

UNIVERSIDADE FEDERAL DO MARANHÃO  
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E TECNOLOGIA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE ELETRICIDADE

**ESPECIFICAÇÕES DE PROJETO PARA MEDIÇÃO DE  
VELOCIDADE DE VENTO UTILIZANDO ANEMÔMETRO ULTRA-  
SÔNICO COM O MÉTODO DE DIFERENÇA DE FASE**

*Mauro Sérgio Silva Pinto*

São Luís - MA  
2006

# **ESPECIFICAÇÕES DE PROJETO PARA MEDIÇÃO DE VELOCIDADE DE VENTO UTILIZANDO ANEMÔMETRO ULTRA-SÔNICO COM O MÉTODO DE DIFERENÇA DE FASE**

Dissertação de Mestrado submetida à Coordenação do Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Eletricidade da UFMA como parte dos requisitos para obtenção do título de mestre em Engenharia Elétrica.

Por

*Mauro Sérgio Silva Pinto*

25 de Outubro de 2006

# ESPECIFICAÇÕES DE PROJETO PARA MEDIÇÃO DE VELOCIDADE DE VENTO UTILIZANDO ANEMÔMETRO ULT SÔNICO COM O MÉTODO DE DIFERENÇA DE FASE

Mauro Sérgio Silva Pinto

Dissertação aprovada em 27 de Outubro de 2006



Prof. Dr. Sebastian Yuri Cavalcanti Catunda  
(Orientador)



Prof. Dr. João Viana da Fonseca Neto  
(Membro da Banca Examinadora)



Prof. Dr. Raimundo Carlos Silvério Freire  
(Membro da Banca Examinadora)

**ESPECIFICAÇÕES DE PROJETO PARA MEDIÇÃO DE  
VELOCIDADE DE VENTO UTILIZANDO ANEMÔMETRO ULTRA-  
SÔNICO COM O MÉTODO DE DIFERENÇA DE FASE**

**MESTRADO**

**Área de Concentração: AUTOMAÇÃO E CONTROLE**

**MAURO SÉRGIO SILVA PINTO**

**Orientador: Dr. Sebastian Yuri Cavalcanti Catunda**

**Programa de Pós-Graduação**

**Em Engenharia de Eletricidade da**

**Universidade Federal do Maranhão**

# Dedicatória

---

À minha mãe Leir Abraão Silva

Aos meus irmãos Mavio Silva Pinto, Marcio Silva Pinto e Keyla Regina Silva Pinto.

# Agradecimentos

---

Agradeço principalmente a DEUS, que tem estado ao meu lado em todos os momentos da minha vida, seja nos momentos bons ou maus.

A Jhose Ariam Melo Costa grande incentivo, amizade e amor, e por está sempre comigo.

Ao Professor SEBASTIAN YURI C. CATUNDA pela orientação, amizade e apoio.

Aos meus amigos Rycardo Bruno, Lúcio Flávio, Jaderson Pereira, Juan Mauricio Moises, Denner Guilhon, Diomadison, Will Almeida pelo apoio, incentivo e amizade.

# Resumo

---

Apresenta-se neste trabalho o método do tempo de trânsito para determinação da velocidade do vento utilizando transdutores ultra-sônicos. Apresentam-se as técnicas da diferença de fase e detecção de limiar para determinação do tempo de trânsito deste método. Um estudo mais aprofundado é realizado para o método da diferença de fase de forma a determinar as especificações de projeto usando esse método, com relação à sensibilidade ao ruído, dependência da faixa de medição com temperatura do meio e resolução de medição. Um exemplo de especificação de projeto é apresentado de forma a ilustrar os procedimentos desenvolvidos.

Palavras Chaves: medição da velocidade de vento, diferença de fase, tempo de vôo, detecção de limiar, sensores ultra-sônicos, dependência com a temperatura.

# Abstract

---

The time of flight method for determining the wind speed using ultrasonic transducers is presented in this work. The techniques of phase difference and threshold detection for determining the time of flight are presented. A more detailed study of the phase difference technique is carried out in order to determine the design specifications using this method with respect to the noise sensitivity, dependence of the measurement range with the medium temperature and measurement resolution. A design specification example is presented in order to illustrate the proposed procedures.

Keywords: Wind speed measurement, phase difference, time of flight, threshold detection, ultrasonic sensors, temperature dependence.

# Sumário

---

<b>DEDICATÓRIA .....</b>	<b>V</b>
<b>AGRADECIMENTOS .....</b>	<b>VI</b>
<b>RESUMO .....</b>	<b>VII</b>
<b>ABSTRACT .....</b>	<b>VIII</b>
<b>SUMÁRIO.....</b>	<b>IX</b>
<b>LISTA DE FIGURAS.....</b>	<b>XI</b>
<b>LISTA DE ABREVIATURAS E SÍMBOLOS .....</b>	<b>XIII</b>
<b>1 INTRODUÇÃO .....</b>	<b>1</b>
1.1 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO.....	2
<b>2 ONDAS SONORAS.....</b>	<b>4</b>
2.1 ONDAS DE SOM E SUAS PROPRIEDADES GERAIS. ....	4
2.1.1 Propagação das ondas ultra-sônicas. ....	5
2.1.2 Deslocamento das ondas ultra-sônicas.....	7
2.2 GERAÇÃO DA ONDA ULTRA-SÔNICA.....	8
2.2.1 Sensores Ultra-sônicos.....	8
2.2.2 Configurações de operação dos transdutores.....	10
<b>3 MEDIÇÃO DA VELOCIDADE DO VENTO.....</b>	<b>13</b>
3.1 TIPOS DE ANEMÔMETROS.....	13
3.1.1 Anemômetros Rotacionais.....	13
3.1.2 Tubos de Pressão.....	14
3.1.3 Deflexão .....	15
3.1.4 Anemômetro Termoelétrico .....	16
3.1.5 Anemômetro Laser.....	17
3.1.6 Anemômetro Ultra-sônico .....	18
3.2 TÉCNICAS DE MEDIÇÃO DA VELOCIDADE DO VENTO UTILIZANDO ANEMÔMETRO ULTRA-SÔNICO .....	20
3.2.1 Medição do Fluido por Efeito Doppler Ultra-sônico (DUF).....	20
3.2.2 Medição do Fluido por Tempo de Trânsito (TTUF ou ToF).....	21
<b>4 DETERMINAÇÃO DO TEMPO DE TRÂNSITO.....</b>	<b>23</b>
4.1 MÉTODO DA DETECÇÃO DO LIMIAR .....	26
4.2 MÉTODO DA DIFERENÇA DE FASE. ....	28

4.2.1 <i>Análise da Velocidade do Vento em Função da Distância</i> .....	30
4.3 SENSIBILIDADE AO RUÍDO E ATENUAÇÃO DO MEIO .....	34
<b>5 ESPECIFICAÇÕES PARA O MÉTODO DE DIFERENÇA DE FASE E SIMULAÇÕES</b> .....	<b>37</b>
5.1 INFLUÊNCIA DA TEMPERATURA. ....	37
5.2 FAIXA DE MEDIÇÃO DE VELOCIDADE DO VENTO.....	38
5.3 RESOLUÇÃO DE MEDIÇÃO DA VELOCIDADE DO VENTO.....	40
5.4 EXEMPLO DE ESPECIFICAÇÕES DE PROJETO.....	41
5.5 SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL .....	42
5.5.1 <i>Transdutores</i> .....	43
5.5.2 <i>Meio de Transmissão</i> .....	43
5.5.3 <i>Técnicas de medição de ultra-som</i> . ....	44
<b>6 CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS</b> .....	<b>46</b>
6.1 CONCLUSÕES.....	46
6.2 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	47
<b>BIBLIOGRAFIA</b> .....	<b>48</b>
<b>APÊNDICE A – CÓDIGOS MATLAB</b> .....	<b>51</b>
A1. CÓDIGO FONTE DA SIMULAÇÃO DO GRÁFICO DA VELOCIDADE MÁXIMA .....	51
A2 CÓDIGO FONTE DA SIMULAÇÃO DA VRF.....	52
A3 CÓDIGO DA SIMULAÇÃO DA FASE EM FUNÇÃO DA VELOCIDADE MÁXIMA E DA DISTÂNCIA ENTRE OS SENSORES .....	52
A4 CÓDIGO DA SIMULAÇÃO DA FASE COM VALORES ACIMA DA VELOCIDADE MÁXIMA.....	53
<b>APÊNDICE B – DATA SHEET TÍPICO DE TRANSDUTOR ULTRA-SÔNICO</b> .....	<b>55</b>

# Lista de Figuras

---

FIGURA 1. ILUSTRAÇÃO DA PROPAGAÇÃO DAS ONDAS ULTRA-SÔNICAS LONGITUDINAIS..	6
FIGURA 2. ILUSTRAÇÃO DA PROPAGAÇÃO DAS ONDAS ULTRA-SÔNICAS LONGITUDINAIS..	7
FIGURA 3. ILUSTRAÇÃO DA RESPOSTA EM FREQUÊNCIA DE UM SENSOR DE 25 KHZ .....	10
FIGURA 4. ILUSTRAÇÃO DA TRANSMISSÃO ULTRA-SÔNICA EM MODO PULSADO OU CONTÍNUO COM COMPENSAÇÃO DE TEMPERATURA. ....	11
FIGURA 5. ILUSTRAÇÃO DA TRANSMISSÃO ULTRA-SÔNICA EM MODO CONTÍNUO.....	11
FIGURA 6. ILUSTRAÇÃO DE UM ANEMÔMETRO DO TIPO ROTACIONAL: A) USANDO HÉLICES E B) TIPO CÂNECAS SEMI-CÔNICAS. ....	14
FIGURA 7. ILUSTRAÇÃO DO FUNCIONAMENTO DE UM MODELO DO TUBO DE PITOT. ....	15
FIGURA 8. ILUSTRAÇÃO DO ANEMÔMETRO DE DEFLEXÃO. ....	16
FIGURA 9. ILUSTRAÇÃO DE UM ANEMÔMETRO DE FIO QUENTE. ....	17
FIGURA 10. FORMAÇÃO DA INTERSECÇÃO DOS FEIXES E FORMAÇÃO DAS FRANJAS NO DETALHE $\lambda$ O VOLUME DAS FRANJAS. ....	18
FIGURA 11. ILUSTRAÇÃO DE UM MODELO DE ANEMÔMETRO ULTRA-SÔNICO, FABRICADO PELA THIES. ....	19
FIGURA 12. ILUSTRAÇÃO DE UM ARRANJO DA TÉCNICA QUE USA DUF.....	21
FIGURA 13. ILUSTRAÇÃO DE UM ARRANJO DA TÉCNICA QUE USA CCFU.....	22
FIGURA 14. ILUSTRAÇÃO DE UM SISTEMA QUE USA A TÉCNICA DO TEMPO DE TRÂNSITO.	23
FIGURA 15 - ILUSTRAÇÃO DA DETECÇÃO DA RECEPÇÃO DE UMA ONDA ULTRA-SÔNICA. ..	27
FIGURA 16. EXEMPLO DE DETECÇÃO DE LIMIAR, TX – SINAL TRANSMITIDO E RX – SINAL RECEBIDO.....	28
FIGURA 17. ILUSTRAÇÃO DO MÉTODO DE DETECÇÃO DE FASE PARA O CÁLCULO DO TEMPO DE TRÂNSITO. ....	30

<b>FIGURA 18. ILUSTRAÇÃO DA DIFERENÇA DE FASE MEDIDA EM FUNÇÃO DA DISTÂNCIA ENTRE OS SENSORES E DA VELOCIDADE DO VENTO. ....</b>	<b>32</b>
<b>FIGURA 19. ILUSTRAÇÃO DA DIFERENÇA DE FASE MEDIDA EM FUNÇÃO VELOCIDADE DO VENTO, PARA UMA DISTÂNCIA IGUAL A VINTE VEZES O COMPRIMENTO DE ONDA. ....</b>	<b>33</b>
<b>FIGURA 20. CURVAS DE <math>\sqrt{VRF}</math> PARA <math>\epsilon_A = \epsilon_N</math>, <math>\epsilon_A = 5\epsilon_N</math> E <math>\epsilon_N = 5\epsilon_A</math>. ....</b>	<b>36</b>
<b>FIGURA 21. GRÁFICO DOS VALORES DA VELOCIDADE DO VENTO EM FUNÇÃO DA TEMPERATURA. ....</b>	<b>38</b>
<b>FIGURA 22 - VELOCIDADE MÁXIMA DO VENTO QUE PODE SER MEDIDA EM FUNÇÃO DA DISTÂNCIA ENTRE OS SENSORES. ....</b>	<b>40</b>
<b>FIGURA 23. ILUSTRAÇÃO DO DIAGRAMA DE BLOCOS DA SIMULAÇÃO DA MEDIÇÃO DA VELOCIDADE DO SOM UTILIZANDO-SE SENSORES ULTRA-SÔNICOS. ....</b>	<b>42</b>
<b>FIGURA 24. APRESENTAÇÃO DO BLOCO DO TRANSDUTOR UTILIZADO PARA SIMULAR A TRANSMISSÃO DO SINAL ULTRA-SÔNICO. ....</b>	<b>43</b>
<b>FIGURA 25. APRESENTAÇÃO DO BLOCO QUE SIMULA O MEIO DE TRANSMISSÃO. ....</b>	<b>44</b>
<b>FIGURA 26. APRESENTAÇÃO DO BLOCO QUE FAZ A DETECÇÃO DO LIMIAR. ....</b>	<b>44</b>
<b>FIGURA 27 - APRESENTAÇÃO DO BLOCO QUE FAZ A DETECÇÃO DO CRUZAMENTO POR ZERO. ....</b>	<b>45</b>

# Lista de Abreviaturas e Símbolos

---

$VRF$	<i>fator de redução de variância</i>
$C_0$	<i>velocidade do som sem vento</i>
$C$	<i>velocidade do som com a influência do vento</i>
$L$	<i>distância entre os sensores</i>
$\bar{v}$	<i>velocidade do vento</i>
$t$	<i>tempo de vôo</i>
$t^M$	<i>tempo de vôo mais o atraso eletrônico</i>
$t^E$	<i>atraso eletrônico</i>
$T_K$	<i>temperatura em Kelvin</i>
$\theta$	<i>ângulo entre o alinhamento dos sensores ultra-sônicos e a horizontal</i>
$t_{AB}$	<i>tempo de vôo do sensor A para o sensor B</i>
$t_{BA}$	<i>tempo de vôo do sensor B para o sensor A</i>
$O_{ref}$	<i>valor de referência de controle</i>
$u_\phi$	<i>Incerteza da fase</i>
$\epsilon_N$	<i>incerteza relativa da fase</i>
$K_p$	<i>ganho proporcional do controlador</i>
$f$	<i>freqüência de ressonância dos sensores ultra-sônicos</i>
$\Delta C_0$	<i>variação da velocidade do som devido à variação da temperatura</i>
$C_0^*$	<i>velocidade do som no ar parado para uma dada temperatura</i>
$\vartheta_{max}$	<i>velocidade máxima do vento medida</i>
$r$	<i>resolução</i>
$V$	<i>tensão</i>

$V_m$	<i>Amplitude máxima de tensão</i>
$u_A$	<i>incerteza na atenuação do sinal</i>
$u_N$	<i>incerteza do ruído aditivo</i>
$\Delta x$	<i>deslocamento da onda ultra-sônica</i>
$A$	<i>amplitude genérica de uma onda ultra-sônica</i>
$\varphi$	<i>defasagem entre as ondas transmitidas e recebidas</i>

Pinto, Mauro Sérgio Silva

Especificação de projeto para medição de velocidade de vento utilizando anemômetro ultra-sônico com o método de diferença de fase / Mauro Sérgio Silva Pinto. – São Luís, 2006.

70 f.

Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Eletricidade, Universidade Federal do Maranhão, 2006.

1. Transdutores ultra-sônicos. 2. Medição da velocidade do vento. 3. Anemômetros ultra-sônicos. I. Título.

CDU: 681.586.48

# 1 introdução

---

A medição da velocidade do vento tem relevância em aplicações biomédicas (pulmonares), é essencial para aplicações meteorológicas e muito importantes para avaliação de locais para instalação de geradores eólicos. Nesta última aplicação, as medições têm que ser realizadas com uma exatidão suficientemente grande de forma a prover informações confiáveis sobre a densidade de potência do vento, parâmetro mais importante na determinação de locais para instalação de usinas eólicas.

Diversos métodos e sensores existem para medição de velocidade do vento, sendo os mais utilizados: 1) de rotor, baseado na medição da velocidade angular de um rotor, que pode ser impulsionado por uma ventoinha, utilizando-se canecas ou hélices; 2) de fio quente, que se baseia na determinação da velocidade de vento pela quantidade de calor retirada de um sensor por convecção forçada; 3) ultra-sônico que se baseia na determinação da velocidade do vento através da propagação das ondas ultra-sônicas, podendo utilizar os métodos de tempo de trânsito ou efeito Doppler. As vantagens do método ultra-sônico, com relação aos outros, são que: ele não possui partes móveis, não obstrui e nem mantém contato com o fluxo de ar.

Os sensores ultra-sônicos são largamente usados em aplicações industriais para medir distâncias entre objetos no ar e para medir fluxos de fluidos [1]. A operação padrão, utilizando o método do tempo de trânsito (ToF, *Time of Flight*) consiste em determinar o tempo necessário para uma onda ultra-sônica viajar de um sensor transmissor a um sensor receptor [2]. Existem várias técnicas para o cálculo do ToF, dentre elas, destacam-se o Método do Limiar e o Método da Diferença de Fase.

O presente trabalho traz um estudo sobre a utilização da técnica da diferença de fase, apresentando as limitações deste método, bem como da sua aplicabilidade no sentido de se diminuir a incerteza inerente aos processos de medição realizados com este tipo de técnica. O estudo apresentado neste trabalho foi realizado no intuito de determinar as especificações de projeto usando esse método, com relação à sensibilidade ao ruído e grandezas que influenciam diretamente no processo de medição, tais como: distância entre os sensores, o comprimento de onda utilizado, a velocidade máxima do vento medida, e a temperatura do meio.

## **1.1 Organização do Trabalho**

O presente trabalho está dividido em seis capítulos, um apêndice e referências bibliográficas:

Capítulo 2 – Definições preliminares. Apresenta-se um arcabouço sobre todas as propriedades gerais do som, um breve estudo sobre a propagação da onda ultra-sônica, a apresentação de equações analíticas que descrevem o deslocamento das ondas ultra-sônicas e a geração das ondas ultra-sônicas, ou seja, os dispositivos que têm a capacidade de gerar uma onda ultra-sônica.

Capítulo 3 - Medição da velocidade do vento. Neste capítulo, são apresentados os principais tipos de anemômetros ultra-sônicos disponíveis no mercado bem como a evolução destes aparelhos e as principais técnicas de medição da velocidade do vento utilizando-se anemômetros ultra-sônicos encontradas hoje.

Capítulo 4 - Determinação do Tempo de Trânsito. No capítulo quatro são apresentados as principais técnicas para a determinação do tempo de trânsito: a detecção do limiar e a diferença de fase. Além de um estudo mais aprofundado com a técnica da diferença de fase, apresentando-se equações analíticas que descrevam o seu comportamento e limites físicos.

Capítulo 5 - Especificações para o método de diferença de fase e Simulações. No capítulo cinco são apresentadas as grandezas que influenciam na faixa de medição da velocidade do vento, o comportamento físico destas grandezas em função da diferença de fase e um exemplo de especificação de projetos com o método da diferença de fase. Além disso, apresenta-se o modelo utilizado para as simulações com o método da diferença de fase, bem

como os subsistemas desenvolvidos para a simulação do ambiente e para a simulação das técnicas de limiar e cruzamento por zero.

Capítulo 6 – Conclusão. Apresentam-se as conclusões e sugestões relacionadas ao trabalho apresentado.

## 2 Ondas Sonoras

---

Neste capítulo, são apresentados: uma breve revisão sobre ondas ultra-sônicas, o princípio básico do funcionamento de sensores ultra-sônicos e as propriedades gerais do som.

### 2.1 Ondas de Som e suas Propriedades Gerais.

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 ultra-sônicas.

As ondas sonoras são manifestações mecânicas, ou seja, vibrações de moléculas 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 [3]. Elas são originadas quando parte do meio, quer seja sólido, líquido ou gasoso, em que são encontradas é deslocado de sua posição normal e em seguida abandonado.

De forma microscópica, 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, o qual se pode conceituar como uma percepção fisiológica das ondas sonoras que são transmitidas ao aparelho auditivo humano, o ouvido. Tais ondas sonoras podem ser classificadas quanto ao

seu número de ciclos por unidade de tempo, isto é, sua frequência, basicamente, pode ser classificada em três diferentes tipos ondas: as ondas sônicas, infra-sônicas e ultra-sônicas.

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

### **2.1.1 Propagação das ondas ultra-sônicas.**

As ondas sonoras e ultra-sônicas propagam-se através da matéria, de modo que ao alcançarem uma superfície de dois meios diferentes, parte da onda é refletida, parte é refratada (transmitida) e parte é absorvida. No momento em que as ondas ultra-sônicas 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 ultra-sônicas, tendo somente relevância em partículas que contenham muitos átomos [4].

Quando as partículas de um meio se deslocam de sua posição de equilíbrio a 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. [5]. 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 ultra-sônicas.

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.

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  $P_1$  e  $P_2$  contínuas que se propagam pelo fluido ao longo do tubo da figura 1, transportando energia pelo seu curso.

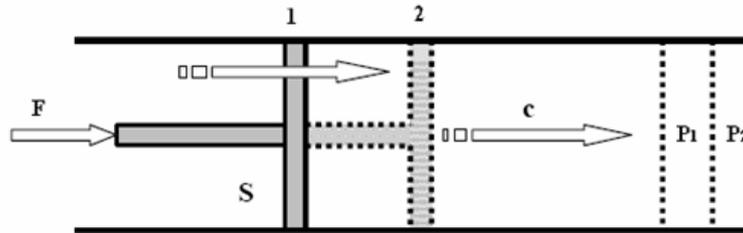


Figura 1.. Ilustração da propagação das ondas ultra-sônicas longitudinais.

A transmissão de pressões no meio de uma massa fluida, conforme a contida no arranjo ilustrado na Figura 1, não é instantânea, pois leva um determinado tempo para onda percorrer certa distância, o que configura certa velocidade de deslocamento que é, na verdade, igual à velocidade  $C$  de propagação da onda sonora no respectivo meio e a uma determinada temperatura. Assim, a velocidade do som no ar, a uma temperatura de  $20^{\circ}\text{C}$ , é igual a  $344\text{ m/s}$  ou  $1238,4\text{ km/h}$ . Em virtude de seu efeito compressivo, as ondas longitudinais podem se propagar em meios que sejam sólidos, líquidos e gasosos. [6].

As ondas ultra-sônicas *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.

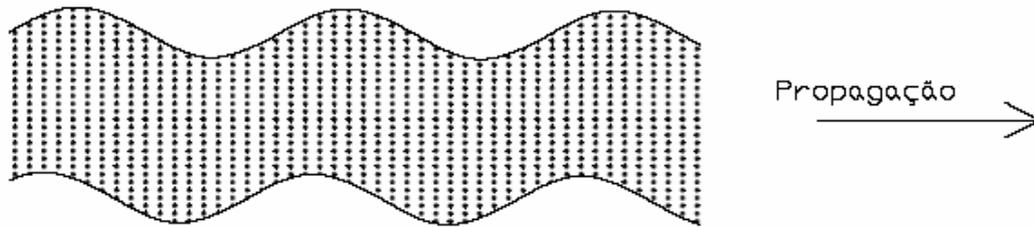


Figura 2. Ilustração da propagação das ondas ultra-sônicas longitudinais.

As ondas ultra-sônicas do tipo longitudinal têm velocidade de propagação maior que as ondas ultra-sônicas do tipo transversal, isto é, as ondas longitudinais são duas vezes mais rápidas que as ondas transversais. Neste trabalho, por se usar os fluidos como meio, as ondas ultra-sônicas consideradas, são as do tipo longitudinais.

### 2.1.2 Deslocamento das ondas ultra-sônicas

Considerando as ondas mecânicas que se propagem longitudinalmente, o deslocamento  $\Delta x$  em um ponto  $x$  a partir da origem do deslocamento, num eixo hipotético  $x$  no sentido positivo, como ilustrado no gráfico da figura 2, é dado por:

$$\Delta x = A \cdot \sin(2 \cdot \pi \cdot f \cdot t - \varphi) \quad (1)$$

Em que  $\Delta x$  é o deslocamento da onda ultra-sônica desde sua origem até um ponto  $x$  em função do tempo,  $A$  é a amplitude da onda,  $f$  é a frequência de vibração da onda ultra-sônica e  $\varphi$  é o deslocamento angular [7]. Neste trabalho,  $\varphi$  será tratado como a diferença de fase entre as ondas transmitidas e as ondas recebidas e pode ser calculada através da equação

A velocidade do som nos meios sólidos que são homogêneos e isotrópicos pode ser calculada segundo a equação (2):

$$v = \sqrt{\frac{E}{\rho}}, \quad (2)$$

em que  $\rho$  é a densidade do material, isto é, do sólido e  $E$  é o módulo de elasticidade do material. A equação (2) é dada em “m/s” [8].

Nos meios líquidos, a velocidade do som é tratada de uma forma diferente, ou seja, ela varia em função da compressibilidade adiabática  $k$  do líquido e de sua densidade  $\rho$ , esta relação pode ser verificada através da equação (3)

$$v = \sqrt{\frac{1}{k \cdot \rho}} . \quad (3)$$

A taxa em que a onda se desloca em função do tempo em materiais gasosos como o ar ou outro gás está em função da relação entre a compressibilidade  $k$  e da sua densidade  $\rho$ , especificamente, quando se trata de um gás, a sua compressibilidade é proporcional à sua pressão. Esta pressão é proporcional à densidade e à sua temperatura, seguindo este raciocínio, pode-se dizer que a velocidade do som nos gases pode ser dada pela equação (4), assim:

$$C = 20,074 \cdot \sqrt{T_K} . \quad (4)$$

Em que,  $T_K$  é a temperatura em Kelvins do meio em que se desloca a onda sonora. A velocidade  $C$  do som é dada então em “m/s” [8].

## 2.2 Geração da Onda Ultra-sônica

As ondas ultra-sônicas são geradas a partir de uma excitação mecânica das moléculas de um meio isotrópico e elástico. Esta excitação pode ser feita basicamente, através de sensores ultra-sônicos ou transdutores ultra-sônicos.

### 2.2.2 Sensores Ultra-sônicos

Os sensores ultra-sônicos são um tipo de transdutor ultra-sônico ou simplesmente transdutor que transmitem ondas mecânicas a uma frequência superior a 20 kHz.

Os transdutores são dispositivos que convertem uma forma de energia em outra e vice-versa. No caso específico dos transdutores ultra-sônicos, há uma transformação de energia elétrica em energia mecânica e vice-versa, através de um fenômeno conhecido como Piezo eletricidade. O fenômeno piezo elétrico foi descoberto por Pierre Curie e Jacques Curie em 1880 e consiste na variação das dimensões físicas de certos materiais quando sujeitos a campos elétricos ou o contrário, isto é, certos materiais sujeitos a deformações físicas

apresentam diferença de potencial elétrico proporcional à deformação. Este fenômeno pode ser reversível.

Como exemplo de matérias piezelétrico utilizados comercialmente, pode-se destacar: o quartzo, minerais do grupo da turmalina e os cristais naturais [9]. 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). Com o efeito reverso (efeito elétrico  $\Rightarrow$  efeito mecânico). Podem-se utilizar os materiais piezo elétricos para gerar ondas acústica a partir de um estímulo elétrico.

Os transdutores ultra-sônicos precisam de um cristal para gerar a onda ultra-sônica. Este cristal deve ser cortado de uma forma tal que um campo elétrico alternado, quando nele aplicado, produza variações em sua espessura. Dessa variação, resulta um movimento vibratório nas faces deste cristal, originando as ondas sonoras ultra-sônicas. Cada transdutor possui uma frequência de ressonância natural, tal que quanto menor a espessura do cristal, maior será a sua frequência de vibração [10].

Os sensores ultra-sônicos são utilizados nas mais diversas áreas do conhecimento, tais como: saúde, segurança (sensores de presença), automobilismo, meteorologia, indústrias, hospitais, e especificamente neste trabalho, para medição de velocidade de fluídos, de forma particular a medição da velocidade do ar [11].

Levando-se em consideração a resposta em frequência dos sensores ultra-sônicos, observa-se que seu comportamento se assemelha ao de um filtro do tipo passa-faixa. Isto pode ser observado através da ilustração de um gráfico exemplo na Figura 3, em que um sensor ultra-sônico de 25 kHz é mostrado.

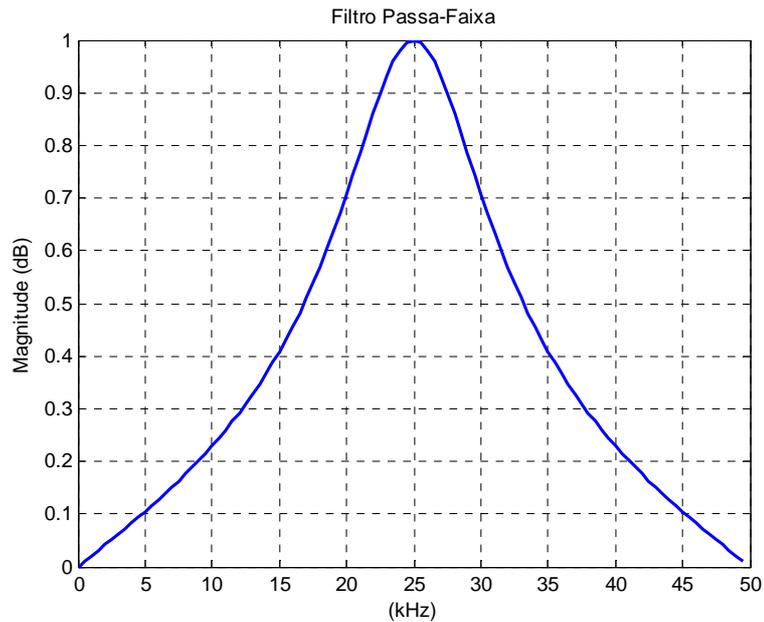


Figura 3. Ilustração da resposta em frequência de um sensor de 25 kHz

Utilizando-se o sensor ultra-sônico para a estimação de velocidade de fluidos, uma frequência apenas é utilizada: a frequência  $f_c$  que também pode ser chamada de frequência de corte do filtro passa-faixa.

### 2.2.2 Configurações de operação dos transdutores

Para medição da velocidade do vento tem-se que determinar a velocidade do som no ar. A velocidade do som no ar depende da temperatura do ar. A medição da velocidade do vento pode ser feita com transmissão unidirecional, medindo-se também a temperatura para determinar os valores tabelados da velocidade do som, ou bidirecionalmente realizando uma compensação automática da velocidade do som. Assim, podem-se utilizar os métodos contínuo e pulsado com os dois tipos de transmissão: unidirecional e bidirecional.

A diferença entre os modos contínuo e pulsado está na maneira com a qual o sinal de ultra-som pode ser transmitido, mais especificamente na interrupção da propagação da energia [12].

Na transmissão no modo pulsado, o sinal é transmitido em forma de rajadas, ou seja, pequenas amostras do sinal são transmitidas a cada intervalo de tempo. Assim, há interrupções frequentes na propagação de energia.

Apresenta-se na Figura 4, uma ilustração da transmissão de ondas ultra-sônicas utilizando-se o modo pulsado de transmissão com o tipo bidirecional. Para que haja este tipo de transmissão é necessário que um sincronismo seja feito entre os sensores 1 e 2 no momento da transmissão do sinal, pois há o risco de um dos sensores transmitindo quando, na verdade, deveria estar recebendo o sinal ultra-sônico. A mesma configuração pode ser utilizada para o método de transmissão contínuo, mas nesse caso, deve-se utilizar a compensação com a temperatura.



Figura 4. Ilustração da transmissão ultra-sônica em modo pulsado ou contínuo com compensação de temperatura.

No modo contínuo, o sinal ultra-sônico é transmitido, como sugerido pela própria denominação do modo, de forma contínua, ou seja, sem a necessidade de interrupções ou rajadas. Assim não existe a necessidade de um sincronismo prévio, entre os sensores, como o exigido pelo método anterior. Está ilustrado na Figura 5, um exemplo de transmissão utilizando-se o modo contínuo sem a compensação da temperatura. Nesse caso, a medição deve ser feita em dois sentidos.

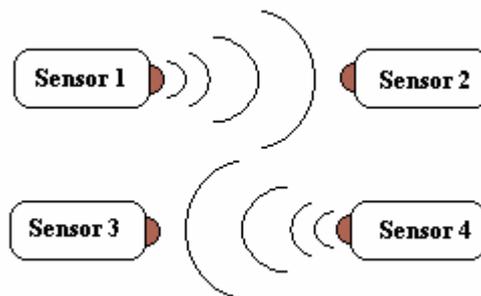


Figura 5. Ilustração da transmissão ultra-sônica em modo contínuo.

Para a utilização do arranjo da figura 5, é necessário que um sensor só transmita os dados do sinal ultra-sônico e um segundo só receba estes sinais, assim há a necessidade de se utilizar o dobro do número de sensores do método anterior.

Para a medição da velocidade vento utilizando-se os dois métodos apresentados nas Figuras 4 e 5, apesar da desvantagem de se utilizar o dobro de sensores, pode-se fazer uso de

uma técnica eficiente para a estimação da velocidade do vento: o método da diferença de fase. A desvantagem do uso de quatro sensores, como mostra a Figura 5, pode ser contornada com a medição da temperatura quando da estimação da velocidade do vento [13]. Isto reduz à metade o uso de sensores ultra-sônicos, no caso específico de quatro sensores para somente dois.

## 3 Medição da velocidade do vento

---

Os anemômetros são dispositivos que são 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 [14].

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 [15].

### 3.1 Tipos de Anemômetros

Os anemômetros mais modernos podem ser reunidos em cinco principais tipos: Rotacional, Tubo de Pressão, Deflexão, Termoelétricos e Ultra-sônicos.

#### 3.1.1 Anemômetros Rotacionais

Os anemômetros rotacionais são os mais simples e populares anemômetros utilizados para medição da velocidade do vento. São constituídos, basicamente, por hélices que giram a uma velocidade angular proporcional a velocidade do vento que passa por elas, conforme ilustrado na Figura 6-a. Este tipo de anemômetro ainda pode ser formado por “canecas semi-cônicas” anexadas a um eixo horizontal de rotação. Quando as moléculas de ar exercem uma força sobre as canecas, elas fazem com que o eixo horizontal de rotação gire a uma velocidade proporcional à velocidade de deslocamento do ar. Uma das grandes desvantagens desse tipo

de anemômetro é estar em contato com o ar, obstruindo a passagem do fluxo do ar para medir a velocidade do vento. Além disso, este anemômetro também é pouco sensível a rajadas de vento de curta duração, devido a sua inércia. Está ilustrado na Figura 6-b um exemplo de anemômetro rotacional.



Figura 6. Ilustração de um anemômetro do tipo rotacional: a) usando hélices e b) tipo canecas semi-cônicas.

### 3.1.2 Tubos de Pressão

O Tubo de Pressão é um tipo de anemômetro que usa diferenças de pressão exercida pelo movimento das moléculas do ar em movimento, para medir a velocidade do vento. Ou seja, este dispositivo mede a velocidade do vento convertendo a energia cinética em energia potencial no ponto de estagnação à entrada do tubo, conforme apresentado na Figura 7. Os Tubos de pressão também são conhecidos como Tubo de Pitot, em homenagem ao seu inventor Henri Pitot (1695-1771).

Este aparelho consiste, simplesmente, de um tubo apontado diretamente à direção do fluxo do fluido, conforme se pode verificar na Figura 7, este dispositivo é formado por duas entradas: uma que colhe a pressão estática e a outra serve para a obtenção da pressão de estagnação. Estas duas entradas são ligadas a um espaço preenchido com um fluido que varia seu nível em função da pressão dinâmica. Através da equação de Bernoulli, sabe-se que a pressão dinâmica é a diferença entre as pressões estáticas e de estagnação. Assim, pode-se estabelecer uma relação direta entre as pressões de estagnação e as pressões estáticas através de

$$v = \sqrt{\frac{2 \cdot g \cdot (P_{ESTAGNAÇÃO} - P_{ESTÁTICA})}{\gamma}}, \quad (5)$$

em que  $\gamma$  é o peso específico do fluido,  $g$  a aceleração gravitacional,  $P_{ESTAGNAÇÃO}$  e  $P_{ESTÁTICA}$ , são respectivamente a pressão de estagnação e pressão estática.

Observa-se como principal vantagem do Tubo de Pitot o fato dele ser facilmente construído a um custo muito reduzido, quando comparado aos demais sensores disponíveis no mercado e praticamente não necessita de calibração [16].

As principais limitações deste tipo de sensor são que a sua precisão e resolução espacial são insuficientes para algumas aplicações, o seu tubo tem de ser perfeitamente alinhado com a linha de escoamento do ar e para que se tenha resultados confiáveis é preciso que se tenha muito rigor quando da sua construção.

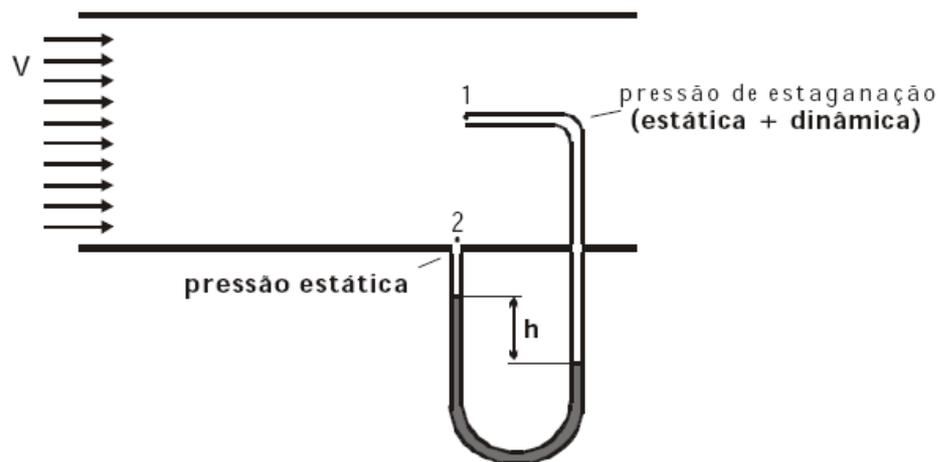


Figura 7. Ilustração do funcionamento de um modelo do Tubo de Pitot.

### 3.1.3 Deflexão

O anemômetro de deflexão foi o primeiro aparelho destinado à medição da velocidade do vento de que se tem registro, ele também é conhecido como Anemômetro de Da Vinci, pois muitos atribuem a sua invenção ao cientista italiano Leonardo Da Vinci [17]. O anemômetro de deflexão pode facilmente ser construído, pois é formado apenas por uma chapa metálica em que um de seus lados fica solto e outro preso à ponta do arco que a constitui. A chapa é montada sobre uma escala logarítmica, conforme ilustrado na Figura 8.

Seu funcionamento também é muito simples, basicamente o vento incide sobre a chapa metálica, a qual defletirá em função da magnitude da velocidade do vento.

Apesar do funcionamento e da montagem simples, o anemômetro de deflexão tem uma característica extremamente desfavorável: a incerteza deste dispositivo é muito grande quando comparado aos anemômetros comerciais hoje encontrados.



Figura 8. Ilustração do anemômetro de Deflexão.

### 3.1.4 Anemômetro Termoelétrico

Neste grupo de anemômetros podem ser enquadrados todos os tipos de anemômetros do tipo térmico, ou seja, todo anemômetro que usa a troca de calor para determinar a velocidade do fluido. Basicamente esta troca de calor é feita através de um fio ou filme que seja condutor de calor e o próprio fluido medido. O fio ou filme são aquecidos e expostos ao fluido a ser medido. Assim a velocidade do vento fica proporcional à quantidade de calor retirada do fio ou filme quente.

Existem basicamente para a mensuração da velocidade do vento usando trocas de calor os métodos: corrente, tensão ou potência constante, temperatura constante. A excitação do sensor pode ser feita de forma contínua ou pulsada, usando PWM. Na primeira técnica, a tensão, corrente ou a potência é mantida constante e a velocidade do vento é calculada em função da temperatura do fio ou filme [18]. Na técnica de temperatura constante, mede-se a corrente necessária para manter a temperatura do fio constante [19]. O método de PWM utiliza a largura dos pulsos da corrente necessária para manter a temperatura constante do fio ou filme. Esta técnica é a mais sofisticada e recente [20].

As principais vantagens deste tipo de anemômetro são não possuir partes móveis, ter um tamanho reduzido quando comparado com os anemômetros rotacionais, além de ter maior sensibilidade para baixas velocidades do vento. No entanto, são muito frágeis e seus parâmetros são muito sensíveis às partículas de poluição depositadas no fio, o que implica diretamente em recalibração e custo elevado. Está ilustrado na Figura 9, um exemplo de anemômetro de fio quente comercial.



Figura 9. Ilustração de um anemômetro de Fio Quente.

### 3.1.5 Anemômetro Laser

Este tipo de anemômetro usa o efeito Doppler causado pelo movimento das partículas que atravessam as franjas formadas pelo cruzamento de dois feixes de raios Laser. Um sistema assim é chamado de LDV (Laser Doppler Velocimetry) e funciona através do cruzamento de dois feixes de raios laser. No ponto de cruzamento são criadas franjas, conforme ilustrado na Figura 10. O volume  $\lambda$ , com dimensão muito reduzida, é colocado sobre o escoamento do fluido a ser medido.

As micro-partículas de poluição deste fluido acabam passando pelas franjas, também chamadas de franjas de Fresnel. Isto faz com que a luz seja desviada no momento em que é atravessada pelas franjas, o que implica em um pequeno desvio de frequência devido ao

movimento das partículas, fenômeno este chamado de Efeito Doppler. Assim, dispositivos óticos conseguem detectar estes desvios e associa-los à velocidade do fluido, de tal forma que a razão com que estas partículas atravessam as franjas seja proporcional à velocidade de escoamento do fluido. As micro-partículas de poluição citadas acima são as mais diversas possíveis e encontradas, geralmente em qualquer fluido, ou seja, micro-bolhas de ar, partículas de pó, fumaça, algas, dentre outros.

A principal vantagem deste tipo de anemômetro é que ele consegue medir uma vasta gama de velocidade de escoamento de líquidos e gases, isto é, desde  $\mu\text{m/s}$  até condições supersônicas, adaptável em escalas muito diferentes. Além dessa vantagem, os anemômetros a laser têm precisão e resolução espacial elevadas, no entanto é necessário adicionar impurezas ao fluido a ser medido, não é aplicável a fluidos altamente turbulentos e tem custo elevado.

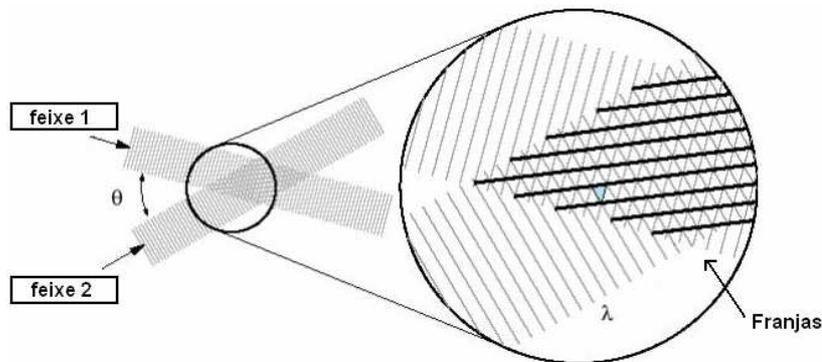


Figura 10. Formação da intersecção dos feixes e formação das franjas no detalhe  $\lambda$  o volume das franjas.

### 3.1.6 Anemômetro Ultra-sônico

Os anemômetros ultra-sônicos trabalham explorando um princípio conhecido: o movimento das partículas do ar em movimento afeta a velocidade de uma onda acústica, com frequência ultra-sônica. Este tipo de anemômetro, basicamente, consiste de uma fonte de energia sonora, o transdutor transmissor e uma fonte de energia coletora, o transdutor receptor, separados por uma distância de alguns centímetros.

A onda sonora é emitida do transmissor e depois disso é recebida no sensor receptor. O tempo necessário para que o sinal ultra-sônico saia do transmissor alcançar o receptor é depende da velocidade de deslocamento do ar em movimento no espaço entre o transmissor e

o receptor. Este tempo, medido entre as transmissões dos sinais ultra-sônicos, é chamado de tempo de trânsito, abreviado por ToF, do inglês: *Time of Flight*. Existem várias técnicas disponíveis para a sua medição dentre elas a medição da diferença de fase que é objeto de estudo deste trabalho.

Os anemômetros ultra-sônicos são formados por pelo menos um par de transdutores ultra-sônicos, 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 ultra-sônicas bem como os receber e funcionar como anemômetros para a medição da velocidade de vento.

Apresenta-se na Figura 11 um exemplo de anemômetro ultra-sônico comercial, nela percebe-se claramente o conjunto de sensores ultra-sônicos na *cabeça* do anemômetro.



Figura 11. Ilustração de um modelo de anemômetro ultra-sônico, fabricado pela Thies.

O anemômetro da Figura 11, além de medir a velocidade do vento utilizando ultrassom, mede também a direção do vento.

Suas principais vantagens são: boa exatidão, resposta sistêmica rápida (depende do tempo gasto pelo deslocamento da onda ultra-sônica 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 ultra-sônicos não possuem partes móveis, além de poder ser usado para vários tipos de fluido.

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

### **3.2 Técnicas de Medição da Velocidade do Vento Utilizando Anemômetro Ultra-sônico**

Existem, basicamente, três métodos para o uso da tecnologia ultra-sônica 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 ultra-sônico (DUF – Doppler Ultrasonic Flow-meter) e medição do fluxo do fluido por tempo de trânsito (TTUF - Transit Time Ultrasonic Flow-meter ou ToF – Time of Flight). Nestes dois procedimentos apresentados, podem-se utilizar técnicas de processamento de sinais, como a correlação cruzada e a transformada de Fourier.

#### **3.2.1 Medição do Fluido por Efeito Doppler Ultra-sônico (DUF)**

A técnica do DUF funciona a partir do efeito Doppler que aparece quando um fluido é atingido por uma onda ultra-sônica, devido às partículas de poluição sólidas ou de outra natureza que estão presentes nos fluidos mais comuns. Estas partículas de poluição podem ser bolhas de ar, bem como outros gases. Estes resíduos agem como se fossem espalhadores de ultra-som, estabelecendo relação de proporção entre a velocidade do fluxo e o deslocamento Doppler. O deslocamento Doppler pode ser dado através da equação (6):

$$f_D = 2 \cdot f_t \cdot \frac{v}{C} \cdot \cos(\theta), \quad (6)$$

em que,  $f_t$  é a frequência de transmissão,  $C$  é a velocidade do som no fluido,  $v$  é a velocidade de deslocamento dos detritos e  $\theta$  é o ângulo existente entre os sensores ultra-sônicos e a direção de deslocamento do fluido. É apresentado na Figura 12, um exemplo de medição utilizando a técnica do DUF.

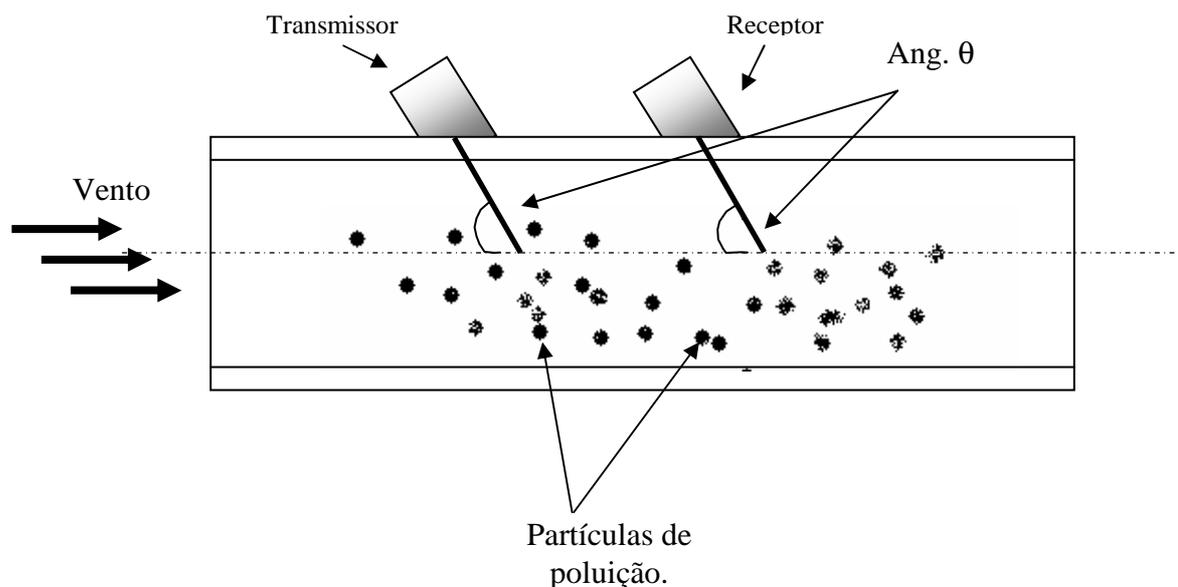


Figura 12. Ilustração de um arranjo da técnica que usa DUF.

### 3.2.2 Medição do Fluido por Tempo de Trânsito (TTUF ou ToF)

A técnica de medição da velocidade do vento pelo tempo de trânsito é uma das técnicas mais utilizadas para a estimativa da velocidade de fluidos. Esta técnica, basicamente, funciona através da estimativa do tempo em que uma onda ultra-sônica 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 ultra-sônica é transmitida no sentido do fluxo do fluido ou no sentido contrário.

Por apresentar maior escala de aplicação, maior precisão e baixa incerteza [21], esta técnica é abordada com mais profundidade neste trabalho. O método do tempo de trânsito também conhecido método do tempo de vôo.

Um sistema que utiliza o método do tempo de trânsito, basicamente, é constituído por um par de transdutores dispostos conforme ilustrado na Figura 13, em que  $C$  é a velocidade do som em uma dada temperatura e  $v$  é a velocidade do fluido na mesma temperatura.

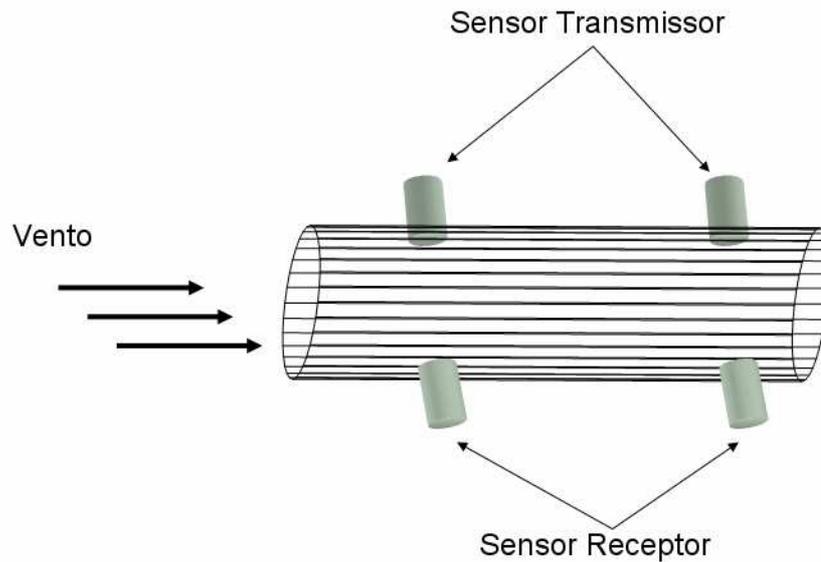


Figura 13. Ilustração de um arranjo da técnica que usa CCFU.

Existem vários métodos que podem ser usados para se determinar o tempo de trânsito ou tempo de vôo, tais como detecção de limiar, diferença de fase e métodos que utilizam processamento digital de sinais, e que exigem certo poder computacional, como o da correlação cruzada e transformada de Fourier. 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 ultra-sônicos transmitidos e os sinais ultra-sônicos recebidos.

Neste trabalho, são apresentados e discutidos com detalhes os métodos da detecção do limiar e da diferença de fase.

## 4 Determinação do Tempo de Trânsito

---

Neste capítulo, são apresentadas as principais técnicas, isto é, as mais utilizadas, para a determinação do Tempo de Trânsito, variável de importância fundamental quando se trabalha com as técnicas de ultra-som. As principais técnicas são: o Método da Detecção do Limiar e o Método da Diferença de Fase. Além de apresentar, são estudadas as suas principais características e limitações.

Os transdutores considerados neste trabalho têm frequência central de 40 kHz e podem ser modelados como filtros passa-faixa de primeira 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. Um ângulo  $\theta$  diferente de zero grau, conforme ilustrado na Figura 14, deve ser considerado no processo de medição para evitar distúrbios dos sensores no fluxo de ar.

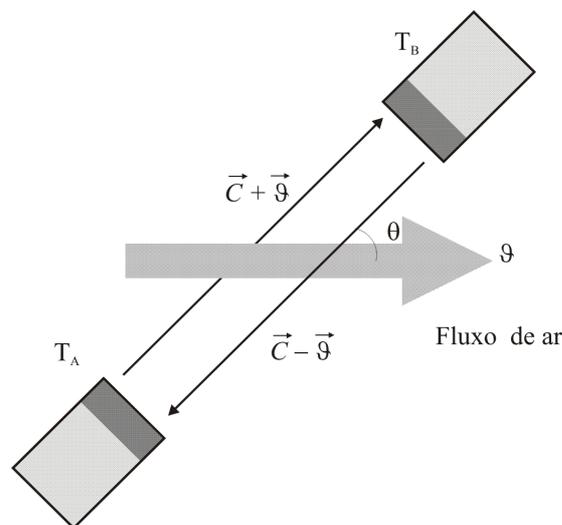


Figura 14. Ilustração de um sistema que usa a técnica do tempo de trânsito.

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:

$$\vec{C} = \vec{C}_0 \pm \vec{v}, \quad (7)$$

em que  $\vec{C}$ ,  $\vec{C}_0$  e  $\vec{v}$  são respectivamente: a velocidade do deslocamento da onda ultra-sônica, velocidade da onda ultra-sônica com o ar parado e a velocidade do vento, com todas estas grandezas dadas em m/s [23]. O sinal de “ $\pm$ ” na equação (7) 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 ultra-som pode ser calculada por:

$$\vec{C} = \frac{L}{t}, \quad (8)$$

em que  $L$  é a distância percorrida pela onda ultra-sônica e  $t$  é o tempo decorrido para que a onda chegue ao seu destino. Pode-se simplificar a equação vetorial (7) escrevendo:

$$C = C_0 \pm v \cdot \cos(\theta). \quad (9)$$

Fazendo-se a substituição da equação (8) na equação (9), tem-se que

$$v = \frac{1}{\cos(\theta)} \cdot \left( \frac{L}{t} \pm C_0 \right). \quad (10)$$

Através da equação (10), pode-se calcular a velocidade de um fluido conhecendo-se o tempo de trânsito  $t$  e a velocidade do som com o ar parado  $C_0$ , dada em m/s. Em que  $\theta$  é o angulo formado entre a direção de deslocamento do fluido e o eixo de alinhamento entre os sensores de transmissão e recepção, conforme ilustrado na Figura 14.

O problema com a estimação da velocidade do vento utilizando-se a equação (10) 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  $C_0$  pode ser dada, em Kelvins, por (4). Através de (4), 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 e a temperatura do meio dada por

$$\vartheta = \frac{1}{\cos(\theta)} \cdot \left( \frac{L}{t} \pm 20,074 \cdot \sqrt{T_K} \right) \quad (11)$$

Há também, uma outra possibilidade de estimação da velocidade de vento sem, entretanto, determina-se  $C_0$  ou a temperatura do meio, mas aumentando a complexidade do sistema, consiste em medir o tempo de trânsito nos dois sentidos, ou seja, contra o fluxo do vento e a favor do fluxo do vento.

Da equação (7) sabe-se que a velocidade da onda ultra-sônica é a soma vetorial da velocidade do som parado e da velocidade do fluido. De forma mais simplificada, a velocidade da onda ultra-sônica pode ser calculada através da equação (8). Considerando-se a Figura 14, reescreve-se a equação 8 da seguinte maneira:

$$C_{AB} = C_0 + \vartheta \cdot \cos(\theta) \quad (12)$$

$$C_{BA} = C_0 - \vartheta \cdot \cos(\theta) \quad (13)$$

Substituindo a equação (8) nas equações (12) e (13) tem-se:

$$\frac{L}{t_{AB}} = C_0 + \vartheta \cdot \cos(\theta). \quad (14)$$

$$\frac{L}{t_{BA}} = C_0 - \vartheta \cdot \cos(\theta). \quad (15)$$

Fazendo-se a soma entre as equações (14) e (15) e isolando-se a velocidade do vento  $\vartheta$ , tem-se:

$$v = \frac{L}{2 \cdot \cos(\theta)} \left( \frac{1}{t_{AB}} - \frac{1}{t_{BA}} \right). \quad (16)$$

Com isso, pode-se determinar a velocidade do vento, conhecendo-se apenas  $t_{AB}$  e  $t_{BA}$ , ou seja, os tempos de trânsito nos sentidos positivo e negativo do fluxo de vento. Observa-se, através de (16), que não há necessidade da determinação da temperatura do meio de medição para a estimação da velocidade do vento. Fisicamente, este sistema de medição pode ser implementado através de um conjunto de transdutores funcionando como receptor ou transmissor, ou seja, ora um transdutor está trabalhando como receptor ora o mesmo transdutor está trabalhando como transmissor, ou ainda usando quatro transdutores.

A configuração eleita neste trabalho para a estimação da velocidade foi a primeira descrito neste capítulo, o método que utiliza apenas um par de sensores e a estimação da temperatura.

Nas próximas seções, serão apresentadas as duas principais técnicas para a determinação do tempo de trânsito ToF.

#### **4.1 Método da Detecção do Limiar**

O Método da Detecção do Limiar funciona, basicamente, através da comparação do nível da amplitude da onda ultra-sônica recebida com um limite pré-estabelecido, de modo que quando este limiar é ultrapassado pela amplitude da onda ultra-sônica recebida, identifica-se a sua recepção. Este momento está ilustrado nos gráficos da Figura 15, em que a curva tipo senoidal representa o sinal recebido e a tipo degrau, a detecção de limiar. Observa-se claramente, Figura 15 que a partir de um determinado momento o degrau muda de estado indicando a chegada da onda ultra-sônica recebida.

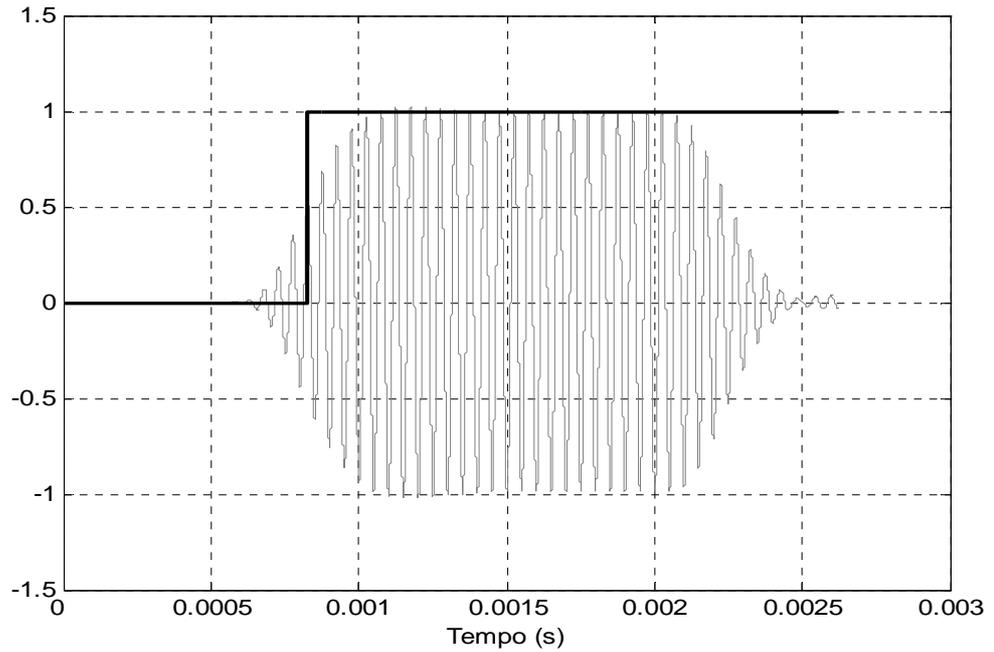


Figura 15 - Ilustração da detecção da recepção de uma onda ultra-sônica.

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 ultra-sônica 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 [22].

O transdutor ultra-sônico 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 ( $t$ ). 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 ( $t$ ) com o tempo necessário para a detecção do sinal recebido ( $t^E$ ) [13]. 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

$$t = t^M - t^E . \quad (17)$$

Na Figura 16, são apresentados, com mais detalhes, os sinais de transmissão e recepção, obtidos a partir de simulação computacional de um sistema de medição da velocidade vento utilizando-se ultra-som, em que, podem-se observar os tempo de transmissão, medição e recepção do sinal ultra-sônico.

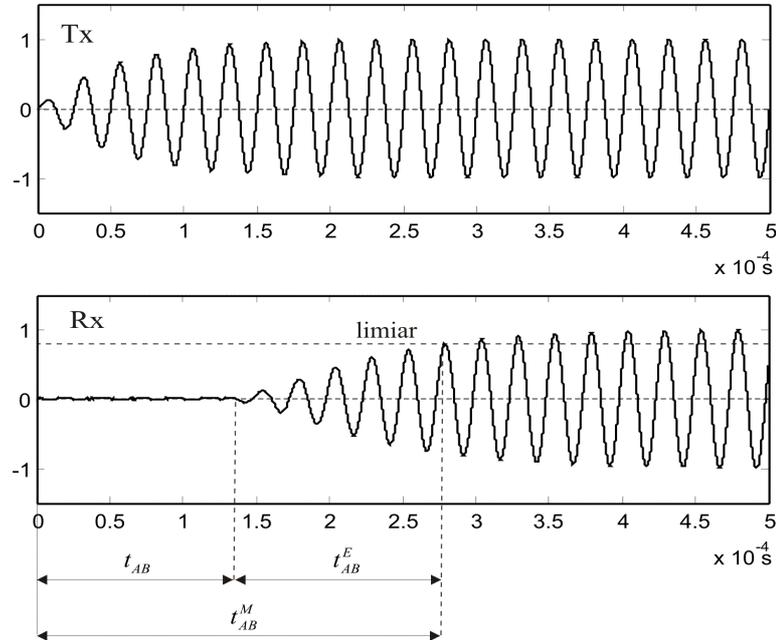


Figura 16. Exemplo de detecção de limiar, Tx – sinal transmitido e Rx – sinal recebido.

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.

#### 4.2 Método da Diferença de Fase.

O método da diferença de fase, objeto maior de estudo deste trabalho, funciona medindo-se a defasagem entre as ondas ultra-sônicas transmitidas e recebidas medidas em graus. A defasagem pode ser medida diretamente em segundos, ou micro segundos, utilizando contadores, verificando os instantes de cruzamento por zero entre as formas de onda transmitidas e recebidas.

O método da diferença de fase tem como principal vantagem ser menos suscetível a ruídos, o que não ocorre com o método da diferença de fase, e ser bem mais preciso que a técnica anteriormente descrita [24]. Em virtude das vantagens descritas anteriormente, escolheu-se o método da diferença de fase para um estudo mais aprofundado. Além destas vantagens, esta técnica também apresenta o fato de ser imune à variação de atenuação do meio de propagação, como será demonstrado na próxima seção. A fase instantânea para a transmissão do sinal, em radianos, no sentido  $T_A \rightarrow T_B$  pode ser calculada por

$$\varphi_{AB} = 2 \cdot \pi \cdot f \cdot t_{AB}. \quad (18)$$

Uma vez que o período da onda ultra-sônica se repete a cada  $2\pi$ , o método da diferença de fase torna-se limitado. De modo que, para se fazer uma medição com exatidão, há necessidade de se determinar o número de ciclos da forma de onda transmitida ocorridos desde a transmissão até o instante em que se comparam as fases dos sinais transmitidos e recebidos.

Com a distância entre os transdutores ultra-sônicos ajustadas para a diferença de fase igual a zero quando a velocidade do vento for igual a zero, os valores de  $t_{AB}$ , para uma velocidade de vento diferente de zero, podem ser calculados por:

$$t_{AB} = n\tau - \varphi_{AB},$$

em que  $\tau$  é o período de um ciclo de onda ultra-sônica, o qual para uma operação na frequência de 40 kHz é igual a 25  $\mu$ s.

Na Figura 17, ilustra-se o procedimento da medição da diferença de fase. Como se pode observar nesta figura, há a marcação do tempo de trânsito entre os cruzamentos por zero dos sinais transmitidos e recebidos, ou seja, nesta situação a defasagem está diretamente medida em micro-segundos. Isto está indicado no segundo gráfico da Figura 17, ou seja, um pulso gerado com a defasagem entre os sinais transmitidos e recebidos, cuja largura é diretamente proporcional à defasagem entre estes sinais.

Esta mesma medição pode ser verificada também em graus desde que se utilize a equação (18).

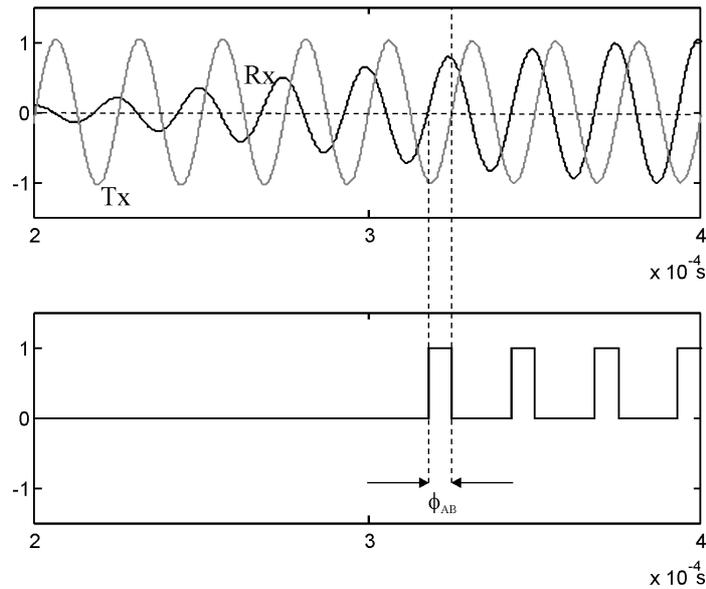


Figura 17. Ilustração do método de detecção de fase para o cálculo do tempo de trânsito.

O tempo de resposta dos métodos de limiar e da diferença de fase depende do tempo necessário para se repetir o procedimento de medição. No método do limiar, esse tempo é o  $t_{AB}^M$  e no método da diferença de fase é de um ciclo de onda, no caso específico é igual a 25  $\mu$ s.

#### 4.2.1 Análise da Velocidade do Vento em Função da Distância

Para que o Tempo de Vôo seja calculado através do método da diferença de fase é necessário se conhecer as limitações físicas desta técnica, assim, o método pode ser utilizado com racionalidade e lógica. Isto só pode ser conseguido com a dedução de equações analíticas que sejam capazes de descrever integralmente o comportamento desta grandeza em função da velocidade do vento e da distância percorrida pelas ondas ultra-sônicas, isto é, a distância entre os sensores ultra-sônicos. Além disso, necessita-se de simulações que possam ilustrar de forma mais fidedigna possível o que acontece com a diferença de fase ao se aumentar a velocidade do vento ou se alterar a distância  $L$  entre os sensores. A diferença de fase, neste trabalho, será sempre determinada em segundos, isto é, sem o fator multiplicativo  $2\pi f$  da equação (18). Desta forma, as manipulações das equações tornam-se mais fáceis.

Assim, tomando-se a distância  $L$  entre os sensores ultra-sônicos, dado em  $m$ , proporcional ao comprimento de onda ultra-sônica, para facilitar o raciocínio e os cálculos, podem-se fazer as seguintes proposições:

$$\begin{aligned}
L = 0 &\rightarrow \varphi(0) = 0 \\
L = \frac{\lambda}{4} &\rightarrow \varphi\left(\frac{\lambda}{4}\right) = \frac{\pi}{2} \\
&\vdots \quad \quad \quad \vdots \\
L = \frac{\lambda}{2} &\rightarrow \varphi\left(\frac{\lambda}{2}\right) = \pi
\end{aligned} \tag{19}$$

Levando-se em consideração as proposições em (19), em que  $\varphi$  é a fase instantânea em segundos e  $\lambda$  é o comprimento de onda pode-se obviamente verificar que a fase instantânea varia em função da distância entre os sensores conforme a equação (20):

$$\varphi(L) = \frac{2 \cdot \pi \cdot L}{\lambda} \tag{20}$$

Sabe-se que  $\lambda = C \cdot T$ , em que  $T$  é o período da onda ultra-sônica e que  $\lambda = \frac{C}{f}$ , em que  $C$  é a velocidade do som, com influência do vento, e  $f$  é a frequência com a qual a onda ultra-sônica vibra em kHz. Substituindo-se a relação do comprimento de onda em função da frequência e  $C$ , na equação (20), tem-se

$$\varphi(L) = \frac{2 \cdot \pi \cdot L \cdot f}{C} \tag{21}$$

Substituindo-se a equação da velocidade do som com a influência do vento, equação (12), em seu sentido positivo, isto é A→B na figura 14, na equação (21), tem-se:

$$\varphi(L, \vartheta) = \frac{2 \cdot \pi \cdot L \cdot f}{C_0 + \vartheta \cdot \cos(\theta)} \tag{22}$$

A equação (22) representa a variação da fase instantânea em função da distância  $L$  entre os sensores e da velocidade do vento  $\vartheta$ .

A diferença instantânea entre dois sinais, neste caso específico transmissão e recepção, é definida como defasagem. Assim, pode-se definir a diferença de fase ou defasagem  $\Delta\varphi$  como sendo a diferença entre a fase instantânea  $\varphi$  e a fase instantânea sem vento  $\varphi_0$ , assim  $\Delta\varphi = \varphi_0 - \varphi$ . Fazendo a correspondência com a equação (22) tem-se:

$$\Delta\varphi(L, \vartheta) = \frac{2 \cdot \pi \cdot L \cdot f}{C_0} - \frac{2 \cdot \pi \cdot L \cdot f}{C_0 + \vartheta \cdot \cos(\theta)}$$

$$\rightarrow \Delta\varphi(L, \vartheta) = 2\pi \cdot L \cdot f \cdot \left( \frac{C_0 + \vartheta \cdot \cos(\theta) - C_0}{C_0 \cdot (C_0 + \vartheta \cdot \cos(\theta))} \right)$$

$$\rightarrow \Delta\varphi(L, \vartheta) = 2\pi \cdot L \cdot f \cdot \left( \frac{\vartheta \cdot \cos(\theta)}{C_0 \cdot (C_0 + \vartheta \cdot \cos(\theta))} \right). \quad (23)$$

A equação (23) expressa a defasagem ou diferença de fase em função da distância  $L$  e da velocidade do vento  $\vartheta$  [25].

Apresenta-se na Figura 18 um gráfico ilustrativo do comportamento da equação (23), obtido por simulações através do Matlab, variando-se a velocidade do vento e a distância entre os sensores. Cada gráfico na Figura 18 tem um valor diferente para  $L$ , o qual pode ser lido na legenda e está em função do comprimento de onda  $\lambda$ .

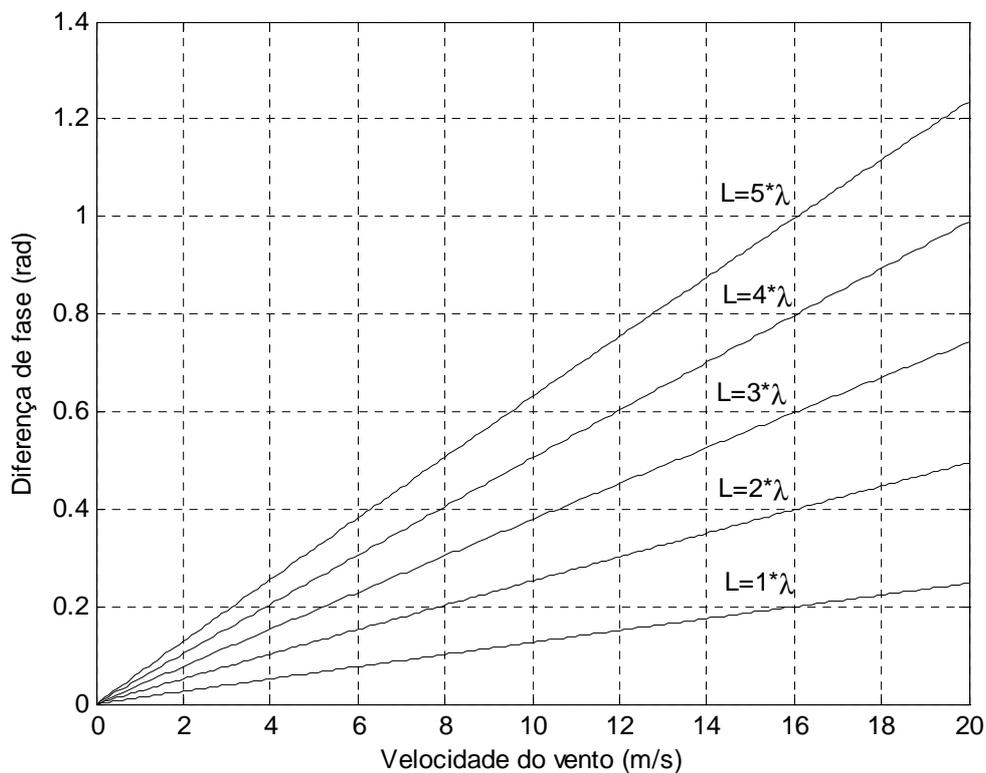


Figura 18. Ilustração da diferença de fase medida em função da distância entre os sensores e da velocidade do vento.

Apesar de se observar um comportamento contínuo e linear para toda a fase, nos gráficos da Figura 18, fisicamente há um limite a ser considerado, o que faz com que a equação (23) não seja válida para toda a faixa de medição de velocidade de vento, ou seja, existe uma velocidade máxima medida que deve ser considerada quando de sua interpretação e uso. A faixa de medição da diferença de fase é finita, sendo possível a medição da defasagem em um intervalo finito  $\Delta\phi$  igual a:  $0 \leq \Delta\phi \leq 2\pi$ . Na seção 5.2, este assunto será tratado com mais detalhes.

Elevando-se o valor da velocidade do vento além de sua *velocidade máxima*, o resultado obtido será a repetição do mesmo intervalo de defasagem, mas defasado com relação à velocidade. Este comportamento se repete a cada ciclo de defasagem, caracterizando-se, assim, um comportamento periódico de período igual à velocidade máxima medida. Esta situação é mostrada no gráfico da Figura 19, o qual foi obtido a partir da simulação da equação (24) no ambiente Matlab.

$$\Delta\phi = 2\pi \cdot L \cdot f \cdot \left( \frac{1}{c_0} - \frac{1}{c_0 + \text{ren}(v; v_{\max}) \cdot \cos(\phi)} \right) \quad (24)$$

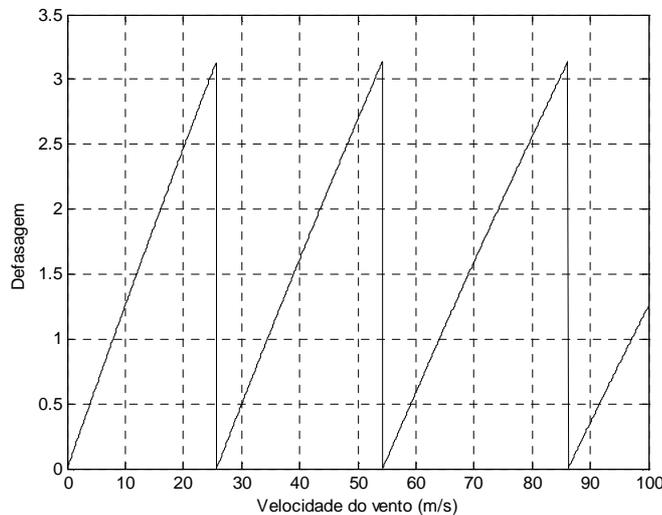


Figura 19. Ilustração da diferença de fase medida em função velocidade do vento, para uma distância igual a vinte vezes o comprimento de onda.

A partir do gráfico da Figura 19, pode-se observar que a cada vez que a velocidade máxima é alcançada, um novo ciclo se repete. Desta maneira, pode-se dizer que o gráfico

apresentado na Figura 19 é do tipo dente de serra com o período igual à velocidade de vento máxima, para uma determinada distância  $L$ .

Na seção 5.2, será feito uma abordagem mais detalhada da faixa de medição da velocidade do vento levando-se em consideração a temperatura do meio em que é feita a estimação da velocidade do vento. Além da temperatura, observa-se também a variação da velocidade máxima alcançada em função da distância  $L$  como múltiplo do comprimento de onda.

### 4.3 Sensibilidade ao ruído e atenuação do meio.

Considere, de maneira simplificada, que a forma de onda ultra-sônica recebida possa ser conforme

$$v = (v_m \pm u_A) \cdot \sin(\omega t + \varphi) \pm u_N, \quad (25)$$

em que  $v$  é o valor instantâneo da tensão,  $v_m$  é o valor máximo da forma de onda em um dado instante, devido à dinâmica do transdutor,  $\omega$  e  $\varphi$  são a frequência instantânea e a defasagem respectivamente,  $u_A$  e  $u_N$  são as incertezas devido à variação de atenuação do meio e ao ruído aditivo, respectivamente.

Faz-se uma análise da propagação das incertezas de medição para os métodos de detecção do limiar e da diferença de fase com a finalidade de se obter uma avaliação comparativa da sensibilidade ao ruído desses dois métodos. Para a detecção de cruzamento por zero e de limiar, têm-se as seguintes comparações  $v = 0$  e  $v = v_l$ , respectivamente. Considerando  $t = 0$ , sem perda de generalidade, para se determinar a fase em que ocorre a detecção para uma determinada tensão, desconsiderando as incertezas, tem-se, para o cruzamento por zero e para o limiar:

$$\varphi = \arcsin\left(\frac{v_d}{v_m}\right), \quad (26)$$

em que  $v = v_d$  é a tensão de detecção, igual a zero ou a  $v_l$  para o cruzamento por zero ou limiar, respectivamente.

Através do estudo de propagação de incertezas, tem-se que a incerteza na determinação da fase pode ser calculada por

$$u_{\phi}^2 = \left( \frac{\partial \phi}{\partial v_m} u_A \right)^2 + \left( \frac{\partial \phi}{\partial v_d} u_N \right)^2, \quad (27)$$

que resulta em

$$u_{\phi}^2 = \left( \frac{v_d}{v_m^2 \sqrt{1 - \frac{v_d^2}{v_m^2}}} u_A \right)^2 + \left( \frac{1}{v_m^2 \sqrt{1 - \frac{v_d^2}{v_m^2}}} u_N \right)^2. \quad (28)$$

Considerando as incertezas como um percentual da tensão máxima  $v_m$ ,  $u_A = \varepsilon_A v_m$  e  $u_N = \varepsilon_N v_m$  e fazendo  $v_p = v_d/v_m$ , tem-se

$$u_{\phi}^2 = \left( \frac{v_p}{\sqrt{1 - v_p^2}} \varepsilon_A \right)^2 + \left( \frac{1}{\sqrt{1 - v_p^2}} \varepsilon_N \right)^2, \quad (29)$$

que corresponde à incerteza para detecção do limiar (em radianos) [26]. A incerteza para detecção por cruzamento por zero é então

$$u_{\phi} = \varepsilon_N = \frac{u_N}{v_m}, \quad (30)$$

ou seja, é igual ao próprio valor do ruído aditivo relativo na amplitude.

Definindo-se o fator de redução de variância (VRF, *Variance Reduction Factor*) como a razão entre as variâncias da fase pelo método do limiar e de detecção por zero, tem-se

$VRF = \frac{u_{\phi, \text{limiar}}^2}{u_{\phi, \text{zero}}^2}$ , o que implica em:

$$VRF = \left( \frac{v_p}{\sqrt{1 - v_p^2}} \cdot \frac{\varepsilon_A}{\varepsilon_N} \right)^2 + \left( \frac{1}{\sqrt{1 - v_p^2}} \right)^2. \quad (31)$$

Na Figura 20, mostram-se as curvas de  $\sqrt{VRF}$  para  $\epsilon_A = \epsilon_N$ ,  $\epsilon_A = 5\epsilon_N$  e  $\epsilon_N = 5\epsilon_A$ , para  $v_p$  de 0,7 a 0,95, faixa de tensão típica do limiar.

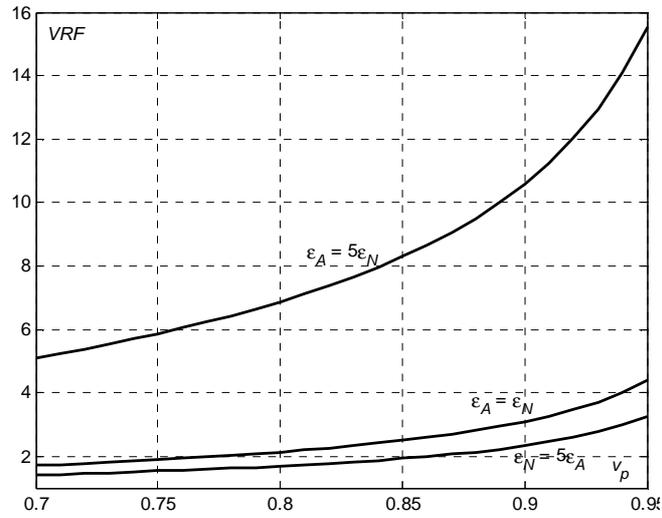


Figura 20. Curvas de  $\sqrt{VRF}$  para  $\epsilon_A = \epsilon_N$ ,  $\epsilon_A = 5\epsilon_N$  e  $\epsilon_N = 5\epsilon_A$ .

A partir dos resultados obtidos na Figura 20, observa-se que o método da diferença de fase é mais imune às incertezas devido ao ruído e principalmente à atenuação do sinal pelo meio de transmissão.

# 5 Especificações para o Método de Diferença de Fase e Simulações

---

Nesta seção, discutem-se considerações práticas para a implementação do método de diferença de fase necessárias à especificação do projeto do sistema de medição.

## 5.1 Influência da temperatura.

A temperatura é a principal grandeza que influencia a velocidade do som no ar. Na Figura 21, apresenta-se o gráfico dos valores nominais da velocidade do som no ar parado em função da temperatura, obtido a partir de (4), para uma faixa de medição de 0°C a 40°C. Observa-se que, para essa faixa de temperatura, a velocidade do som varia de aproximadamente 23,5 m/s.

A variação da velocidade do vento em função da temperatura causa uma variação na fase detectada, que pode ser corrigida. Entretanto, se a variação de fase causar a mudança da ordem de cruzamento por zero das ondas transmitidas e recebidas, o sistema de medição irá produzir um erro bastante significativo. Além disso, a variação da temperatura causa uma diminuição da faixa de medição de fase a qual deve ser considerada no projeto. A fase (em ambos os sentidos) em função da variação de velocidade do vento pode ser encontrada por

$$\varphi = \frac{2\pi fL}{C_0^* + \Delta C_0 \pm v \cdot \cos(\theta)}, \quad (32)$$

em que  $C_0^*$  é a velocidade do som no ar parado para a temperatura de aferição. A equação (32) se originou da equação (22), já abordada na 4.2.1.

Observa-se, a partir de (32), que: 1) no sentido do vento (sentido positivo), a fase diminui com a velocidade do vento e a temperatura; 2) no sentido inverso (sentido negativo), a fase diminui com a temperatura, mas aumenta com a velocidade do vento.

Uma solução seria optar por aferir o sistema para um valor de temperatura média em que a diferença de fase seja igual a  $\pi$ , que permitiria a medição em ambos os sentidos. Entretanto, isso significaria uma redução pela metade da faixa de medição de velocidade do vento (0 a  $\pi$  ao invés de 0 a  $2\pi$ ).

A opção adotada aqui, de forma a maximizar a faixa de medição da fase, é de medir a diferença de fase em apenas um sentido e realizar a correção da influência da temperatura. Para tal, deve-se aferir o sistema para o valor mínimo de velocidade do vento, ou seja,  $C_0^* = 20,074\sqrt{T_{K\min}}$  dado em metros por segundo.

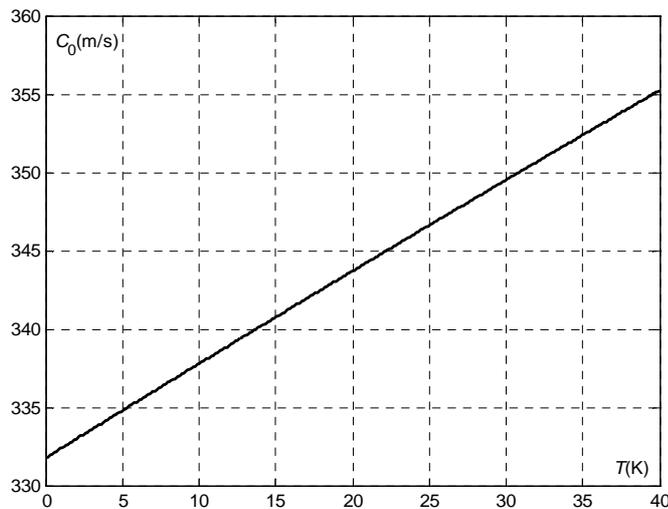


Figura 21. Gráfico dos valores da velocidade do vento em função da temperatura

## 5.2 Faixa de medição de velocidade do vento

Como já abordado na seção 4.2.1, a diferença de fase entre as ondas transmitidas e recebidas, para uma mesma velocidade do vento, aumenta com a distância de separação entre os transdutores. Essa diferença de fase pode ser encontrada subtraindo-se os valores

instantâneos da fase com vento e sem vento e considerando a variação da velocidade do vento devido à variação de temperatura, assim manipulando-se a equação (23), tem-se:

$$\Delta\varphi = \frac{2\pi fL}{C_0^*} - \frac{2\pi fL}{C_0^* + \Delta C_0 + \vartheta \cdot \cos(\theta)}, \quad (33)$$

que resulta em

$$\Delta\varphi = 2\pi fL \left( \frac{\Delta C_0 + \vartheta \cdot \cos(\theta)}{C_0^* (C_0^* + \Delta C_0 + \vartheta \cdot \cos(\theta))} \right). \quad (34)$$

A equação (34) é semelhante à equação (23), porém a abordagem feita para a velocidade do som é diferente, pois leva em consideração a influência da temperatura nesta, ou seja,  $\Delta C_0$ . A solução de (34) para a velocidade do vento é dada por

$$\vartheta = \frac{\Delta\varphi \cdot C_0^* \cdot (C_0^* + \Delta C_0^*) - 2\pi \cdot f \cdot L \cdot \Delta C_0^*}{\cos(\theta) \cdot (2\pi \cdot f \cdot L - \Delta\varphi \cdot C_0^*)}, \quad (35)$$

que simplificando resulta em

$$\vartheta = \frac{\Delta\varphi \cdot C_0^{*2}}{\cos(\theta) \cdot (2\pi \cdot f \cdot L - \Delta\varphi \cdot C_0^*)} - \frac{\Delta C_0}{\cos(\theta)}. \quad (36)$$

Pode-se observar então, a partir de (36), que a redução da faixa de medição da velocidade do vento é constante para uma determinada variação de temperatura. Definindo-se a distância entre os sensores como um número inteiro vezes o comprimento de onda, aferido para a velocidade do vento igual a zero e temperatura mínima da faixa de medição,

$L = n\lambda = \frac{nC_0^*}{f}$ , tem-se a partir de (36)

$$\vartheta = \frac{\Delta\varphi \cdot C_0^*}{\cos(\theta) \cdot (2\pi n - \Delta\varphi)} - \frac{\Delta C_0^*}{\cos(\theta)}. \quad (37)$$

A velocidade máxima do vento pode ser encontrada em função da velocidade do som e da distância dos sensores, atribuindo-se  $\Delta\varphi = 2\pi$ , como

$$\vartheta_{\max} = \frac{C_0^*}{\cos(\phi) \cdot (n-1)} - \frac{\Delta C_0}{\cos(\phi)}. \quad (38)$$

Através da equação (38), é possível lançar uma relação de compromisso entre a diferença de fase máxima medida e a distância que separa os sensores (expressada em função do número de comprimento de ondas  $n$  envolvidas no processo). Assim pode-se evitar, por exemplo, a sobreposição de ondas, pois há o conhecimento prévio da diferença de fase máxima possível de ser medida, o que evita possíveis erros durante a detecção das ondas recebidas. Isto resolve uma das maiores dificuldades de se usar o método da diferença de fase.

Na Figura 22, apresentam-se os gráficos da velocidade máxima do vento em função da distância entre os sensores (em múltiplos do comprimento de onda para velocidade do som de aferição) para as velocidades do som nas temperaturas de zero e 40 °C.

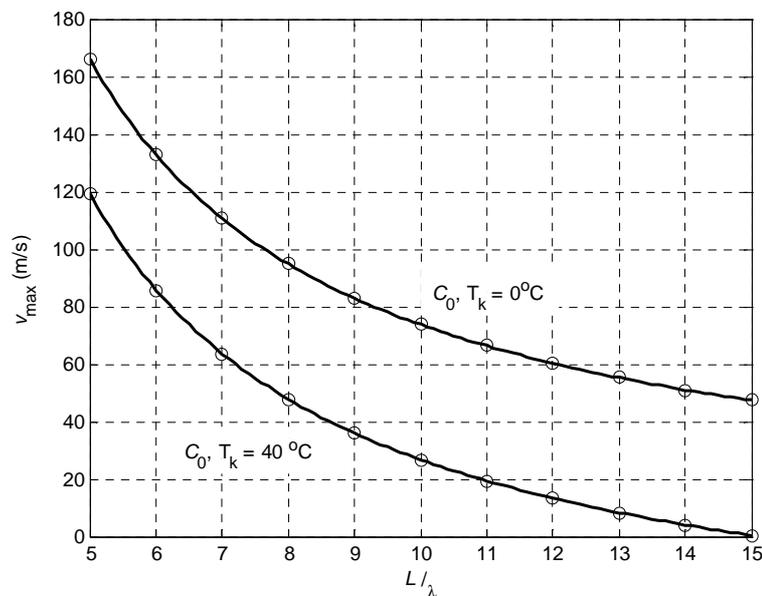


Figura 22 - Velocidade máxima do vento que pode ser medida em função da distância entre os sensores.

### 5.3 Resolução de medição da velocidade do vento

A resolução de medição é definida como a menor variação da grandeza que causa uma variação perceptível nos valores medidos. No caso de medição do ToF usando um contador e um relógio, a menor resolução será o valor da grandeza representado por um pulso do relógio.

Uma vez que a faixa de medição é limitada em  $2\pi$ , o período máximo de tempo que pode ser medido é o de um ciclo de onda, definido como  $\tau = 1/f$ . Dessa forma, supondo um período do pulso de relógio definido por  $\tau_{ck} = 1/f_{ck}$ , a resolução de medição pode ser encontrada por

$$r = \frac{\vartheta_{\max} \cdot f}{f_{ck}}. \quad (39)$$

#### 5.4 Exemplo de especificações de projeto

Deseja-se realizar um projeto de medição da velocidade do vento do ar através da estimação do tempo de vôo (ToF) utilizando a diferença de fases com as seguintes características:

- Resolução mínima equivalente a 10 bits;
- Menor frequência possível do contador;
- Faixa de medição de 0 a 25 m/s;
- Temperatura de operação de 0 a 40 °C;
- Ângulo de alinhamento dos transdutores 60 °, de forma a simplificar o cálculo da velocidade do vento;
- Frequência de operação dos transdutores 40 kHz.

De posse das especificações funcionais acima, pode-se calcular  $r$  como

$$r \leq \frac{25}{2^{10}} \rightarrow r \leq 0,02441.$$

Para esta faixa de variação de temperatura, têm-se  $C_0^* = 331,8$  m/s e  $\Delta C_0 = 23,5$  m/s.

A partir de (38), tem-se

$$n \leq 1 + \frac{663.5}{71.9} \leq 10.22.$$

Para se ter a menor frequência do relógio, tem-se que diminuir ao mínimo a faixa de medição de velocidade. Dessa forma, escolhe-se o valor de  $n = 10$ , que resulta numa distância de  $L = 8,29$  mm.

Para o valor de  $n = 10$  a velocidade máxima do vento que pode ser medida é de 26,8 m/s. Para essa velocidade e a partir de (39), tem-se que

$$f_{ck} \geq 43.9MHz .$$

## 5.5 Simulação Computacional

Nesta seção, apresenta-se o modelo utilizado para a simulação da medição da velocidade do vento utilizando-se as técnicas de Diferença de fase e Detecção de Limiar. Este modelo foi criado no Matlab no ambiente Simulink, no qual se podem observar o comportamento de ambas as técnicas já descritas.

Na Figura 26, pode-se observar as principais partes que compõem o sistema de medição de velocidade. As técnicas utilizadas para a marcação do tempo de voo, isto é estão separadas em blocos distintos. Nas próximas seções, cada bloco do diagrama da Figura 26 será descrito com mais detalhes.

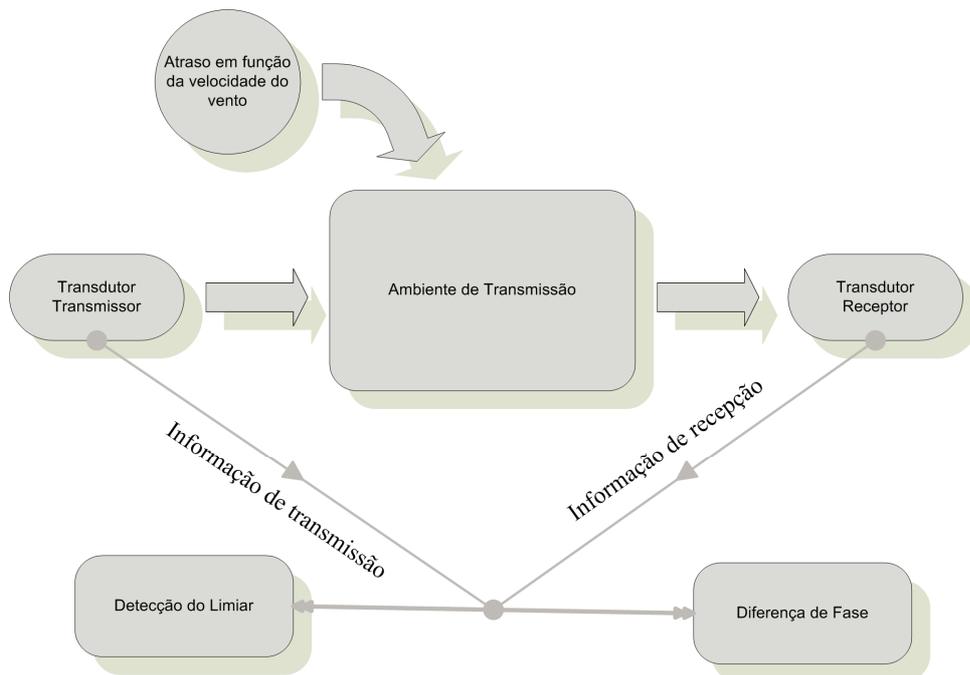


Figura 23. Ilustração do diagrama de blocos da simulação da medição da velocidade do som utilizando-se sensores ultra-sônicos.

### 5.5.1 Transdutores

Os transdutores de recepção e de transmissão foram modelados a partir de um filtro de primeira ordem. O transdutor transmissor é formado basicamente através da multiplicação de dois blocos no Simulink: um gerador de pulsos e um gerador de sinais, o qual gera uma senoide de 40 kHz. O resultado de tudo isso são rajadas de sinais senoidais, mas ainda não são os sinais esperados para um transdutor, portanto houve a necessidade de mais um bloco: um filtro passa-faixa de 40kHz e largura de banda de 6 kHz. O filtro utilizado é do tipo Butterworth. Está ilustrado na figura 24 o conjunto de todos estes blocos.

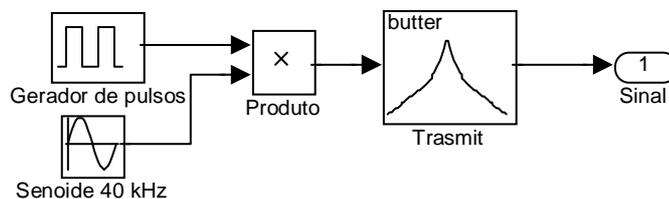


Figura 24. Apresentação do bloco do transdutor utilizado para simular a transmissão do sinal ultra-sônico.

O transdutor receptor funciona, meramente, através de um filtro semelhante ao utilizado para transmissão. Além disso, um bloco de ganho foi colocado na saída do filtro com um ganho de dez.

### 5.5.2 Meio de Transmissão.

O meio de transmissão foi modelado a partir da interconexão de vários componentes: um bloco de atraso, um bloco que simula a atenuação de um sinal e um bloco que simula o ruído e um bloco que simula a defasagem devido à velocidade do vento. Apresenta-se, na Figura 25 todos estes componentes que formam o bloco meio de transmissão. Ligado ao bloco “Delay”, existe um bloco que simula o atraso em função da velocidade do vento.

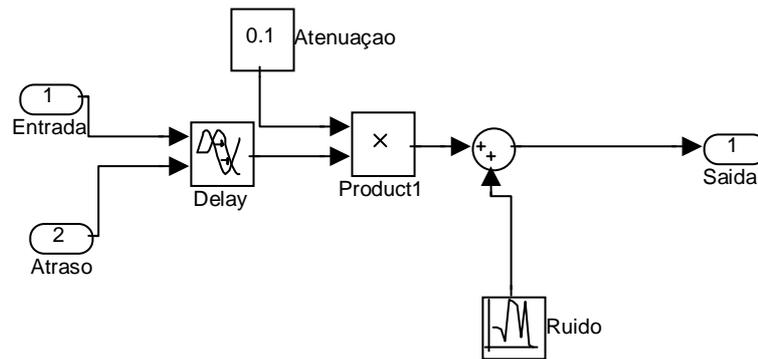


Figura 25. Apresentação do bloco que simula o meio de transmissão.

### 5.5.3 Técnicas de medição de ultra-som.

Existem dois blocos que fazem a medição da velocidade do vento: o bloco que simula a técnica do limiar e o bloco que simula a técnica do diferença de fase. O bloco da detecção do limiar trabalha, basicamente, comparando-se o valor do sinal recebido com 0,5V, quando a comparação for verdadeira, o sinal é mantido em um detector de pico. Depois disso, um relógio, que começou a sua contagem desde o início da transmissão, é paralisado, este tempo medido é subtraído do atraso eletrônico, o resultado disso é o tempo de vôo da onda ultrassônica. Na Figura 26, ilustra-se este bloco.

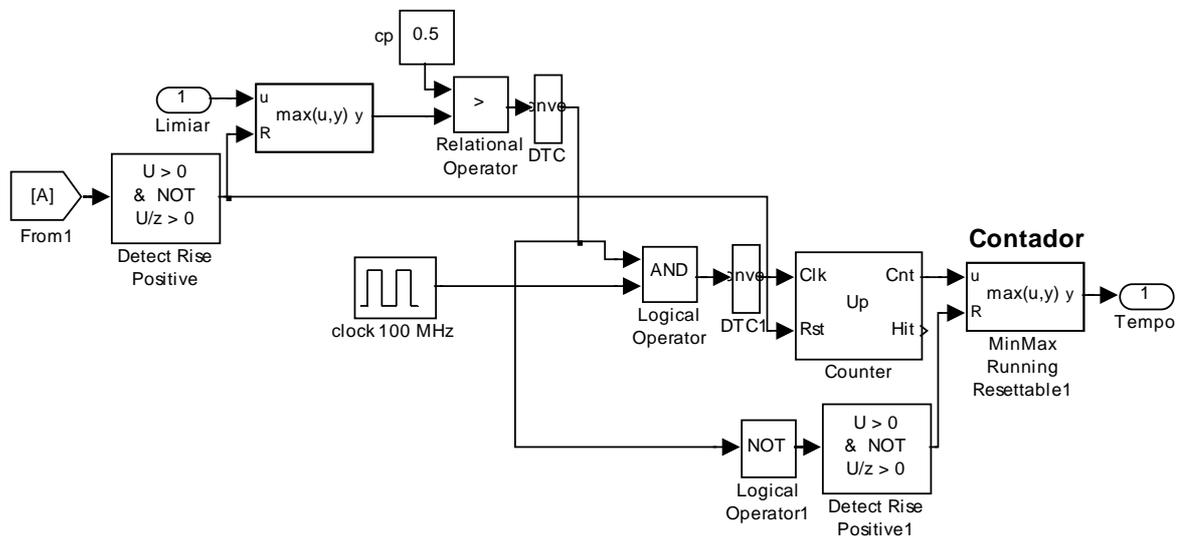


Figura 26. Apresentação do bloco que faz a detecção do limiar.

A técnica de cruzamento por zero ou diferença de fase trabalha com a contagem de pulsos da defasagem entre as ondas transmitidas e as ondas recebidas. Ilustra-se na Figura 27, o bloco que faz a detecção do cruzamento por zero, nela, pode-se observar que isto é feito a partir de uma porta lógica “or”. As entradas desta porta são precedidas de um detector engatilhado na subida e um bloco “Relay”, que servem evitar distúrbios com o ruído do sinal recebido durante o cruzamento por zero. O cruzamento por zero gera um pulso que fica no nível um enquanto do primeiro cruzamento por zero da onda transmitida até o primeiro cruzamento por zero da onda recebida.

Um relógio é ativado e conta um numero de pulsos enquanto o pulso gerado pelo cruzamento por zero estiver em nível um.

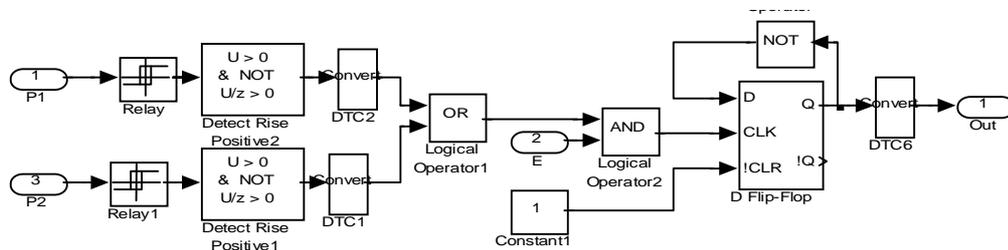


Figura 27 - Apresentação do bloco que faz a detecção do cruzamento por zero.

## 6 Conclusões e trabalhos futuros

---

### 6.1 Conclusões.

Neste trabalho, fez-se um estudo sobre técnicas de medição do tempo de vôo. Especificamente sobre o método da detecção do cruzamento por zero ou diferença de fase. Este estudo foi iniciado com a apresentação, sucinta, dos tipos de anemômetros utilizados para a medição da velocidade do vento, em seguida, apresentou-se diversas técnicas para a medição da velocidade do vento utilizando-se ultra-som. Um estudo mais aprofundado foi feito com o procedimento de medição da velocidade do vento utilizando-se o tempo de vôo. As duas principais técnicas usadas: detecção do limiar e cruzamento por zero, foram apresentadas, sendo a técnica do limiar apresentada resumidamente e a técnica da detecção por zero estudada de forma mais aprofundada.

A partir dos estudos da técnica do cruzamento por zero, verificou-se que a temperatura do meio de medição e a distância entre os sensores são as principais grandezas que influenciam na medição da velocidade do vento utilizando-se este tipo de técnica. A distância varia de forma exponencial com a velocidade máxima possível de ser medida com o método da diferença de fase.

O problema com a temperatura em função da velocidade pode causar variação na fase detectada, podendo inclusive introduzir erros significativos se a variação causar mudança na ordem da detecção da fase.

Através da equação da diferença de fase, verificou-se que há um problema com a medição da velocidade do vento no momento da medição, pois a fase pode aumentar ou diminuir dependendo do sentido do fluxo medido. Uma solução seria optar por aferir o sistema para um valor de temperatura média em que a diferença de fase seja igual a  $\pi$ , que permitiria a medição em ambos os sentidos. Entretanto, isso significaria uma redução pela metade da faixa de medição de velocidade do vento (0 a  $\pi$  ao invés de 0 a  $2\pi$ ).

## **6.2 Sugestões para trabalhos futuros.**

O tema apresentado neste trabalho é vasto com a apresentação de apenas alguns aspectos, deixando espaço para o desenvolvimento de estudos complementares, assim se pode destacar:

- A implementação de um protótipo utilizando-se a técnica de medição da diferença de fase com as considerações levantadas neste trabalho;
- Um estudo da resposta em frequência desta técnica;
- Análise da distância em função da diferença de fase a partir das equações desenvolvidas neste trabalho com o objetivo de aumentar a faixa de medição;

# Bibliografia

---

- [1] Aziz, E., Caldas, I. L. and Staroseicki, M., **An Flowmeter Designed According to Smart Sensor Concept**, Electrotechnical Conference MELECON '96, pp. 1371-1374.
- [2] Marioli, D., Narduzzi C., Offelli, Petri D., Sardini E. and Taroni A., **Digital time of flight measurement for ultrasonic sensors**, IEEE Tans. Instrum. Meas., vol. 41, no. 1, Feb. 1992
- [3] HALLIDAY, David; KRANE, Kenneth S; RESNICK, Robert. **Física**. 4.ed. Rio de Janeiro: LTC – Livros Técnicos e Científicos. v. 2-4, 1996.
- [4] RESOURCE CENTER. **NTD**. Disponível em: <http://www.ndt-ed.org/EducationResources/CommunityCollege/Ultrasonics/Physics/wavepropagation.htm>. Último acesso em 5/07/06.
- [5] 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.
- [6] 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.
- [7] OLIVEIRA, J. I. S., **Medição de Múltiplas Fases de Nível de Líquidos: técnicas, métodos e simulações**. São Luis, MA. Dissertação de mestrado, Universidade Federal do Maranhão, 2005.
- [8] WEBSTER, Jhon G. **The Measurement Instrumentation and Sansors Handbook**. 4. ed. Boca Raton – Florida: CRC Press LLC. 1999.
- [9] UFRGS, **LAPES**. Disponível em: [http://www.lapes.ufrgs.br/Demin/discipl\\_grad/\\_geologia1/apostilas/4mineralogia\\_2003.pdf](http://www.lapes.ufrgs.br/Demin/discipl_grad/_geologia1/apostilas/4mineralogia_2003.pdf). Último acesso em 07/08/2006.

- [10] USP. **USP**. Disponível em: <http://www.forp.usp.br/restauradora/us01.htm>. Último acesso em 3/07/06.
- [11] NADER, G., **Desenvolvimento de Técnicas de Caracterização de Transdutores Piezelétricos**. São Paulo, SP. Tese de Doutorado, Universidade São Paulo, 2002.
- [12] BASSOLI, D. A., Avaliação dos Efeitos do Ultra-som Pulsado de Baixa Intensidade na Regeneração de Musculos Esqueléticos com Vistas à Aplicabilidade em Clínica Fisioterápica, Dissertação de Mestrado, São Carlos, São Paulo, Brasil, 2001.
- [13] Kaimal, J. C., Businger J. A., **A Continuous Wave Sonic Anemometer-Thermometer**, Journal of Applied Meteorology, 1963, pp. 156-164.
- [14] WIKIPEDIA. **Wikipedia**. Disponível em: <http://en.wikipedia.org/wiki/Anemometer>. Último acesso em 06/08/06.
- [15] CLCGI. **Clegi**. Disponível em: <http://clcgi.msu.edu/~rtsmith/anemomet.html#CUP>. Último acesso em 06/08/06.
- [16] VIEIRA , J.C. **Métodos Experimentais em Energia e Ambiente**. Disponível em: [http://in3.dem.ist.utl.pt/laboratories/EMEEprog\\_2003.pdf](http://in3.dem.ist.utl.pt/laboratories/EMEEprog_2003.pdf) . Último acesso em 06/08/06.
- [17] ECSITE. **Muzeo Nazionale della Scienza e della Tecnologia Leonardo**. Disponível em: <http://www.museoscienza.org/english/leonardo/anemometro.asp>. Último acesso em 09/09/06.
- [18] SARMA, G. R., **Analysis of a Constant Voltage Anemometer**. In: IMCT'93-INSTRUMENTATION AND MEASUREMENT TECHNOLOGY CONFERENCE. Proceedings. 1993, pp 731-736.
- [19] FREYMUTH, P., 1967, **Feedback Control Theory for Constant-Temperature Hot-Wire Anemometers**. The Review os Scientific Instruments, Vol. 38, No. 5, p. 677-681.
- [20] CHARTIER, P., GROSS, M., SPIGLER, et al. **Application de la thermodynamique dunon équilibre**. Effets thermoelétriques – Couplage du courant de matière. Ed.Masson, 1971. p. 154-163.
- [21] Tong C. and J. F. Figueroa., **Guidelines for the ultrasonic non-invasive metering techniques**, Flow Measurement and Instrumentation., vol 13 pp. 125-142, Jul. 2002.
- [22] 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.

- [23] Espina, P. I., Yeh, Tem e Rothfleisch, P.I., **Tele-metrology and advanced flow metering**, National Institute of Standard and technology Fluid Flow Group Gaithersburg, USA. 2000.
- [24] Almeida, Will R. M., Catunda, S. Y. C., Freire, Raimundo C. S. **Estudo de Propagação de Incertezas dos Métodos de Tempo de Trânsito em Anemômetros Ultra-Sônicos**. XV Congresso Brasileiro de Automática, v. 1. p. 1-6, Gramado, 2004.
- [25] PINTO, M. S. S. ; CATUNDA, S. Y. C. ; Oliveira, S. H. **Especificação de Projeto para Medição de Velocidade de Vento Utilizando Sensores Ultra-sônicos com o Método da Diferença de Fase**. In: XVI Congresso Brasileiro de Automática, 2006, Salvador. Anais do XVI Congresso Brasileiro de Automática, 2006. v. 1. p. 1944-1949.
- [26] Taylor J. R., **An introduction to error analysis: the study of uncertainties in physical measurements**, 2nd ed. Sausalito, Calif.: University Science Books, 1997.

# Apêndice A – Códigos MATLAB

---

Neste apêndice, são ilustrados os códigos fontes necessários à construção dos gráficos ilustrativos apresentados neste trabalho. Todos estes códigos foram feitos no script do ambiente Matlab.

## A1.Código fonte da simulação do gráfico da velocidade máxima

Nesta parte do trabalho, é apresentado o código fonte do gráfico da figura 22, a qual ilustra o comportamento da diferença de fase em função da distância  $L$  entre os sensores para duas temperaturas: um gráfico para a temperatura de  $0^\circ$  e um outro para a temperatura de  $40^\circ$ .

```
%calcula a velocidade máxima do vento em função da distancia para uma faixa
%de temperatura de 0 a 40 °C

clear
%Dados
Tk = 273.15;
cox = 20.074*sqrt(Tk);
dco = 20.074*sqrt(Tk+40) - cox;
f = 40e3;
l = cox/f;
dp = 2*pi;
k = cos(2*pi*60/360);
L = 5*1:1/10:15*1;

for i = 1:length(L)
    vs(i) = -(2*pi*L(i)*f*dco-dp*cox^2-dp*cox*dco)/k/(2*pi*L(i)*f-dp*cox);
    vs2(i) = (dp*cox^2)/k/(2*pi*L(i)*f-dp*cox);
end
L2=(5:15)*1
for i = 1:length(L2)
    vs3(i) = -(2*pi*L2(i)*f*dco-dp*cox^2-dp*cox*dco)/k/(2*pi*L2(i)*f-dp*cox);
```

```

        vs4(i) = (dp*cox^2)/k/(2*pi*L2(i)*f-dp*cox);
    end

    plot(L/l,vs,'k',L/l,vs2,'k',L2/l,vs3,'ok',L2/l,vs4,'ok')
    grid

```

## A2 Código fonte da Simulação da VRF

Nesta parte do apêndice A, mostra-se o código fonte utilizado para o cálculo dos valores de um coeficiente de projeto chamado de fator de redução de variância, ou do inglês: (VRF, *Variance reduction factor*). este gráfico é apresentado na figura 20, em que se percebe a sensibilidade da técnica de cruzamento por zero.

```

% Calculo da VRF

clear % limpa variáveis
e1 = 0.01; e2 = 0.01;
%incertezas relativas
VP = 0.7:0.01:0.95;
for i = 1:length(VP)
    vp = VP(i);
    up1(i) = sqrt(((e1/e2)*vp/sqrt(1-vp^2))^2 + (1/sqrt(1-vp^2))^2);
    up2(i) = sqrt(((5*e1/e2)*vp/sqrt(1-vp^2))^2 + (1/sqrt(1-vp^2))^2);
    up3(i) = sqrt(((e1/5/e2)*vp/sqrt(1-vp^2))^2 + (1/sqrt(1-vp^2))^2);
end
k=360/2/pi;
plot(VP, up1,'k', VP, up2, 'r', VP, up3)
grid

```

## A3 Código da simulação da fase em função da velocidade máxima e da distância entre os sensores

Nesta parte do apêndice é apresentado o algoritmo usado para se construir o gráfico da Figura 18, no qual se pode verificar uma variação linear da fase em função da distância entre os sensores e da velocidade máxima do vento.

```

% Fase em função da distância entre os sensores e Vmax
clear
c0 = 3.4525e2;
F = 40e3;
v=1

lb = c0/F; %lambda

```

```

L = (1:1:5)*lb
v = v*(1:1:20);
dphi = 0;
for i = 1:length(v)
    for j = 1:length(L)
        dphi(i,j) = 2*pi*L(j)*F*(1/c0 - 1/(c0 + v(i)));
    end
end
dphi
plot(dphi)
grid

```

#### A4 Código da simulação da fase com valores acima da velocidade máxima

Esta parte do apêndice ilustra o algoritmo da simulação do gráfico da Figura 19, em que se pode observar que o comportamento da diferença da fase assemelha-se a um gráfico do tipo dente de serra.

```
%diferença de fase simulada além da velocidade maxima
```

```
c0 = 3.4525e2;%velocidade do som sem vento.
```

```
F = 40e3;% freqüência da onda ultra-sonica
v=1% velocidade do vento
```

```
lb = c0/F; %lambda
```

```
L = 20*lb % distancia entre so sensores
```

```
v = v*(0:0.1:80); %variação da velocidade do vento
```

```
te=cos(7.853981634e-1); %cos45°
```

```
Vmax=0 % velocidade máxima do vento.
```

```
Vmax=(c0)^2/((F*L-c0)*te)%velocidade máxima do vento em função da distância.
```

```
dphi = 0;
```

```
%função de cálculo da diferença de fase
```

```
for i = 1:length(v)
```

```
    dphi(i) =2*pi*L*F*(1/c0 - 1/(c0 + rem(v(i),Vmax)*te));% calculo da
diferença de fase em função da velocidade do vento
```

```
    %y(i)=dphi(i)*(4.09/Vmax);%artificio utilizado para se encontrar o periodo
da onda dente de serra, 4.09 é a velocidade p dphi=1.
```

```
    %x(i)=(y(i)-floor(y(i)))*pi; % artificio para se encontrar a amplitude da
onda.
```

```
    rp(i) = rem(dphi(i),2*pi);
```

```
    rps(i) = rp(i)/2/pi/F;
```

```
end
```

```
figure(1)
```

```
%Comando de plotagem
```

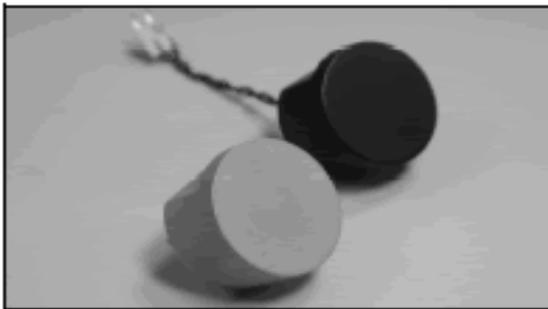
```
plot(v,dphi)%gráfico de dphi em função da velocidade do vento.
```

```
grid
```

# Apêndice B – Data Sheet típico de Transdutor Ultra-sônico

Air Ultrasonic Ceramic Transducers

400EP18D



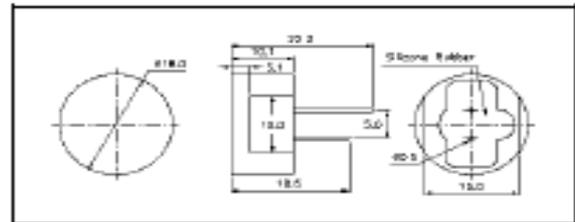
Asymmetric Beam Patterns  
Specification

<b>400EP18D</b>	Transceiver
<b>Center Frequency</b>	40.0±1.0Khz
<b>Bandwidth (-6dB) F.O.M.</b>	1.2Khz
<b>Transmitting Sound Pressure Level</b> at resonant frequency; 0dB re 0.0002µbar per 10Vrms at 30cm	100dB min.
<b>Receiving Sensitivity</b> at resonant frequency 0dB = 1 volt/µbar	-80dB min.
<b>Nominal Impedance (Ohm)</b>	850
<b>Ringing</b> (measured with rubber holder as per figure on next page)	1.5ms max.
<b>Capacitance at 1KHz ±20%</b>	1750 pF
<b>Temperature Compensated Type</b>	3800 pF
<b>Max. Driving Voltage (Cont.)</b> 2% Duty (Bursts)	20Vrms 100Vpp
<b>Total Beam Angle</b> Wide*	135±12°
-6dB Narrow*	75°±12°
<b>Operation Temperature</b>	-30 to 80°C
<b>Storage Temperature</b>	-40 to 85°C

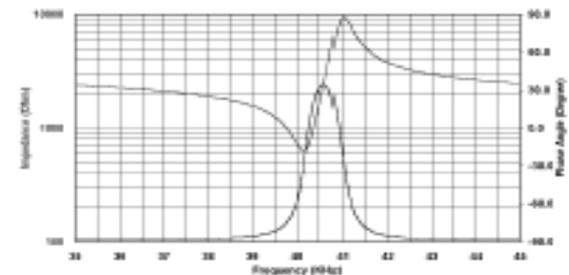
All specification taken typical at 25°C  
Both lead pins and lead wires output are available  
Models available:

1	400EP18D	Black Al. Housing
2	400EP18D0	Natural Al. Housing

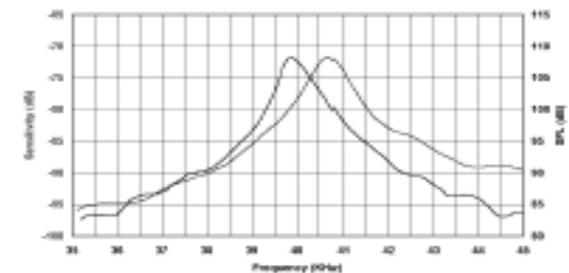
Dimensions: dimensions are in mm



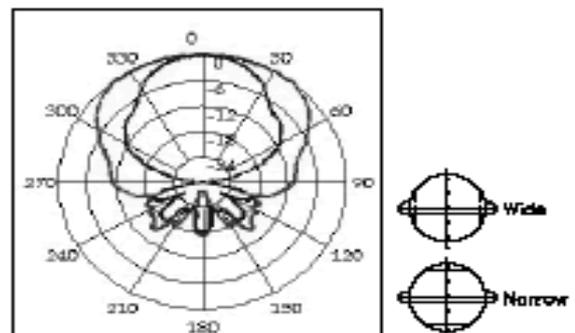
Impedance/Phase Angle vs. Frequency  
Tested under 1Vrms Oscillation Level



Sensitivity/Sound Pressure Level  
Tested under 10Vrms @30cm



Beam Angle: Tested at 40.0Khz frequency  
Wide Angle \_\_\_\_\_ Narrow Angle \_\_\_\_\_



Pro Wave, Air Ultrasonic Ceramic Transducers Data Sheet, patina 20 de 41.