relacionados com as propriedades do ruído aditivo presente no meio de propagação. Com isso, para concretizar a implementação do método de Simulação de Monte Carlo foram gerados M simulações (intitulado conjunto de números aleatórios), onde, cada conjunto representava um sinal de ruído aleatório aditivo μA .

O Método de Simulação Monte Carlo (SMC) é definido como uma classe de mé-

todos estatísticos que se baseiam em amostragens aleatórias para obter as distribuições de probabilidade das variáveis do problema, e com isso obter futuras informações sobre o desempenho de sistemas ou processos. Na metrologia, a SMC é utilizada na avaliação de propagação de incertezas, que é indicada no suplemento 1 do GUM, onde fornece uma gama de resultados possíveis associados a uma distribuição juntamente com suas respectivas probabilidades de ocorrência, possibilitando a obtenção de informações relevantes e permitindo determinar seus momentos estatísticos, como: valor médio, desvio padrão, variância, kurtosis e skewness.

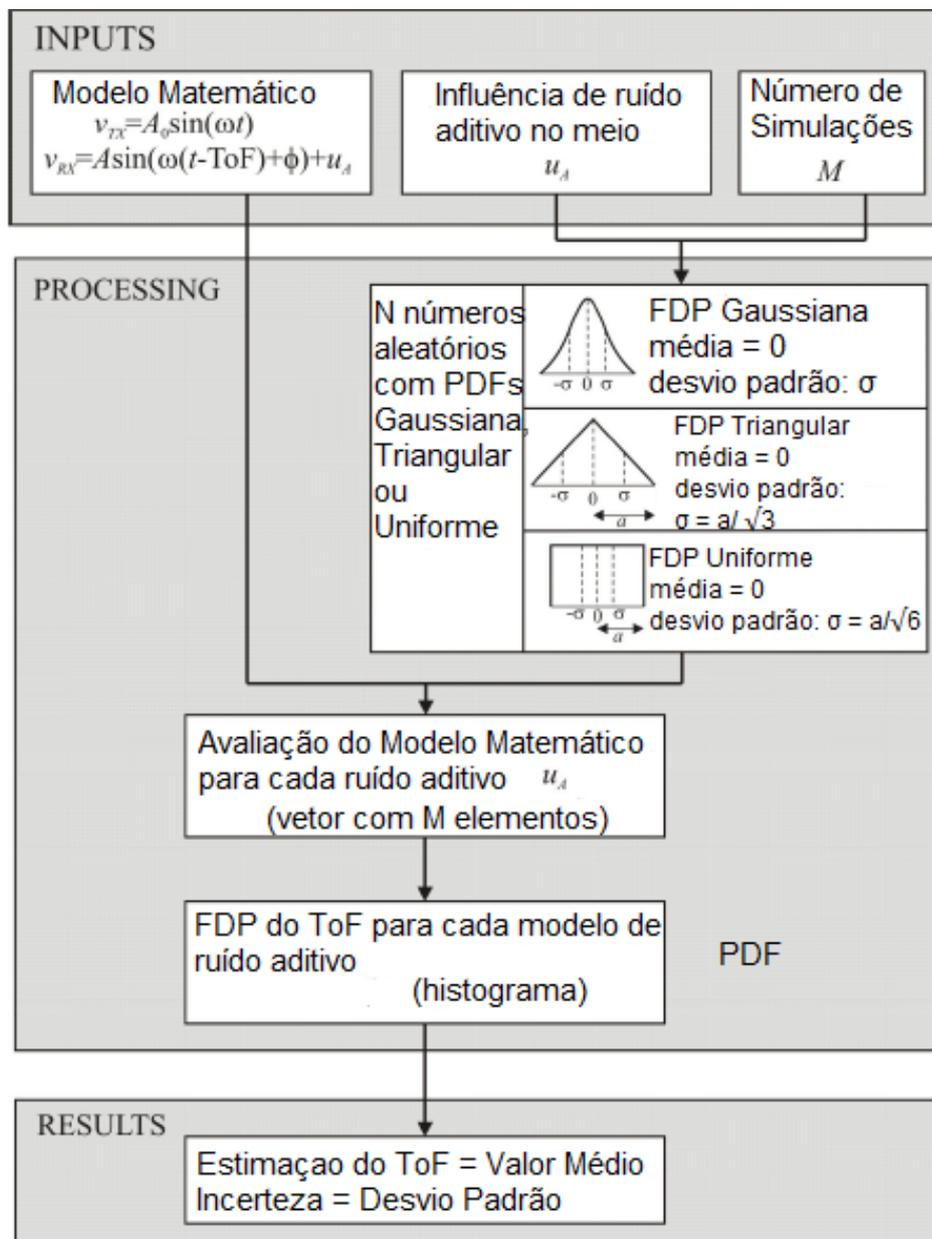
Figura 15 ilustra o fluxograma para estimação do ToF baseado no método de Simulação Monte Carlo usando diferentes funções de distribuições de probabilidade (FDP's) de um ruído aditivo. Este processo tem como entradas o modelo matemático do problema, que neste caso foi representado por dois sinais elétricos associados a TX e RX (ver Equação 3.8). Também no mesmo nível, foi introduzido a caracterização da influência da incerteza associada com um ruído aditivo que se propaga na onda ultrassônica. Adicionalmente, foram utilizados M número de simulações, que para este trabalho foram de 10000. No estágio de processamento, foi introduzido um gerador de números aleatórios capaz de gerar as distintas distribuições Gaussiana, Triangular e Uniforme com momentos estatísticos conhecidos, que estão relacionados as propriedades do ruído aditivo presente no meio de propagação. A avaliação de incertezas usando a técnica de SMC é feita em duas fases. A primeira é estabelecer o modelo de medição e subsequentemente, a segunda envolve a avaliação do modelo.

Baseado neste procedimento, podemos mostrar uma sequência de ações necessárias para avaliar as incertezas usando tal método, de acordo com o guia suplemento 1 para a Expressão de Incertezas na Medição, intitulado "Métodos Numéricos para a Propagação de Distribuições". Segundo o suplemento 1 para o GUM, a partir de M simulações pelo método de SMC, FDP's foram construídas para o ToF. A partir destas FDP's foram observadas certas características e extraídas parâmetros fundamentais como valor médio (melhor estimativa) e desvio padrão (incerteza padrão).

A SMC efetua a análise por meio da construção de modelos de possíveis resultados, substituindo com um intervalo de valores, uma distribuição de probabilidade e todo fator com incerteza inerente. Em seguida, a SMC calcula os valores repetidamente, cada vez com outros conjuntos de valores aleatórios gerados por funções de probabilidades. Dependendo do número de incertezas e dos intervalos especificados para elas, uma simulação de Monte Carlo pode ter milhares ou dezenas de milhares de recálculos antes de terminar, e por fim, a SMC produz distribuições de probabilidade de valores dos possíveis resultados.

Como mencionado anteriormente, para obtenção da estimativa do tempo de trânsito ultrassônico, foi introduzido um ruído aditivo no sinal transmitido. O ruído aditivo é gerado devido à influência do meio de propagação sobre o sinal ultrassônico, podendo

Figura 15 – Fluxograma para a estimação das FDP's do ToF para diferentes FDP's de ruído aditivo

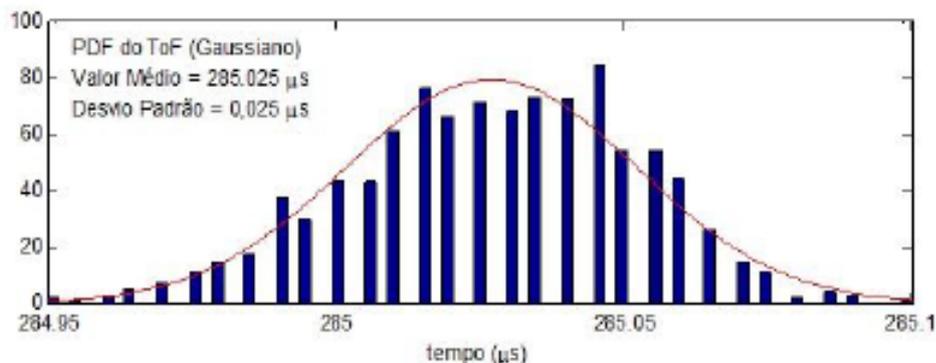


Fonte: Autor

apresentar diferentes distribuições como Gaussiana, Triangular e Uniforme. A distribuição Gaussiana, também chamada de distribuição Normal, apresenta certas características e propriedades, tais como a própria forma (forma de sino), a simetria em torno da média que é onde ocorre o pico da distribuição, uma maior probabilidade de ocorrência concentradas em torno da média e a curva é especificada usando dois parâmetros, o desvio padrão e a média, como se ilustra na Figura 16.

A distribuição Triangular é uma distribuição contínua que possui um valor mínimo, um valor máximo de modo que a função de probabilidade é zero nas extremidades e afim

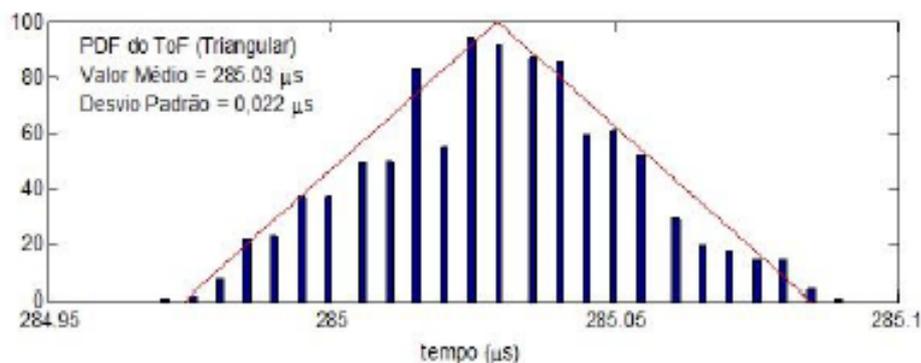
Figura 16 – Distribuição Gaussiana



Fonte: Autor.

entre cada extremo, de forma que o gráfico dessa distribuição é um triângulo e requer parâmetros que são o valor médio e o desvio padrão, como se ilustra na Figura 17.

Figura 17 – Distribuição Triangular



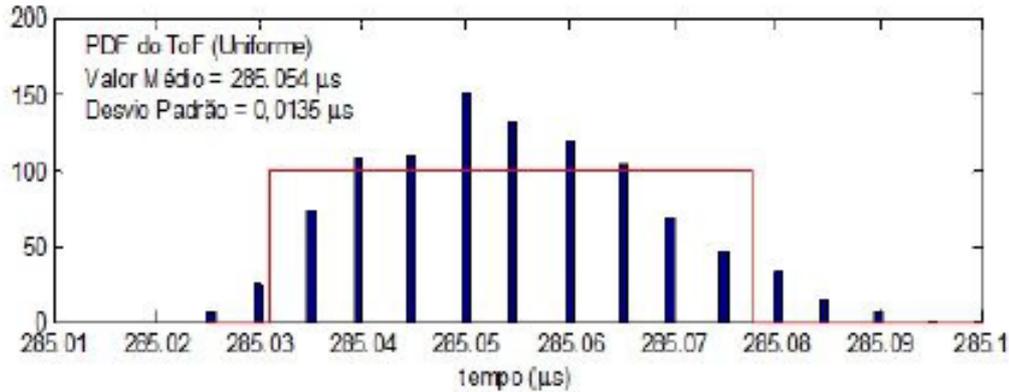
Fonte: Autor.

Para o caso da distribuição Uniforme, a mesma possui uma importante característica na qual, existindo um número finito de resultados, esses resultados terão a mesma chance de acontecer. Torna-se adequado representar seus possíveis resultados com um intervalo fechado $[a, b]$ com a e b considerados como os principais parâmetros da distribuição, como mostra a Fig. 18.

Os parâmetros em comum que influenciam nos três tipos de função de probabilidade podem ser definidos, do ponto de vista estatístico, como: valor médio, desvio padrão, variância, skewness e kurtosis. Desvio Padrão é a medida mais comum da dispersão estatística (geralmente representada pela letra grega σ). Ela mostra o quanto de variação ou "dispersão" existe em relação à média.

A variância tem o objetivo de analisar o grau de variabilidade de determinadas situações e através da mesma podemos perceber desempenhos iguais, muito próximos ou

Figura 18 – Distribuição Uniforme



Fonte: Autor.

muito distantes. A variância é calculada através da soma dos quadrados entre a diferença de um valor observado e um valor médio. Skewness, ou obliquidade, é uma medida assimétrica de uma determinada distribuição de frequência. Por fim, Kurtosis, em estatística, é uma medida de achatamento da distribuição de probabilidade de uma variável aleatória.

3.3 Análise de Sensibilidade na Medição da Velocidade do Vento

Nesta seção, afim de avaliar o impacto da temperatura na estimação da velocidade do vento utilizando transdutores ultrassônicos, um modelo matemático foi desenvolvido com base na configuração de medição proposta na Fig. 12. Este modelo foi desenvolvido utilizando a ferramenta computacional MATLAB / SIMULINK ©.

Assumindo que a medição da velocidade do vento usando transdutores ultrassônicos é baseada no *Time-of-Flight (ToF)*, é necessário avaliar sua influência em relação a uma faixa de temperatura na qual o transdutor está em operação. Portanto, é necessário avaliar a sensibilidade de *ToF* em razão de um intervalo de temperatura T_s e adicioná-la à equação primária do modelo de medição proposto neste trabalho.

De acordo com a Eq. (3.4), o *ToF* teórico pode ser expresso pela seguinte equação:

$$ToF = \frac{L}{C + v \cos(\theta)} \quad (3.11)$$

Substituindo Eq. (3.5) na equação acima e agora aplicando o conceito de sensibilidade a uma variável de entrada T_s , temos que a sensibilidade S é dada pela seguinte relação:

$$S = \frac{\partial ToF}{\partial T_s} = \frac{\partial \left(\frac{L}{(20.074\sqrt{T_s}) + v \cos(\theta)} \right)}{\partial T_s} \quad (3.12)$$

Com isso, temos que a sensibilidade S pode ser expressa por:

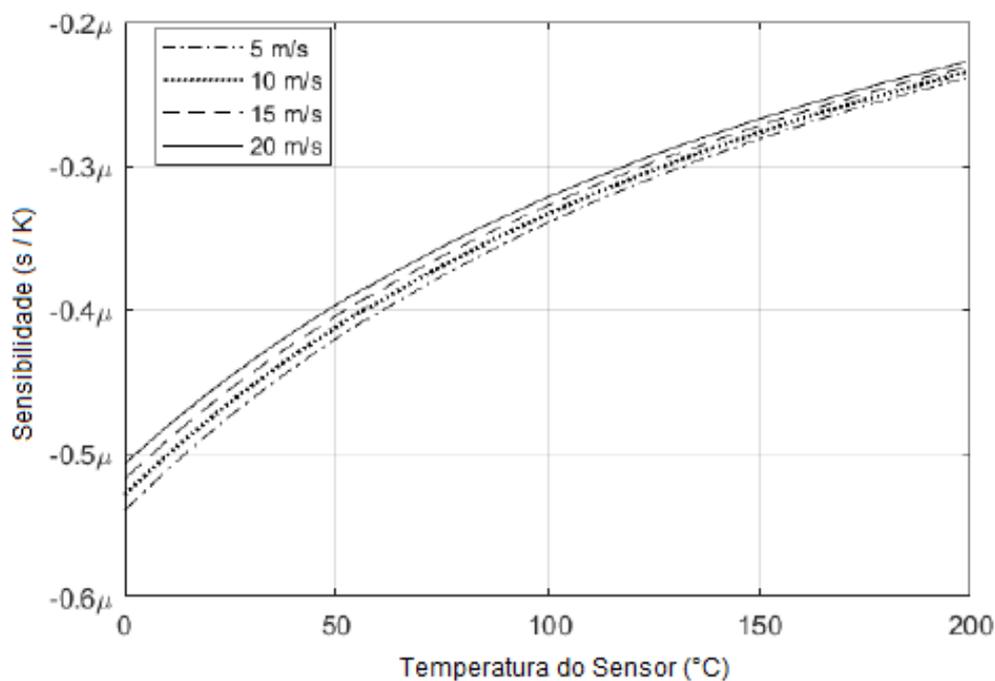
$$S = -\frac{aL}{2\sqrt{T_s} \times (a\sqrt{T_s} + \vartheta \cos(\theta))^2} \quad (3.13)$$

Onde $a = 20.074$.

O sinal negativo infere em uma taxa de variação decrescente de ToF com relação a temperatura.

Observando a Fig. 19, nota-se que a sensibilidade expressa na Eq. (3.13) está sempre diminuindo para a configuração de medição proposta neste trabalho. Além disso, uma avaliação para diferentes valores de velocidade mostra que a diferença entre essas curvas não é alta, embora se observe que valores mais altos de velocidade do vento têm sensibilidades ligeiramente menores. Esta declaração pode ser avaliada através da análise da contribuição da variável ϑ na Eq. (3.13), que é muito menor que a contribuição da variável T_s .

Figura 19 – Sensibilidade como Função da Temperatura do Sensor



Fonte: Autor.

Portanto, para avaliar o impacto da sensibilidade na estimativa da velocidade do vento, temos que o novo valor de ToF será:

$$ToF = ToF_{th} \pm S \times \Delta T_s \quad (3.14)$$

Como ToF_{th} é o valor teórico do tempo de trânsito ultrassônico e ΔT_s é a variação de temperatura, o sinal \pm indica que essa variação pode ser positiva ou negativa para o intervalo de variação de temperatura.

Assim, a velocidade do vento baseada na sensibilidade do ToF em relação à temperatura T_s pode ser calculada pela equação:

$$\vartheta = \frac{1}{\cos(\theta)} \left(\frac{L}{(ToF_{th} \pm S \times \Delta T_s)} - 20.074\sqrt{T_s} \right) \quad (3.15)$$

4 RESULTADOS

Esta seção aborda os resultados referentes as simulações realizadas com a finalidade de estimar a velocidade do vento baseando-se na análise de sensibilidade e a determinação da função densidade de probabilidade do tempo de trânsito ultrassônico considerando-se a influência do ruído.

É válido deixar claro que os resultados presentes neste trabalho são simulacionais, isto é, não foram validados experimentalmente. Diante disso, torna-se importante mencionar que para temperaturas demasiadamente altas no ambiente de medição, a reprodução prática destas análises pode vir a apresentar comportamentos inesperados devido ao surgimento de novas variáveis, como a turbulência no ar em altas temperaturas, que venham a afetar as observações.

4.1 Estimação da Velocidade do Vento baseada na Análise de Sensibilidade

De acordo com a avaliação da influência da sensibilidade ToF em relação à temperatura T_s na estimação da velocidade do vento, esta seção apresenta os resultados das simulações para o modelo de configuração de medição descrito anteriormente. A partir da equação 3.15, podem ser definidos os limites superiores e inferiores na estimação da velocidade do vento com base na equação 3.14 para incrementos positivos e/ou negativos da sensibilidade no ToF experimental mensurado. Sendo assim, tais limites de variação podem ser expressos através das equações 4.1 e 4.2.

Para todas as simulações presentes neste trabalho, foram estabelecidos valores pré-determinados para as seguintes variáveis do modelo de configuração de medição da Fig. 12:

- $L = 10$ cm
- $\theta = \frac{\pi}{4}$ rad
- $T_s = 273$ a 473 K ≈ 0 a 200 ° C
- $v = 5, 10, 15$ e 20 m/s
- $\eta = 0$, i.e., sem ruído
- $\Delta T_s = 1$ K

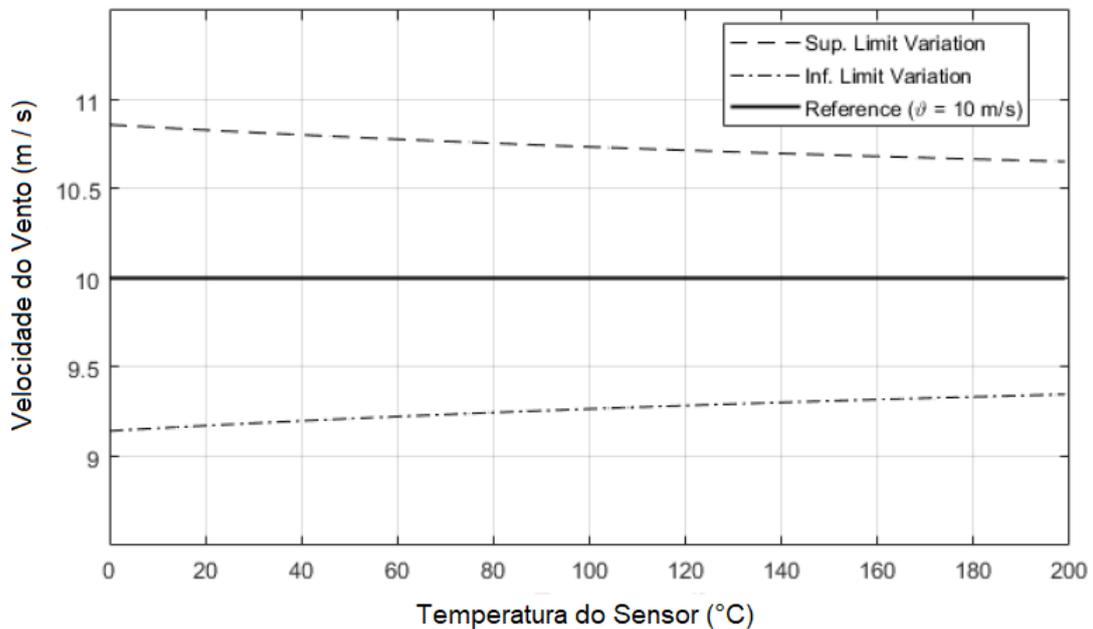
Fig. 20 apresenta a estimaco da velocidade do vento com base na sensibilidade de temperatura para um $\vartheta = 10\text{m/s}$. Tal valor de velocidade do vento foi escolhido para fins de simplificao, porém, vale ser mencionado que para cenários reais, essa grandeza encontra-se em uma faixa de velocidade entre 3 e 9 m/s. Valores acima de 10 m/s podem ser considerados como rajadas não recorrentes.

$$\Delta\vartheta_{sup} = \frac{1}{\cos(\theta)} \left(\frac{L}{(T_oF_{th} + S \times \Delta T_s)} - 20.074\sqrt{T_s} \right) \quad (4.1)$$

$$\Delta\vartheta_{inf} = \frac{1}{\cos(\theta)} \left(\frac{L}{(T_oF_{th} - S \times \Delta T_s)} - 20.074\sqrt{T_s} \right) \quad (4.2)$$

Embora paream simétricos, esses limites têm diferentes faixas de variao, mesmo em pequenas proporoes. Para exemplificar tal afirmao, a Tabela 1 traz valores de variao da velocidade do vento para $\vartheta = 10\text{m/s}$ devido  influência da sensibilidade em diferentes valores absolutos de temperatura.

Figura 20 – Estimaco da Velocidade do Vento baseada na Análise de Sensibilidade para $\vartheta = 10\text{ m/s}$



Fonte: Autor.

Da Fig. 20, pode ser visto que em baixas temperaturas (0 °C) na configurao de medio, a variao na estimativa da velocidade do vento  maior do que para temperaturas mais altas. Com isso, pode-se concluir que a faixa de variao na estimaco da velocidade do vento com base na influência da sensibilidade diminui  medida que a temperatura na qual o sensor é inserido aumenta e aumenta  medida que a mesma temperatura diminui.

Tabela 1 – Limite de variações na velocidade do vento devido à sensibilidade

For $v = 10$ m/s		
Temperatura ($^{\circ}$ C)	$v_{sup.limit}$ (m/s)	$v_{inf.limit}$ (m/s)
0 $^{\circ}$ C	10.8604	9.1427
25 $^{\circ}$ C	10.8234	9.1793
50 $^{\circ}$ C	10.7908	9.2116
75 $^{\circ}$ C	10.7618	9.2403
100 $^{\circ}$ C	10.7358	9.2662
140 $^{\circ}$ C	10.6992	9.3025
180 $^{\circ}$ C	10.6675	9.3339

Vale a pena mencionar que para cada valor de temperatura T_s , um novo valor de ToF_{th} deve ser estimado, de acordo com a Eq. (3.14). Este valor é expresso em unidades de (ms).

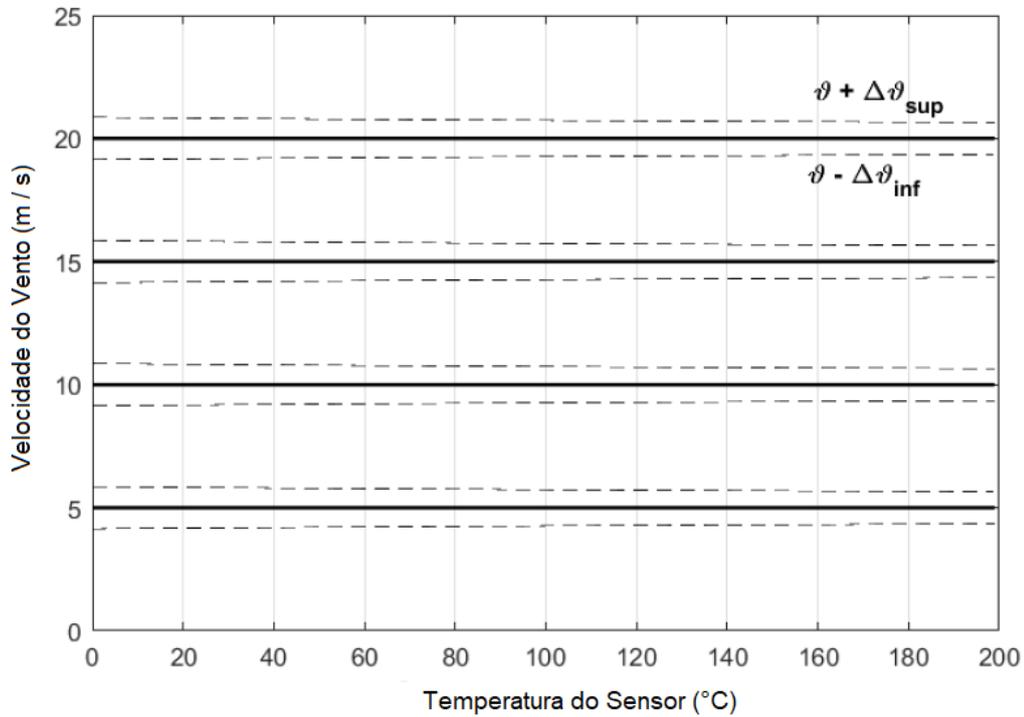
A fim de estabelecer as condições para as variações da velocidade do vento devido a variações de temperatura, a Eq. (4.1) e (4.2) foram utilizados, e as simulações foram realizadas para diferentes valores de velocidade ($v = 5, 10, 15$ e 20 m/s). Na Fig. 21 são mostrados os resultados desta simulação, na qual se observa que os limites de variação para cada velocidade são aproximadamente constantes, ou seja, independente do valor de velocidade absoluta, o mesmo intervalo de variação de velocidade deve ser reportado para este faixa de variação de temperatura (0 a 200 $^{\circ}$ C).

4.2 Determinação da FDP do ToF para Aplicações na Medição da Velocidade do Vento

A princípio, foi desenvolvido um modelo matemático do sistema par ultrassônico transmissor-receptor, como se ilustra na Figura 14. Tal modelo consiste em um transmissor Tx, onde um sinal modelado como uma onda sinusoidal é transmitida pelo meio onde interage com o fluxo de ar representado pelo bloco *Transmitter* e em seguida é adicionado um ruído aditivo de natureza aleatória que atenua o sinal representado pelo bloco *Attenuation*. Após a adição do ruído, o transdutor receptor detecta o sinal recebido, que por sua vez, é amplificado juntamente com o ruído e por fim é utilizada as técnicas de medição para determinar o *ToF*.

O modelo de medição associa-se às equações 3.6 e 3.7, onde o sinal transmitido é modelado pela equação 3.6 e o sinal recebido modelado pela equação 3.7, a amplitude do sinal recebido é diferente da amplitude do sinal transmitido, adicionalmente com uma fase e um ruído aditivo. A relação sinal-ruído (Signal-to-Noise Ratio - SNR) é um conceito usados em diversos campos que envolvem medidas de um sinal em meio ruidoso, definido

Figura 21 – Estimações da Velocidade do Vento baseadas na Sensibilidade para $\vartheta = 5, 10, 15$ e 20 m/s



Fonte: Autor.

como a razão entre a potência de um sinal e a potência de um ruído sobreposto ao sinal. A relação sinal-ruído é um termo para a razão entre as potências de um sinal contendo alguma informação e um ruído de fundo que pode ser modelada por:

$$SNR = \frac{P_{sinal}}{P_{ruído}} \quad (4.3)$$

onde: P_{sinal} é a potência do sinal, $P_{ruído}$ é a potência do ruído.

De acordo com o modelo apresentado na Figura 14, o sinal transmitido é uma onda sinusoidal, com amplitude A , e o ruído é de natureza aleatória com valor médio zero e desvio padrão σ . Assim, a expressão do SNR em decibéis pode ser expressa por:

$$SNR = 10 \log\left(\frac{A^2/2}{\sigma^2}\right) (dB) \quad (4.4)$$

Nota-se da Equação 4.4, que quanto menor a variância do ruído, maior o valor do SNR, e por tanto uma melhor qualidade do sistema de medição.

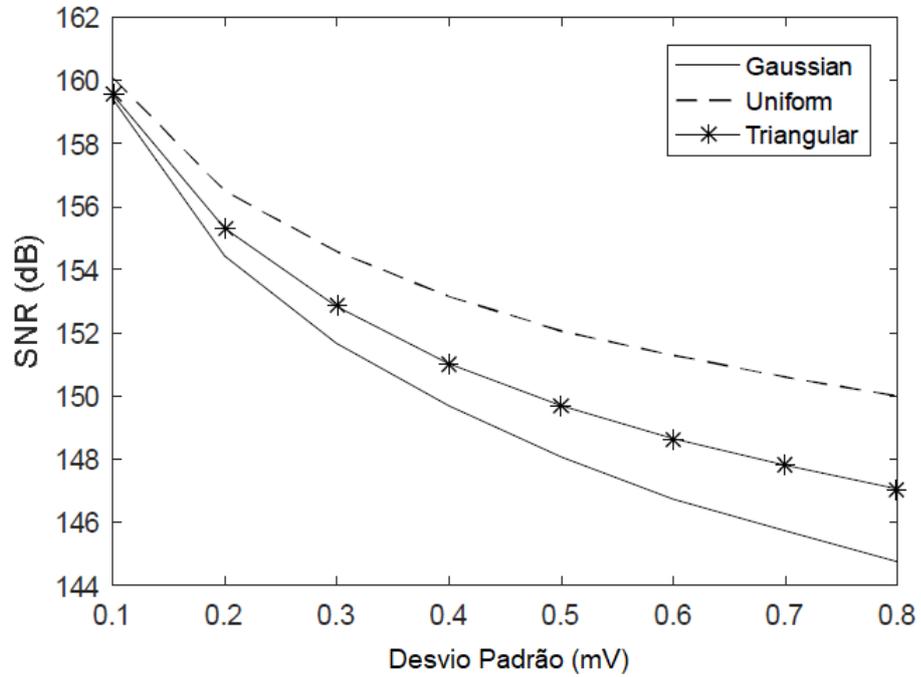
Com o propósito de estimação do ToF e a incerteza associada a esta medição, foi utilizado o procedimento baseado na Simulação Monte Carlo, como dito anteriormente. Para tal, foram estabelecidas as configurações do sistema de medição da Figura 12, sendo:

- Distância entre os transdutores ultrassônicos $L = 0.1$ m
- Velocidade do vento $v = 10$ m/s
- Temperatura $T = 20$ °C
- Ângulo de alinhamento entre a direção da velocidade do vento e os transdutores ultrassônicos de $\theta = \pi/4$
- Atenuação do meio = 10% da amplitude máxima do sinal transmitida
- Sinal elétrico transmitido com 1 volt de amplitude
- A detecção do sinal recebido utilizando a Técnica de Detecção de Limiar foi capturado considerando um limiar de 0.8 volt
- Tipo de características da PDF do ruído aleatório: Gaussiano, Triangular e Uniforme, com valor médio zero e desvio padrão $\sigma = 0.01$ volt e $\sigma = 0.03$ volt.
- Número de simulação do método SMC, $M=10000$

Figura 22 ilustra a relação sinal-ruído (SNR) em função do desvio padrão do ruído no meio. Três tipos de FDP's para o ruído foram considerados nas simulações: Gaussiana, Uniforme e Triangular (de acordo com a Figura 13). Foi observado que o ruído de distribuição gaussiana promove resultados com o menor valor de SNR. Por outro lado, um ruído com distribuição uniforme apresenta resultados com maiores valores para SNR. Enquanto isso, a distribuição triangular ruidosa produz valores de SNR entre máximos e mínimos nas simulações.

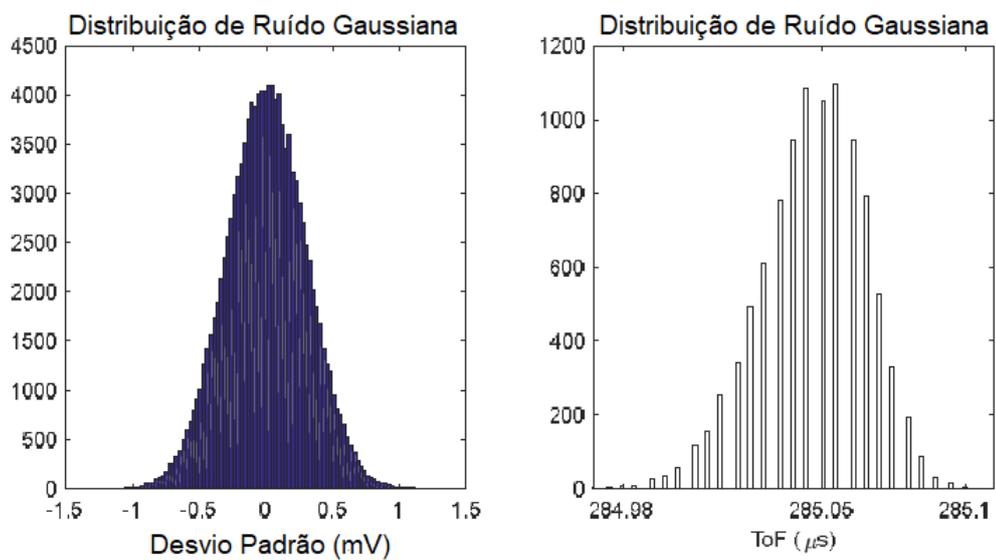
Figuras 23, 24 e 25 mostram resultados para as FDP's do *ToF* adquiridos usando o método SMC considerando três tipos de FDP's ruidosos com desvio padrão $\sigma = 0.3$ mV. Para cada cenário de simulação, testes de normalidade foram utilizados para os respectivos resultados, tais testes têm como objetivo determinar se um conjunto de dados de uma dada variável aleatória, é bem modelada por uma distribuição normal ou não, ou para calcular a probabilidade da variável aleatória subjacente estar normalmente distribuída. Mais precisamente, os testes são uma forma de seleção de modelos, e sendo assim, para todos os casos apresentados os resultados desses testes foram positivos para distribuição normal ou gaussiana.

Figura 22 – SNR por Desvio Padrão



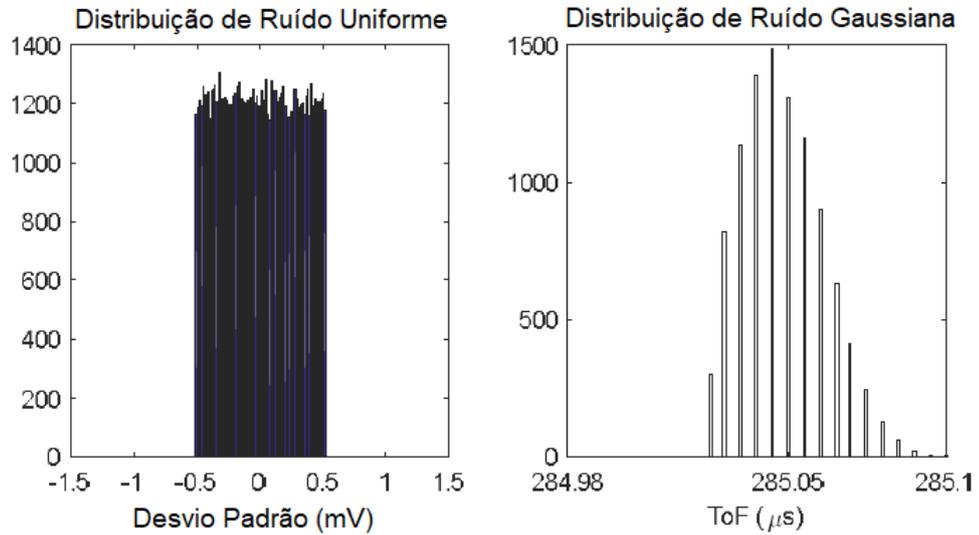
Fonte: Autor.

Figura 23 – FDP do ToF usando ruído Gaussiano com $\sigma=0.3$ mV



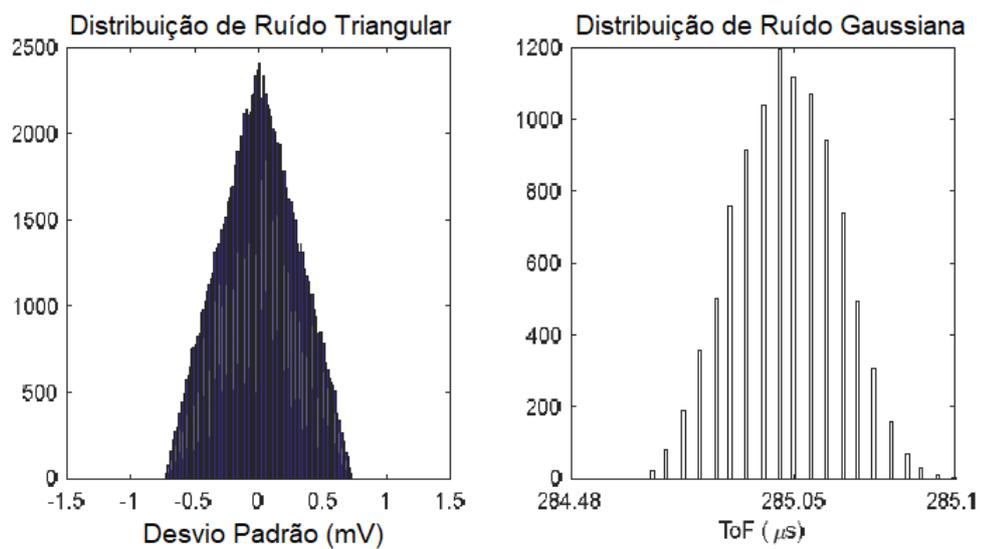
Fonte: Autor.

Figura 24 – FDP do ToF usando ruído Uniforme com $\sigma=0.3$ mV



Fonte: Autor.

Figura 25 – FDP do ToF usando ruído Triangular com $\sigma=0.3$ mV



Fonte: Autor.

5 CONCLUSÃO

Neste trabalho, foi realizada uma análise de sensibilidade na estimativa de tempo de trânsito (ToF) usando transdutores ultrassônicos. Observou-se que existe uma variação da sensibilidade do ToF associado às variações de temperatura no meio de medição. Esta variação deve-se principalmente à influência direta da temperatura na velocidade do som com a qual a onda ultrassônica se propaga. A partir dos resultados, observou-se que a sensibilidade do ToF diminui quando a temperatura no ambiente operacional do sensor aumenta, possibilitando a escolha de um ponto de operação de acordo com essa temperatura. Com relação à velocidade do vento, observou-se que os limites de variação de velocidade são aproximadamente constantes mesmo com o aumento da temperatura. Diante disso, pode-se concluir que a análise de sensibilidade permite definir critérios para o dimensionamento de sistemas de medição de velocidade do vento, com diferentes pontos de operação e considerando variações máximas do instrumento de medição. Dessa forma, concedendo designers e projetistas a avaliarem os efeitos e fontes de incertezas, no interesse de construir modelos mais robustos.

Além disso, a implementação do método de Simulação Monte Carlo foi desenvolvida com o fim de determinação da função densidade de probabilidade do tempo de trânsito (ToF) para aplicações na medição da velocidade do vento usando transdutores ultrassônicos quando considerado várias formas de ruídos aditivos no meio de propagação (Gaussiana, Uniforme e Triangular). O método proposto considera o procedimento do Suplemento 1 do Guia de Avaliação e Expressão de Incertezas na Medição (GUM). Foi observado que o método SMC produziu a função de densidade de probabilidade do ToF , que por sua vez se relaciona com a forma de FDP do ruído aditivo. Diante disso, foi concluído que a forma da FDP do ruído influencia na forma de FDP do ToF . Este resultado pode ser usado para aprimoramento do modelo do sistema para medição de velocidade do vento quando usado transdutores ultrassônicos no qual o princípio de medição seja o tempo de trânsito ultrassônico (ToF).

Bibliografia

- [1] Lihua, W.; Dawei, Y. Study of anemometer for wind power generation. In: 2014 International Conference on Mechatronics and Control (ICMC). IEEE, 2014. p. 657–661. ISBN 978-1-4799-2538-4.
- [2] Halliday, David; KRANE, Kenneth S; RESNICK, Robert. Física. 4.ed. Rio de Janeiro: LTC – Livros Técnicos e Científicos. v. 2-4, 1996.
- [3] Santos, A. O., Desenvolvimento de um Sistema de Sensoriamento de Posição e Atuação para Posicionamento Dinâmico de Modelos Reduzidos em Tanques de Prova, São Paulo, SP. Dissertação de mestrado, Universidade de São Paulo, 2005.
- [4] Almeida, W. R. M., Anemômetro Baseado no Método de Tempo de Trânsito: Estudo Comparativo de Arquiteturas, Avaliação de Incertezas e Implementação, São Luís, MA. Dissertação de mestrado, Universidade Federal do Maranhão, 2004.
- [5] F.A.O. Santos, J.M.M. Villanueva, Mariana R. Villarim, “Sensitivity Analysis in Wind Speed Measurement Using Ultrasonic Transducers,” 4rd International Symposium on Instrumentation Systems, Circuits and Transducers (INSCIT). pp. 1–5, Year 2019.
- [6] Pàllas-Areny. Sensor ans Signal Conditioning. 2. ed. [S.l.]: [s.n.], 2001.
- [7] Villanueva. Análise de Incertezas e Fusão de Dados Baseada em Aritmética Fuzzy para Medição da Velocidade do Vento Utilizando Transdutores Ultrassônicos. Simpósio Brasileiro de Automação Inteligente, VIII SBAI , Florianópolis, Brasil, 2007b.
- [8] F Santos, J Villanueva, R Gouveia and J. Silva. "Method of Monte Carlo simulation for the analysis of uncertainty for ultrasonic time-of-flight". IOP Conf. Series: Journal of Physics: Conf. Series 1044 (2018) 012045.
- [9] Yeh. An Intelligent Ultrasonic Flow Meter for Improved Flow Measurement and Flow Calibration Facility. IEEE Instrumentation and Measurement Tecnology Conference, v. 3, p. 1741-1746, 2001.
- [10] Webster. Measurement, Instrumentation and Sensors Handbook. [S.l.]: [s.n.], 1999.
- [11] F.A.O. Santos, J.M.M. Villanueva, J.T.C. Neto, “Modeling a Multi-Echo Ultrasonic Waves Propagation using 2D Ray-Tracing Method,” 3rd International Symposium on Instrumentation Systems, Circuits and Transducers (INSCIT). pp. 1–5, Year 2018.
- [12] Tong, Chia-Chang and Figueroa, J. Fernando., A Method fo Short or Long Range Time-of-Flight Measurements Using Phase –Detection With an Analog Circuit., IEEE Tans. Instrum. Meas., vol. 50, no. 5, Oct. 2001.

- [13] R Gouveia, J Villanueva, F Santos and J. Silva. "Convergence analysis of the extended Kalman filter used in the ultrasonic time-of-flight estimation". IOP Conf. Series: Journal of Physics: Conf. Series 1044 (2018) 012018.
- [14] Kaimal, J. C., Businger J. A., A Continuous Wave Sonic Anemometer-Thermometer, Journal of Applied Meteorology, 1963, pp. 156-164.
- [15] Hartley, G. The development of electrical anemometers. Proceedings of the IEE - Part II: Power Engineering, v. 98, n. 64, p. 430-437, aug 1951. ISSN 2054-0639.
- [16] Kaganov, E.; YAGLOM, A. Errors in wind-speed measurements by rotation anemometers. Boundary-Layer Meteorology, v. 10, n. 1, p. 15-34, mar 1976. ISSN 0006-8314.
- [17] J. M. Villanueva, Catunda S.Y., Tanscheit R. "Maximum-Likelihood Data Fusion of Phase-Difference and Threshold-Detection Techniques for Wind-Speed Measurement", IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, Vol. 58, Issue. 7, pp: 2189-2195, 2009.
- [18] D. Fernandes, L. Gomes and A. Costa, "Wind speed and direction measurement based on time of flight ultrasonic anemometer", IEEE 26th International Symposium on Industrial Electronics (ISIE), Edinburgh, pp. 1417-1422, 2017.
- [19] Q. Fan, D. Xiao, X. Zhang, "Research on the ultrasonic transducer sensitivity," IEEE Symposium on Piezoelectricity, Acoustic Waves, and Device Applications. pp. 433-436, Year 2014.
- [20] A.S. Morris, Measurement and Instrumentation Principles, 3rd ed. Butterworth Heinemann, 2001.
- [21] J. Brignell and N. White, Intelligent Sensor Systems, Institute of Physics Publishing Bristol and Philadelphia, 1996.
- [22] Mauro Sérgio Silva Pinto, "Especificação de Projeto para Medição de Velocidade de Vento Utilizando Anemômetro Ultrassônico com o Método de Diferença de Fase", Universidade Federal do Maranhão, 2006.
- [23] Rafael Duarte Limeira, "Sistema Embarcado para a Medição da Velocidade do Vento Utilizando Transdutores Ultrassônicos", Universidade Federal da Paraíba, 2015.
- [24] Giancarlo Michelino Gaeta Lopes, "Sistema de Aquisição de Dados para Monitoramento da Velocidade do Vento em Três Dimensões Baseado em Ultrassom", Universidade Estadual de Londrina, 2016.