

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO MARANHÃO  
CENTRO DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA  
DE ELETRICIDADE**

**Anemômetro Baseado no Método de Tempo de Trânsito: Estudo comparativo de arquiteturas, avaliação de incertezas e implementação.**

**Will Ribamar Mendes Almeida**

São Luís

Setembro/2004

# **Anemômetro Baseado no Método de Tempo de Trânsito: Estudo comparativo de arquiteturas, avaliação de incertezas e implementação.**

Dissertação de Mestrado submetido 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

**Will Ribamar Mendes Almeida**

São Luís

Setembro/2004

Almeida, Will Ribamar Mendes.

Anemômetro Baseado no Método de Tempo de Trânsito: Estudo comparativo de arquiteturas, avaliação de incertezas e implementação / Will Ribamar Mendes Almeida. – São Luís, 2004.

84f.:il.

Dissertação (Mestrado em Engenharia de Eletricidade) Centro de Ciências Exatas e Tecnológica, Universidade Federal do Maranhão, 2004.

1. Transdutores ultra-sônicos
2. Medição de velocidade do vento
3. Medidores de fluidos

CDU 681.586: 681.121.

# **Anemômetro Baseado no Método de Tempo de Trânsito: Estudo comparativo de arquiteturas, avaliação de incertezas e implementação.**

**Will Ribamar Mendes Almeida**

Dissertação aprovada em 30 de setembro de 2004

**Prof. Dr. Sebastian Yuri Cavalcanti Catunda  
(Orientador)**

**Prof. Dr. Raimundo Carlos Silvério Freire  
(Orientador)**

**Prof. Dr. Aléssio Trindade de Barros  
(Membro da Banca Examinadora)**

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

## **Dedicatória**

A Deus, por tudo que tenho na vida;

A minha esposa, Gylmara Kylma Feitosa Carvalhêdo por seu incentivo e companheirismo;

Aos meus pais José Ribamar Almeida e Mary Mendes de Almeida por tudo o que sou e construí na vida;

Aos meus irmãos André Rossanno Almeida e Meryellen Mendes Almeida, pelo incentivo dado à realização desse sonho;

À minha sogra Neci Alves Feitosa, pelo incentivo e amor dedicado a mim e à minha família;

Aos meus orientadores, professores Raimundo Carlos Silvério Freire e Sebastian Yuri Cavalcanti Catunda, pelo trabalho realizado.

## **Agradecimentos**

A Deus por ter me dado forças para vencer todos os momentos difíceis ao longo desta jornada;

Aos Professores Sebastian Yuri Cavalcanti Catunda e Raimundo Carlos Silvério Freire, pela orientação segura e precisa, pela oportunidade de poder realizar este trabalho, pela confiança em mim depositada e, sobretudo pela amizade.

À coordenação de pós-graduação da UFMA, em especial a Prof<sup>a</sup>. Maria da Guia da Silva e a Alcides Neto, pelo grande apoio e incentivo;

Aos Profs. Hiran de Melo (UFMG), José Gutemberg de Assis Lira (UFMG), Nelson José Camelo (UFMA), Aléssio Trindade de Barros (CEFET-PB), João Viana da Fonseca Neto (UFMA), Rômulo Pires (CEFET-AL) pelo apoio e esclarecimento;

Ao professor Paulo Almeida (UFMG) e Marcos Tadeu Rezende (UFMA) e aos alunos Afonso Flávio Carvalho (UFMA) e a Marcos Zurita (UFMG) pelo auxílio e pelas inúmeras sugestões que muito me ajudaram no desenvolvimento deste trabalho.

Aos demais colegas de pós-graduação do Departamento de Engenharia Elétrica do LIEA/UFMA que estiveram comigo ao longo deste período: Juan Mauricio, Michel Valença, Jaderson Oliveira, Mauro Pinto, Rycardo Bruno, Gisélia e Silvangela dentre muitos outros.

A CAPES/PROCAD pelo apoio financeiro.

Por fim, a todos aqueles que de alguma forma me ajudaram na conclusão desta dissertação.

## Resumo

Anemômetros são instrumentos que, de maneira simplificada, têm a finalidade de medir velocidade de fluidos e, em alguns casos, a sua direção. Em particular a medição da velocidade do ar estende-se a aplicações como: moinhos de vento, túneis de vento, geração de energia elétrica a partir da energia eólica e meteorologia. Dentre os métodos mais comuns de determinação da velocidade de vento destacam-se os que se baseiam no Tempo de Trânsito de ondas ultra-sônicas, por serem mais adequadas para medição de velocidade de gases, e que se baseiam no tempo levado para uma onda ultra-sônica emitida por um transmissor atingir um receptor. Dentre as técnicas usadas para implementar o método do Tempo de Trânsito destacam-se a Diferença de Tempo (DT) e a Diferença de Fase (DF), ambas abordadas neste trabalho..

Um estudo comparativo, com verificação experimental, entre as duas técnicas (DT e DF) é apresentado neste trabalho, usando técnicas para compensar os efeitos da variação da temperatura na velocidade do som. Foi levado em consideração na comparação à implementação dos circuitos de medição e a propagação de incertezas com relação as variáveis que interferem no processo de medição. A partir das análises realizadas escolheu-se o método mais apropriado para estimação da velocidade do vento, tendo sido desenvolvido um protótipo baseado nesse método. O método mais apropriado foi o da diferença de fase, pois foi observado, tanto por simulação quanto por experimentação, que a incerteza na estimação da velocidade do vento foi bem maior para o método DT.

## **Abstract**

Anemometers are instruments, simply, for measuring the velocity of fluids and, in some cases, its direction. Particularly, the measurement of the air velocity extends to applications like: windmills, wind tunnels, electricity generation from Aeolian energy and meteorology. Among the most used methods for the wind velocity determination, the method based on the transit time of ultrasonic waves is stressed for being more suitable to the measurement of the velocity of gases, and which is based on the time required for an ultrasonic wave emitted from a transmitter to reach a receptor. Among the techniques for implementing the transit time the Difference of Time (DT) and Difference of Phase (DP) are emphasized, and both are addressed in this work.

A comparative study, with experimental verification, between the two techniques (DT and DP) is presented in this work, using techniques for compensating the effects of temperature variation on the sound velocity. It was taken into consideration the implementation of the measurement circuits and the propagation of uncertainties with respect to the variables that interfere in the measurement process. From the analyses carried out, the most suitable method for measuring the wind velocity was chosen, and a prototype was developed based on this method. The most suitable method is the Difference of Phase, because the observed uncertainty, in both simulations and experiments, was much smaller than for the DT method.



# SUMÁRIO

<b>Capítulo 1 Introdução.....</b>	<b>1</b>
<b>Organização do Trabalho.....</b>	<b>2</b>
<b>Capítulo 2 Revisão Bibliográfica.....</b>	<b>4</b>
<b>2.1 Tipos de anemômetros.....</b>	<b>4</b>
2.1.1 Tubo de Pitot.....	4
2.1.2 Anemômetro de Pás.....	5
2.1.3 Termo-anemômetros.....	6
2.1.4 Anemômetro a Laser.....	6
2.1.5 Anemômetro Ultra-sônicos.....	7
<b>2.2 Propriedades Gerais do Som.....</b>	<b>7</b>
2.2.1 Propagação das Ondas Ultra-sônicas.....	8
<b>2.3 Sensores Ultra-sônicos.....</b>	<b>9</b>
<b>Capítulo 3 Anemômetros Ultra-Sônicos.....</b>	<b>11</b>
<b>3.1 Transdutores.....</b>	<b>11</b>
<b>3.2 Tipos de Anemômetros Ultra-Sônicos.....</b>	<b>14</b>
3.2.1 Sistema Ultra-sônico baseado no Método Doppler.....	14
3.2.2 Sistema Ultra-sônico baseado no Método do Tempo de Trânsito.....	16
<b>3.3 Técnicas de Medição do Tempo de Trânsito.....</b>	<b>17</b>
<b>Capítulo 4 Desenvolvimento Teórico e Simulações.....</b>	<b>27</b>
<b>4.1 Propagação de Incertezas.....</b>	<b>27</b>
4.1.1 Incerteza na Diferença de Tempo.....	28
4.1.2 Incerteza na Diferença de Fase.....	29
<b>4.2 Simulações.....</b>	<b>30</b>
<b>4.3 Resultados Experimentais do Estudo de Propagação de Incertezas dos Métodos DT e DF.....</b>	<b>35</b>
<b>Capítulo 5 Implementação do Protótipo do Anemômetro Ultra-sônico.....</b>	<b>42</b>
<b>5.1 Implementação do Circuito.....</b>	<b>42</b>
<b>5.2 Detalhamento dos Blocos do Anemômetro usando o Método DF.....</b>	<b>43</b>
5.2.1 Bloco Gerador de Onda Ultra-sônica.....	43
5.2.2 Bloco de Sincronismo.....	44
5.2.3 Bloco de Transmissão e Recepção.....	44
5.2.4 Bloco de Condicionamento.....	45

5.2.5	Bloco de Processamento.....	46
5.2.6	Bloco Indicador.....	47
5.2.7	Fonte de Tensões.....	47
<b><i>Conclusões e Sugestões.....</i></b>		<b>47</b>
<b><i>Apêndice A.....</i></b>		<b>52</b>
<b><i>Apêndice B.....</i></b>		<b>56</b>
<b><i>Apêndice C.....</i></b>		<b>59</b>
<b><i>Apêndice D.....</i></b>		<b>64</b>

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1. Representação de um sistema de medição.....	2
Figura 2.1. Transmissão da onda ultra-sônica. ....	9
Figura 2.2. Formas de transmissão da onda ultra-sônica: a) Contínua b) Pulsada. ....	10
Figura 3.1. Cristal longitudinal para uso em efeito piezoelétrico [14]. ....	12
Figura 3.2. Configuração dos transdutores quanto à posição: a) Transmissão Direta. B) Reflexão Simples.....	14
Figura 3.3. Sistema Doppler de onda contínua com transdutores nos dois lados do tubo. ....	15
Figura 3.4. Sistema baseado no tempo de propagação de ondas acústicas. ....	16
Figura 3.5. Configuração quanto ao número de transdutores utilizados. ....	18
Figura 3.6. Gráfico de simulação do valor de fase $\pi$ com o incremento de $\vartheta$ .....	24
Figura 3.7. Gráfico de simulação do valor de fase 0 com o incremento de $\vartheta$ .....	25
Figura 4.1. Circuito de Simulação do método DT.....	31
Figura 4.2. Representação do condicionamento do sinal recebido para determinação de $t^E$ . ....	32
Figura 4.3. Gráficos da incerteza em $\vartheta$ em função da velocidade do vento para vários valores da incerteza de $t^E$ .....	32
Figura 4.4. Circuito de Simulação do método DF.....	33
Figura 4.5. Representação do condicionamento do sinal recebido para determinação da diferença de fase.....	34
Figura 4.6. Gráficos da incerteza em função de $\vartheta$ para vários valores da incerteza de $\Phi$ . ....	35
Figura 4.7. Representação da montagem experimental. ....	36
Figura 4.8. – Fluxograma do programa de implementação do método DT.....	38
Figura 4.9. – Fluxograma do programa de implementação do método DF. ....	41
Figura 5.1. Diagrama de blocos de um sistema ultra-sônico Tempo de Trânsito genérico. ...	42
Figura 5.2. Diagrama de blocos do medidor de $\vartheta$ utilizando o método DF pulsado.....	43
Figura 5.3. Circuito de geração de onda quadrada à cristal.....	44
Figura 5.4. Circuito de sincronismo.....	44
Figura 5.5. Esquema elétrico do driver.....	45
Figura 5.6. Esquema elétrico do amplificador.....	45
Figura 5.7. Esquema elétrico do detector de cruzamento por zero.....	46
Figura 5.8. Esquema elétrico do medidor de fase.....	46
Figura 5.9. Fonte de tensões utilizada na alimentação do circuito. ....	47

## ABREVIATURAS E SÍMBOLOS

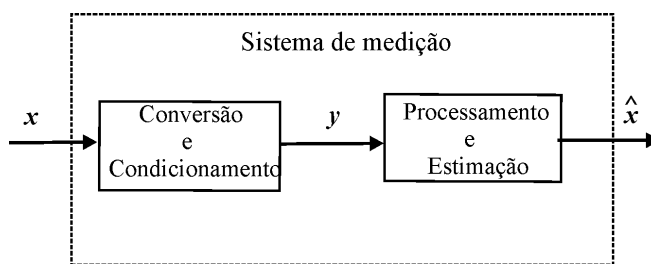
- $DF$  - *Diferença de Fase;*
- $DT$  - *Diferença de Tempo;*
- $C'$  - *Velocidade do som aparente;*
- $L$  - *Distância entre os transdutores;*
- $\theta$  - *Inclinação angular de  $T_A$  para  $T_B$  com relação a direção do fluxo de vento;*
- $f_R$  - *Frequência recebida;*
- $f_T$  - *Frequência transmitida;*
- $T_A$  - *Transdutor A;*
- $T_B$  - *Transdutor B;*
- $C$  - *Velocidade do som;*
- $t_{AB}$  - *Tempo de transmissão da propagação do sinal ultra-sônico de  $T_A$  para  $T_B$  ,*
- $t_{BA}$  - *Tempo de transmissão da propagação do sinal ultra-sônico de  $T_B$  para  $T_A$  ,*
- $t$  - *Valor do intervalo de tempo decorrido da transmissão até a recepção do sinal;*
- $t^E$  - *Valor do intervalo da recepção do sinal até sua detecção;*
- $t^M$  - *Valor do intervalo dos tempos de trânsitos medidos;*
- $\beta$  - *Compressibilidade;*
- $\rho$  - *Densidade do meio;*
- $T_K$  - *Temperatura absoluta na escala Kelvin;*
- $\Delta\Phi$  - *Diferença de fase entre os sinais transmitidos e recebidos;*
- $f$  - *Frequência de operação dos transdutores;*
- $\Phi_{AB}$  - *Valor da fase do sinal ultra-sônico transmitido do  $T_A$  para o  $T_B$ ;*
- $T$  - *Período da onda ultra-sônica;*
- $Xt$  - *Tempo de resolução do contador;*
- $\mu_\phi$  - *Valor de fase esperado;*
- $u_g$  - *Valor de incerteza da velocidade do vento;*
- $u_\phi$  - *Valor de incerteza da fase;*
- $u_{t^E}$  - *Valor de incerteza de  $t^E$ ;*
- $\mathcal{G}$  - *Velocidade do vento;*

# Capítulo 1 Introdução

No princípio do segundo milênio, as principais fontes energéticas eram renováveis, como o vento, o calor produzido pela queima de lenha e a força motriz produzida pelo movimento das águas dos rios. No seu final, como consequência da industrialização e da necessidade de grande quantidade de energia de fácil geração e de custo baixo, energias não renováveis (carvão, petróleo, gás e atômica) substituíram as anteriores. O ressurgimento das energias renováveis deu-se principalmente a partir dos choques petrolíferos da década de 1970. Se por um lado, houve a necessidade de assegurar a diversidade e a segurança no fornecimento de energia, por outro lado, houve a obrigação de proteger o meio ambiente, cuja degradação foi acentuada pelo uso de combustíveis fósseis. Essa situação motivou o interesse pelas fontes renováveis e em particular pelo aproveitamento da energia eólica.

Aliado a essa demanda ocorreu um avanço tecnológico importante que permitiu a exploração em grande escala das diversas formas de energia, possibilitando o desenvolvimento de sistemas complexos a custos reduzidos. No processo de transformação de energia existe a necessidade de se fazer medições. No caso da energia eólica, são particularmente importantes a medição e a monitoração da velocidade do vento.

Pode-se considerar um sistema de medição como uma seqüência de operações, tais como: conversão de natureza física das grandezas; condicionamento de sinais; conversão A/D; processamento de resultados e estimação. Estas operações são executadas em um sistema de medição ou instrumento, constituído de blocos funcionais. De maneira geral, os sistemas de medição podem ser representados pelo diagrama da Figura 1, em que as variáveis  $x$ ,  $y$  e  $\hat{x}$ , representam respectivamente a grandeza a ser medida, o sinal de medição e o valor estimado de  $x$ , ou seja, o resultado da estimação [1].



**Figura 1.1. Representação de um sistema de medição.**

A medição de velocidade de fluidos pode ser feita de diversas maneiras. A forma escolhida para ser implementada neste trabalho baseia-se no uso de ultra-som por interferir pouco no fluxo de ar.

Segundo Asch [2], a medição de velocidade de fluidos usando sensores ultra-sônicos, baseia-se na determinação do tempo de trânsito, através da modificação da velocidade aparente em função da propagação de um sinal de transmissão ultra-sônico no fluido, causado pelo movimento do próprio fluido.

O objetivo deste trabalho é a estimativa da velocidade do vento com transdutores ultra-sônicos. Estes transdutores são dispostos com a inclinação angular entre si  $\theta$  e a uma distância  $L$ , no qual a partir da relação de fase e tempo de propagação medido entre o emissor e o receptor pode-se estimar a velocidade do fluido movente.

A partir destes conceitos, foi desenvolvido no Laboratório de Instrumentação Eletrônica e Automação (LIEA/UFMA) o projeto de um anemômetro ultra-sônico, podendo ser utilizado como instrumento didático ou de recurso para outras pesquisas. As informações para conclusão do projeto foram obtidas a partir das abordagens teóricas e dos resultados de simulações e experimentais.

## **Organização do Trabalho**

Este texto está organizado da seguinte forma:

No capítulo 2 é apresentado, de maneira sucinta, um estudo sobre os princípios básicos do som e do ultra-som como também sobre os diversos tipos de anemômetros e os métodos de medição de velocidade apresentados na bibliografia (estado da arte), abordando-se conceitos, características e suas aplicações.

No capítulo 3 faz-se um estudo sucinto sobre transdutores e sobre os transdutores piezoelétricos. Fazem-se também uma abordagem teórica e um estudo matemático dos principais tipos de anemômetros ultra-sônicos e dos métodos ultra-sônicos à Tempo de Trânsito mais comumente usados.

No capítulo 4 são abordados e discutidos estudos comparativos referentes à análise da propagação de incertezas para determinação do método mais adequado a ser empregado na estimação da velocidade do vento.

No capítulo 5 são apresentadas às arquiteturas implementadas dos anemômetros ultra-sônicos (Diferença de Tempo e/ou Diferença de Fase). São mostrados também os procedimentos para implementação do circuito utilizando o método mais adequado e os resultados práticos e de simulação obtidos a partir do modelo matemático desenvolvido.

## Capítulo 2 Revisão Bibliográfica

Neste capítulo são apresentadas as diferentes técnicas de medições de velocidade de fluidos, enfatizando-se a técnica baseada em ultra-som. São feitas considerações gerais sobre as propriedades do som.

### 2.1 Tipos de anemômetros.

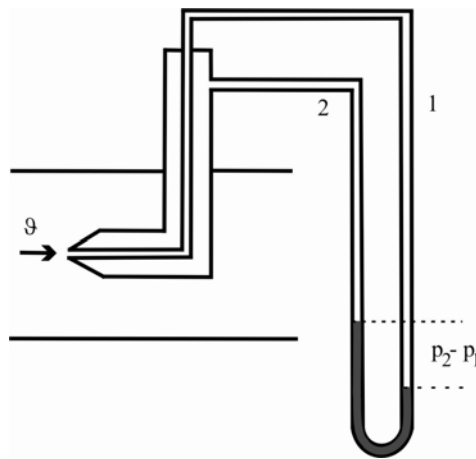
Sabe-se que a anemometria é a determinação quantitativa da velocidade do vento, em termos de seu módulo e direção. Os instrumentos usados com essa finalidade são ditos anemógrafos ou anemômetros conforme efetuem, ou não, o registro da velocidade, ou simultaneamente da velocidade e da direção. No Sistema Internacional (SI) a velocidade do vento é normalmente expressa em m/s, mas podem ser expressas também em km/h, ou em nós.

Existe uma grande variedade de medidores de velocidade de fluido, a seguir são apresentados alguns dos anemômetros mais comuns, baseados em diferentes princípios físicos [8]. A maioria deles apresenta alguma desvantagem que limita sua utilização em medição de velocidade do vento, mas servem como base comparativa.

#### 2.1.1 Tubo de Pitot

O Tubo de Pitot é um instrumento baseado no efeito da variação de pressão exercida pelo ar em movimento. Ele é constituído de dois tubos concêntricos e curvados em forma de  $L$ , e cujo trecho sensor, normalmente o mais curto, é inserido na tubulação e cuidadosamente alinhado na direção frontal do escoamento. O tubo interno é aberto em suas duas extremidades enquanto que o externo é fechado na extremidade que é inserida no escoamento. Este último, porém, é perfurado, possuindo pequenas aberturas a uma distância a jusante da sua ponta. Para a sua utilização, as tomadas de pressão de cada tubo devem ser conectadas a um manômetro ou a um sensor de pressão diferencial, cuja indicação é uma medida da pressão dinâmica do ar. Um diagrama simplificado do tubo de Pitot é mostrado na Figura 2.1





**Figura 2.1. Transmissão da onda ultra-sônica.**

Quando um fluido é levado completamente à situação de velocidade zero em um ponto, este é conhecido como ponto de estagnação, e a pressão deste local é denominada pressão total ou pressão de estagnação. Assim, se considerarmos que o escoamento é levado completamente à condição de estagnação no nariz do tubo de Pitot, através da diferença entre as pressões total e estática em um manômetro, e conhecendo-se a massa específica do fluido no local, pode-se determinar a sua velocidade.

Este tipo de anemômetro opera com uma incerteza de  $\pm 1\%$ . Provavelmente, a maior desvantagem de um tubo de Pitot está na dificuldade de se medir escoamentos de ar em baixas velocidades. Abaixo de 5 m/s o fator de calibração aumenta rapidamente e, de um lado se torna necessária a aplicação de fatores de correção à medição, as baixas pressões diferenciais e a sua dificuldade de medição se constituem um problema adicional. Acima de 60 m/s, no ar, a compressibilidade se constitui em um fator importante a ser considerado.

### **2.1.2 Anemômetro de Pás.**

Os anemômetros de Pás são normalmente utilizados para medição de velocidade do ar em dutos de grandes dimensões, em poços de ventilação e, essencialmente, em escoamentos de ar em condições próximas do ambiente. Estes instrumentos operam de um modo similar a uma turbina e são constituídos de uma hélice montada dentro de uma carcaça cilíndrica.

O escoamento de ar faz com que a hélice se movimente proporcionalmente à velocidade do fluido. Na realidade este tipo de anemômetro é muito mais utilizado como um medidor de deslocamento de ar do que propriamente como um medidor de velocidade. Desse modo, a

velocidade é obtida através de medição de uma determinada distância referente ao deslocamento de ar durante certo intervalo de tempo. Assim sendo, o valor resultante deve ser interpretado como uma velocidade média e não como uma velocidade instantânea do escoamento.

Este tipo de anemômetro pode ser encontrado com dimensões que variam de 2 cm a 40 cm de diâmetro e, dependendo do modelo, os valores de medição de velocidade variam na faixa de 0,1 a 100 m/s.

Quanto à exatidão, após uma calibração cuidadosa, podem ser obtidos valores na faixa de  $\pm 2\%$ , entretanto, eventuais desgastes nos mancais ou um desbalanceamento do rotor pode afetar a calibração original, degradando o desempenho do medidor.

### **2.1.3 Termo-anemômetros**

Nos anemômetros do tipo termo-anemômetros, mede-se a velocidade de um fluido através da detecção das trocas de calor a partir de um pequeno sensor eletricamente aquecido exposto a um escoamento. Basicamente, existem dois tipos de instrumentos que utilizam este princípio, o anemômetro de fio quente e o de filme quente. O Termo-anemômetro de Fio Quente, por suas dimensões reduzidas e sua alta frequência de resposta, é utilizado para analisar detalhes do escoamento, encontrando bastante aplicação no estudo do regime turbulento. As sondas são delicadas e exigem uma habilidade considerável para a sua utilização, logo é mais usado em pesquisas em laboratório. O fluido faz com que a temperatura do fio mude, alterando-se a corrente que é correlacionada com a velocidade.

O Termo-anemômetro de Filme Quente é uma variação do método de fio quente e consiste num pequeno cilindro isolante coberto com um fio metálico fino. Este tipo de sensor é chamado de sensor de filme quente. Pela sua robustez em relação ao sensor de fio quente, tem a possibilidade de utilização em ambientes menos controlados como, por exemplo, nas aplicações de campo.

### **2.1.4 Anemômetro a Laser.**

O LDA (Laser Doppler Anemometer) é constituído de um sistema óptico e um processador de sinais. O sistema óptico gera um feixe principal de laser e divide o mesmo em dois, que se cruzam posteriormente, determinando um volume de interseção. Este volume, de dimensão reduzida, deve ser posicionado no escoamento em estudo.

Geralmente todos os fluidos contêm pequenas partículas de impurezas, tais como partículas de pó, fumaça, algas, bolhas de ar, etc. O anemômetro a Laser utiliza estes contaminantes de cerca de 1 mm ou menos de dimensão, pequenos o suficiente para seguir com boa aproximação o padrão do escoamento. A luz espalhada por estas partículas que atravessam o volume de controle de interseção dos feixes apresenta um pequeno desvio de frequência devido ao movimento das partículas, sendo este fenômeno chamado de Efeito Doppler. Este desvio é detectado por dispositivos do sistema óptico e são relacionados à velocidade do fluido. O LDA requer um investimento relativamente alto e exige uma habilidade considerável para a sua operação, de tal modo que a sua utilização tem se restringido quase que somente a laboratórios de institutos de pesquisas, universidades e empresas especializadas.

### **2.1.5 Anemômetro Ultra-sônicos.**

A medição de velocidade de fluidos usando sensores ultra-sônicos é baseada na determinação do tempo de trânsito, através da modificação aparente da velocidade do som (incremento ou decremento) causado pela propagação de um sinal ultra-sônico no fluido, em decorrência do movimento do próprio fluido.

Este dispositivo de medição é constituído de transdutores (normalmente são constituídos de uma placa piezoelétrica) dispostos a uma inclinação angular  $\theta$  e a uma distância  $L$ , no qual o tempo de propagação entre o emissor e o receptor é determinado, a fim de se obter a velocidade do vento (9).

Assim, com base na teoria desenvolvida sobre os vários tipos anemômetros e na disponibilidade de material optou-se pelo uso de anemômetros ultra-sônicos para determinação da medição de velocidade do vento.

## **2.2 Propriedades Gerais do Som.**

Segundo conceitos da Física, a acústica estuda o som e nela são abordados os fenômenos relacionados com as oscilações mecânicas (vibrações), que originam as ondas sonoras ocorrentes, bem como a propagação dessas ondas nos sólidos, líquidos e gases. As ondas mecânicas são originadas pela deformação de uma região de um meio elástico e necessitam de um meio material para se propagarem, ou seja, as ondas mecânicas não se propagam no vácuo [3]. As vibrações sonoras são ondas mecânicas que transferem energia de um ponto a outro, que

se propagam em uma onda de pressão causando agitação nas moléculas do meio em que estão se propagando, fazendo-as oscilarem, quer o meio seja sólido, líquido ou gasoso [4].

Quando ondas sonoras são transmitidas ao sistema auditivo, são captadas como uma impressão fisiológica denominada som. Dependendo da frequência de propagação (número de períodos por unidade de tempo) e de sua periodicidade (repetição em intervalos de tempo iguais), as ondas sonoras se classificam em sônicas, infra-sônicas e ultra-sônicas. As ondas sônicas são aquelas que se propagam com frequências entre 20 Hz e 20 kHz, enquanto as ondas infra-sônicas são aquelas que se propagam com frequências inferiores a 20 Hz. Já as ultra-sônicas são as ondas que se propagam com frequências superiores a 20 kHz. Dentre as classificações apenas a sônica está dentro da faixa audível dos humanos [5].

### **2.2.1 Propagação das Ondas Ultra-sônicas.**

Quando uma onda acústica atinge uma superfície entre dois meios diferentes, parte dela é refletida, parte é absorvida e parte é transmitida através do novo meio onde ocorre a propagação da onda. Ao se propagar, a onda sonora faz com que as partículas que compõe o meio de propagação executem um movimento oscilatório em torno de sua posição de equilíbrio, cuja amplitude diminui gradativamente em decorrência da perda de energia da onda.

À medida que as ondas sonoras se propagam pelo meio, elas sofrem alterações nas suas características originais, causadas pelos fenômenos da reflexão, refração, atenuação e absorção. A propagação destas ondas acústicas através de um meio depende de alguns fatores, que são dependentes das características físicas do meio em que a onda se propaga (coeficiente de atenuação, impedância acústica, coeficiente de absorção, etc.).

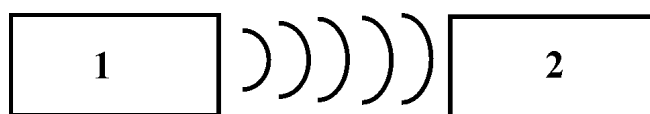
Quanto ao sentido de oscilação das ondas sonoras, estas se classificam em ondas longitudinais e ondas transversais. No caso da primeira classificação, as ondas longitudinais, são aquelas que ocorrem quando as partículas do meio em que a onda sonora se propaga vibram na mesma direção de propagação da onda nesse meio, tendo um efeito compressivo e podendo propagar-se nos meios sólidos, líquidos e gasosos [6]. Já as ondas transversais se caracterizam pela ocorrência de vibração das partículas perpendicularmente em relação à direção de propagação da onda nesse meio. Entretanto, estas ondas não se propagam nos líquidos e nos gases, pois nesses meios não existem ligações mecânicas. As ondas longitudinais são as de maior velocidade de propagação, sendo sua velocidade de propagação aproximadamente o dobro

da velocidade da onda transversal. Como neste trabalho usam-se os gases como meio de propagação das ondas, elas são, portanto, longitudinais.

### 2.3 Sensores Ultra-sônicos.

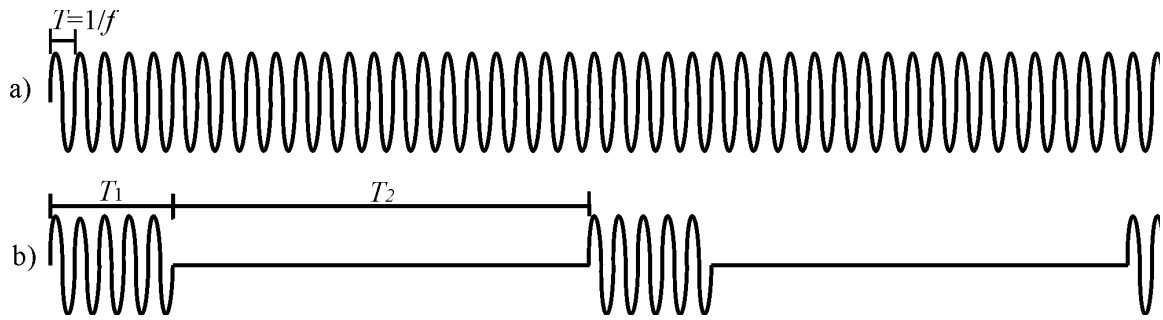
As ondas ultra-sônicas podem ser geradas por transdutores e podem ser usadas na medição de distância, posição, nível, temperatura e especificamente neste trabalho, para medição de velocidade do vento. Os transdutores ultra-sônicos são largamente empregados em diversas áreas, tais como: condicionamento e segurança de ambientes, automobilismo, meteorologia, indústrias e hospitais.

Geralmente os transdutores de ultra-som funcionam como filtros passa-faixa e, na sua utilização para estimação da velocidade de fluidos, uma só frequência  $f$  é utilizada. O sinal ultra-sônico transmitido pode ser de forma contínua ou pulsada (Figura 2.2). No modo contínuo, o sinal não sofre interrupção na propagação e no modo pulsado são enviados amostras de ciclos do sinal em rajadas (Figura 2.3) [7].



**Figura 2.2. Transmissão da onda ultra-sônica.**

No modo contínuo deve-se usar o método da diferença de fase. A frequência máxima de variação da velocidade do vento é, segundo o teorema da amostragem,  $f/2$ . Neste caso, para se poder compensar o efeito da variação da temperatura na estimação da velocidade do vento deve-se usar no bloco 1 (Figura 2.2) um transmissor em uma frequência  $f_1$  e um receptor em frequência  $f_2$  e no bloco 2 (Figura 2.2) um transmissor com uma frequência  $f_2$  e um receptor com frequência  $f_1$ , sendo a máxima frequência detectável de variação da velocidade do vento igual a metade da menor frequência  $f_1$  ou  $f_2$ .



**Figura 2.3. Formas de transmissão da onda ultra-sônica: a) Contínua b) Pulsada.**

No modo pulsado pode-se usar a metade dos transdutores usados no modo contínuo, desde que  $T_1 < T_2$  (Figura 2.3), pois cada transdutor pode ser usado como transmissor (durante o envio do pulso) e como receptor (entre as rajadas). Neste caso, a frequência máxima detectável de variação da velocidade do vento é bem menor que no modo contínuo.

## Capítulo 3 Anemômetros Ultra-Sônicos

### 3.1 Transdutores

O tipo de transdutor escolhido neste trabalho foi o piezo-elétrico, que é um dispositivo que produz trabalho mecânico quando excitado eletricamente, ou pode gerar energia elétrica quando atuado mecanicamente. Neste tipo de transdutores são usados materiais como quartzo, titanato de bário e PZT (titanato zirconato de chumbo), também são usados polímeros flexíveis como o PVDF (Polivinilo de Flúor).

A piezoelectricidade foi descoberta em 1880 pelos irmãos Curie [9] e é definida como uma propriedade física segundo a qual alguns cristais anisotrópicos desenvolvem cargas elétricas quando submetidos a deformações mecânicas. Este fenômeno manifesta-se da seguinte forma: aplicando-se cargas mecânicas em duas faces opostas de uma lâmina de cristal de quartzo ocorre a formação de cargas elétricas de polaridades contrárias nessas faces, isto é, em uma das faces formam-se cargas positivas e na outra, formam-se cargas negativas, como ilustrado na Figura 3.1. De forma contrária, caso seja aplicada agora uma tensão alternada em uma lâmina de cristal, ela sofrerá deformações sucessivas passando a vibrar. A lâmina se contrairá na primeira metade do ciclo da corrente alternada e se expandirá na outra metade. A frequência de vibração mecânica será a mesma da tensão alternada [10].

Os dispositivos piezoelétricos encontram aplicações em diversas áreas, como citado em [11], [12], [13] e [14] e na conversão de deslocamentos, acelerações, forças, pressão, tensão e deformação (efeito direto), na produção de deslocamentos, forças ou ondas acústicas em resposta a uma tensão aplicada (efeito reverso) e na operação em estruturas ressonantes para melhorar a eficiência de radiação de energia. (efeito direto - reverso).

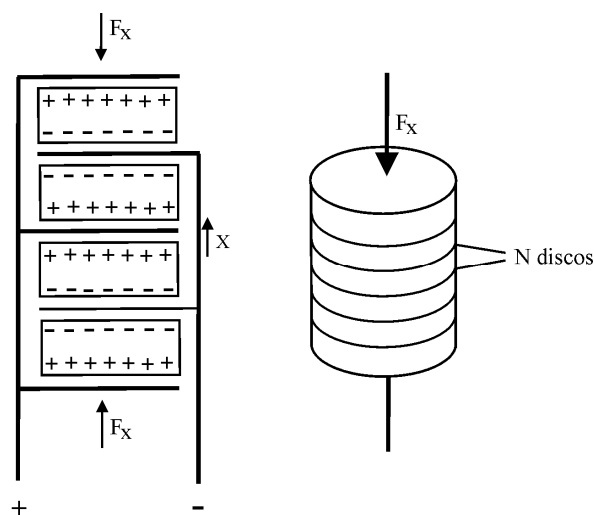


Figura 3.1. Cristal longitudinal para uso em efeito piezoelétrico [14].

### Características do Sensor Ultra-Sônico

Um bom sensor de velocidade ou de fluxo deve ter as seguintes características: uma boa linearidade entre a grandeza de saída e o fluxo passante, ser usado com qualquer fluido, não obstruir a sua passagem, ter boa exatidão e tempo de resposta pequeno. O transdutor ultra-sônico atende a todos esses requisitos, contudo, o desempenho do sistema de medição, depende de seu uso correto, da exatidão no manuseio e exatidão do sistema elétrico.

Os medidores ultra-sônicos de velocidade são os mais frequentemente usados mesmo quando comparados aos medidores de aplicação similar do tipo turbina e magnético. Os medidores do tipo ultra-sônico e tipo turbina apresentam como principais vantagens sua boa linearidade e exatidão enquanto o medidor magnético não obstrui o fluxo. Como desvantagens quando comparados ao medidor ultra-sônico, o medidor magnético exige um fluido eletricamente condutor e o medidor de turbina apresenta alguma obstrução no fluxo e tem partes móveis, o líquido deve ser limpo e não corrosivo, para pressões elevadas o rotor pode ser danificado e com acelerações bruscas ele perde a exatidão.

Os medidores ultra-sônicos podem medir o fluxo de qualquer fluido através do qual o som possa ser transmitido. Os únicos fluidos para os quais existe algum problema de propagação do som são aqueles que têm duas ou mais fases. Líquidos misturados com gases trazem grandes problemas porque bolhas de gás efetivamente bloqueiam ou espalham as ondas sonoras.



Assim, optou-se por fazer a medição da velocidade do vento utilizando sensores ultra-sônicos, estes dispositivos apresentam boa sensibilidade e facilidade de montagem. A seguir são descritos os princípios de funcionamento e características dos sensores ultra-sônicos.

### **Principais vantagens dos sensores ultra-sônicos**

As principais vantagens dos sensores ultra-sônicos usados em medição de velocidades de fluidos são:

- Boa exatidão;
- Resposta rápida;
- Não obstruem o fluxo;
- Linearidade em ampla faixa de frequência;
- Conveniente para todos os fluidos;
- Independência de calibração para uma boa exatidão;
- Não possui partes móveis;

### **Posição do Transdutor**

Um aspecto importante a ser considerado no projeto de medidores ultra-sônicos é a posição dos transdutores em relação ao deslocamento do fluido. Dentre as várias configurações utilizadas quanto à posição dos transdutores, optou-se pela análise das duas principais configurações estão demonstradas na Figura 3.2 que são: a transmissão direta (“Z”) e a reflexão simples (“V”). Na configuração da transmissão direta os transdutores são dispostos em lados opostos da tubulação como mostrado na Figura 3.2a. Esta configuração é usada para pequenas distâncias ou para quando se tem pouca potência no sinal transmitido, seu caminho de propagação acústica é o menor quando comparado com outras configurações.

Na configuração da reflexão simples, os dois transdutores estão posicionados no mesmo lado da tubulação como mostrado na Figura 3.2b. Na reflexão simples o comprimento do caminho acústico é maior, o que resulta em um maior tempo e melhor resolução. Nesta configuração é mais fácil o ajuste da posição e do alinhamento dos transdutores. Neste trabalho

optou-se pelo método de transmissão direta, pois, deseja-se medir velocidades de vento que não estão passando necessariamente por tubos, podendo não ter assim, uma parede para reflexão.

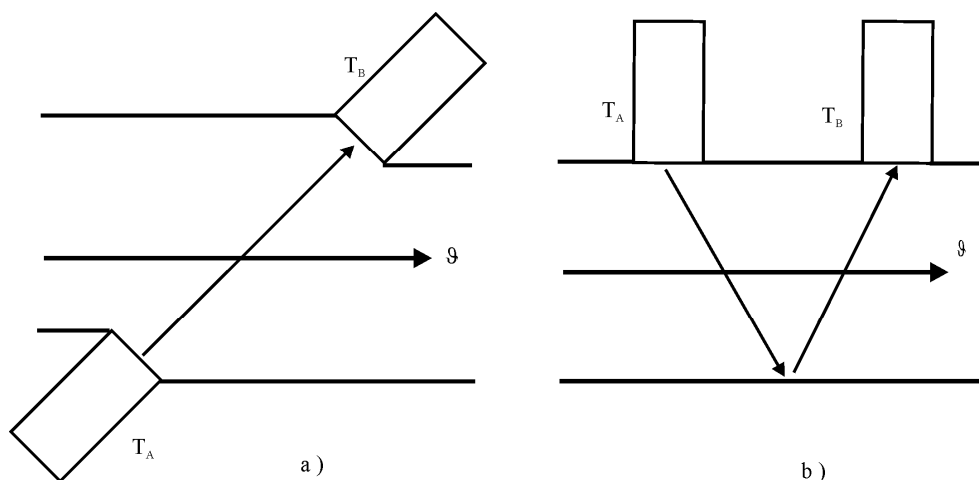


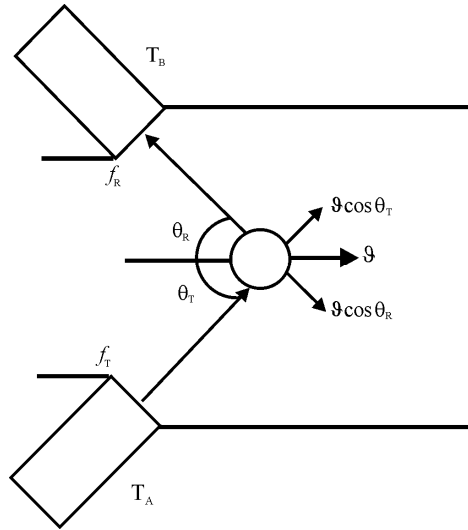
Figura 3.2. Configuração dos transdutores quanto à posição: a) Transmissão Direta. B) Reflexão Simples.

### 3.2 Tipos de Anemômetros Ultra-Sônicos.

Os anemômetros ultra-sônicos podem operar basicamente segundo dois princípios físicos distintos: Tempo de Trânsito e efeito Doppler. No primeiro, a velocidade de propagação efetiva de uma onda acústica em um meio em movimento é igual à soma vetorial da velocidade do som no meio com a velocidade de deslocamento do próprio meio. Já o segundo princípio, baseia-se na variação de frequência quando uma onda acústica é refletida por uma partícula em movimento. A seguir, a partir destes princípios faz-se um estudo mais aprofundado da teoria e do modelo matemático de cada método.

#### 3.2.1 Sistema Ultra-sônico baseado no Método Doppler.

Para ilustrar o método de medição de velocidade de fluidos usando o efeito Doppler pode-se assumir que um fluido se mova com velocidade  $v$  em um tubo (Figura 3.3), de um lado encontra-se o transdutor transmissor ( $T_A$ ) e do outro o de recepção ( $T_B$ ). Se não houvesse movimento do fluido, a frequência recebida seria a mesma da emitida, ou seja, o desvio Doppler, que é a diferença entre estas frequências, seria zero. Havendo movimento, a frequência recebida é diferente da emitida, maior ou menor dependendo do sentido do fluxo e do posicionamento dos transdutores.



**Figura 3.3. Sistema Doppler de onda contínua com transdutores nos dois lados do tubo.**

Para o sistema da Figura 3.3, a equação que relaciona a frequência recebida com a transmitida em função de  $v$  é dada por:

$$f_R = f_T \left[ \frac{1 - (v \cos \theta_R / C)}{1 + (v \cos \theta_T / C)} \right] \quad (1)$$

Em que  $f_R$  e  $f_T$  são as frequências recebida e transmitida respectivamente.

Reescrevendo a equação (1) em função do desvio Doppler  $f_D = f_R - f_T$ , tem-se:

$$f_D = -f_T \left[ \frac{(v \cos \theta_R) + (v \cos \theta_T)}{C + (v \cos \theta_T)} \right] \quad (2)$$

Considerando  $v \ll C$  e fazendo com que os ângulos de incidência sejam iguais ( $\theta = \theta_R = \theta_T$ ), a equação (2) pode ser simplificada para a seguinte forma:

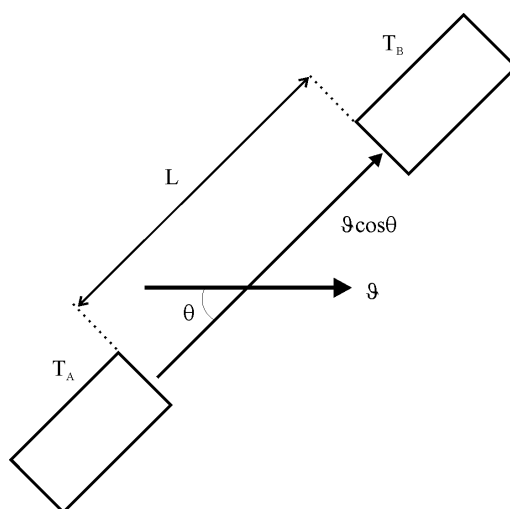
$$f_D = \pm 2 \left( f_T \frac{v \cos \theta}{C} \right) \quad (3)$$

O sinal negativo (-) presente na equação (1) não indica que o desvio Doppler seja uma frequência negativa, trata-se apenas da representação do sentido da velocidade em relação ao posicionamento dos transdutores, ou seja,  $f_R < f_T$ . Caso a velocidade seja em sentido contrário, o

sinal seria positivo, razão pela qual a equação (3) apresenta o sinal ( $\pm$ ). Logo, pode-se concluir que o desvio Doppler é diretamente proporcional à velocidade do fluido [16].

### 3.2.2 Sistema Ultra-sônico baseado no Método do Tempo de Trânsito.

A configuração básica do anemômetro baseado no Método do Tempo de Trânsito é ilustrada na Figura 3.4. Sendo utilizados dois transdutores ( $T_A$  e  $T_B$ ) que são colocados em lados opostos. Sabendo que durante um intervalo de tempo, o transdutor  $T_A$  emite pulsos que são captados por  $T_B$ , e no instante seguinte os pulsos são emitidos de  $T_B$  para  $T_A$ . A velocidade de propagação de cada transmissão ultra-sônica vista pelos transdutores é uma composição vetorial da velocidade de propagação do som no fluido com a velocidade de escoamento do próprio fluido.



**Figura 3.4. Sistema baseado no tempo de propagação de ondas acústicas.**

Para os casos em que não há movimento do fluido, o tempo de propagação dos pulsos de  $T_A$  para  $T_B$  ( $T_{AB}$ ) será o mesmo que de  $T_B$  para  $T_A$  ( $T_{BA}$ ). Com o movimento do fluido, o tempo de propagação da onda sonora de  $T_A$  para  $T_B$  torna-se menor do que se não houvesse fluxo, enquanto que de  $T_B$  para  $T_A$ , o tempo torna-se maior. A velocidade do fluido é medida através dos tempos de trânsito obtidos quando transmitidos em sentidos opostos e na mesma direção de propagação do fluido.

Como no método do efeito Doppler necessita-se de reflexão e esta é melhor nos líquidos que nos gases, optou-se pelo método do tempo de trânsito para se poder medir velocidade com mais facilidade.

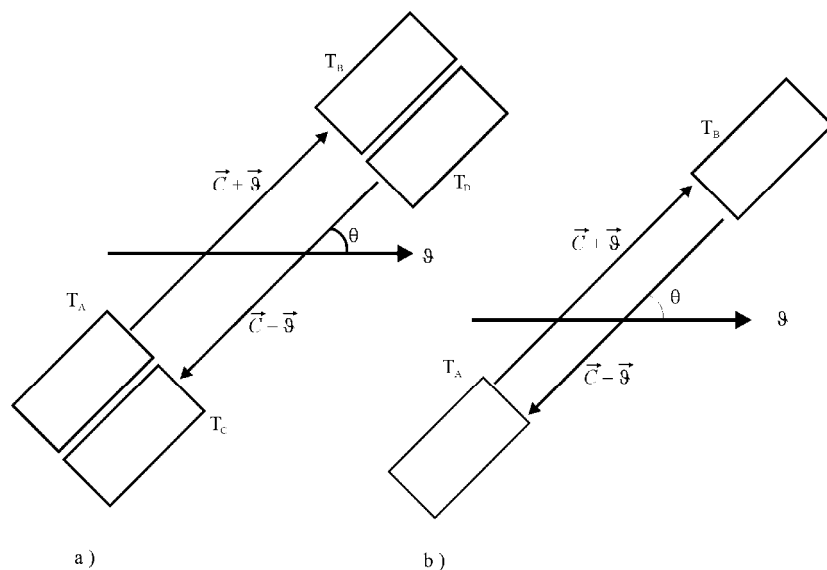
### 3.3 Técnicas de Medição do Tempo de Trânsito.

Dentre os anemômetros que utilizam o método do Tempo de Trânsito existem duas classificações quanto às formas de transmissão do sinal: os contínuos e os pulsados. Nos primeiros, há a emissão contínua de ondas ultra-sônicas por parte do transdutor transmissor. O sinal que chega ao transdutor (receptor) é, portanto, originado pelo sinal gerado por uma fonte intermitente. Já os pulsados funcionam emitindo rajadas que nada mais são do que conjuntos fixos de pulsos ultra-sônicos emitidos com certa periodicidade.

Na literatura, a grande ênfase é dada geralmente ao circuito eletrônico usado para obter um sinal proporcional a  $\vartheta$ , que neste caso corresponde ao tempo decorrido entre a transmissão e recepção de um sinal [17]. Assim, dentre as várias formas de obtenção do tempo de trânsito, as duas técnicas mais difundidas do método Tempo de Trânsito são: as feitas de forma direta, ou seja, a Diferença de Tempo (DT) e a indireta, ou seja, a Diferença de fase (DF). Na primeira o tempo de trânsito é determinado por meio da contagem do tempo ocorrida entre a emissão do pulso e sua recepção. Essa contagem pode ser facilmente obtida com o uso de contadores que são iniciados simultaneamente à transmissão do sinal e parados com a detecção de um nível de tensão do sinal recebido compatível com um nível de referência previamente determinado. Já para a segunda técnica, um sinal é continuamente transmitido, e o tempo de trânsito é determinado pela diferença de fase entre o sinal emitido e o recebido. Nesse caso, os resultados são obtidos com grande exatidão ao custo de um hardware sofisticado e de um algoritmo que possa compensar a medição do tempo quando a distâncias entre os transdutores for maior do que o comprimento de onda do sinal transmitido. Essa compensação pode ser feita com o uso de diferentes frequências ou através da determinação de uma distância ótima dentro da faixa do comprimento de onda.

Segundo o teorema da amostragem de Shannon [18] ou Nyquist [19], a frequência de amostragem deve ser igual ou maior a duas vezes a frequência máxima do sinal amostrado. Desta forma, para o caso do sistema pulsado, a frequência máxima de variação da velocidade do fluxo deve ser menor ou igual a metade da frequência de repetição dos pulsos. Para o caso do sistema de diferença de fase, a frequência do sinal de ultra-som deve ser igual ou maior que o dobro da frequência máxima de variação da velocidade do fluido. Portanto, caso se deseje medir velocidades de fluidos turbulentos, com variações de frequências elevadas, o melhor método é o da diferença de fases.

Com relação às formas de transmissão do sinal dos anemômetros que usam transdutores ultra-sônicos para o método Tempo de Trânsito, estes podem ser classificados quanto ao número de transdutores utilizados. Para as configurações que possuem quatro transdutores, dois para transmissão e dois para recepção, pode-se empregar tanto às formas de transmissão contínua ou pulsada, como mostrado na Figura 3.5a. Outra possibilidade de configuração utiliza dois transdutores, cada um atuando ora como transmissor, ora como receptor, como mostrado na Figura 3.5b, este tipo de configuração só pode ser implementado no modo pulsado. Para o caso de medição de vento com transmissão contínua ou pulsada, utilizando apenas dois transdutores, sendo um exclusivamente para transmissão e o outro para a recepção, necessita-se também de um sensor de temperatura para determinação da velocidade do som.



**Figura 3.5. Configuração quanto ao número de transdutores utilizados.**

A velocidade de propagação de uma onda sonora através de um fluido é a soma vetorial das velocidades de propagação natural (velocidade do som,  $C$ ) com velocidade do fluido a ser medido (velocidade do vento,  $v$ ) [11]:

$$\vec{C}' = \vec{C} \pm \vec{v} \quad (4)$$

Na prática, observa-se que dois transdutores com transmissões opostas e paralelas à propagação do vento não resultam em uma boa estimativa de  $v$  devido principalmente aos distúrbios causados pela incidência do vento sobre o próprio transdutor. Entretanto, esses

distúrbios podem ser eliminados caso os transdutores,  $T_A$  e  $T_B$ , sejam colocados a um ângulo  $\theta$  ao sentido de propagação do fluido, como mostrado na Figura 3.5 [20].

A velocidade do som,  $C$ , depende de diversos fatores, dentre os quais se tem a viscosidade do fluido, sua temperatura, etc. Isto se constitui em um problema para a estimação de  $\mathfrak{V}$ , mas a necessidade de se determinar  $C$  para o cálculo de  $\mathfrak{V}$  pode ser eliminada como será mostrado em seguida.

Considerando que para o caso da diferença de tempo, os transdutores  $T_A$  e  $T_B$  podem transmitir e receber alternadamente, para um determinado caminho o sinal ultra-sônico é disposto no sentido de propagação do fluido ( $C'_{AB}$ ), enquanto que no caminho inverso é colocado contra o sentido de propagação deste mesmo fluido ( $C'_{BA}$ ). Nestes casos, a transmissão do sinal tem velocidades resultantes expressas por:

$$\vec{C}'_{AB} = \vec{C} + \vec{\mathfrak{V}} \quad (5)$$

e

$$\vec{C}'_{BA} = \vec{C} - \vec{\mathfrak{V}} \quad (6)$$

Assumindo-se que os tempos de trânsito podem ser determinados pela relação inversa entre as velocidades de propagação e o comprimento do caminho sonoro  $L$  (distância entre os transdutores), as velocidades resultantes podem ser calculadas da seguinte forma:

$$C'_{AB} = \frac{L}{t_{AB}} \quad \text{e} \quad C'_{BA} = \frac{L}{t_{BA}} \quad (7)$$

Considerando-se que  $C' = C \pm \mathfrak{V} \cos \theta$  seja a simplificação do vetor soma  $\vec{C} \pm \vec{\mathfrak{V}}$ , tem -se:

$$t_{AB} = L / (C + \mathfrak{V} \cos \theta) \quad (8)$$

e

$$t_{BA} = L / (C - \mathfrak{V} \cos \theta) \quad (9)$$

Assim, a partir da relação existente entre  $t_{AB}$  e  $t_{BA}$  pode-se determinar a velocidade do fluido, sem que essa velocidade seja afetada por mudanças nas condições do meio (temperatura, pressão, viscosidade e densidade), ou seja, sem nenhuma influência de  $C$ . Fazendo-se a diferença das equações (8) e (9) pode-se determinar  $\mathfrak{V}$  como sendo [21]:

$$\mathfrak{V} = \frac{L}{2 \cos\theta} \left( \frac{1}{t_{AB}} - \frac{1}{t_{BA}} \right) \quad (10)$$

### 3.3.1 Método da Diferença de Tempo.

O método de medição direta dos tempos de propagação inclui, além dos tempos de propagação no meio, tempos de atraso dos circuitos eletrônicos. Esse tempo de atraso eletrônico se deve principalmente a resposta dinâmica do transdutor ultra-sônico e deve ser considerado, necessitando uma aferição do circuito de medição. Neste caso, os tempos de trânsitos medidos podem ser representados por  $t^M = t + t^E$ , em que  $t$  é intervalo de tempo decorrido do momento da transmissão do sinal até sua recepção e  $t^E$  é o valor do intervalo da recepção do sinal até sua detecção. Muitas vezes  $t^E \ll t$  e pode ser desprezado.

Dessa forma, para o método DT, a velocidade do vento pode ser determinada por:

$$\mathfrak{V} = \frac{L}{2 \cos\theta} \left( \frac{1}{t_{AB}^M - t_{AB}^E} - \frac{1}{t_{BA}^M - t_{BA}^E} \right) \quad (11)$$

#### Aferição do tempo de atraso eletrônico

Assume-se que tempo de atraso eletrônico ( $t^E$ ) ocorre sistematicamente e que ele está acrescentado ao tempo de trânsito medido em ambas as direções ( $t_{AB}^M$  e  $t_{BA}^M$ ). A determinação de  $t^E$  pode ser realizada, usando a relação existente entre velocidade do som no ar em função da temperatura [22]. No caso do fluido, estas ondas acústicas se propagam com velocidade:

$$C = \sqrt{\beta/\rho} \quad (12)$$

Em que  $\beta$  é a compressibilidade (“bulk modulus”) e  $\rho$  é a densidade do meio. Mais especificamente no caso do gás, a compressibilidade é proporcional à pressão, sendo que esta



mesma pressão também é proporcional à densidade e à temperatura absoluta do meio. Deste modo, a velocidade do som é independente da densidade e é proporcional à temperatura.

A relação  $\beta/\rho$  em um gás ideal é proporcional à temperatura absoluta  $T_k$ , a velocidade do som no ar em função da temperatura pode ser calculada pela expressão:

$$C = 20,074\sqrt{T_k} \quad (13)$$

A partir da soma das equações (8) e (9) obtém-se:

$$C = \frac{1}{2} \left[ L \left( \frac{1}{t_{BA}} + \frac{1}{t_{AB}} \right) \right] \quad (14)$$

Substituindo (13) em (14), obtém-se a equação de Kaimal e Businger que fornece a possibilidade da estimação desse tempo de atraso. Logo, tem-se:

$$T_k = \frac{L^2}{1612} \left( \frac{1}{t_{BA}^M - t_{BA}^E} + \frac{1}{t_{AB}^M - t_{AB}^E} \right)^2 \quad (15)$$

Considerando-se que  $t_{AB}^E = t_{BA}^E = t^E$  para  $\vartheta = 0$ , tem-se que  $t_{AB} = t_{BA} = t$ . Então, a partir da equação (15) pode-se estimar  $t^E$  como:

$$t^E = t^M - \frac{L}{20,074\sqrt{T_k}} \quad (16)$$

A partir da equação (16) pode-se também observar que para determinação dos valores do tempo de atraso eletrônico, é necessário para a determinação da temperatura do fluido, que só deve ser feito no processo de calibração.

### 3.3.2 Método da Diferença de Fase.

No método da diferença de fase, o sinal ultra-sônico é transmitido continuamente entre um par de sensores, ou transmitido até que o sinal seja detectado no transdutor receptor. Por

isso, o atraso eletrônico devido à dinâmica do transdutor pode ser desprezado. A velocidade do vento é determinada medindo-se a diferença de fase entre dois sinais transmitidos também em direções opostas. A diferença de fase aparece como consequência do acréscimo ou do atraso da propagação do sinal ultra-sônico causado pelo movimento do vento.

Assim, a fase dos sinais recebidos em ambas os sentidos a uma frequência  $f$  de operação dos transdutores é definida como:

$$\Phi_{AB} = 2\pi f t_{AB} \quad (17)$$

$$\Phi_{BA} = 2\pi f t_{BA} \quad (18)$$

Sendo  $\Delta\Phi = \Phi_{BA} - \Phi_{AB}$  a diferença de fase. Faz-se a diferença entre as equações (17) e (18) para determinar  $\vartheta$  como sendo:

$$\vartheta = \frac{\pi f L}{\cos\theta} \left( \frac{1}{\Phi_{AB}} - \frac{1}{\Phi_{BA}} \right) = \frac{\pi f L}{\cos\theta} \left( \frac{\Delta\Phi}{\Phi_{AB}\Phi_{BA}} \right) \quad (19)$$

Para determinação do tempo de trânsito prático e em um único sentido tem-se:

$$\Phi_{AB} = \Phi_{AB}^M + \Phi^F \quad (20)$$

$$2\pi f t_{AB}^M = 2\pi f t^F + 2\pi f t_{AB} \quad (21)$$

$$t_{AB}^M = t^F + t_{AB} \quad (22)$$

Os tempos de trânsitos medidos no método da diferença de fase são determinados de forma análoga ao método da diferença de tempo. Assim, os tempos podem ser representados por  $t_{AB}^M = t_{AB} + t^F$ . Assumindo que a determinação do tempo de fase ( $t^F$ ) poderá ser facilmente obtida com o uso de um circuito comparador de fase o qual fornecerá um pulso com largura correspondente à diferença de fase existente entre o sinal ultra-sônico transmitido e recebido. A medição desta largura de pulso pode ser determinada utilizando-se um microcontrolador.

Entretanto, o outro elemento formador de  $t_{AB}^M$ , ou seja,  $t_{AB}$  numa transmissão contínua é determinado pela relação  $k/f$ , na qual o valor da constante  $k$  representa o valor equivalente ao número de ciclos ocorridos desde o momento da transmissão até o momento da detecção deste sinal ultra-sônico, tendo uma relação direta de proporcionalidade com a distância existente entre os transdutores. Então, através dessa relação de proporcionalidade deseja-se obter o melhor valor de  $L$  para se determinar o valor de  $k$  quando ocorrer um incremento de  $\mathfrak{G}$ .

Assim, sendo  $t_{SI}$  o valor do tempo de propagação quando  $\mathfrak{G} = 0$  e  $t_I$  o tempo de propagação quando  $\mathfrak{G} \neq 0$ , assume-se que  $t_{SI} = L/C_0$  para  $C = C_0$  e  $t_I = L/C$  para  $C = C_0 + \mathfrak{G}$ , admitindo-se que  $0 < \phi < \pi$  e que  $\Delta\phi_{MÁX} = \pi$ , tem-se:

$$\Delta\Phi = 2\pi f t_{SI} - 2\pi f t_I \quad (23)$$

$$\Delta\Phi = 2\pi f (t_{SI} - t_I) \quad (24)$$

$$\Delta\Phi = 2\pi f (L / C_0 - L / C) = 2\pi f L (1 / C_0 - 1 / C) \quad (25)$$

Assumindo-se  $\Delta\Phi \leq \Delta\Phi_{MÁX}$  e  $C = C_{MÁX}$  obtem-se:

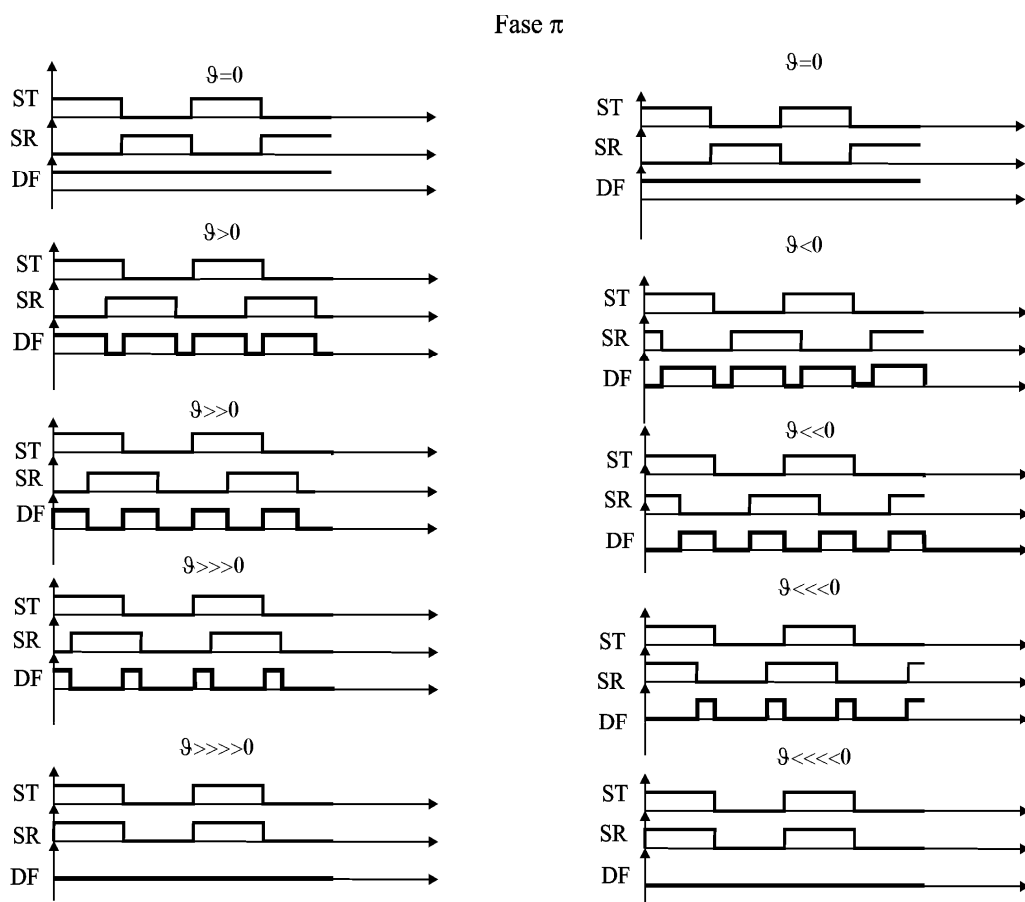
$$2\pi f L (1 / C_0 - 1 / C) \leq \pi \quad (26)$$

$$\frac{1}{2fL} \leq \frac{1}{C_0} - \frac{1}{C_{MÁX}} \quad (27)$$

$$L \leq \frac{C_0 C_{MÁX}}{2f(C_{MÁX} - C_0)} \quad (28)$$

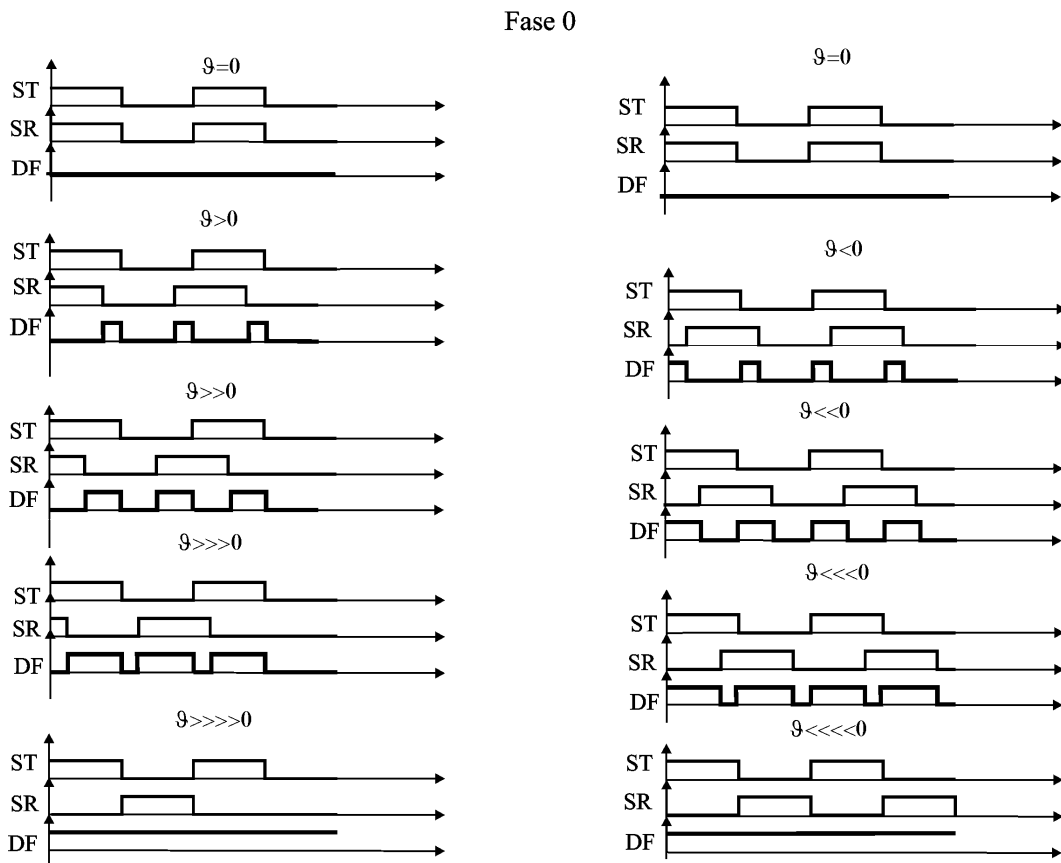
Logo, a partir da equação (28) pode-se concluir que o valor de  $L$  para um acréscimo de  $\mathfrak{G}$  não tem um valor definido.

Assumindo que a relação  $2k\pi < \phi < (2k+1)\pi$  como verdadeira, e também que para o valor de  $\vartheta = 0$  o atraso de fase deve ser  $\pi$  ou  $0$ . Para o caso em que o atraso seja igual a  $\pi$ , como mostrado na Figura 3.6, observa-se que o valor da diferença de fase decresce com o aumento de  $\vartheta$ .



**Figura 3.6.** Gráfico de simulação do valor de fase  $\pi$  com o incremento de  $\vartheta$ .

Entretanto, para o atraso igual a  $0$ , pode-se afirmar que a diferença de fase aumenta com  $\vartheta$ , conforme observado na Figura 3.7. A partir da Figura 3.7 pôde-se constatar que a fase se repete quando ela varia de  $0$  a  $\pm \pi$ .



**Figura 3.7. Gráfico de simulação do valor de fase 0 com o incremento de  $\theta$ .**

Colocando-se o valor de  $L$  em relação às variações dos valores de  $\phi$  ( $\phi_1 = 0$  e  $\phi_2 = \pi$ ) tem-se:

$$L = \frac{C\phi}{2\pi f} \quad (29)$$

$$L_1 = \frac{C_0 K}{f} \text{ para } K=1,2,3,\dots \quad (30)$$

e

$$L_2 = \frac{C(2k+1)}{2f} \quad (31)$$

Para fins de análise optou-se por utilizar  $L_1$  que tem a fase centrada em  $0^\circ$ . A partir de  $L_1$  deseja-se encontrar a faixa equivalente de velocidade máxima e mínima.

$$-\pi \leq \Delta\Phi \leq \pi \quad (32)$$

$$C = 2\pi fL / (2\pi fL / C_o + \Delta\phi) \quad (33)$$

Para que haja um valor de  $C_{máx}$  deve existir um valor de  $\Delta_{min}$  que segundo a equação (32) corresponde a  $-\pi$ . Logo, para  $C_{máx} = 2\pi fL / (2\pi fL / C_o - \pi)$  e assumindo  $L_1 = L$ , como mostrado na equação (30) tem-se:

$$g_{máx} = \left( \frac{2\pi K C_o}{2\pi K - \pi} \right) - C_o \quad (34)$$

Analogamente, obtêm-se  $g_{min}$  como sendo:

$$g_{min} = \left( \frac{2\pi K C_o}{2\pi K + \pi} \right) - C_o \quad (35)$$

Com o auxílio da programação desenvolvida utilizando-se o ambiente “MATLAB” foi possível estimar os resultados  $g_{máx}$  e  $g_{min}$  em função da determinação de  $L_1$ . A partir de um protótipo que estava sendo desenvolvido com  $L_1 \cong 12$  cm foi obtido um valor de  $g_{máx} = 11 \text{ ms}^{-1}$  e  $g_{min} = -10 \text{ ms}^{-1}$ .

## Capítulo 4 Desenvolvimento Teórico e Simulações

Neste capítulo faz-se um estudo sucinto sobre os transdutores ultra-sônicos e também é feita uma análise teórica e comparativa da propagação de incertezas de cada método, com a finalidade de se determinar o método mais apropriado a ser empregado. A partir desses estudos pretende-se desenvolver um protótipo do instrumento de medição para realização de testes experimentais.

Para análise de simulação são usados modelos de circuitos que representam os métodos DT e DF, utilizando as ferramentas MATLAB–SIMULINK e MULTISIM, que possibilitam obter gráficos que relacionam a propagação de incertezas das velocidades de cada método com as velocidades verdadeiras. Com a implementação do circuito simulado faz-se uma análise, tornando possível discutir seu comportamento, ou seja, como as constantes e as variáveis interferem na determinação de  $\vartheta$ . Entretanto, descreve-se também neste tópico a implementação prática destes métodos a fim de validar os resultados obtidos através de simulação.

### 4.1 Propagação de Incertezas.

O método mais utilizado na bibliografia especializada para determinação de incerteza é o de Kleine e McClintock [23]. Para uma variável  $y = f(x_1, x_2, x_3, \dots, x_n)$ , segundo esse método, o resultado da estimação da incerteza é uma função das variáveis independentes e das incertezas associadas a cada variável ( $u_1, u_2, \dots, u_n$ ). Dessa forma, considerando as incertezas não correlacionadas, a incerteza total  $u_y$  pode ser estimada por:

$$u_y^2 = \left( \frac{\partial f}{\partial x_1} u_1 \right)^2 + \left( \frac{\partial f}{\partial x_2} u_2 \right)^2 + \dots + \left( \frac{\partial f}{\partial x_n} u_n \right)^2 \quad (36)$$

No caso da estimação total da incerteza, torna-se necessário tratar cada fonte de incerteza separadamente a fim de se obter a parcela de contribuição de cada uma. Cada uma das contribuições à incerteza total é denominada como uma componente de incerteza

$[(\partial f/\partial x)u]^2$ , que deve ser multiplicada pelo valor da própria incerteza elevada ao quadrado. Assim, neste estudo deseja-se determinar como cada componente de incerteza contribui no resultado da incerteza total. Sendo a componente de maior incerteza aquela cuja contribuição é a maior no cálculo de  $u_y$ .

#### 4.1.1 Incerteza na Diferença de Tempo.

Definindo-se  $K = 1/2\cos\theta$ , a equação (11) pode ser representada por:

$$\vartheta = KL(1/t_{AB} - 1/t_{BA}) \quad (37)$$

Para determinação da incerteza em  $\vartheta$  deve-se determinar quais dos elementos ( $K$ ,  $L$ ,  $t_{AB}$ ,  $t_{BA}$ ) da equação (37), contribuem significativamente para determinação de  $u_\vartheta$ . Logo, o fator de contribuição de incerteza de cada uma das componentes é dado por:

$$\partial\vartheta/\partial K = L(1/t_{AB} - 1/t_{BA}) \quad (38)$$

$$\partial\vartheta/\partial L = K(1/t_{AB} - 1/t_{BA}) \quad (39)$$

$$\partial\vartheta/\partial t_{AB} = -KL/(t_{AB})^2 \quad (40)$$

$$\partial\vartheta/\partial t_{BA} = KL/(t_{BA})^2 \quad (41)$$

As componentes de incertezas  $K$  e  $L$  podem ser desprezadas considerando que estas influem muito menos na determinação da incerteza total do que as contribuições representadas nas equações (40) ou (41).



Assumindo que o tempo de trânsito médio esperado é definido como  $\mu_t$ , a partir da propagação de incertezas independentes [24],  $u_g$  pode ser aproximada por:

$$u_g^2 = \left( \frac{KL}{\mu_{t_{AB}}^2} \right)^2 u_{t_{AB}}^2 + \left( \frac{KL}{\mu_{t_{BA}}^2} \right)^2 u_{t_{BA}}^2 \quad (42)$$

#### 4.1.2 Incerteza na Diferença de Fase.

Para  $K = \pi f / \cos\theta$ , em que  $f$  é a frequência da onda ultra-sônica, pode-se re-escrever (19) como sendo:

$$\mathfrak{G} = KL(1/\Phi_{AB} - 1/\Phi_{BA}) \quad (43)$$

A partir da equação (36), determinam-se quais dentre os elementos ( $K$ ,  $L$ ,  $\Phi_{AB}$ ,  $\Phi_{BA}$ ) da equação (43) contribuem significativamente para determinação de  $u_g$ . O fator de contribuição de incerteza de cada componente de incerteza é:

$$\partial\mathfrak{G}/\partial K = fL(1/\Phi_{AB} - 1/\Phi_{BA}) \quad (44)$$

$$\partial\mathfrak{G}/\partial L = Kf(1/\Phi_{AB} - 1/\Phi_{BA}) \quad (45)$$

$$\partial\mathfrak{G}/\partial\Phi_{AB} = -KfL/(\Phi_{AB})^2 \quad (46)$$

$$\partial\mathfrak{G}/\partial\Phi_{BA} = KfL/(\Phi_{BA})^2 \quad (47)$$

A partir da determinação das componentes de incerteza de  $u_g$ , pode-se afirmar que  $K$  e  $L$  tornam-se desprezíveis para valores da incerteza menores do que os valores obtidos nas equações (46) ou (47). Assumindo que o valor de fase esperado seja  $\mu_\Phi$ , a partir da propagação de incertezas independentes, pode-se aproximar  $u_g$  para:

$$u_g^2 = \left( \frac{KL}{\mu_{\Phi_{AB}}^2} \right)^2 u_{\Phi_{AB}}^2 + \left( \frac{KL}{\mu_{\Phi_{BA}}^2} \right)^2 u_{\Phi_{BA}}^2 \quad (48)$$

## 4.2 Simulações

Para análise crítica e comparativa dos métodos DT e DF, foram desenvolvidos circuitos dos referidos métodos em ambiente “MULTISIM” e através de modelos matemáticos em ambiente de programação através do software “MATLAB 6.5”. Nestas simulações foram executadas as tarefas de transmissão, recepção e o condicionamento do sinal recebido, a fim de se analisar o erro relativo ao método.

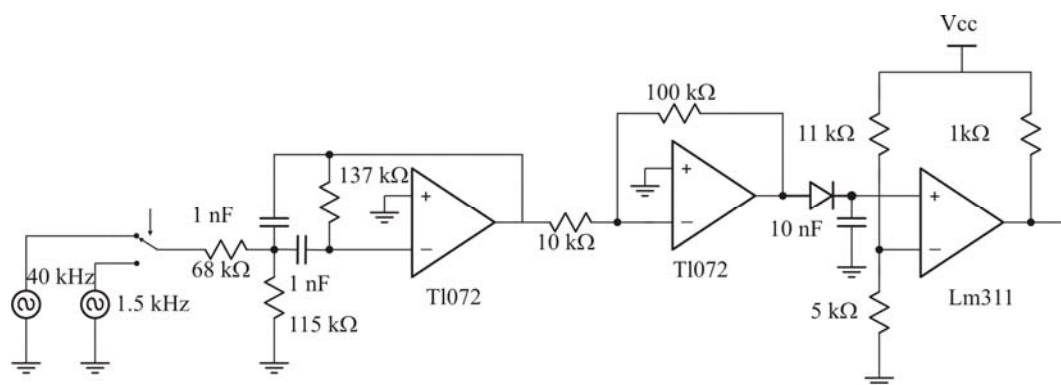
Para simulação do circuito em ambiente “MULTISIM”, inicialmente aplicou-se um sinal senoidal na frequência de 40 kHz, como se este sinal de 40 kHz fosse o resultado de uma transmissão. A fim de simular a recepção do sinal transmitido, assumiu-se que o transdutor que opera como receptor, sendo modelado como um filtro passa-faixa de frequência central de operação do transdutor [15]. Após o processo de condicionamento monitora-se o sinal da saída para estimação de diversos valores de  $\vartheta$ . Foi considerado que tanto no processo de transmissão quanto na recepção, os transdutores possuíam as mesmas características dinâmicas, estando afastados a uma distância de 12,5 cm e direcionados com um ângulo de 45° com relação à direção do vento e que há atenuações no sinal acústico em decorrência de uma considerável perda de energia à medida que a onda sonora se propaga [17]. Entretanto, existem basicamente, dois tipos de relação entre o sinal de saída e entrada, que são: o comportamento da resposta do sinal de saída em função da variação da amplitude do sinal de entrada à frequência constante (característica de transferência) e o comportamento da resposta do sinal de saída em função da variação da frequência do sinal de entrada à amplitude constante (resposta em frequência). Este último não é estudado neste trabalho em função de se ter uma frequência constante (frequência de operação do transdutor). Então, é feito um estudo do comportamento da resposta do sinal recebido em função da variação da amplitude do sinal de entrada a fim de se obter a análise da variação do tempo de atraso e conseqüentemente determinação do erro.

### 4.2.1 Simulação do método DT.

Para uma análise crítica do método da Diferença de Tempo simulou-se um circuito que realize a transmissão de um pacote senoidal (trem de senos), a recepção deste sinal e seu

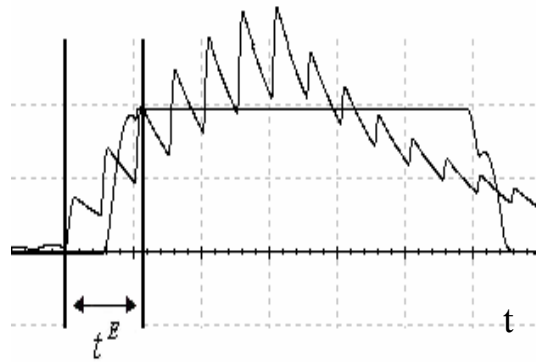
condicionamento, como mostrado na Figura 4.4. O condicionamento deste sinal se inicia com a amplificação do sinal recebido seguido de sua passagem por um comparador de nível.

Para a simulação do sinal de transmissão foram chaveadas duas fontes de tensão (40 kHz e 1.5 kHz) originando o pacote senoidal. Nesta simulação foram usados dois amplificadores operacionais (amplificadores virtuais), o primeiro opera como o sensor receptor (filtro passa-faixa centrado na frequência de operação dos transdutores) e o segundo como amplificador do sinal (sendo este atenuado durante a propagação no meio) para simular a variação da amplitude do sinal e suas conseqüências na determinação de  $t^E$ . Também foi utilizado um LM311 que operou como um comparador de nível a fim de determinar o momento de recepção do sinal ultra-sônico.



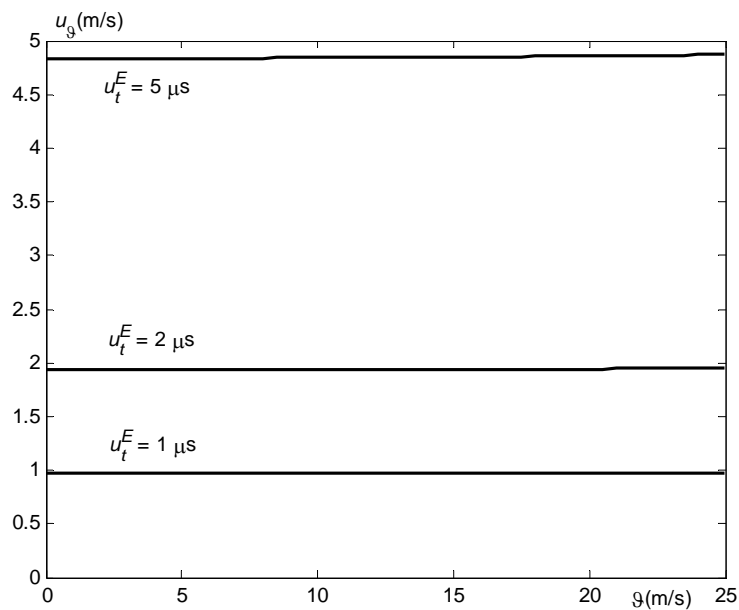
**Figura 4.1. Circuito de Simulação do método DT**

Na simulação deste circuito notou-se que as distorções causadas no sinal recebido pelo transdutor são significativas quando se analisa o comportamento da resposta do sinal recebido pelo transdutor em função da variação da amplitude do sinal de transmitido, como mostrado na Figura 4.2.



**Figura 4.2. Representação do condicionamento do sinal recebido para determinação de  $t^E$ .**

O comprimento de onda do sinal de ultra-som utilizado é de  $25 \mu\text{s}$  e para tal foi considerado os valores da incerteza  $u_{t^E}$  iguais a 1, 2 e  $5 \mu\text{s}$ . Os valores simulados da incerteza na determinação de  $\vartheta$  são apresentados na Figura 4.3.



**Figura 4.3. Gráficos da incerteza em  $\vartheta$  em função da velocidade do vento para vários valores da incerteza de  $t^E$ .**

De acordo com os resultados obtidos através de simulações, foram feitas algumas constatações:

Analisando o gráfico que representa a determinação do valor de  $t^E$ , Figura 4.2, verificou-se que o tempo de resposta aumenta à medida que a amplitude do sinal recebido é atenuada. Foi verificado a partir da Figura 4.3, que a relação entre o valor da incerteza na estimação da velocidade do vento permanece praticamente constante com incremento do valor desta

velocidade. Verificou-se também através do programa desenvolvido em ambiente “MATLAB”, que o erro pode ser diminuído à medida que a distância entre os transdutores aumenta, por que o tempo de propagação aumenta com relação ao tempo de atraso eletrônico.

#### 4.2.2 Simulação do método DF.

Para análise crítica do método da diferença de fase foi simulado um circuito de transmissão e recepção de forma pulsada de um sinal ultra-sônico senoidal. O condicionamento neste método se inicia com a amplificação do sinal recebido seguido da transformação deste sinal através dos detectores de passagem por zero e finalizando com uma comparação de fase, como mostrado na Figura 4.4.

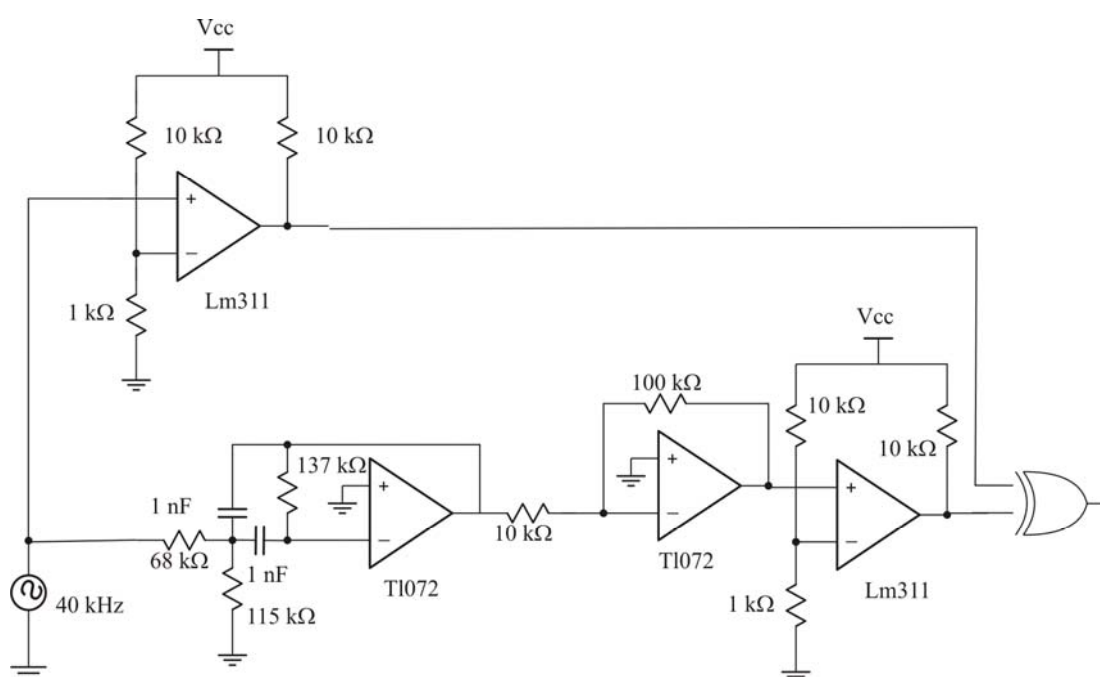
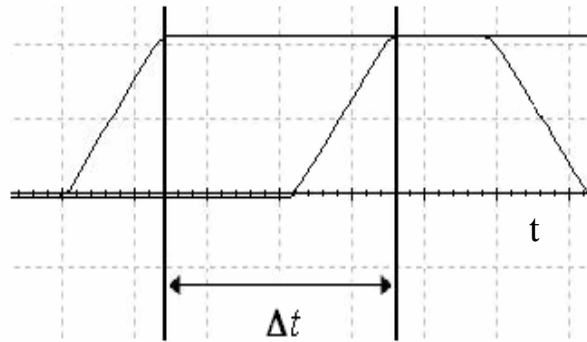


Figura 4.4. Circuito de Simulação do método DF

Na Figura 4.5, mostram-se as formas de ondas de simulação para detecção de diferença de fase, que pode ser calculada a partir da medição da diferença entre os sinais transmitidos e recebidos por  $\Delta\Phi = 2\pi f\Delta t$ .



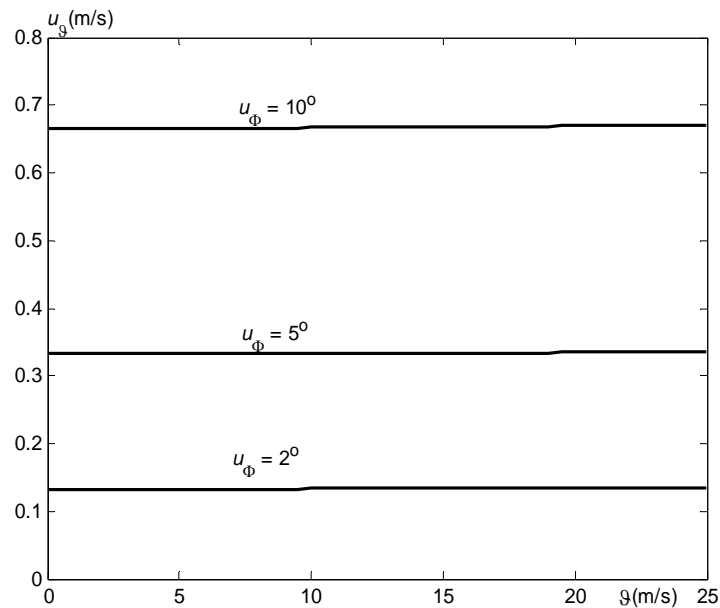
**Figura 4.5.** Representação do condicionamento do sinal recebido para determinação da diferença de fase.

Neste caso de medição, dependendo da distância entre os transdutores, podem ocorrer vários ciclos do sinal transmitido até sua detecção. Dessa forma, além da medição da diferença de fase, faz-se necessário conhecer o número de períodos de oscilações ocorridos antes, o que pode limitar a faixa de variação de medição de velocidade de vento.

A máxima diferença de fase que pode ser detectada usando a operação XOR (ou exclusivo) é de  $180^\circ$ . Nas simulações utilizando os softwares MULTISIM e MATLAB foram considerados valores da incerteza na medição da diferença de fase iguais a 2, 5 e  $10^\circ$  e não foi considerado o tempo de atraso eletrônico. Os gráficos da incerteza na determinação de  $\vartheta$  em função da incerteza na determinação da diferença de fase são apresentados na Figura 4.6.

De acordo com os resultados obtidos através de simulações, foram feitas algumas constatações:

Analisando o gráfico que representa a determinação do valor de  $\Delta t$ , na Figura 4.5, verifica-se que neste método há uma variação de faixa limitada ( $12.5 \mu\text{s}$ ) o que inviabiliza a aplicação deste método na medição de grandes faixas de variação de velocidade de vento. Foi verificado a partir da Figura 4.6 que novamente a relação entre o valor da incerteza na estimação da velocidade do vento permanece praticamente constante com incremento do valor desta velocidade.



**Figura 4.6.** Gráficos da incerteza em função de  $\vartheta$  para vários valores da incerteza de  $\Phi$ .

Avaliando-se os gráficos de estimação da incerteza da velocidade do vento utilizando o método DT na Figura 4.3, juntamente com os gráficos de estimação da incerteza da mesma faixa de velocidade do vento representados na Figura 4.6, constata-se que o método da diferença de fase apresenta os resultados com menor valor de incerteza da velocidade do vento, portanto, provocando menor erro no processo de medição.

### **4.3 Resultados Experimentais do Estudo de Propagação de Incertezas dos Métodos DT e DF.**

A fim de validar os resultados simulados foram montados os circuitos para análise de propagação de incertezas e conseqüentemente para medição da velocidade do vento utilizando os métodos DT e DF. O experimento foi realizado utilizando-se um “cooler” como fonte de vento, cuja velocidade de rotação varia com a tensão aplicada, fixado numa das extremidades de um duto. Na outra extremidade foram fixados os transdutores a uma distância de 0,125 m e ângulo de 45° com relação à direção do fluxo de vento, e um anemômetro comercial para comparação dos valores medidos, como mostrado na Figura 4.8. Os circuitos eletrônicos foram montados em protoboards que são bastante susceptíveis ao ruído e foi utilizado um microcontrolador PIC16F877 com uma frequência de relógio de 20 MHz, o qual fornecia uma resolução de contagem de pulsos de 200 ns.

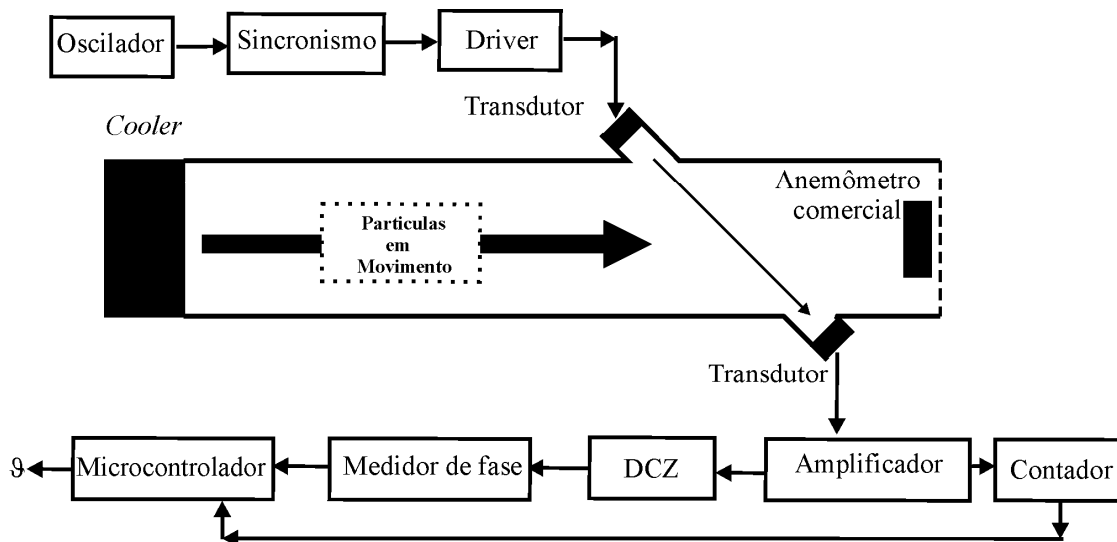


Figura 4.7. Representação da montagem experimental.

### PROGRAMAÇÃO DO MICROCONTROLADOR.

Na programação do microcontrolador PIC16F877, foi utilizado o software “MPLAB”, que permite tanto a criação do programa em linguagem de baixo nível (assembly) quanto em linguagem de alto nível (linguagem C).

Na determinação do sistema de aquisição de dados foi utilizado tanto o sistema lógico de programação (software) para medição dos tempos de propagação (método DT) quanto o hardware do microcontrolador para medição da largura dos pulsos (método DF) a fim de se determinar a velocidade do vento.

Sendo o fluxograma uma seqüência de execuções que explicam o funcionamento e o objetivo da tarefa a ser determinada, este foi dividido em módulos (funções), onde cada módulo fica responsável por uma tarefa específica, requisitada pela interface externa (computador). Para diferenciar a tarefa que será requisitada pela interface, este software possui um seletor de tarefas (interrupções) que fica responsável por identificar e chamar (executar) a tarefa a ser realizada. Nos tópicos seguintes serão detalhados alguns aspectos importantes da programação dos métodos DF e DT desenvolvida no ambiente “MPLAB” e gravada no PIC16F877.



## **FLUXOGRAMAS DOS MÉTODOS DF E DT.**

### ✓ **Programa do PIC 16F877**

Para o PIC, a execução do programa é iniciada fazendo algumas configurações iniciais básicas, necessárias para o seu correto funcionamento. Dentre estas configurações iniciais estão a configuração da taxa de interrupção da porta serial, ajustada para 9600 bits/segundos; a configuração das interrupções, habilitando as que serão necessárias e desabilitando as outras, e também configurando suas prioridades; e a programação dos timers/counters que serão usados.

### ✓ **Programa de implementação do método DT**

Após executar configurações iniciais, o programa de implementação do método DT entra em um laço de repetição que se resume a ficar testando o estado de dois flags, que são ativados pela chamada da interrupção, sendo sua execução semelhante a um seletor de tarefas: habilitando ou desabilitando de forma alternada, tanto a transmissão quanto à recepção. Assume-se que existem dois sensores (sensor\_0 e sensor\_1) que possuem alternância nas transmissões e nas recepções do sinal ultra-sônico.

O primeiro estado dos flags ocorre quando se assume  $\text{flag} = 0$ , sendo que este estado é ativado pela indicação que o pino PIN\_B0 está em nível alto, executando uma seqüência de tarefas: habilitando o envio de sinal ultra-sônico para o sensor\_0, zerando o contador, em seguida habilita a interrupção responsável pela captura do sinal condicionado (a um nível de tensão pré-estabelecido ou a uma determinada largura de pulso) e finalmente limpando o valor do flag que sinalizou a interrupção. Após a coleta do dado, no final do loop o flag será incrementado a função XOR, ou seja, será assumido que o valor do flag é  $\text{flag} = 1$ , sendo que este estado é ativado pela indicação do nível alto originado no pino PIN\_B1. Sendo que sua seqüência de execução de tarefas do programa é desviada para uma rotina diferente no qual o sensor\_1 é habilitado para a transmissão e conseqüentemente o sensor\_0 para recepção. Logo, após o processo de transmissão, recepção e captura do sinal (tempo de propagação), ou seja, no próximo loop os sensores invertem suas funções passando a transmitir o que antes era responsável pela recepção e vice-versa. Pois, quando algum desses flags ( $\text{flag} = 0$  e  $\text{flag} = 1$ ) estiver ativado, a tarefa é realizada, e em seguida, o flag é desabilitado, e então o programa retorna ao laço de repetição até que seja ativado outra vez pela interrupção. Isto se repete enquanto o timer estiver ligado, conforme fluxograma mostrado na Figura 4.8.

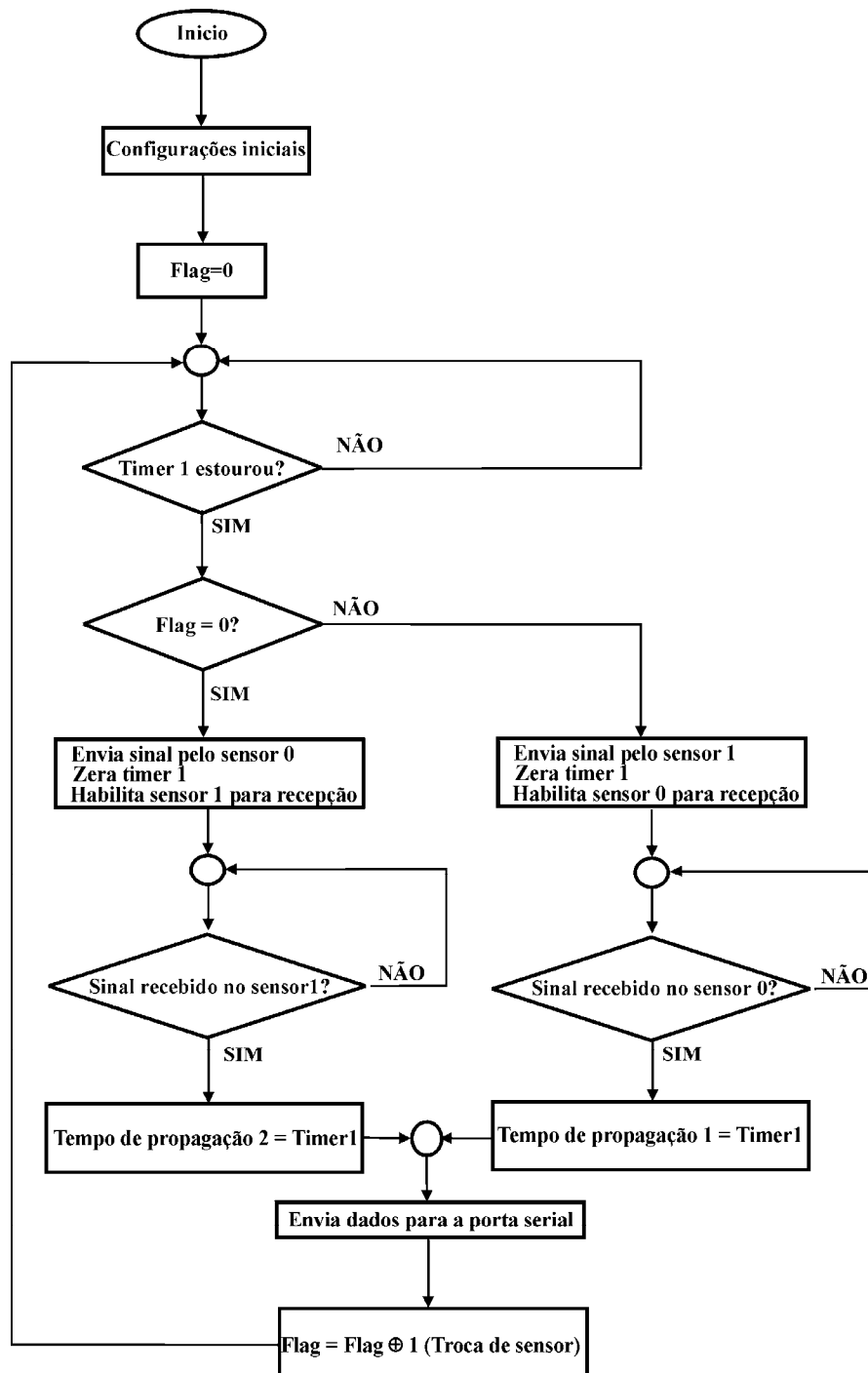


Figura 4.8. – Fluxograma do programa de implementação do método DT.

✓ Programa de implementação do método DF

Após executar as configurações iniciais, o programa de implementação do método DF entra em um laço de repetição (loop) que se resume em testar o estado do flag durante a rotina de execução do programa para orientar a seqüência de tarefas a serem realizadas. Este sistema de verificação faz o sincronismo dos sensores durante duas etapas: etapa\_1 (o sensor\_0 transmite e o sensor\_1 recebe) e etapa\_2 (o sensor^0 transmite e o sensor^1 recebe).

O primeiro estado dos flags ocorre quando se assume  $\text{flag} = 0$ , sendo que este estado é ativado pela indicação que o pino PIN\_B0 está em nível alto, executando uma seqüência de tarefas: habilitando o envio de sinal ultra-sônico para o sensor\_0, habilita o os pinos do PIC responsáveis pela captura via hardware da largura do pulso e habilita a recepção do sinal ultra-sônico para o sensor\_1. Após a coleta do dado, no final do loop o flag será incrementado a função XOR. Para o valor do flag diferente de  $\text{flag} = 0$  ativado pela indicação do nível alto originado no pino PIN\_B1. Sendo que sua seqüência de execução de tarefas do programa é desviado para uma rotina diferente no qual o sensor^0 é habilitado para a transmissão e conseqüentemente o sensor^1 é habilitado para recepção. Logo, após o processo de transmissão, recepção e captura do sinal (largura de pulso) executado pelos dois primeiros pares de sensores, ou seja, no próximo loop o sincronismo habilita os outros dois sensores para executar os mesmos procedimentos da etapa anterior (transmissão, recepção e captura), então o programa retorna ao laço de repetição até que seja ativado outra vez pela interrupção, conforme fluxograma demonstrado na Figura 4.9.

De acordo com os resultados obtidos através de realizações experimentais, foram feitas algumas constatações:

As velocidades de vento obtidas, mesmo aplicando-se tensão máxima no cooler, foram bastante baixas. Mesmo assim, o estudo da análise de propagação de incerteza foi atingido. A partir da montagem prática do circuito que utiliza o método de diferença de tempo, obteve-se para os valores de velocidades um atraso eletrônico com valor médio de aproximadamente  $17 \mu\text{s}$  com uma variação em torno de  $3 \mu\text{s}$ . Esses valores correspondem a uma incerteza final na determinação da velocidade do vento de  $2,9 \text{ m/s}$ . Para o método de diferença de fase, o valor da incerteza na determinação do intervalo de tempo foi de  $0,5 \mu\text{s}$ , equivalente a uma incerteza na diferença de fase de  $7,2^\circ$ . Esse resultado produz uma incerteza na determinação da velocidade de vento de aproximadamente  $0,5 \text{ m/s}$ .

Avaliando-se os resultados experimentais obtidos a partir dos circuitos que utilizaram os métodos DF e DT, constatou-se novamente que o método da diferença de fase apresenta os resultados com menor valor de incerteza da velocidade do vento. Assim, principalmente em função deste resultado optou-se pela implementação do protótipo do anemômetro ultra-sônico baseado no método da diferença de fase com excitação pulsada.

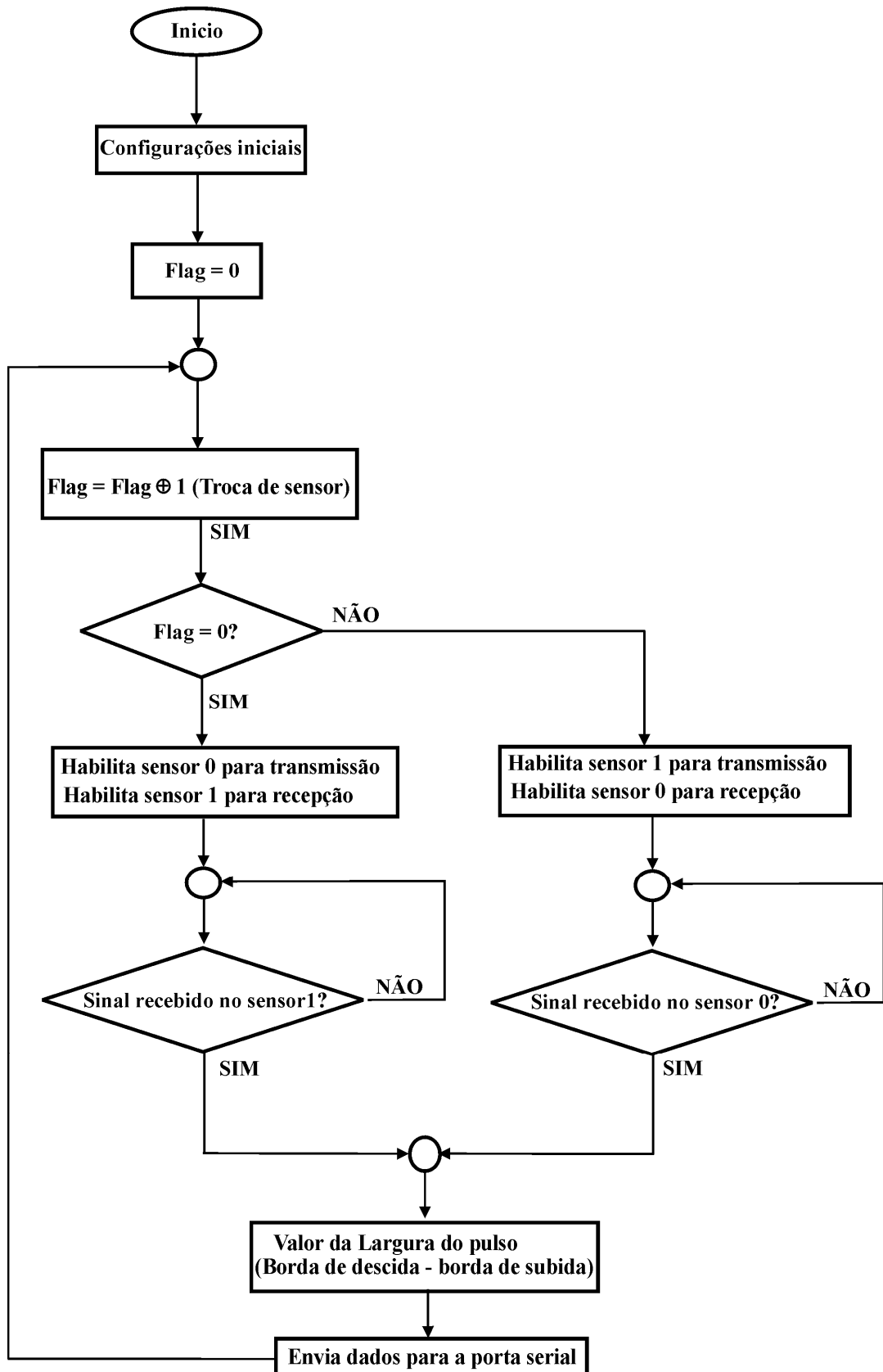


Figura 4.9. – Fluxograma do programa de implementação do método DF.

# Capítulo 5 Implementação do Protótipo do Anemômetro Ultra-sônico

## 5.1 Implementação do Circuito.

É mostrado nesse capítulo, a implementação de um circuito que foi desenvolvido utilizando o método DF com transmissão de sinal na forma pulsada (protótipo) para medir a velocidade do vento, utilizando para isso transdutores ultra-sônicos com 40 kHz de frequência nominal. O protótipo do anemômetro ultra-sônico desenvolvido foi dividido em vários blocos, segundo suas características funcionais, como demonstrado na Figura 5.1. Sem, no entanto, incluir nos blocos funcionais a fonte de tensões.

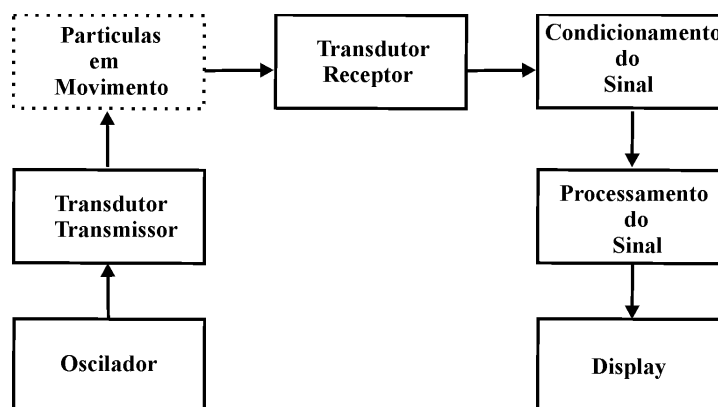


Figura 5.1. Diagrama de blocos de um sistema ultra-sônico Tempo de Trânsito genérico.

A partir da Figura 5.1 projetou-se outro diagrama de bloco mais específico, neste caso para o método DF pulsado. Este sistema de medição de vento é composto pelos blocos de geração de onda ultra-sônica, de sincronismo, de transmissão e recepção, condicionamento, processamento e finalmente o bloco indicador, como apresentados na Figura 5.2.

O diagrama de blocos do método DF pulsado é composto por um Gerador de Onda Ultra-sônica sintonizado na frequência nominal do sensor ultra-sônico. Este gerador fornece um sinal ultra-sônico capaz de excitar o transmissor ultra-sônico. Uma vez feita a emissão, assim que o sinal ultra-sônico for detectado no bloco de recepção este sinal sonoro é convertido em sinal elétrico. Entretanto, só esse tempo de propagação não é suficiente para definição do tempo total e determinação de  $\vartheta$  no método da DF pulsado. Logo, ainda necessita-se determinar um

segundo tempo que é oriundo da diferença de fase entre o sinal transmitido e recebido. Para isso, o sinal recebido precisa ser condicionado por um Detector de Cruzamento por Zero (DCZ) convertendo-o em um sinal de mesma forma (onda quadrada) para ser comparado com o sinal de referência, ou seja, o sinal transmitido. A próxima etapa consiste no bloco de Processamento que tem por função determinar a defasagem entre o sinal transmitido e o recebido, que nada mais é que um tempo. Por fim, o tempo resultante do circuito medidor de fase obtido é somado ao tempo de propagação das ondas ultra-sônicas, que também deve estar previamente determinado, definindo-se assim o tempo total, que é proporcional a  $\vartheta$ . Então, de posse deste tempo e com todas as outras variáveis definidas, pôde-se estimar o valor de  $\vartheta$ .

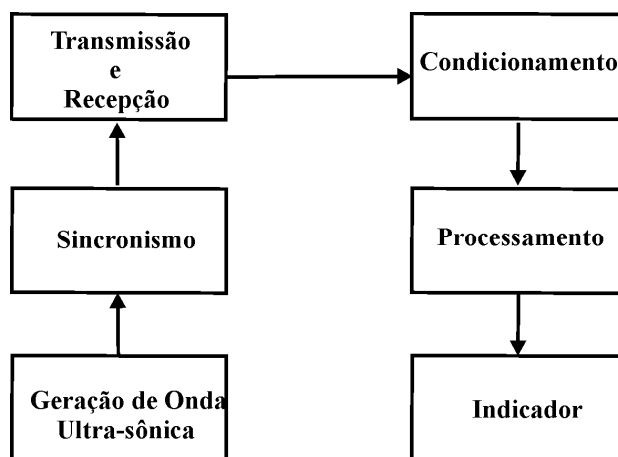
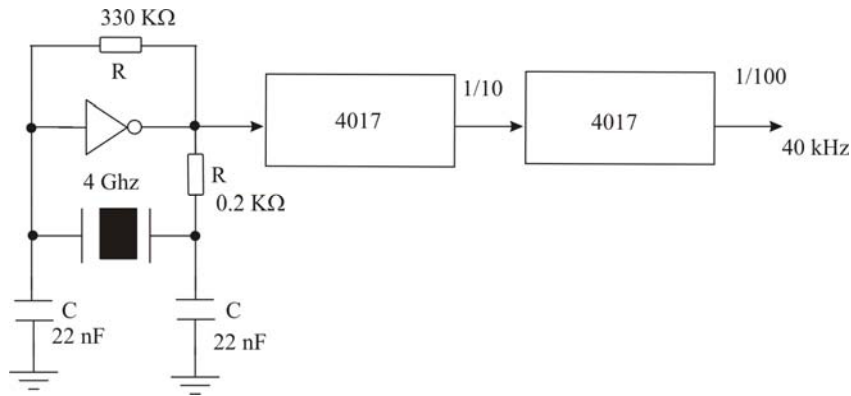


Figura 5.2. Diagrama de blocos do medidor de  $\vartheta$  utilizando o método DF pulsado.

## 5.2 Detalhamento dos Blocos do Anemômetro usando o Método DF.

### 5.2.1 Bloco Gerador de Onda Ultra-sônica.

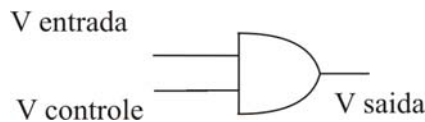
Buscando um sinal com boa estabilidade, exatidão e de fácil geração, optou-se pela utilização de um circuito gerador de onda ultra-sônica á cristal de quartzo. Como o cristal escolhido tem uma freqüência de oscilação de 4 MHz, faz-se necessário utilizar um circuito divisor de freqüência para torná-lo compatível com a freqüência de operação dos transdutores (40 kHz). O circuito de geração da onda de 40 kHz é mostrado na Figura 5.3.



**Figura 5.3. Circuito de geração de onda quadrada á cristal.**

### 5.2.2 Bloco de Sincronismo.

Para o projeto deste protótipo, o bloco de sincronismo nada mais é que uma alternância confiável entre as funções de operação dos transdutores, pois estes transdutores ora operam como transmissores e ora como receptores. Este bloco também é responsável pela quantidade de trem de ondas transmitida, ou seja, a largura de cada pacote que é enviado de um transdutor ao outro. O circuito de sincronismo é mostrado na Figura 5.4.

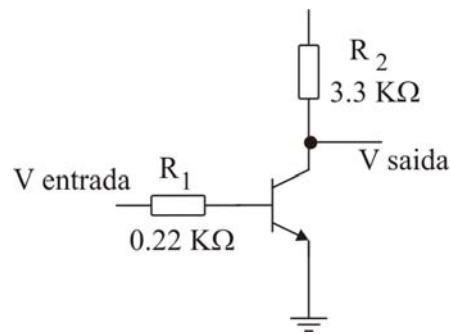


**Figura 5.4. Circuito de sincronismo.**

### 5.2.3 Bloco de Transmissão e Recepção.

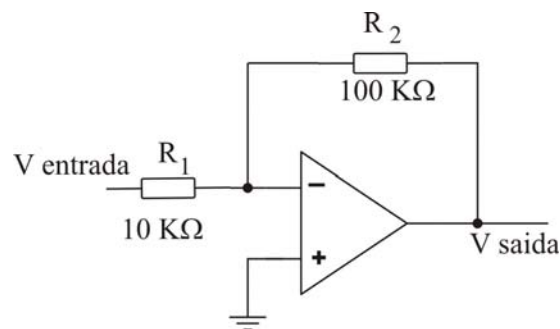
O bloco de transmissão tem por finalidade emitir um pacote de ondas ultra-sônicas de um transdutor transmissor ao receptor. Entretanto, esse sinal (pacote) obtido na saída do bloco de sincronismo não é suficiente para que o transdutor transmita o sinal ultra-sônico. Assim, faz-se necessário o uso de um “driver”. Este driver tem como principal função fornecer ao transdutor corrente necessária para sua operação. A Figura 5.5 mostra o esquema elétrico desse driver.





**Figura 5.5. Esquema elétrico do driver.**

O bloco de recepção é responsável pela detecção do sinal transmitido, sendo constituído pelo transdutor receptor e por um amplificador. Assumindo que os transdutores que fazem a transmissão e recepção sejam idênticos e sabendo que esses transdutores quando operando como receptores tem funções de filtro passa-faixa centrado em 40 kHz, na saída de sua recepção só haverá um sinal de mesma frequência da transmissão. Como é sabido que há perdas de amplitude no sinal durante a transmissão, faz-se necessário uma amplificação deste sinal para fins de aquisição. O circuito de amplificação é mostrado na Figura 5.6.



**Figura 5.6. Esquema elétrico do amplificador.**

#### **5.2.4 Bloco de Condicionamento.**

O bloco de condicionamento neste trabalho é responsável pelo tratamento do sinal que é fornecido na saída do bloco de recepção, convertendo o sinal senoidal proveniente do receptor ultra-sônico em uma onda quadrada de mesma frequência e com ciclo de trabalho de 50%. Para aplicação desta técnica foi utilizado um comparador de tensão (LM193). A configuração deste circuito é demonstrada na Figura 5.7.

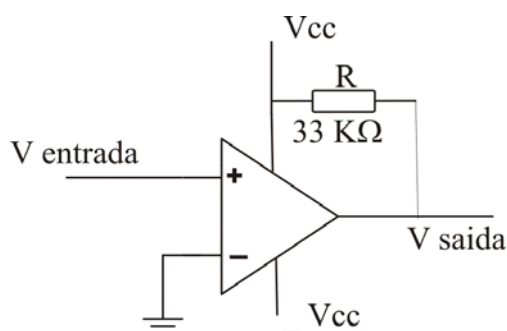


Figura 5.7. Esquema elétrico do detector de cruzamento por zero.

### 5.2.5 Bloco de Processamento.

O bloco de processamento utilizado no protótipo tem como função a aquisição dos tempos (tempo de propagação e tempo de fase) responsáveis pela determinação de  $\vartheta$ , como também da estimação de  $\vartheta$ . Este bloco é constituído de um circuito medidor de fase e de um microcontrolador (PIC16F877). O tempo de propagação é determinado por um contador interno a esse microcontrolador. Para determinação do tempo de fase é necessário se obter a largura do pulso proveniente da saída do circuito medidor de fase.

#### Medidor de Fase.

O circuito medidor de fase tem a função de comparar dois sinais e fornecer na sua saída um trem de pulsos de largura igual à defasagem entre estes sinais. O primeiro sinal é proveniente do bloco de geração de onda quadrada ultra-sônica enquanto o outro é obtido na saída do detector de cruzamento por zero, ou seja, uma comparação entre o sinal de transmissão e o sinal recebido (já condicionado). Para esta comparação foi utilizado o circuito integrado 4070BE que possui portas “XOR”. A configuração deste circuito é demonstrada na Figura 5.8.

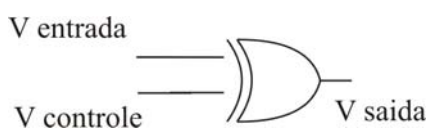


Figura 5.8. Esquema elétrico do medidor de fase.

### 5.2.6 Bloco Indicador.

O bloco Indicador proposto para o protótipo é composto de um display (LCD 16X2) que tem a função de exibir em sua tela de cristal líquido os valores referentes à medição de  $\theta$ , e um microcontrolador, que é responsável pelo envio dos dados e pelo controle da apresentação na tela.

### 5.2.7 Fonte de Tensões.

Para o anemômetro ultra-sônico, foi utilizada uma fonte de tensão própria, Figura 5.9, visando uma futura integração dos circuitos responsáveis pela transmissão e recepção ultra-sônica com tensões de  $\pm 12V$  de forma que a tensão máxima aplicada ao transdutor é  $+12V$  de geração e tratamento do sinal que operam em  $\pm 12V$  com processamento do sinal (microcontrolador) que opera em  $\pm 5V$ . Assim o circuito utiliza, portanto, quatro tensões de alimentação:  $\pm 12V$  e  $\pm 5V$ . Esta tensão limita a potência emitida pelo transdutor, tendo sido compensada pela utilização de trens de pulsos mais largos.

A fonte é composta por um transformador com relação de transformação 110/220 V para 12 V+12 V. O secundário é conectado a um retificador de onda completa feito com diodos, seguido de um estágio de filtros capacitivos. A regulação das várias tensões de saída é feita com circuitos integrados reguladores da família 78xx (tensões positivas) e 79xx (tensões negativas).

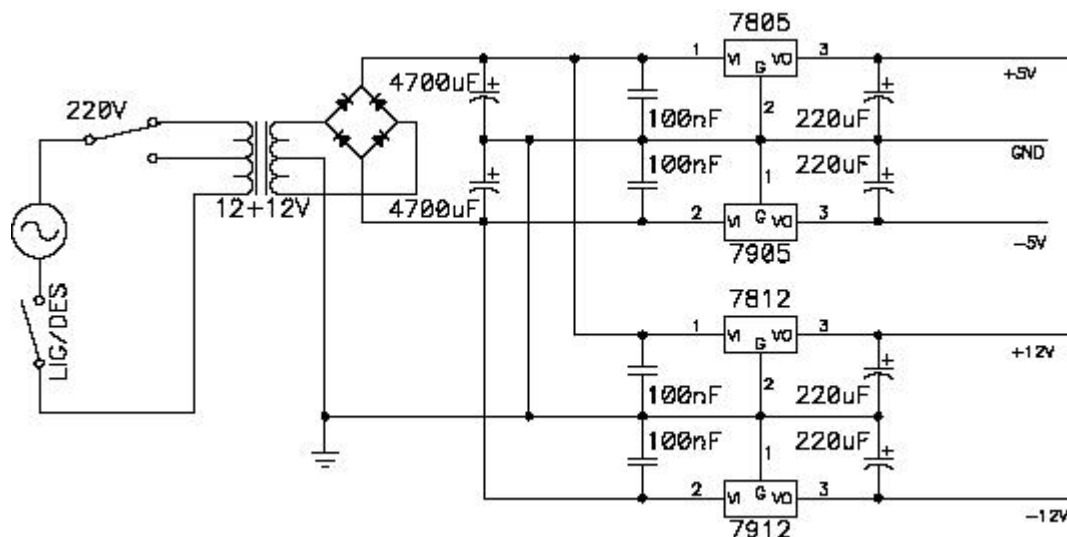


Figura 5.9. Fonte de tensões utilizada na alimentação do circuito.

## Conclusões e Sugestões

Neste trabalho foram descritos os métodos de diferença de tempo de propagação e de diferença de fase para a determinação da velocidade do vento, utilizando ondas ultra-sônicas. Para determinação do método mais coerente, foi realizada uma análise da propagação de incertezas na determinação da velocidade do vento.

Foram realizados simulações e experimentos para os dois métodos e a partir dos resultados de simulação obtidos nos gráficos mostrados nas Figuras 4.3 e 4.6 e nas montagens práticas, pôde-se concluir que o método da diferença de fase apresenta resultados com menor incerteza. Entretanto, a faixa de medição desse método é limitada.

Os resultados para ambos os métodos podem ser melhorados projetando-se uma placa dedicada para o condicionamento dos sinais (ao invés de se utilizar protoboards) e utilizando-se dispositivos mais rápidos, i.e. comparadores, amplificadores, e microcontroladores com uma frequência de relógio mais alta.

Assim, a partir das análises teóricas e comparativas de cada método e também através da sua propagação de incertezas, optou-se pela montagem experimental pela utilização do método DF na forma pulsada, sendo utilizados quatro transdutores para determinação da velocidade do vento. Neste caso, foi utilizada uma combinação das duas formas de medição do tempo de trânsito: contagem do tempo e diferença de fase.

Para continuação deste trabalho, sugere-se o estudo e implementação de um método que seria a junção dos métodos de diferença de fase e de diferença de tempo. Com isso, poder-se-ia melhorar a exatidão da medição de velocidade do vento sendo aplicável a uma faixa de medição ampla.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Gabriel, M. V., “Análise de Sensibilidade de Anemômetros a Temperatura Constante Baseados em Sensor Termo-resistivo,” Dissertação de Mestrado, São Luís, Maranhão, Brasil, 2004.
- [2] Asch, G. et Collaborateurs, *Le Capteurs - En Instrumentation Industrielle*, Dunod, Paris, 5<sup>a</sup> ed., 1999.
- [3] S. Kitchen e J. Partridge, “A Review of Therapeutic Ultrasound Physiotherapy,” Vol 76, N.10, 1990.
- [4] Ter Haar, G., *Basic Physic of Therapeutic Ultrasound*, Physiotherapy, Vol 64, Mar, 1978.
- [5] Ter Haar, G., *Physic of Therapeutic Ultrasound*, London, Physiotherapy, Vol 73, Mar, 1987.
- [6] Williams, R. A., “Ultrasound: Biological Effect and Potential Hazards,” London Academic Press. 1983.
- [7] Kremkau, F.W., Physical Considerations. In Nyborg L. N.; Zinski, M. C. Biological Effect of Ultrasound. New York, Churchill Livingstone Cap.2. 1985.
- [8] Kawakita, K., Casciny, L., Caly, J.P., 1998, “Estudo Comparativo Entre Diferentes Técnicas de Anemometria,” MERCOFRIO 98 – Feira e Congresso de Ar Condicionado.
- [9] Mason, W. P., “Piezoelectricity, Its History and Applications,” *Journal Acoust. Soc. Am.* Vol-70, 1981.
- [10] Okuno, E., Caldas, I. L. e Chow, C., “Física Para Ciências Biológicas e Biomédicas,” São Paulo, Harba 1986.
- [11] Aziz, E., Barboucha, M., e Starosweicki, M., “An Flowmeter Designed According to Smart Sensor Concept,” Electrotechnical Conference MELECON '96, pp.1371-1374
- [12] Wright, J. D., “The Performance of Transit Time Flowmeters in Heated Gas Mixtures,” *Proceedings of Fluids Engineering Division Summer Meeting*, Washington, 1998, pp. 21-25.
- [13] Yeh, T, Espina, P., e Osella, S., “An Intelligent Flow Meter for Improved Flow Measurement and Flow Calibration Facility,” *IEEE- Transactions on Instrumentation and Measurement*, Budapest, Hungary, May 2201, pp. 21-23.
- [14] Mylvaganam, K. “High-Rangeability Gas Flowmeter for Monitoring Flare Gas,” *IEEE-Transactions on Ferroelectrics and Frequency Control*, March 1989, Vol 36.
- [15] Christensen, D. A., “Ultrasonic Bioinstrumentation,” New York, John Wiley & Sons, 1988, 235 p.

- [16] Budinski, K.G., Budinski, M.K. “Engineering Materials: Properties and Selection”, 6th ed., Prentice Hall (Upper Saddle River, NJ), 1999.
- [17] Halit, E. “Accuracy in Real Time Applications and Transit Time Flow Meters,” *IEEE-Instrumentation and Measurement Conference Technology*; Canadá, May, 1998, pp. 18-21
- [18] Ogata, Katsuhiko - *Engenharia de Controle Moderno*. Rio de Janeiro, Prentice Hall do Brasil Ltda., 1970, p. 702-748.
- [19] Oppenheim, Alan V., Willsky, Alan S. & Young, Ian T. - Signals and Systems. New Jersey, Prentice Hall, 1983, p. 513-572.
- [20] Espina, P. I., Yeh, T. e Rothfleisch, P. I., “Tele-Metrology and Advanced Flow Metering,” National Institute of Standards and Technology Fluid Flow Group Gaithersburg, USA, .2000.
- [21] Moore, P., Piomelli, U., A. Johnson, e Espina, P., “Simulation of Transit Time in a Fully Developed Turbulent Flow using a Ray-Tracing Method,” North Sea Measurement Workshop, 2002.
- [22] Kaimal, J. C., Businger, J. A. “A Continuous Wave Sonic Anemometer-Thermometer,” *Journal of Applied Meteorology*, 1963, pp.156-164.
- [23] Fialho, A. B., *Instrumentação Industrial - Conceitos, Aplicações e Análises*, Editora Érica Ltda, 1998, 2ª ed.
- [24] Taylor, J. R “An Introduction to Error Analysis: the Study of Uncertainties in Physical Measurements,” 2ª ed. Sausalito, California, University Science Books, 1997.
- [25] Webster, J. G. (ed.) - Medical Instrumentation: Application and Design. 2nd ed., New York, Houghton Mifflin Company, 1992, p. 408-456.
- [26] INMETRO – Vocabulário Internacional de Termos Fundamentais e Gerais de Metrologia.

## **APÊNDICES**

## Apêndice A

---

### TERMOS TÉCNICOS UTILIZADOS EM METROLOGIA

Neste apêndice são apresentados algumas definições e alguns termos técnicos mais usuais relacionados à metrologia, a fim de facilitar o entendimento do trabalho de dissertação. Este é um resumo baseado em [25] e [26].

Na prática de instrumentação, vários dos termos listados adiante são utilizados como sinônimos de forma descriteriosa, por exemplo: precisão/exatidão e sensor/transdutor. Ao lado de cada termo, encontra-se sua tradução para o inglês.

•Ajuste (“adjustment”) - Operação destinada a fazer com que um instrumento de medição tenha desempenho compatível com seu uso.

•Calibração/Aferição (“calibration”) - Conjunto de operações que estabelece, em condições específicas, a correspondência entre o estímulo e a resposta de um instrumento de medir, sistema de medição ou transdutor de medição.

O resultado de uma calibração pode permitir a determinação de um ou mais parâmetros da curva característica que relaciona o estímulo à resposta ou os valores de grandezas correspondentes às divisões de escalas indefinidas de um instrumento de medir.

•Detetor (“detector”) - Dispositivo ou substância que indica a presença de uma determinada grandeza sem necessariamente fornecer seu valor.

•Erro de medição (“error of measurement”) - Resultado de uma medição menos o valor verdadeiro convencional da grandeza medida.

•Erro relativo (“relative error”) - Erro da medição dividido pelo valor verdadeiro convencional da grandeza medida.

•Erro aleatório (“random error”) - Componente do erro de medição que varia de uma forma imprevisível quando se efetuam várias medições da mesma grandeza.



• Erro sistemático (“systematic error”) - Componente do erro da medição que se mantém constante ou varia de forma previsível quando se efetuam várias medições de uma mesma grandeza, é o valor do erro de medição menos o erro sistemático. Os erros sistemáticos e suas causas podem ser conhecidos ou desconhecidos.

• Estabilidade (“stability”) - Aptidão de um instrumento de medir em conservar constantes suas características metrológicas. É usual considerar a estabilidade em relação ao tempo.

• Exatidão (“accuracy”) - Aptidão de um instrumento de medir para dar indicações próximas do valor verdadeiro de uma grandeza medida. É dada pela diferença entre o valor considerado verdadeiro e o valor medido, dividido pelo valor verdadeiro.

• Faixa nominal (“nominal range”) - Faixa de valores que compreende o valor mínimo e o máximo indicado por um instrumento de medir. A amplitude da faixa nominal (span) corresponde à diferença (em módulo) entre os dois limites da faixa nominal.

• Fidelidade (“fidelity”) - Aptidão de um instrumento de medir para dar, sob condições de utilização definidas, respostas muito próximas para aplicações repetidas de um mesmo estímulo.

• Incerteza (“uncertainty”) - Estimativa caracterizando a faixa de valores dentro da qual se encontra o valor verdadeiro da grandeza medida. A incerteza da medição compreende, em geral, muitos componentes. Alguns desses componentes podem ser estimados com base na distribuição estatística dos resultados das séries de medições e caracterizados por um desvio padrão experimental. A estimativa dos outros componentes somente pode ser avaliada com base na experiência ou em outras informações.

• Indicação (“indication”) - Valor de uma grandeza a ser medida fornecido por um instrumento de medir. A indicação é expressa em unidades da grandeza medida.

• Instrumento de medir (“measuring instrument”) - Dispositivo destinado a fazer uma medição, sozinho ou em conjunto com outros equipamentos.

•Limiar de mobilidade (“discrimination/threshold”) - Maior variação no estímulo que não produz variação detectável na resposta de um instrumento de medição, sendo a variação do sinal de entrada lenta e uniforme.

•Mensurando (“mensurand”) - Objeto da medição; grandeza específica submetida à medição.

•Padrão (“standard”) - Medida materializada (ex. massa marcada), instrumento de medir ou sistema de medição destinado a definir, realizar, conservar ou reproduzir uma unidade ou valores conhecidos de uma grandeza a fim de transmiti-los por comparação a outros instrumentos de medir.

•Padrão primário (“primary standard”) - Padrão que possui as mais altas qualidades metrológicas em um campo específico.

•Padrão secundário (“secondary standard”) - Padrão cujo valor é determinado por comparação com o padrão primário.

•Precisão (“precision”) - Precisão é um termo geral para avaliar a dispersão de resultados entre ensaios independentes, repetidos de uma mesma amostra, amostras semelhantes ou padrões, em condições definidas.

•Regulagem (“user adjustment”) - Ajuste, empregando somente os recursos disponíveis no instrumento para o usuário.

•Repetibilidade/Repetitividade (“repeatability”) - Graus de concordância entre os resultados de medições sucessivas de uma mesma grandeza, efetuadas nas mesmas condições: método de medição, observador, instrumento de medida, local, condições de utilização e em intervalo de tempo curto entre medições. A repetibilidade pode ser expressa quantitativamente em função das características da dispersão dos resultados.

•Reprodutibilidade (“reproductibility”) – Grau de concordância entre os resultados das medições de uma mesma grandeza, efetuadas variando-se uma ou mais das seguintes condições: método de medição, observador, instrumento de medida, local, condições de utilização e tempo.

Para que uma expressão de reprodutibilidade seja obtida é necessário especificar as condições que foram alteradas.

•Resolução (“resolution”) - Menor diferença entre indicações de um dispositivo mostrador que pode ser significativamente percebida.

•Resultado (“result”) - Valor de uma grandeza obtido por medição. Uma expressão completa do resultado de uma medição compreende também a incerteza de medição e os valores de referência das grandezas que influem sobre o valor da grandeza a medir ou sobre o instrumento de medir.

- Resultado não corrigido: resultado de uma medição antes de correção de erros sistemáticos.
- Resultado corrigido: resultado de uma medição após correção de erros sistemáticos.

•Sensibilidade (“sensitivity”) - Variação da resposta de um instrumento de medição dividida pela correspondente variação do estímulo. A sensibilidade pode depender do valor estímulo.

•Sensor (“sensor”) - Elemento de um instrumento de medir, ou de uma cadeia de medição, que é diretamente afetado pelo mensurando. Exemplos: junta de medição de um termopar, bóia de medidor de nível, fotocélula de espectrofotômetro.

•Transdutor de medição (“measuring transducer”) - Dispositivo de medição que fornece uma grandeza de saída que tem uma correlação determinada com a grandeza de entrada. Exemplo: termopar, strain-gauge, transformador de corrente, eletrodo de pH.

## Apêndice B

---

Neste apêndice é apresentado a programação do estudo de propagação de incertezas desenvolvido em ambiente “MATLAB”, a partir dos valores estimados nas simulações dos circuitos em ambiente “MULTISIM, referentes ao estudo dos métodos DT e DF. Assumiu-se que sensor\_0 e o sensor\_1 correspondem respectivamente a transmissão do sinal ultra-sônico do sensor A (TA) para o sensor B (TB) e que a relação de transmissão que ocorre do sensor<sup>0</sup> para o sensor<sup>1</sup> correspondem a transmissão do sinal ultra-sônico do sensor B (TB) para sensor A (TA).

### **SIMULAÇÃO DOS MÉTODOS ULTRA-SÔNICOS, COM EXCITAÇÃO PULSADA.**

O objetivo desta simulação consiste em estimar e avaliar a influência de cada um dos parâmetros, dos métodos em análise (DF e DT) a partir das respectivas equações (19) e (11)pectivas equações (19) e (11), na determinação da velocidade do vento utilizando sensores ultra-sônico.

### **ESTUDO DA PROPAGAÇÃO DE INCERTEZA SIMULADO – MÉTODO DF**

```
clear

v=0:0.5:25; %Velocidade verdadeira
T=0:0.8:40; %Temperatura
c=20.0484*sqrt (273.15+25); %Velocidade do som
L =0.1; %Distância entre o sensor A e o sensor B
f=40e3; %Frequência de operação dos sensores
theta=0.53; %Variável correspondente ao cosseno de theta
k= pi/theta; %Variável correspondente a 1/theta

tba = L./(c - v*theta); %Tempo de propagação entre o sensor_0 e o
sensor _1
tab = L./(c + v*theta); %Tempo de propagação entre o sensor ^0 e o
sensor^1

t_erro=13,89e-6; %Tempo médio de erro
t_erro1=0.01*t_erro; %1% do tempo médio de erro
t_erro2=0.02*t_erro; %2% do tempo médio de erro
t_erro3=0.05*t_erro; %5% do tempo médio de erro

d_erro1=2*f*pi.*t_erro1;%1% do erro da fase media
d_erro2=2*f*pi.*t_erro2; %2% do erro da fase media
```

```

d_erro3=2*f*pi.*t_erro3;%5% do erro da fase media

dab=2*f*pi.*tab;%Diferença de fase entre o sinal transmitido A e sinal
recebido B
dba=2*f*pi.*tba; %Diferença de fase entre o sinal transmitido B e sinal
recebido A

vf=k*f*L.*(1./dab-1./dba);%Velocidade em função da diferença de fase

A= (k*f*L./dab.^2);
B= (k*f*L./dba.^2);

uv1 = sqrt((A.*d_erro1).^2 +(B.*d_erro1).^2);%Incerteza da velocidade
em função do método da diferença de fase para um erro de 1% do valor t_erro
uv2 = sqrt((A.*d_erro2).^2 +(B.*d_erro2).^2); % Incerteza da
velocidade em função do método da diferença de fase para um erro de 2%
uv3 = sqrt((A.*d_erro3).^2 +(B.*d_erro3).^2); % Incerteza da
velocidade em função do método da diferença de fase para um erro de 5%

plot (vf,uv1,'k',vf,uv2,'k',vf,uv3,'k') % Gráfico da incerteza da
velocidade para as 3 variações de tempo de erro.

```

## ESTUDO DA PROPAGAÇÃO DE INCERTEZA SIMULADO – MÉTODO DT

```

clear

v=0:0.5:25; % velocidade verdadeira
T=0:0.8:40; % Temperatura
c=20.0484*sqrt(273.15+25); % Velocidade do som
L=0.07; % distancia
theta=0.5; % variável correspondente ao cosseno de theta
k=1/(2*theta); % variável correspondente a 1/theta

tba = L./(c - v*theta); % Tempo de propagação entre o sensor _0 e o
sensor_1
tab = L./(c + v*theta); % Tempo de propagação entre o sensor ^0 e o
sensor^1

t_erro=100e-6; % Tempo médio de erro
t_erro1=0.01*t_erro; % 1 e-6 microsegundos
t_erro2=0.02*t_erro; % 2 e-6 do tempo médio de erro
t_erro3=0.05*t_erro; % 5 e-6 do tempo médio de erro

```

```

vdt=k*L*(1./tab-1./tba); % velocidade em função da diferença de tempo

A=(k*L./tab.^2);
B=(k*L./tba.^2);

uv1 = sqrt((A.*t_erro1).^2 +(B.*t_erro1).^2); % incerteza da
velocidade em função do método da diferença de fase para um erro de 1%
uv2 = sqrt((A.*t_erro2).^2 +(B.*t_erro2).^2); % incerteza da
velocidade em função do método da diferença de fase para um erro de 2%
uv3 = sqrt((A.*t_erro3).^2 +(B.*t_erro3).^2); % incerteza da
velocidade em função do método da diferença de fase para um erro de 5%
plot(vdt,uv1,'k',vdt,uv2,'k',vdt,uv3,'k'); % gráfico da incerteza da
velocidade para 1,2 e 5e-6.

```

## Apêndice C

---

Neste apêndice são apresentados e comentados os programas desenvolvidos em linguagem “ASSEMBLER” e “C” para o sistema de aquisição de dados que utiliza sensores ultra-sônicos e um microcontrolador PIC16F877, referentes ao sistema de medição de  $\theta$  dos métodos DF e DT.

```
.*****  
;  
; CONFIGURAÇÕES INICIAIS  
.*****  
,  
  
#include <16F877.h>  
#device adc=8  
#use delay(clock=20000000)  
#fuses HS,PUT,BROWNOUT,NOWDT  
#use rs232(baud=9600,parity=N,xmit=PIN_C6,rcv=PIN_C7,bits=8)
```

### PROGRAMA DE MEDIÇÃO DOS TEMPOS – MÉTODO DF

```
.*****  
;  
; INICIALIZA AS ROTINAS  
.*****  
,  
  
#include "ultra.h"  
#include <LCD.C>  
#include <input.c>  
#zero_ram  
long rise,fall,pulse_width;  
#byte w_temp=0x70  
#byte status_temp=0x71  
#byte STATUS=3  
#byte PIR2=0x0d  
#byte PCLATH=0x0a  
  
#int_global  
isr() {  
  
#asm  
.*****  
;  
; SALVA CONTEXTO DA CPU  
.*****  
,  
  
movwf w_temp ; save off current W register contents  
movf STATUS,w ; move status register into W register
```

```

movwf status_temp      ; save off contents of STATUS register
bcf STATUS,5
bcf STATUS,6
#endasm

rise = CCP_1; Salva o valor do timer1 na borda de subida
fall = CCP_2; ; Salva o valor do timer1 na borda de descida

#asm
;*****
; RECUPERA CONTEXTO DA CPU
;*****
,
    clrf   pir2
    movwf status_temp,w; retrieve copy of STATUS register
    movwf STATUS ; restore pre-isr STATUS register contents
    swapf  w_temp,f
    swapf  w_temp,w ; restore pre-isr W register contents
    ; return from interrupt
#endasm
}

main() {
float result;
int i;
int16 cal0,call;
boolean sensor;
;*****
; HABILITA PORTAS, FAZ SINCRONISMO ENTRE TRANSISSÃO E RECEPÇÃO,
; CAPTURA LARGURA DO SINAL, ENVIA OS DADOS ( TEMPOS) PELA PORTA SERIAL
;*****
,

    setup_ccp1 (CCP_CAPTURE_RE); // Habilita CCP1 para capturar dado na
borda de subida
    setup_ccp2 (CCP_CAPTURE_FE); // Habilita CCP2 para capturar dado na
borda de descida
    setup_timer_1 (T1_INTERNAL); // Start timer 1

    enable_interrupts (INT_CCP2); // Setup interrupt on falling edge
    enable_interrupts (GLOBAL);
    lcd_init(); // Incicializa LCD

    while(TRUE) {
    delay_ms(100);
    sensor=sensor^1; // Flag que alterna o envio do sinal para os sensores
    if(sensor){
    printf(lcd_putc, "\f");// Limpa LCD
    lcd_gotoxy(1,1); // Coloca curso na posição 1,1
    result=(float)((fall-rise))/5; // Calcula a largura do pulso

```



```

    printf(lcd_putc,"%3.1fus", result); // Mostra tempo sensor_0 | sensor
da direita | aumenta pulso alto
    printf("%3.1f ", result); // Envia resultado para porta serial
    output_low(PIN_B1); // Habilita para recepção sensor_1
    output_high(PIN_B0); // Habilita sensor_0 para transmissão
    }else{
    lcd_gotoxy(1,2); // Ccoloca curso na posição 1,2
    result=(float)((fall-rise))/5; // Calcula a largura do pulso
    printf(lcd_putc,"%3.1fus", result); // Mostra tempo sensor^1 | sensor
da esquerda | diminui pulso alto
    printf("%3.1f\n\r", result); // Envia resultado para porta serial
    output_high(PIN_B1); // Habilita para recepção sensor^1
    output_low(PIN_B0); // Habilita sensor^0 para transmissão
    }
    }
}

```

## PROGRAMA DE MEDIÇÃO DOS TEMPOS – MÉTODO DT

```

;*****
;
; INICIALIZA AS ROTINAS
;*****
;
    #include "ultra.h"
    #include <LCD.C>
;*****
; HABILITA PORTAS, FAZ SINCRONISMO ENTRE TRANSISSÃO E RECEPÇÃO,
CAPTURA LARGURA DO SINAL, ENVIA OS DADOS (TEMPOS) PELA PORTA SERIAL
;*****
;
    #include <input.c>
    long rise,fall,pulse_width_1,pulse_width_2;
;*****
; ENDEREÇAMENTO DOS REGISTRADORES DOS PERIFÉRICOS.
;*****
;
    #byte w_temp=0x70
    #byte status_temp=0x71
    #byte STATUS=3
    #byte PIR2=0x0d
    #byte PCLATH=0x0a
    #byte PIR1=0x0c
;*****
;
; ROTINA DE ATENDIMENTO DE INTERRUPÇÃO DO TIMER1, HABILITAÇÃO DAS PORTAS,
; SINCRONISMO TRANSISSÃO/ RECEPÇÃO, CAPTURA DO TEMPO DO TIMER1
; ENVIO DE DADOS PELA PORTA SERIAL.

```

\*\*\*\*\*

```
int flag;
#include <int_timer1.h>
ISR_TIMER1() { // Interrupção do timer1

switch(flag){
case 0:
output_low(PIN_B1);
output_high(PIN_B0); // Envia sinal para o sensor 0
set_timer1(0); // Zera contador
enable_interrupts(INT_CCP2); // Habilita interrupção da captura
bit_clear(PIR2,0) ; // Limpa flag de int CCP2
break;
case 1:
output_low(PIN_B0); // Tempo sem nenhuma transmissão
output_low(PIN_B1);
disable_interrupts(INT_CCP1);
disable_interrupts(INT_CCP2);
break;
case 2:
output_low(PIN_B0);
output_high(PIN_B1); // Envia sinal para o sensor 1
set_timer1(0); // Zera contador
enable_interrupts(INT_CCP1); // Habilita interrupção da captura
bit_clear(PIR1,2); // Limpa flag de int CCP2
break;
case 3: // Tempo sem nenhuma transmissão
output_low(PIN_B0);
output_low(PIN_B1);
disable_interrupts(INT_CCP1);
disable_interrupts(INT_CCP2);

}
if(flag++>2){
flag=0;
}
}
#include <int_CCP2.h>
ISR_CCP2(){
pulse_width_2=CCP_2;
output_low(PIN_B1);
output_low(PIN_B0); // Desabilita todos sensores para envio
disable_interrupts(INT_CCP2);
}
#include <int_CCP1.h>
ISR_CCP1(){
pulse_width_1=CCP_1;
```

```

output_low(PIN_B1); //
output_low(PIN_B0); // Desabilita todos sensores para envio
disable_interrupts(INT_CC1);
}

main() {

setup_ccp2(CCP_CAPTURE_RE); / Configura CCP2 para captura em subida
setup_ccp1(CCP_CAPTURE_RE);
setup_timer_1(T1_INTERNAL); // Start timer 1
output_low(PIN_B1); //
output_low(PIN_B0); // Desabilita todos sensores para envio
enable_interrupts(INT_TIMER1); // configura a interrupção em descida
enable_interrupts(GLOBAL);
lcd_init();
while(TRUE) {
delay_ms(300);

printf("%lu ", pulse_width_1); // Envia para serial em ciclos (16bits)
ida
printf("%lu\n\r", pulse_width_2); // Envia para serial em ciclos
(16bits) volta

}
}

```

## Apêndice D

---

Neste apêndice são apresentados os programas desenvolvidos em ambiente “MATLAB 6.5” para aquisição, manipulação e estimação de dados decorrentes do processo de medição de  $\vartheta$  utilizando-se sensores ultra-sônicos.

```
*****  
,  
PROGRAMA DE ESTIMAÇÃO DA PROPAGAÇÃO DE INCERTEZA E DE  
VELOCIDADE DO VENTO - MÉTODO DT  
,  
*****  
  
N=20;  
A1=0;  
A2=0;  
B=[0 0];  
fopen(s1);  
VELO=0;  
for I=1:N  
vetor_old_1(I)=0;  
vetor_old_2(I)=0;  
end  
j=0;  
while 1  
  
B=fscanf(s1,'%f');  
=j+1;  
if (j>20)  
  
vetor_old_1(mod(j,N)+1)=B(1)/5;  
vetor_old_2(mod(j,N)+1)=B(2)/5;  
B(1)=mean(vetor_old_1);  
B(2)=mean(vetor_old_2);  
A1=[A1,B(1)];  
A2=[A2,B(2)];  
VELO=[VELO,velotempo(B(1)/10^6,B(2)/10^6)];  
end  
pause(.1)  
subplot(2,1,1)  
plot(A1)  
hold on  
plot(A2,'r')  
grid on  
hold off  
subplot(2,1,2)
```

```

plot(VELO)
grid on
end

```

\*\*\*\*\*

## DETERMINAÇÃO DO ERRO PRÁTICO EM FUNÇÃO DOS TEMPOS OBTIDOS NA MEDIÇÃO - MÉTODO DT

\*\*\*\*\*

```

function erro=erro_media(t1,t2)
erro(1)=(max(t1)-min(t1))/2
erro(2)=(max(t2)-min(t2))/2
erro(3)=mean(t1)
erro(4)=mean(t2)

```

\*\*\*\*\*

## DETERMINAÇÃO DO GRÁFICO DE ERRO - MÉTODO DT

\*\*\*\*\*

```

function uv=graferrodt2(t1,t2,terro1,terro2)

v=0:0.5:25; % velocidade verdadeira
T=0:0.8:40; % Temperatura
c=20.0484*sqrt(273.15+25); % Velocidade do som
L=0.11; % distancia
theta=0.525; % variável correspondente ao cosseno de theta
k=1/(2*theta); % variável correspondente a 1/theta

%t_erro1 e t_erro2 % Tempo médio de erro
t_erro11=0.01*terro1; % 1% do tempo médio de erro
t_erro21=0.02*terro1; % 2% do tempo médio de erro
t_erro31=0.05*terro1; % 10% do tempo médio de erro
t_erro12=0.01*terro2; % 1% do tempo médio de erro
t_erro22=0.02*terro2; % 2% do tempo médio de erro
t_erro32=0.05*terro2;
vdt=k*L*(1/t1-1/t2); % velocidade em função da diferença de tempo
A=(k*L/t1^2);
B=(k*L/t2^2);
uv(1) = sqrt((A*t_erro11)^2 +(B*t_erro12)^2) % formula de incerteza da
velocidade em função do método da diferença de fase para um erro de 1%
uv(2) = sqrt((A*t_erro21)^2 +(B*t_erro22)^2) % formula de incerteza da
velocidade em função do método da diferença de fase para um erro de 2%
uv(3) = sqrt((A*t_erro31)^2 +(B*t_erro32)^2) % formula de incerteza da
velocidade em função do metodo da diferença de fase para um erro de 5%

%plot(vdt,uv1,'k',vdt,uv2,'k',vdt,uv3,'k'); % gráfico da incerteza da

```

velocidade para todas as variações de %

.\*\*\*\*\*

### DETERMINAÇÃO DA VELOCIDADE DO VENTO - MÉTODO DT

.\*\*\*\*\*

```
function vf=velotempo(tdf1,tdf2)

L1 =0.11;% distância entre os sensores A e B
L2=0.11;% distância entre os sensores B e A
at2=(460-330)*10^-6% Tempo de atraso2
at1=(620-330)*10^-6% Tempo de atraso1
theta=0.5; % variável correspondente ao cosseno de theta
k= 1/2*theta;

t1 = tdf1-at1% Tempo de propagação entre A e B sem vento
t2 = tdf2-at2% Tempo de propagação entre B e A sem vento

vt=k*(-L1/t1+L2/t2);%velocidade em função da diferença de tempo
```

.\*\*\*\*\*

### DETERMINAÇÃO DOS TEMPOS PRÁTICOS DO MÉTODO DT

.\*\*\*\*\*

```
function plot_graf(A,B)

at2=(460-330)*10^-6;
at1=(620-330)*10^-6;
for i=1:length(A)
    t1(i) = A(i)*10^-6-at1;% Tempo de propagação entre A e B sem
vento
    t2(i) = B(i)*10^-6-at2;% Tempo de propagação entre B e A sem
vento
end
tmp=erro_media(t1,t2);
terro1=tmp(1)
terro2=tmp(2)
t1=tmp(3)
t2=tmp(4)
grafferodt2(t1,t2,terro1,terro2)
% Exemplo % plot_graf(A1_6VN,A2_6VN)
```

.\*\*\*\*\*

### PROGRAMA DE ESTIMAÇÃO DE PROPAGAÇÃO DE INCERTEZA E DE VELOCIDADE DO VENTO - MÉTODO DF

.\*\*\*\*\*

```

N=20;
A1=0;
A2=0;
B=[0 0];
fopen(s1);
call1=7.6
cal2=1.2
VELO=0;
for I=1:N
vetor_old_1(I)=0;
vetor_old_2(I)=0;
end
j=0;
while 1

B=fscanf(s1,'%f');
if (B(1) < 12.5) & (B(2) < 12.5)
j=j+1;
vetor_old_1(mod(j,N)+1)=call1-(B(1));
vetor_old_2(mod(j,N)+1)=(B(2))-cal2;
B(1)=mean(vetor_old_1);
B(2)=mean(vetor_old_2);
A1=[A1,(B(1))];
A2=[A2,(B(2))];
VELO=[VELO,velofase(B(2)/10^6,B(1)/10^6)];
end
pause(.01)
subplot(2,1,1)
plot(A1)
hold on
plot(A2,'r')
hold off
subplot(2,1,2)
plot(VELO)
end

```

\*\*\*\*\*

## DETERMINAÇÃO DO ERRO EM FUNÇÃO DOS TEMPOS OBTIDOS NA MEDIÇÃO - MÉTODO DF

\*\*\*\*\*

```
function erro=erro_media(t1,t2)
```

```

erro(1)=(max(t1)-min(t1))/2
erro(2)=(max(t2)-min(t2))/2
erro(3)=mean(t1)
erro(4)=mean(t2)

```

```

,*****

```

## DETERMINAÇÃO DO GRÁFICO DE ERRO - MÉTODO DF

```

,*****

```

```

function uv=graferrod2(t1,t2,terro1,terro2)

v=0:0.5:25;% velocidade verdadeira
T=0:0.8:40;% Temperatura ambiente
c=20.0484*sqrt(273.15+25);% Velocidade do som em função da temperatura
ambiente
L=0.11;% distância entre os transdutores.
f=40000;% freqüência de operação dos transdutores.
theta=0.5; % variável correspondente ao cosseno de theta
k=pi/theta;% variável correspondente a 1/theta.
tba = L/(c ); % constante correspondente ao tempo de propagação entre
os sensores A e B
e A
tab = L/(c ); % constante correspondente ao tempo de propagação entre B
e A

%t_erro=100e-6; % Tempo médio de erro.
t_erro11=0.01*2*f*pi*terro1; % 1% do tempo médio de erro1
t_erro21=0.02*2*f*pi*terro1; % 2% do tempo médio de erro1
t_erro31=0.05*2*f*pi*terro1; % 5% do tempo médio de erro1
t_erro12=0.01*2*f*pi*terro2;% 1% do tempo médio de erro2
t_erro22=0.02*2*f*pi*terro2; % 2% do tempo médio de erro2
t_erro32=0.05*2*f*pi*terro2; 5% do tempo médio de erro2
dab=2*f*pi*(t1+tba); % fase entre A e B
dba=2*f*pi*(t2+tab);
vdt=k*f*L*(1/dab-1/dba);% velocidade em função da diferença de tempo
A=(k*f*L/dab^2);
B=(k*f*L/dba^2);
uv(1) = sqrt((A*t_erro11)^2 +(B*t_erro12)^2) % formula da incerteza da
velocidade em função do método da diferença de fase para um erro de 1%
uv(2) = sqrt((A*t_erro21)^2 +(B*t_erro22)^2) % formula da incerteza da
velocidade em função do método da diferença de fase para um erro de 2%
uv(3) = sqrt((A*t_erro31)^2 +(B*t_erro32)^2) % formula da incerteza da
velocidade em função do método da diferença de fase para um erro de 5%
%plot(vdt,uv1,'k',vdt,uv2,'k',vdt,uv3,'k'); % gráfico da incerteza da
velocidade para todas as variações de %

```

```

,*****

```

## DETERMINAÇÃO DA VELOCIDADE DO VENTO - MÉTODO DF

```

,*****

```



```

function vf=velofase(tdf1,tdf2)
c=20.0484*sqrt(273.15+28.2);% Velocidade do som
L1=0.125; % distancia entre os sensores A e B
L2=0.125; % distancia entre os sensores C e D
f=40000; % freqüência de operação dos sensores
theta=0.5; % variável correspondente ao cosseno de theta
k= pi/theta; % variável correspondente a 1/theta
tba = L1/(c) % Tempo de propagação entre A e B sem vento
tab = L2/(c) % Tempo de propagação entre B e A
dab=2*f*pi*(tab+tdf1);% fase entre A e B
dba=2*f*pi*(tba+tdf2); % fase entre C e D
vf=k*f*(L1/dab-L2/dba); % velocidade em função da diferença de fase

```

\*\*\*\*\*

## DETERMINAÇÃO DOS TEMPOS PRÁTICOS DO MÉTODO DF

\*\*\*\*\*

```

function plot_graf_f(A,B)

at2=(460-330)*10^-6; % Tempo de atraso1
at1=(620-330)*10^-6; % Tempo de atraso2
% for i=1:length(A)
% t1(i) = A(i)*10^-6-at1;% Tempo de propagação entre A e B sem vento
% t2(i) = B(i)*10^-6-at2;% Tempo de propagação entre B e A sem vento
% end
tmp=erro_media(A,B);
terro1=tmp(1)
terro2=tmp(2)
t1=tmp(3)
t2=tmp(4)

```