



UNIVERSIDADE  
ESTADUAL DE LONDRINA

---

MARCELA HITOMI KOYAMA

**DESENVOLVIMENTO DE UM ANEMÓMETRO 3D ULTRA-  
SÔNICO BASEADO EM APENAS QUATRO TRANSDUTORES**

---

Londrina  
2009

MARCELA HITOMI KOYAMA

**DESENVOLVIMENTO DE UM ANEMÓMETRO 3D ULTRA-  
SÔNICO BASEADO EM APENAS QUATRO TRANSDUTORES**

Dissertação de mestrado submetido à Universidade Estadual de Londrina como parte dos requisitos para a obtenção do grau de mestre em Engenharia Elétrica.

**Área de Concentração:** Instrumentação Eletrônica

Orientador: Prof. Dr. José Alexandre França

Londrina  
2009

**Catálogo elaborado pela Divisão de Processos Técnicos da Biblioteca Central da  
Universidade Estadual de Londrina.**

**Dados Internacionais de Catalogação-na-Publicação (CIP)**

K88d	<p>Koyama, Marcela Hitomi. Desenvolvimento de um anemômetro 3D ultra-sônico baseado em apenas quatro transdutores/ Marcela Hitomi Koyama. – Londrina, 2009. 74 f.: il.</p> <p>Orientador: José Alexandre de França. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Universidade Estadual de Londrina, Centro de Tecnologia e Urbanização, Curso de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, 2009. Inclui bibliografia</p> <p>1. Transdutores ultra-sonicos – Teses. 2. Meteorologia agrícola – Instrumentos eletrônicos – Teses. 3. Anemômetro ultra-sônico 3D – Teses. I. França, José Alexandre de. II. Universidade Estadual de Londrina. Centro de Tecnologia e Urbanismo. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica. III. Título.</p> <p style="text-align: right;">CDU 621.318.43</p>
------	--

MARCELA HITOMI KOYAMA

**DESENVOLVIMENTO DE UM ANEMÓMETRO 3D ULTRA-  
SÔNICO BASEADO EM APENAS QUATRO TRANSDUTORES**

Dissertação de mestrado submetido à Universidade Estadual de Londrina como parte dos requisitos para a obtenção do grau de mestre em Engenharia Elétrica.

**BANCA EXAMINADORA**

---

Prof. Dr. Jose Alexandre de França Orientador  
Universidade Estadual de Londrina – UEL

---

Dr. Carlos Eduardo Cugnasca  
Universidade de São Paulo – USP

---

Dr. Dari de Oliveira Toginho Filho  
Universidade Estadual de Londrina – UEL

---

Dr. Marcelo Giovanetti Canteri  
Universidade Estadual de Londrina – UEL

Londrina, 04 de abril de 2009

KOYAMA Marcela Hitomi. **Desenvolvimento de um Anemômetro 3D Ultra-sônico baseado em apenas quatro transdutores.** 2009. 74 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia elétrica) – Universidade Estadual de Londrina, Londrina.

## RESUMO

As variáveis ambientais influenciam o desenvolvimento de plantas e animais. Uma dessas variáveis é o vento, que pode ser responsável por alterar a fisiologia de plantas, propagar doenças e influenciar a eficiência de práticas agrícolas. Normalmente, a medição da velocidade do vento é feita utilizando anemômetros em conjunto com birutas que atuam em apenas duas dimensões, medindo a velocidade e a direção do vento por meio de um sistema mecânico. Uma das desvantagens dessa abordagem é a existência de peças móveis que impossibilitam medidas de velocidades precisas devido ao atrito com o ar e a inércia do equipamento. Neste trabalho, apresenta-se um anemômetro ultra-sônico que mede a direção e a velocidade do vento em três dimensões. Tal anemômetro utiliza apenas quatro sensores piezoelétricos dispostos em dois eixos ortogonais não concorrentes, de forma que, unindo-se os pontos de cada sensor, obtém-se uma estrutura no formato de um tetraedro regular. Assim, medindo o tempo necessário (tempo de trânsito) para que um pulso de ultra-som, enviado por um dos sensores, atinja os outros três, a velocidade do vento nas três direções pode ser medida. Além disso, com a estrutura em forma de tetraedro, a medição pode ser realizada em até quatro sistemas de coordenadas diferentes. Isso acrescenta redundância ao sistema fazendo com que, mesmo considerando-se uma incerteza de até 5% na construção do anemômetro, é possível obter um erro médio de aproximadamente 2% na velocidade do vento medida. Essa medição é realizada por um microcontrolador que também é responsável pelo armazenamento dos dados e posterior envio dos mesmos a um microcomputador.

**Palavras-chave:** Anemômetro ultra-sônico 3D. Método tempo de trânsito. Estrutura em formato de tetraedro.

KOYAMA Marcela Hitomi. **Development of an ultrasonic 3D anemometer with only four transducers.** 2009. 74 p. Dissertation (Master's Degree in Electrical Engineering) - Universidade Estadual de Londrina, Londrina.

### **ABSTRACT**

The environmental variables influence in the development of plants and animals. One of these variables is the wind, which can be responsible for changing the physiology of plants, spreading diseases and influence the efficiency of agriculture management. Usually, such measuring is done by use of anemometers working with wind cocks which work in only two dimensions, measuring the wind speed and direction by a mechanical system. One disadvantage of this approach is the existence of mobile parts which does not render accurate speed measures, due to air friction and equipment inertia. In this work, an ultrasonic anemometer which measures the direction and speed of the air in three dimensions is presented. Such anemometer use only four piezoelectric sensors arranged in two orthogonal axes non-competitors. So that, joining together the points of each sensor it was get a structure in the form of a regular tetrahedron. The wind speed in three directions can be measured inferring the necessary time (transit time) so that a pulse of ultrasound, sent for one of the sensors, reaches the others three. Moreover, the tetrahedron-shaped structure allows to measure in four different coordinate systems. This adds redundancy to the system so that, even when a 5% fabrication error in the dimensions of the anemometer is considered, it is possible to obtain an average error of approximately 2% in the speed of the measured wind. This measurement is performed by a microcontroller that also is responsible for the storage of the data and posterior sending of the same ones to a microcomputer.

**Keywords:** Ultrasonic anemometer 3D. Transit time. Structure in form of tetrahedron.

# Lista de Figuras

<b>Figura 1.1</b> – Diagrama de blocos do Anemômetro a ultra-som.....	12
<b>Figura 1.2</b> – Anemômetro 3D .....	13
<b>Figura 1.3</b> – Transdutor piezoelétrico apresentado por PERTENCE (2003).....	15
<b>Figura 1.4</b> – Ilustração do método diferença de fase .....	16
<b>Figura 1.5</b> – Ilustração de um sistema que utiliza o método diferença de fase.....	17
<b>Figura 3.1</b> – Diagrama de blocos do método tempo de trânsito .....	24
<b>Figura 3.2</b> – Ilustração do atraso na detecção da chegada da onda ultra-sônica.....	25
<b>Figura 3.3</b> – Arranjo de transdutores para medição da velocidade em 2D .....	26
<b>Figura 3.4</b> – Anemômetro 2D com transdutores dispostos em um triângulo equilátero .....	27
<b>Figura 3.5</b> – Anemômetro 3D com transdutores dispostos em tetraedro (PEREIRA, 2007).....	28
<b>Figura 3.6</b> – Sistema de coordenadas do Anemômetro 3D com transdutores dispostos em tetraedro .....	29
<b>Figura 3.7</b> – Erro no módulo do vetor velocidade em cada um dos sistemas de coordenadas do Anemômetro 3D .....	33
<b>Figura 3.8</b> – Erro no módulo do vetor velocidade em relação a média dos quatro sistemas de coordenadas do Anemômetro 3D.....	34
<b>Figura 3.9</b> – Erro de azimute em cada um dos sistemas de coordenadas do Anemômetro 3D .....	35
<b>Figura 3.10</b> – Erro de zenite em cada um dos sistemas de coordenadas do Anemômetro 3D .....	36
<b>Figura 3.11</b> – Erro em relação a média de azimute dos quatro sistemas de coordenadas do Anemômetro 3D .....	36
<b>Figura 3.12</b> – Erro em relação a média de zenite dos quatro sistemas de coordenadas do Anemômetro 3D .....	37
<b>Figura 3.13</b> – Protótipo do Anemômetro 3D .....	38
<b>Figura 3.14</b> – Diagrama esquemático do circuito para excitação do transdutor de ultra-som.....	39
<b>Figura 3.15</b> – Diagrama esquemático do circuito para condicionar o sinal de recepção do ultra-som.....	40

<b>Figura 3.16</b> – Pulso gerado pelo PIC18F4550 (canal 1) e pulso de excitação para T1 (canal 2).....	41
<b>Figura 3.17</b> – Pulso gerado pelo PIC18F4550 (canal 1) e sinal de ultra-som recebido por T2 (canal 2).....	41
<b>Figura 3.18</b> – Saída do comparador inversor (canal 1) e pulso gerado pelo PIC18F4550 (canal 2).....	42
<b>Figura 3.19</b> – Gráfico das 500 medidas de tempo de trânsito do sinal ultra-sônico de T1 para T2.....	43
<b>Figura 3.20</b> – Diagrama esquemático para medição da velocidade do vento utilizando os quatro transdutores do Anemômetro 3D.....	44

# Lista de Símbolos e Abreviações

$v_V$  – Velocidade do vento.

$v_S$  – Velocidade do som.

$\beta$  – Ângulo formado entre o caminho da onda de ultra-som e a direção do fluido.

$\theta$  – Ângulo formado entre os eixos dos transdutores.

$v_F$  – Velocidade do fluido.

$v_{ij}$  – Velocidade de propagação da onda de ultra-som no caminho do transdutor  $T_i$  para o transdutor  $T_j$ .

$v'_{ij}$  – Projeção paralela do vetor velocidade no eixo de propagação da onda de ultra-som no caminho do transdutor  $T_i$  para o transdutor  $T_j$ .

$v^m_{ij}$  – Projeção ortogonal do vetor velocidade no eixo de propagação da onda de ultra-som no caminho do transdutor  $T_i$  para o transdutor  $T_j$ .

$t_{ij}$  – Tempo de propagação da onda de ultra-som no caminho do transdutor  $T_i$  para o transdutor  $T_j$ .

$\hat{t}_{ij}$  – Instante de detecção do tempo de propagação da onda de ultra-som de  $T_i$  para o transdutor  $T_j$ .

$t_E$  – Tempo de atraso eletrônico.

$d$  – Distância entre os transdutores.

$S_n(T_i/T_j, T_i/T_k, T_i/T_n)$  – Sistema não-ortogonal, com origem no transdutor  $T_i$ , formado pelos transdutores  $T_i, T_j, T_k$  e  $T_n$ .

$S_o(T_i/T_j, T_i/T_k, T_i/T_n)$  – Sistema ortogonal, com origem no transdutor  $T_i$ , formado pelos transdutores  $T_i, T_j, T_k$  e  $T_n$ .

$S_i$  – Sistema com origem no transdutor  $T_i$ .

# Sumário

<b>1</b>	<b>Introdução</b> .....	9
<b>1.1</b>	<b>Tipos de Anemômetros</b> .....	10
<b>1.1.1</b>	<b>Anemômetro de rotação</b> .....	10
<b>1.1.2</b>	<b>Anemômetro Termoelétrico</b> .....	10
<b>1.1.3</b>	<b>Tubo de Pitot</b> .....	11
<b>1.1.4</b>	<b>Ondas Sonoras</b> .....	13
<b>1.1.5</b>	<b>Métodos para medição da velocidade do vento através do anemômetro ultra-sônico</b> .....	15
	<b>Referências</b> .....	18
<b>2</b>	<b>Objetivos</b> .....	20
<b>2.1</b>	<b>Geral</b> .....	20
<b>2.2</b>	<b>Específicos</b> .....	20
	<b>Artigo para Publicação</b> .....	21
<b>3</b>	<b>Um Anemômetro 3D ultra-sônico baseado em Apenas Quatro Transdutores</b> .....	22
<b>3.1</b>	<b>Introdução</b> .....	22
<b>3.2</b>	<b>Materiais e Métodos</b> .....	23
<b>3.3</b>	<b>Resultados Experimentais</b> .....	31
<b>3.3.1</b>	<b>Resultados com Anemômetro Simulado</b> .....	31
<b>3.3.2</b>	<b>Resultados com Anemômetro Real</b> .....	38
<b>3.4</b>	<b>Conclusões</b> .....	44
	<b>Referências</b> .....	45
<b>4</b>	<b>Conclusão</b> .....	46
<b>A</b>	<b>– Simulação do Anemômetro 3D</b> .....	58
<b>B</b>	<b>– Artigos Publicados</b> .....	56

---

# Introdução

---

As variáveis ambientais influenciam no crescimento de plantas e animais. Assim, o clima assume papel significativo em quase todas as fases das atividades agrícolas, desde a escolha do melhor local para a instalação de culturas, até o planejamento do cultivo (MOTA, 1981). Uma das variáveis ambientais que influencia no desenvolvimento dos vegetais é o vento. Essa variável pode alterar o crescimento, reprodução e distribuição de plantações no campo. Por exemplo, velocidades de vento altas provocam ruptura nos tecidos das folhas, quebra de galhos e caules, podendo comprometer uma safra inteira. Além disso, o vento pode propagar doenças, como a ferrugem asiática, transportando esporos<sup>1</sup>. Porém, no caso da ferrugem asiática, apesar do vento transportar os esporos, ele age como acelerador do secamento das superfícies molhadas, diminuindo a umidade e a severidade da doença.

Uma das técnicas mais utilizadas para controle de doenças agrícolas é a aplicação de agrotóxicos. Contudo, a pulverização deve ser bem administrada para que não ocorram grandes prejuízos. Um dos cuidados necessários no momento da aplicação é observar a velocidade do vento, pois tal variável pode ser responsável pela poluição de lavouras vizinhas e rios, causando danos ao meio ambiente. Além disso, dependendo da velocidade do vento, o agrotóxico é depositado para fora da área desejada, causando perdas de pelo menos 30% do produto (PICKLER, 2003). Desse modo, a velocidade do vento é um fator importante no momento da aplicação de agrotóxico. No trabalho de SANTOS (2006), tem-se que velocidades abaixo de 6,5 Km/h são ideais para aplicação, velocidades entre 6,5 a 9,5 Km/h são aceitáveis em algumas condições específicas, enquanto velocidades acima de 9,5 Km/h não são indicadas para pulverização.

O conhecimento da direção e velocidade do vento também é utilizado no fornecimento de informações para a instalação de quebra-ventos em plantações agrícolas, na instalação de turbinas para geração de energia eólica e na decisão do melhor local para instalação de fábricas. Por exemplo, no trabalho de PEDRO JÚNIOR et al. (1998), observou-se que através

---

<sup>1</sup>unidade básica de reprodução de fungos

da utilização de quebra-ventos, a produção da videira *Niagara Rosada* teve um aumento de 15 a 29%.

Portanto, devido a importância da velocidade do vento para agricultura, este trabalho tem como objetivo apresentar um anemômetro 3D ultra-sônico. Tal anemômetro fornece informações sobre as condições horizontais e verticais do vento, tornando possível verificar se estas informações favorecem o desenvolvimento de doenças. O método escolhido para mensurar a velocidade do vento neste anemômetro foi o método da diferença de tempo. Esse método consiste na medição do tempo de trânsito da onda de ultra-som para determinar a velocidade do vento. É apresentado também, uma configuração dos transdutores de ultra-som para medir a velocidade do vento em 3D.

## 1.1 Tipos de Anemômetros

Os principais anemômetros existentes no mercado são: anemômetro de rotação, anemômetro termoelétrico, tubo de Pitot e anemômetro ultra-sônico. O princípio de funcionamento desses anemômetros são descritos nas seções a seguir.

### 1.1.1 Anemômetro de rotação

Dentre os anemômetros existentes no mercado, um dos mais tradicionais é o anemômetro de rotação (CYLIAX, 2006). Esse anemômetro pode ser constituído de copos fixos que giram radialmente proporcionalmente à velocidade média do vento que pode ser indicada por um tacômetro. Geralmente, estes anemômetros são encontrados com dimensões que variam de 2 a 40 cm de diâmetro, podendo medir velocidades de 0,1 a 100 m/s (ALMEIDA, 2004). Um anemômetro que possui o mesmo princípio de funcionamento do anemômetro de copos é o anemômetro de hélices.

A vantagem de se utilizar esse anemômetro é o baixo custo, porém possui a desvantagem de ter peças móveis que impossibilitam medidas de velocidades precisas devido ao atrito com o ar. Uma outra desvantagem é a necessidade da velocidade inicial ter uma intensidade capaz de vencer a inércia dos copos ou hélices. Além disso, o movimento dos copos pode ser impedido por folhas, galhos e qualquer outra barreira física necessitando assim de uma supervisão constante (RIBEIRO et al., 2004).

### 1.1.2 Anemômetro Termoelétrico

O anemômetro termoelétrico, mede a velocidade do ar ou fluido através da troca de calor entre o sensor aquecido e o fluido a ser medido. Essa troca de calor pode ser feita através de um fio ou filme metálico e o ar. Desse modo, o sensor é aquecido e a perda de calor

retirada do fio ou filme é proporcional a velocidade do vento. Estes anemômetros possuem uma velocidade baixa de partida, alta sensibilidade e tempo de resposta rápido, podendo ser utilizado em fluidos com fluxos turbulentos (SAMPAIO et al., 1998).

Os métodos mais utilizados para medir a velocidade do vento através do anemômetro termoeletrico são: corrente constante, tensão constante e temperatura constante. Na primeira ou segunda técnica, o sensor é alimentado com uma corrente ou tensão constante e conforme a perda de calor, devido ao movimento do fluido, a temperatura do sensor é alterada e, através dessa variação, pode-se calcular a velocidade do vento. No último método, a perda de calor provocada pela velocidade do ar é compensada pelo aumento da potência do circuito, de maneira a manter constante a temperatura do sensor. Desse modo, a velocidade é mensurada através da tensão ou corrente.

Uma das vantagens desse anemômetro é não possuir partes móveis. Contudo, o seu desempenho pode ser afetado por impurezas ou sujeiras acumuladas no sensor. Além disso, os sensores são muito frágeis não sendo ideais para utilização em campo aberto.

### 1.1.3 Tubo de Pitot

O tubo de Pitot foi inventado por Henri Pitot (1695-1771). Seu principal objetivo era medir o fluxo de água no Rio Sena, que atravessa Paris. A partir da invenção, surgiram novas aplicações e configurações desse medidor.

Este aparelho é um tipo de anemômetro que mede a velocidade do vento através das medições da pressão estática e de estagnação ou total. O tubo de pitot é constituído por um tubo de pequeno diâmetro instalado no interior do duto por onde circula o fluido. Uma das extremidade do tubo de Pitot deve ser cuidadosamente alinhada com a direção da velocidade do ar.

A diferença entre a pressão estática e a de estagnação é denominada pressão dinâmica. Assim, conhecendo a pressão dinâmica, é possível, utilizando a equação de Bernoulli, definir a velocidade do vento  $v_V$  como (FIGUEIREDO et al., 2005)

$$v_V = \sqrt{\frac{2g(P_2 - P_1)}{\rho}}, \quad (1.1)$$

onde  $\rho$  é o peso específico do fluido,  $g$  é a aceleração gravitacional,  $P_1$  e  $P_2$  são respectivamente a pressão estática e pressão de estagnação.

Atualmente o tubo de Pitot possui inúmeras aplicações como aviação, medidores de pressão, velocidade, altitude e vazão de fluxos em tubulações industriais. As principais vantagens desse medidor é a fácil implementação e o custo bastante reduzido. Em FREITAS e NUNES (1999) é proposto um método de medição de vazão em turbinas hidráulicas, através

do tubo de Pitot. Esse método se mostrou vantajoso devido ao baixo custo, facilidade de implementação e coleta de dados. Contudo, a precisão é insuficiente para algumas aplicações. Além disso, não é ideal para medição de ventos turbulentos, pois a diferença de pressão responde de forma lenta.

### Anemômetro a Ultra-som

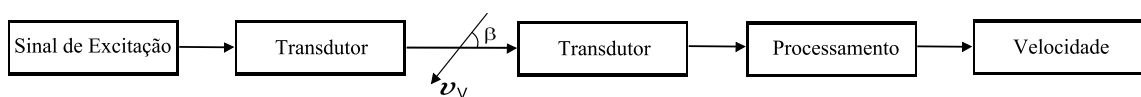
O anemômetro ultra-sônico mede a velocidade do ar por meio da medida da velocidade do som no ar, ou seja, através do incremento ou decremento da velocidade do som é possível estimar a velocidade do ar. Este anemômetro é mais robusto e confiável se comparado com os anemômetros de peças móveis, já que pode operar em qualquer meio físico.

As principais vantagens dos sensores ultra-sônicos utilizados na medição de velocidade em fluidos são (PEREIRA, 2007):

- boa exatidão;
- respostas rápidas;
- não obstrução do fluxo do fluido objeto da medição;
- ausência de partes móveis;
- pode ser usado em fluidos perigosos como corrosivos e/ou contaminantes sem risco para o transdutor.

No diagrama de blocos da figura 1.1, é apresentado o comportamento do sensor ultra-sônico, onde percebe-se que esse sensor necessita de um sinal de excitação, o qual é enviado para o transdutor-transmissor. Por sua vez, este transmitirá o sinal ultra-sônico para o transdutor-receptor. O sinal a ser transmitido sofrerá variações no caminho, conforme a velocidade do som e do vento. Quando o sinal chega ao transdutor-receptor, ele é processado e a alteração do sinal transmitido é observada. É necessário também conhecer o ângulo formado entre o caminho ultra-sônico e a direção do vento para medir a sua velocidade.

O anemômetro ultra-sônico não necessita de uma biruta para medir a direção e o sentido do vento, pois pode ser arranjado de forma a obter o módulo da velocidade, a direção e o sentido em um só equipamento. Tal arranjo pode ser feito em 2 dimensões ou 3 dimensões.



**Figura 1.1** – Diagrama de blocos do anemômetro a ultra-som.

Na figura 1.2(a), mostra-se um dos arranjos de transdutores encontrados comercialmente para medição da velocidade do vento em 3D. Este anemômetro tem a forma de dois tetraedros opostos por um vértice, com três pares de transdutores, como na figura 1.2(b). Os três pares de transdutores estão alinhados sobre os eixos  $x_1$ ,  $x_2$  e  $x_3$  e alocados em cada vértice do tetraedro.

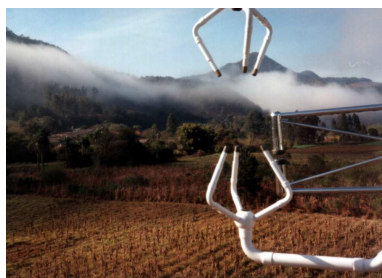
Devido as vantagens que o anemômetro ultra-sônico possui em relação aos outros tipos de anemômetro, o anemômetro ultra-sônico foi escolhido para o trabalho proposto. Para que se possa compreender melhor o anemômetro ultra-sônico, descreve-se a seguir alguns princípios básicos do funcionamento dos transdutores ultra-sônicos.

### 1.1.4 Ondas Sonoras

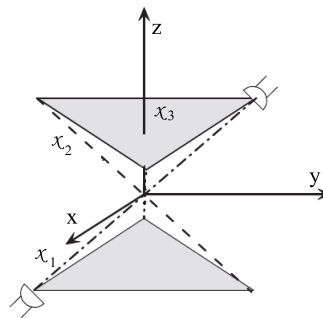
As ondas sonoras são ondas mecânicas que necessitam de um meio material (ar, sangue, materiais sólidos, etc) para se propagarem, ou seja, não podem se propagar no vácuo. Essas ondas se propagam através das oscilações de partículas do meio de propagação, transferindo energia de um ponto ao outro sem o transporte de matéria. As ondas sonoras podem ser caracterizadas como longitudinais ou transversais, dependendo da relação entre a direção de propagação e vibração das ondas. As ondas longitudinais são aquelas nas quais as partículas do meio se movimentam no mesmo sentido da onda sonora. Enquanto, nas ondas transversais, o movimento das partículas é perpendicular à direção de propagação da onda. Contudo, as ondas transversais não se propagam em líquidos e gases, pois necessitam de um meio de propagação com ligações mecânicas. Desse modo, no caso do meio de propagação ser o ar, as ondas sonoras são do tipo longitudinais. Além disso, quando a onda sonora se propaga em um meio material, esta sofre uma atenuação devido a fenômenos como a absorção de energia pelo meio.

A velocidade da onda sonora  $v_S$ , quando o meio de propagação é o ar, é dada por (HALLYDAY, 2002)

$$v_S = \sqrt{\frac{\gamma RT}{M}}, \quad (1.2)$$



(a) Anemômetro 3D *Campbell*;



(b) Eixos no anemômetro 3D;

**Figura 1.2** – Anemômetro 3D.

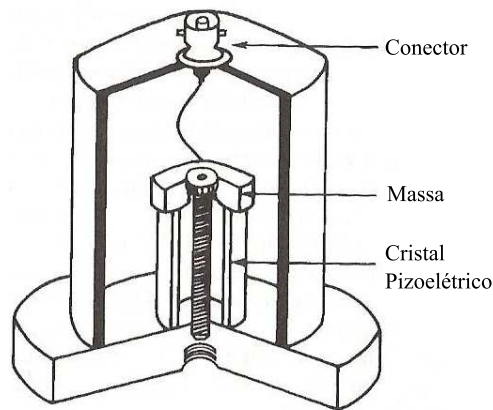
onde  $\gamma$  é a razão entre o calor específico do gás (ar) a pressão constante e a volume constante,  $M$  é a massa molecular,  $R$  é a constante universal dos gases ( $R = 8,31 J/molK$ ) e  $T$  é a temperatura absoluta. Para o ar, tem-se  $\gamma \simeq 1,402$  e  $M = 29,0 \times 10^{-3} Kg/mol$ . Desse modo, percebe-se que  $v_S$  é variável com a temperatura do ambiente.

Conforme a frequência de propagação, as ondas sonoras podem ser sônicas, infra-sônicas e ultra-sônica. As ondas sônicas possuem frequência de propagação entre 20 Hz e 20 kHz, são as ondas que se encontram na faixa de frequência audível ao ouvido humano. As ondas infra-sônicas se propagam a uma frequência inferior a 20 Hz. E por último, tem-se as ondas ultra-sônicas que se propagam em frequências superiores a 20 kHz.

### Ondas Ultra-sônicas

As ondas ultra-sônicas são utilizadas em diversas áreas como biomédicas (MAIA, 2001), robótica (BASTOS et al., 1991), segurança e em medições de fluxo de fluido (SKWAKREK et al., 2001). Essas ondas podem ser geradas por transdutores que convertem a energia elétrica em energia mecânica e vice-versa. Tais transdutores são constituídos de materiais piezoelétricos que apresentam o fenômeno chamado efeito piezoelétrico. Esse fenômeno foi descoberto por Pierre e Jacques Curie em 1880, que perceberam a variação da dimensão de certos materiais quando submetidos a campos elétricos e o contrário, ou seja, caso for aplicado uma pressão no material, esse apresentará uma diferença de potencial em sua superfície. Assim, os transdutores ultra-sônicos possuem tanto a capacidade de gerar ondas ultra-sônicas (transdutor transmissor), como também de recebê-las (transdutor receptor). Nos trabalhos de GALLEGO (1989) e GENG e ZHANG (1999), encontram-se descrições do efeito piezoelétrico, das propriedades dos materiais que possuem esse efeito e suas aplicações. Os principais elementos piezoelétricos utilizados na construção do transdutor de ultra-som são cerâmicas de elementos ferroelétricos como chumbo, zircônio, o bário e o titânio (PEREIRA, 2007). Na figura 1.3 (PERTENCE, 2003), mostra-se um exemplo de um transdutor piezoelétrico utilizado como acelerômetro. Neste transdutor, pode-se observar a massa e o cristal que oscilam conforme a presença de corrente pelo conector.

Os transdutores ultra-sônicos são contruídos para trabalhar em diferentes aplicações e frequências. Geralmente, esses transdutores são acondicionados em um suporte para proteção mecânica e elétrica. O comportamento de um transdutor de ultra-som depende de fatores como o elemento piezoelétrico utilizado e a construção mecânica do mesmo (NASCIMENTO, 2003). A construção mecânica influencia principalmente na determinação da área de irradiação da onda de ultra-som. Enquanto, o elemento piezoelétrico determina a frequência de oscilação do transdutor. Assim, na construção do transdutor é possível variar a frequência de oscilação conforme a aplicação desejada. Por exemplo, na área médica para obtenção de imagens são utilizadas frequências na faixa de 300 kHz a 20 MHz, podendo chegar a 100 MHz (MAIA, 2001).



**Figura 1.3** – Transdutor piezoelétrico apresentado por PERTENCE (2003).

Existe uma corrente mínima para que os transdutores oscilem na sua frequência natural. Tais transdutores podem ser excitados através de um pulso ou um trem de pulsos. Para excitar o transdutor com um único pulso é necessário uma tensão relativamente alta. Por exemplo, no trabalho de JOHANSSON et al. (2006), foi utilizado um pulso de 40 V sobre o transdutor. Em NASCIMENTO (2003), um pulso retangular negativo, com taxa de repetição de 100 Hz e amplificado até 66 V, foi utilizado para excitar um transdutor e verificar sua frequência de ressonância. MAIA (2001) relatou ter utilizado um pulso senoidal de 130 V de pico a pico para excitar o transdutor. Na excitação com um trem de pulsos, a tensão do sinal pode ser menor. BRASSIER et al. (2001) excitou o transdutor com um trem de 4 pulsos com amplitude de 4 V.

O coeficiente de elasticidade do elemento piezoelétrico determina o tempo de duração da onda de ultra-som. Assim, conforme este coeficiente, o sinal de ultra-som não responde a mudanças ocorridas no sinal de excitação. A impedância desses elementos também influencia na duração da onda de ultra-som e na sensibilidade do transdutor.

### 1.1.5 Métodos para medição da velocidade do vento através do anemômetro ultra-sônico

Geralmente, dois métodos são utilizados para estimar a velocidade do vento através do anemômetro ultra-sônico: Método *Doppler* e Método Tempo de Trânsito.

No método *Doppler*, o transdutor transmissor emite ondas ultra-sônicas que são refletidas por partículas (sólidos) do fluido até chegarem ao transdutor receptor. Desse modo, através da variação da frequência do sinal ultra-sônico recebido, devido ao efeito *Doppler*, é possível estimar a velocidade do vento. Contudo, esse método possui a desvantagem de necessitar de partículas em suspensão para a reflexão do sinal de ultra-som.

O método tempo de trânsito permite a medida da velocidade do vento através da medida do tempo que a onda de ultra-som leva para ser recebida após emitida. Este tempo varia

em função da velocidade do vento e da velocidade do som. Pode-se mensurar este tempo de maneira direta através do método da diferença de tempo ou, de maneira indireta, através do método da diferença de fase. A seguir, apresenta-se um estudo superficial do método da diferença de fase.

### Método da Diferença de Fase

Na figura 1.4, é possível observar o procedimento da medição da diferença de fase. Esse método mede a velocidade do vento através da diferença de fase entre o sinal transmitido  $T_x$  do sinal recebido  $R_x$ . O tempo  $t_F$ , obtido pela diferença de fase entre as ondas (figura 1.4), é dado em segundos. Esta medição em radianos é dada por

$$\Delta\theta = 2\pi ft_F, \quad (1.3)$$

onde  $\Delta\theta$  é a diferença de fase, entre as ondas recebida e transmitida, dada em radianos, e  $f$  é a frequência de oscilação do sinal de ultra-som.

Observando o diagrama da figura 1.5, a velocidade de propagação da onda de ultra-som para percorrer o caminho do transdutor  $T_1$  para o transdutor  $T_2$  é dada por

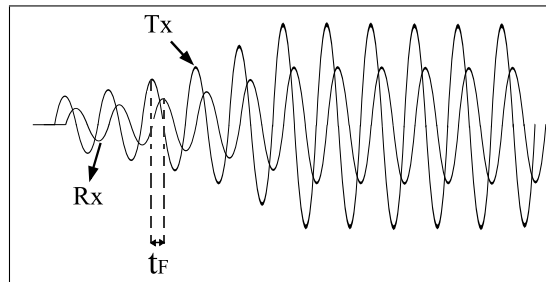
$$v_{12} = v_S + v_F, \quad (1.4)$$

onde  $v_{12}$  é a velocidade de propagação da onda de ultra-som no caminho de  $T_1$  para  $T_2$  e  $v_F$  é a velocidade do fluido. Contudo, se a onda de ultra-som percorrer o caminho de  $T_2$  para  $T_1$  a velocidade de propagação  $v_{21}$  é dada por

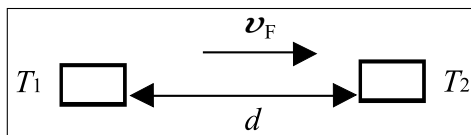
$$v_{21} = v_S - v_F. \quad (1.5)$$

Além disso, considerando a diferença de fase entre o sinal transmitido e o recebido, tem-se que

$$v_S + v_F = \frac{d}{\left(n - \frac{\Delta\theta}{2\pi}\right) \frac{1}{f}}, \quad (1.6)$$



**Figura 1.4** – Ilustração do método diferença de fase.



**Figura 1.5** – Ilustração de um sistema que utiliza o método diferença de fase.

$$v_S - v_F = \frac{d}{\left(n + \frac{\Delta\theta}{2\pi}\right) \frac{1}{f}}, \quad (1.7)$$

onde  $d$  é a distância entre os transdutores e  $n$  é o número de ciclos inteiros (período da onda de ultra-som) ocorridos até o instante da detecção do sinal ultra-sônico.

Contudo, percebe-se que, para determinar  $v_F$ , é necessário conhecer  $v_S$ . Para estimar  $v_S$ , sabe-se que a temperatura deve ser medida, pois  $v_S$  é variável com a temperatura. No trabalho de HUANG et al. (2002), é utilizado desse artifício para estimar, através da velocidade da onda de ultra-som no ar, a temperatura do ambiente. É possível eliminar  $v_S$ , relacionando as equações (1.6) e (1.7), ou seja,

$$v_F = \frac{d}{2} \left( \frac{1}{\left(n - \frac{\Delta\theta}{2\pi}\right) \frac{1}{f}} - \frac{1}{\left(n + \frac{\Delta\theta}{2\pi}\right) \frac{1}{f}} \right). \quad (1.8)$$

No trabalho de PEREIRA (2007), utilizou-se do método da diferença de fase para estimar a velocidade do vento. Contudo, neste trabalho a máxima diferença de fase que pode ser detectada é de  $180^\circ$ , ou seja, metade de um ciclo da onda de ultra-som. Além dessa diferença de fase, sabe-se que é necessário detectar o número de ciclos inteiros da onda ocorridos até o instante de detecção do sinal (ver equação (1.8)). Considerando uma velocidade de vento zero, é necessário ajustar a distância entre os transdutores para que o sinal ultra-sônico esteja em fase com o sinal de referência, ou seja,  $\Delta\theta=0$  rad. Em seguida, é possível identificar o número de ciclos inteiros da onda ( $n$ ) que ocorreram até a recepção do sinal de ultra-som. O valor de  $n$  estimado é válido somente para uma determinada faixa de temperatura, pois sabe-se que  $n$  é influenciado pela velocidade do som e essa é influenciada pela temperatura.

No trabalho de Pinto (2006), é verificado esta limitação, onde é discutido também a influência do valor de  $d$  na determinação de  $n$ . Quanto menor a distância entre os transdutores, melhor a eficiência do método da diferença de fase, pois a variação do tempo de trânsito é pequena (HAN et al., 2008). Em vista disso, é possível verificar que existe um limite na medição da velocidade. Quando o limite é atingido, ou seja, quando a velocidade máxima é alcançada, um novo ciclo se repete. Percebe-se que uma das desvantagens deste método é a limitação da faixa de variação da velocidade do vento.

Devido ao método utilizado no trabalho de PEREIRA (2007) não ser ideal para medir grandes faixas de velocidades, no presente trabalho, optou-se pela utilização do método da

diferença de tempo, pois esse método não possui limitação na faixa de velocidade. Assim, tal método será descrito em mais detalhes no artigo do capítulo 3.

## Referências

- ALMEIDA, W. R. M. (2004). Anemômetro baseado no método de tempo de trânsito: Estudo comparativo de arquiteturas, avaliação de incertezas e implementação. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Maranhão.
- BASTOS, T. F., BASTOS FILHO, T. F., MARTIN, J. M., e CERES, R. (1991). Uso de sensores de ultra-som na medicao de parametros em robotica e outras aplicações. *SBA: Controle & Automação*, 3(1):299–303.
- BRASSIER, P., HOSTEN, B., e VULOVIC, F. (2001). High-frequency transducers and correlation method to enhance ultrasonic gas flow metering. *Flow Measurement and Instrumentation*, 12:201–211.
- CYLIAX, I. (2006). Internet-connected sonic anemometer. *Circuit Cellar, the Magazine for Computer Applications*.
- FIGUEIREDO, B. B., CAMPOS, C. D., VENTURA, P. C. S., e MOURA, D. G. (2005). O tubo de pitot. Em *XVI Simpósio Nacional de Ensino de Física*, Rio de Janeiro.
- FREITAS, R. V. e NUNES, M. (1999). Medição de vazão em turbinas hidráulicas utilizando tubo de pitot. Em *Grupo de Trabajo sobre hidromecánica, 5ª Reunión*, Montevideo.
- GALLEGO, J. A. (1989). Piezoelectric ceramics and ultrasonic transducer. *Journal of Physics*, 22:804–816.
- GENG, X. e ZHANG, Q. M. (1999). Resonance modes and losses in 1-3 piezocomposites for ultrasonic transducer applications. *Journal of Applied Physics*, 85:1342–1350.
- HALLYDAY, R. W. (2002). *Fundamentos de Física 2, Gravitação, Ondas e Termodinâmica*. Livros Técnicos e Científicos Editora S.A, Rio de Janeiro.
- HAN, D., KIM, S., e PARK, S. (2008). Two-dimensional ultrasonic anemometer using the directivity angle of an ultrasonic sensor. *Microelectronics Journal*, 39:1195–1199.
- HUANG, A. N., HUANG, C. F., LI, Y. C., e YOUNG, M. S. (2002). High precision, fast ultrasonic thermometer based on measurement of speed of sound in air. *Scientific Instruments*, 7(11):4022–4027.
- JOHANSSON, J., GUSTAFSSON, M., e DELSING, J. (2006). Ultra-low power transmit/recvie asic for batery operated ultrasound measurement systems. *Sensors and Actuators*, pp. 317–328.

- MAIA, J. M. (2001). Sistema ultra-sônico para auxílio ao diagnóstico da osteoporose. Dissertação de Mestrado, Universidade Estadual de Campinas.
- MOTA, F. S. (1981). *Meteorologia Agrícola*. Livraria Nobel S.A.
- NASCIMENTO, V. M. (2003). Desenvolvimento de um protocolo para construção e caracterização de transdutores de ultra-som. Dissertação de Mestrado, Universidade Estadual de Campinas.
- PEDRO JÚNIOR, M. J., PEZZOPANE, J. R. M., MARTINS, F. P., POMMER, C. V., e MORAES, A. V. C. (1998). Efeito do uso de quebra-ventos na produtividade da videira *Niagara Rosada*. *Revista Brasileira de Agrometeorologia*, 6:75–79.
- PEREIRA, R. V. (2007). Sensores e transdutores para um sistema automático de aquisição de dados agrometeorológicos. Dissertação de Mestrado, Universidade Estadual de Londrina.
- PERTENCE, A. (2003). *Amplificadores Operacionais e Filtros Ativos*. Bookman, Porto Alegre.
- PICKLER, H. M. B. (2003). Indicador de velocidade e direção do vento em pulverizações agrícolas. Dissertação de Mestrado, Universidade Estadual de Londrina.
- Pinto, M. S. P. (2006). Especificações de projeto para medição de velocidade de vento utilizando anemômetro ultra-sônico com o método de diferença de fase. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Maranhão.
- RIBEIRO, M. R. S., R., B., G., R. M., AREDES, S., e BARBOSA, L. (2004). Desenvolvimento de um anemômetro digital ultra-sônico. Em *X Encontro Latino Americano de Iniciação Científica e VI Encontro Latino Americano de Pós-Graduação*, Universidade do Vale do Paraíba, São José dos Campos.
- SAMPAIO, C. A. P., PASSOS, E. F., DIAS, G. P. D., e CORREA, P. C. (1998). Desenvolvimento e avaliação de um anemômetro de fio quente operando à temperatura constante. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, 2:229–234.
- SANTOS, D. H. (2006). Desenvolvimento de indicadores de velocidade do vento para o combate à deriva de agrotóxicos. Dissertação de Mestrado, Universidade Estadual de Londrina.
- SKWAKREK, V., WINDORFER, H., e HANS, V. (2001). Measuring pulsating flow width ultrasound. *Measurement*, 29:225–236.

# Objetivos

---

## 2.1 Geral

- Projetar, implementar e testar um anemômetro 3D baseado em uma técnica que utiliza apenas quatro transdutores de ultra-som para medir a velocidade do vento.

## 2.2 Específicos

- Validar a técnica de medição da velocidade do vento em 3D com um sistema baseado em quatro transdutores.
- Implementar o método da diferença de tempo para estimar a velocidade do vento.
- Verificar as vantagens que o anemômetro 3D proposto possui em relação aos anemômetros comerciais.

# Artigo para Publicação

---

# Um Anemômetro 3D Ultra-sônico baseado em Apenas Quatro Transdutores

---

## Resumo

---

As variáveis ambientais influenciam o desenvolvimento de plantas e animais. Uma dessas variáveis é o vento, que pode ser responsável por alterar a fisiologia de plantas, propagar doenças e influenciar a eficiência de práticas agrícolas. Normalmente, a medição da velocidade do vento é feita utilizando anemômetros em conjunto com birutas que atuam em apenas duas dimensões, medindo a velocidade e a direção do vento por meio de um sistema mecânico. Uma das desvantagens dessa abordagem é a existência de peças móveis que impossibilitam medidas de velocidades precisas devido ao atrito com o ar e a inércia do equipamento. Neste trabalho, apresenta-se um anemômetro ultra-sônico que mede a direção e a velocidade do vento em três dimensões. Tal anemômetro utiliza apenas quatro sensores piezoelétricos dispostos em dois eixos ortogonais não concorrentes, de forma que, unindo-se os pontos de cada sensor, obtém-se uma estrutura no formato de um tetraedro regular. Assim, medindo o tempo necessário (tempo de trânsito) para que um pulso de ultra-som, enviado por um dos sensores, atinja os outros três, a velocidade do vento nas três direções pode ser medida. Além disso, com a estrutura em forma de tetraedro, a medição pode ser realizada em até quatro sistemas de coordenadas diferentes. Isso acrescenta redundância ao sistema fazendo com que, mesmo considerando-se uma incerteza de até 5% na construção do anemômetro, é possível obter um erro médio de aproximadamente 2% na velocidade do vento medida. Essa medição é realizada por um microcontrolador que também é responsável pelo armazenamento dos dados e posterior envio dos mesmos a um microcomputador.

**Palavras-chave:** Anemômetro ultra-sônico 3D, Método tempo de trânsito, Estrutura em formato de tetraedro.

## 3.1 Introdução

O vento influencia o desenvolvimento dos vegetais, podendo alterar o seu crescimento, reprodução e distribuição no campo. Por exemplo, velocidades de vento altas provocam

ruptura nos tecidos das folhas, quebra de galhos e caules, podendo comprometer uma safra inteira. Além disso, o vento pode propagar doenças, como a ferrugem asiática, transportando inóculos e poluentes, e influenciar a eficiência de práticas agrícolas como a pulverização de agrotóxicos.

Uma forma de medir a velocidade de deslocamento do ar pode ser realizada por meio de um anemômetro ultra-sônico. A tecnologia baseada em ultra-som tem sido largamente utilizada em diferentes trabalhos. No trabalho de EGANÃ et al. (1985), é proposto um sistema com transdutores ultra-sônicos para detectar a presença de obstáculos/barreiras no caminho de sistemas autônomos. Um sistema de medição de velocidade de fluido utilizando dois transdutores de ultra-som foi desenvolvido por CHANDE et al. (2008). No trabalho de HUANG et al. (2002), é apresentado um termômetro baseado na medição da velocidade de propagação da onda de ultra-som. Em KALACHE (2007), é apresentado a construção de um sistema de medição das camadas adiposa e muscular através de ultra-som.

Geralmente, os anemômetros ultra-sônicos são compostos de materiais piezoelétricos que, quando submetidos a uma diferença de potencial, produzem vibrações mecânicas. O contrário também é válido, ou seja, com uma pressão sobre o material ocorre a formação de cargas elétricas. Assim, tais anemômetros possuem tanto a capacidade de gerar ondas ultra-sônicas, como também de recebê-las.

Neste contexto, o presente trabalho apresenta um anemômetro 3D baseado em ultra-som, que mede a velocidade do ar por meio da medida da velocidade do som no ar, ou seja, através do incremento ou decremento da velocidade do som.

## 3.2 Materiais e Métodos

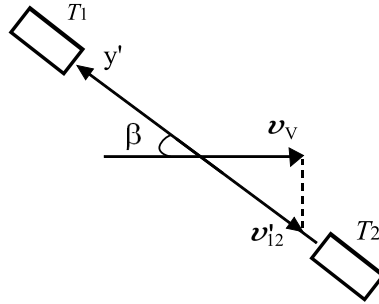
No diagrama de blocos da figura 3.1, um vetor de fluido passa transversalmente ao longo do eixo (referenciado na figura 3.1 como  $y'$ ) formado por um par de transdutores ultra-sônicos  $T_1$  e  $T_2$ . Esses transdutores podem operar como transmissores ou receptores. Além disso, o sinal ultra-sônico transmitido pelo transdutor-transmissor chega ao transdutor-receptor com uma atenuação e um deslocamento no tempo em relação ao sinal transmitido. Estas variações do sinal recebido são influenciadas pela velocidade do som, ou seja,

$$v'_{12} = \frac{d}{t_{12}}, \quad (3.1)$$

onde  $v'_{12}$  é a velocidade de propagação do pulso de ultra-som para percorrer o caminho de  $T_1$  para  $T_2$ ,  $d$  é a distância entre os transdutores e  $t_{12}$  é o tempo para a onda ultra-sônica percorrer o percurso de  $T_1$  para  $T_2$ . Contudo, se o ar estiver movendo-se a uma velocidade  $v_V$ , a velocidade do pulso (mesmo sentido de propagação do fluido) pode ser dada por

$$v'_{12} = v_S + v_V \cos \beta, \quad (3.2)$$

onde  $\beta$  é o ângulo formado entre o eixo dos transdutores e a direção do fluido e  $v_S$  é a velocidade do som. Assim, considerando  $d$  fixo e conhecendo-se  $v_S$ , é possível determinar  $v_V$  medindo-se o tempo  $t_{12}$ . Contudo,  $v_S$  é variável com a temperatura. Por isso, para obter-se uma maior exatidão, a temperatura também deve ser medida para que  $v_S$  seja estimada. Essa foi a abordagem utilizada, por exemplo, por OTTONI e LAGES (2003), em seus trabalhos para medir, através da velocidade do som, a distância entre um veículo autônomo e seus obstáculos.



**Figura 3.1** – Diagrama de blocos do método tempo de trânsito.

Na equação (3.2), é possível eliminar  $v_S$  medindo também o tempo de propagação da onda no sentido contrário, ou seja, o tempo que o sinal ultra-sônico leva para percorrer o caminho de  $T_2$  para  $T_1$  (sentido contrário a propagação do fluido). Neste caso, a velocidade do pulso  $v'_{21}$ , através do caminho de  $T_2$  para  $T_1$ , pode ser escrita como

$$v'_{21} = v_S - v_V \cos \beta. \quad (3.3)$$

Além disso, relacionando a equação (3.1) com as equações (3.2) e (3.3), tem-se

$$\frac{d}{t_{12}} = v_S + v_V \cos \beta, \quad (3.4)$$

$$\frac{d}{t_{21}} = v_S - v_V \cos \beta. \quad (3.5)$$

Agora, das equações (3.4) e (3.5), é possível determinar a velocidade do fluido (vento), ou seja,

$$v_V = \frac{d}{2 \cos \beta} \left( \frac{1}{t_{12}} - \frac{1}{t_{21}} \right). \quad (3.6)$$

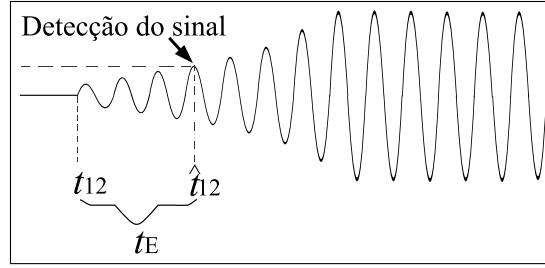
Assim, através da medição dos tempos  $t_{12}$  e  $t_{21}$ , obtém-se a velocidade do fluido sem a necessidade de estimar a velocidade do som no ar. Este método é denominado método da diferença de tempo.

A precisão da medição da velocidade do fluido depende da medição de  $t_{12}$  e  $t_{21}$ . Contudo, na maioria das vezes, existe um erro na medição desses tempos. Isto porque, inicialmente, o sinal chega no receptor bastante atenuado, como ilustrado na figura 3.2. Assim, determinando-se o instante de chegada eletronicamente, deve existir uma diferença entre o instante de chegada do sinal,  $t_{12}$ , e o instante de detecção do sinal,  $\hat{t}_{12}$ . Na figura 3.2, tal diferença de tempo é denominada  $t_E$ .

Através da figura 3.2, percebe-se que o tempo de chegada da onda ultra-sônica  $t_{12}$  é dado por

$$t_{12} = \hat{t}_{12} - t_E. \quad (3.7)$$

Considerando o tempo de atraso eletrônico  $t_E$ , a equação (3.6) pode ser reescrita como sendo



**Figura 3.2** – Ilustração do atraso na detecção da chegada da onda ultra-sônica.

$$v_V = \frac{d}{2 \cos \beta} \left( \frac{1}{\hat{t}_{12} - t_E} - \frac{1}{\hat{t}_{21} - t_E} \right), \quad (3.8)$$

onde  $\hat{t}_{12}$  é o tempo medido para a onda ultra-sônica percorrer o caminho de  $T_1$  para  $T_2$ , enquanto  $\hat{t}_{21}$  é o tempo medido para a onda ultra-sônica realizar o percurso contrário. Desse modo, percebe-se que uma variação no tempo  $t_E$  pode provocar imprecisões na aferição da velocidade do fluido.

Na prática, pode-se calcular o atraso eletrônico através da relação entre a temperatura e a velocidade do som. Tal relação é verificada na equação a seguir (HALLYDAY, 2002)

$$v_S = \sqrt{\frac{\gamma RT}{M}}, \quad (3.9)$$

onde  $\gamma$  é a razão entre o calor específico do gás (ar) a pressão constante e a volume constante,  $M$  é a massa molecular,  $R$  é a constante universal dos gases ( $R = 8,31 J/molK$ ) e  $T$  é a temperatura absoluta. Para o ar, tem-se  $\gamma \simeq 1,402$  e  $M = 29,0 \times 10^{-3} Kg/mol$ .

Considerando uma velocidade de fluido nula, tem-se que o tempo para a onda ultra-sônica percorrer o caminho entre  $T_1$  e  $T_2$  é influenciado somente pela velocidade do som. Assim, a partir da relação entre a equação (3.1) e a equação (3.7), tem-se

$$t_E = \hat{t}_{12} - \frac{d}{v_S}. \quad (3.10)$$

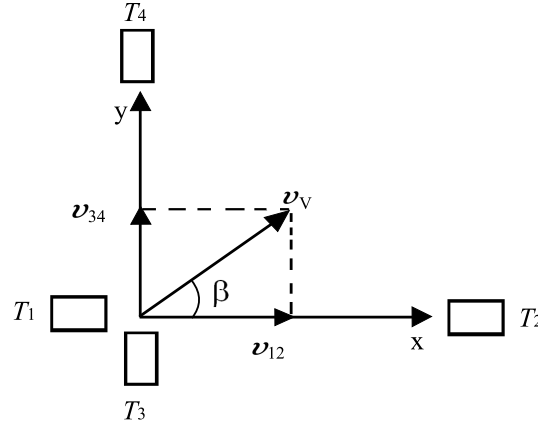
Em vista disso, para estimar o tempo de atraso eletrônico, é necessário aferir a temperatura do ambiente, além de submeter o anemômetro ultra-sônico a uma velocidade de fluido zero.

Na equação (3.6), é necessário conhecer o ângulo  $\beta$ , ou seja, a direção de incidência do fluido em relação aos transdutores. Em alguns casos, isto é possível quando o fluxo do fluido a ser medido se encontra, por exemplo, em tubos. Assim, pode-se arranjar os transdutores de maneira que se conheça o ângulo entre o caminho do sinal de ultra-som e a parede do tubo.

Normalmente  $\beta$  é desconhecido. Assim, com o arranjo da figura 3.1, é possível medir apenas a projeção ortogonal do vetor de fluido no eixo  $y'$ , ou seja,

$$v_{12}^m = \frac{d}{2} \left( \frac{1}{t_{12}} - \frac{1}{t_{21}} \right). \quad (3.11)$$

Contudo, a velocidade e a direção do fluido podem ser obtidas utilizando-se mais transdutores, por exemplo, com a configuração da figura 3.3. Nessa, são utilizados quatro transdutores arranjados em eixos ortogonais concorrentes. Assim, as coordenadas do vetor velocidade



**Figura 3.3** – Arranjo de transdutores para medição da velocidade em 2D.

do fluido são obtidas da velocidade medida em cada eixo ortogonal, determinada através da equação (3.11), ou seja,

$$\mathbf{v}_V = \begin{bmatrix} v_{12} \\ v_{34} \end{bmatrix}. \quad (3.12)$$

Uma outro arranjo que também torna possível medir a velocidade do fluido em duas dimensões é esboçado na figura 3.4. Nessa, observa-se três transdutores arranjados em um triângulo equilátero, formando um novo sistema não-ortogonal  $S_n(T_1/T_2, T_1/T_3)$ <sup>1</sup>. No trabalho de HAN et al. (2008), esse arranjo foi utilizado para medir o módulo e a direção do fluido em 2D. Nesse sistema,

$$\mathbf{v}_V = \begin{bmatrix} v'_{12} \\ v'_{13} \end{bmatrix}, \quad (3.13)$$

onde  $v'_{12}$  e  $v'_{13}$  são as projeções paralelas do vetor  $\mathbf{v}_V$  nos eixos  $x'$  e  $y'$ . Por sua vez,  $v'_{12}$  e  $v'_{13}$  podem ser obtidas a partir das projeções ortogonais medidas, ou seja,

$$\begin{bmatrix} v'_{12} \\ v'_{13} \end{bmatrix} = \mathbf{A}^{-1} \begin{bmatrix} v^m_{12} \\ v^m_{13} \end{bmatrix}, \quad (3.14)$$

onde  $v^m_{12}$  e  $v^m_{13}$  são as projeções ortogonais do vetor  $\mathbf{v}_V$  nos eixos  $x'$  e  $y'$ , obtidas através de (3.11), e

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} 1 & \cos \theta \\ \cos \theta & 1 \end{bmatrix}. \quad (3.15)$$

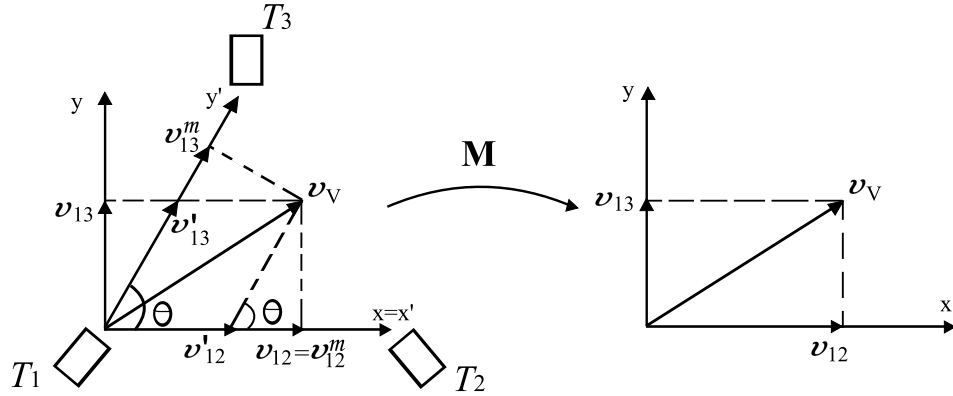
É necessário ainda ortogonalizar as coordenadas dos eixos do triângulo ( $v'_{12}$  e  $v'_{13}$ ) pois, sabe-se que os transdutores estão alocados em eixos não-ortogonais. Observando-se a figura 3.4, geometricamente, percebe-se que essa ortogonalização é dada por

$$v_{12} = v'_{12} + v'_{13} \cos \theta, \quad (3.16)$$

$$v_{13} = v'_{13} \sin \theta, \quad (3.17)$$

onde  $v_{12}$  e  $v_{13}$  são as coordenadas ortogonalizadas e  $\theta$  é o ângulo entre os transdutores.

<sup>1</sup>Sistema não-ortogonal, com origem no transdutor  $T_1$ , formado pelos transdutores  $T_1$ ,  $T_2$  e  $T_3$ .



**Figura 3.4** – Anemômetro 2D com transdutores dispostos em um triângulo equilátero .

As equações (3.16) e (3.17) podem ser representadas na forma matricial, ou seja,

$$\begin{bmatrix} v_{12} \\ v_{13} \end{bmatrix} = \mathbf{M} \begin{bmatrix} v'_{12} \\ v'_{13} \end{bmatrix}, \quad (3.18)$$

onde

$$\mathbf{M} = \begin{bmatrix} 1 & \cos \theta \\ 0 & \sin \theta \end{bmatrix} \quad (3.19)$$

é a matriz de mudança de base do sistema  $x'$  e  $y'$  para o sistema  $x$  e  $y$ .

Dessa maneira, através da aferição da velocidade do fluido nos eixos  $x'$  e  $y'$  e posteriormente a ortogonalização das medidas, é possível obter a velocidade do fluido em relação ao mesmo referencial da figura 3.3.

No diagrama da figura 3.4, tem-se um outro sistema não-ortogonal  $S_n(T_2/T_1, T_2/T_3)$ . Assim, usando-se o mesmo procedimento de ortogonalização descrito anteriormente, através da equação (3.19), obtém-se o sistema ortogonal  $S_o(T_2/T_1, T_2/T_3)^2$ . Por sua vez, esse sistema difere do  $S_o(T_1/T_2, T_3/T_4)$  apenas por uma matriz de rotação, ou seja,

$$\mathbf{MR} = \begin{bmatrix} \cos \alpha & \sin \alpha \\ -\sin \alpha & \cos \alpha \end{bmatrix}, \quad (3.20)$$

onde  $\alpha$  é ângulo necessário a ser rotacionado no sentido horário. Neste caso,  $\alpha = \pi$ . Portanto, a matriz de rotação  $\mathbf{MR}$  é dada por

$$\mathbf{MR} = \begin{bmatrix} -1 & 0 \\ 0 & -1 \end{bmatrix}. \quad (3.21)$$

Desse modo, percebe-se que no arranjo dos transdutores em um triângulo equilátero é possível obter até três sistemas de coordenadas diferentes com medidas de velocidades redundantes. Como é demonstrado empiricamente na próxima seção, a medição da velocidade do fluido em mais de um sistema de coordenadas aumenta a exatidão dos resultados. Isso é possível através de um cálculo estatístico simples, aproveitando a redundância disponível.

A maioria dos anemômetros disponíveis no mercado mede apenas a velocidade do vento em duas dimensões, paralelo ao plano da terra. Porém, os transdutores de ultra-som também

<sup>2</sup>Sistema ortogonal, com origem no transdutor  $T_2$ , formado pelos transdutores  $T_1$ ,  $T_2$  e  $T_3$ .

podem ser arranjados para medir a velocidade do vento em 3D. Tal arranjo tem o intuito de medir também as correntes de ar descendentes e ascendentes, para verificar se estas medidas favorecem o desenvolvimento de doenças. QUARANTA et al. (1985) utilizou um arranjo de seis transdutores dispostos em eixos ortogonais concorrentes para mensurar a velocidade do ar em 3D. No trabalho de PEREIRA (2007), pode-se observar um arranjo de transdutores diferente para medir a velocidade do vento em 3D. A configuração adotada por PEREIRA (2007) esta ilustrada na figura 3.5. Esta configuração utiliza quatro transdutores dispostos em dois eixos ortogonais, não concorrentes, de forma que, unindo-se os pontos de cada transdutor, obtém-se uma estrutura no formato de um tetraedro regular. Cada aresta do tetraedro corresponde a um caminho que a onda de ultra-som deve percorrer. As arestas formam entre si um ângulo de  $60^\circ$ , enquanto o ângulo  $\varrho$ , formado entre cada aresta do tetradro e o plano oposto, é de  $54,7356103^\circ$ .

Na figura 3.6, pode-se observar o  $S_n(T_1/T_2, T_1/T_3, T_1/T_4)$  do anemômetro da figura 3.5. Para ortogonalizar tal sistema, é necessário uma matriz de mudança da base  $(\mathbf{u}_{x'}, \mathbf{u}_{y'}, \mathbf{u}_{z'})$  para a base  $(\mathbf{u}_x, \mathbf{u}_y, \mathbf{u}_z)$ . O processo de ortogonalização de um sistema 3D é mais complexo do que a de um 2D. Assim, para facilitar os cálculos, utilizou-se um procedimento semelhante ao adotado nos trabalhos de VICENTE (1997), baseado na combinação linear entre a base  $(\mathbf{u}_{x'}, \mathbf{u}_{y'}, \mathbf{u}_{z'})$  e a base  $(\mathbf{u}_x, \mathbf{u}_y, \mathbf{u}_z)$ . Nesse processo de ortogonalização, considerou-se que os vetores das bases  $(\mathbf{u}_{x'}, \mathbf{u}_{y'}, \mathbf{u}_{z'})$  e  $(\mathbf{u}_x, \mathbf{u}_y, \mathbf{u}_z)$  são unitários. Desse modo, tem-se que

$$\mathbf{u}_x = (\mathbf{u}_x \cdot \mathbf{u}_{x'})\mathbf{u}_{x'} + (\mathbf{u}_x \cdot \mathbf{u}_{y'})\mathbf{u}_{y'} + (\mathbf{u}_x \cdot \mathbf{u}_{z'})\mathbf{u}_{z'}, \quad (3.22)$$

$$\mathbf{u}_y = (\mathbf{u}_y \cdot \mathbf{u}_{x'})\mathbf{u}_{x'} + (\mathbf{u}_y \cdot \mathbf{u}_{y'})\mathbf{u}_{y'} + (\mathbf{u}_y \cdot \mathbf{u}_{z'})\mathbf{u}_{z'}, \quad (3.23)$$

$$\mathbf{u}_z = (\mathbf{u}_z \cdot \mathbf{u}_{x'})\mathbf{u}_{x'} + (\mathbf{u}_z \cdot \mathbf{u}_{y'})\mathbf{u}_{y'} + (\mathbf{u}_z \cdot \mathbf{u}_{z'})\mathbf{u}_{z'}. \quad (3.24)$$

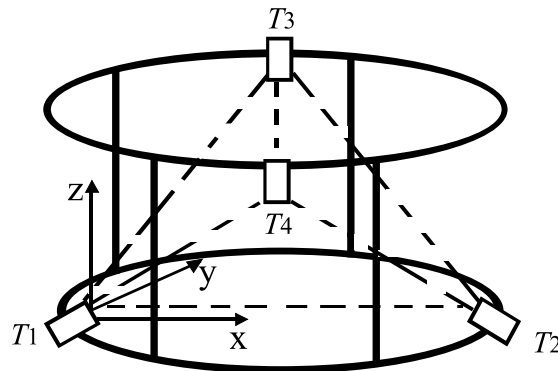
Pode-se determinar facilmente os produtos escalares

$$\mathbf{u}_x \cdot \mathbf{u}_{x'} = |\mathbf{u}_x||\mathbf{u}_{x'}| \cos \langle \mathbf{u}_x, \mathbf{u}_{x'} \rangle = 1, \quad (3.25)$$

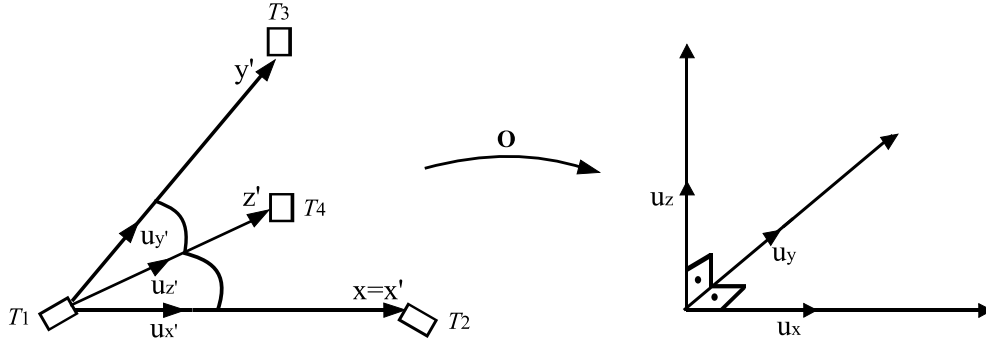
$$\mathbf{u}_x \cdot \mathbf{u}_{y'} = |\mathbf{u}_x||\mathbf{u}_{y'}| \cos \langle \mathbf{u}_x, \mathbf{u}_{y'} \rangle = \cos \langle \mathbf{u}_x, \mathbf{u}_{y'} \rangle, \quad (3.26)$$

$$\mathbf{u}_x \cdot \mathbf{u}_{z'} = |\mathbf{u}_x||\mathbf{u}_{z'}| \cos \langle \mathbf{u}_x, \mathbf{u}_{z'} \rangle = \cos \langle \mathbf{u}_x, \mathbf{u}_{z'} \rangle, \quad (3.27)$$

$$\mathbf{u}_y \cdot \mathbf{u}_{x'} = |\mathbf{u}_y||\mathbf{u}_{x'}| \cos \langle \mathbf{u}_y, \mathbf{u}_{x'} \rangle = 0, \quad (3.28)$$



**Figura 3.5** – Anemômetro 3D com transdutores dispostos em tetraedro(PEREIRA, 2007).



**Figura 3.6** – Sistema de coordenadas do anemômetro 3D com transdutores dispostos em tetraedro.

pois  $\mathbf{u}_y$  e  $\mathbf{u}_{x'}$  são ortogonais,

$$\mathbf{u}_y \cdot \mathbf{u}_{y'} = |\mathbf{u}_y| |\mathbf{u}_{y'}| \cos \langle \mathbf{u}_y, \mathbf{u}_{y'} \rangle = \sin \langle \mathbf{u}_x, \mathbf{u}_{y'} \rangle, \quad (3.29)$$

$$\mathbf{u}_z \cdot \mathbf{u}_{x'} = |\mathbf{u}_z| |\mathbf{u}_{x'}| \cos \langle \mathbf{u}_z, \mathbf{u}_{x'} \rangle = 0, \quad (3.30)$$

pois  $\mathbf{u}_z$  e  $\mathbf{u}_{x'}$  são ortogonais,

$$\mathbf{u}_z \cdot \mathbf{u}_{y'} = |\mathbf{u}_z| |\mathbf{u}_{y'}| \cos \langle \mathbf{u}_z, \mathbf{u}_{y'} \rangle = 0, \quad (3.31)$$

pois  $\mathbf{u}_z$  e  $\mathbf{u}_{y'}$  são ortogonais. Agora, para determinar os demais produtos escalares considere-se que

$$\mathbf{u}_x = \mathbf{u}_{x'}, \quad (3.32)$$

$$\mathbf{u}_y = \kappa \mathbf{u}_{x'} + \sigma \mathbf{u}_{y'} = \kappa \mathbf{u}_x + \sigma \mathbf{u}_{y'}, \quad (3.33)$$

onde  $\kappa$  e  $\sigma$  são escalares que podem ser calculados pelas seguintes relações

$$\mathbf{u}_x \cdot \mathbf{u}_y = 0, \quad (3.34)$$

pois os vetores  $\mathbf{u}_x$  e  $\mathbf{u}_y$  são ortogonais, e

$$\mathbf{u}_y \cdot \mathbf{u}_y = 1, \quad (3.35)$$

pois  $\mathbf{u}_y$  é um vetor unitário. Desse modo, a partir da relação das equações (3.32) e (3.33) com as equações (3.34) e (3.35), tem-se

$$\kappa + \sigma \mathbf{u}_{x'} \cdot \mathbf{u}_{y'} = 0, \quad (3.36)$$

$$\kappa^2 + \sigma^2 + 2\kappa\sigma \mathbf{u}_{x'} \cdot \mathbf{u}_{y'} = 1. \quad (3.37)$$

Assim,  $\kappa = -\frac{\cos \langle \mathbf{u}_{x'}, \mathbf{u}_{y'} \rangle}{\sin \langle \mathbf{u}_{x'}, \mathbf{u}_{y'} \rangle}$  e  $\sigma = \frac{1}{\sin \langle \mathbf{u}_{x'}, \mathbf{u}_{y'} \rangle}$ . Agora, substituindo  $\kappa$  e  $\sigma$  na equação (3.33), tem-se

$$\mathbf{u}_{y'} = \cos \langle \mathbf{u}_{x'}, \mathbf{u}_{y'} \rangle \mathbf{u}_x + \sin \langle \mathbf{u}_{x'}, \mathbf{u}_{y'} \rangle \mathbf{u}_y. \quad (3.38)$$

Em seguida, relacionando  $\mathbf{u}_{z'}$  como combinação linear de  $\mathbf{u}_x, \mathbf{u}_y$  e  $\mathbf{u}_z$ , ou seja,

$$\mathbf{u}_{z'} = (\mathbf{u}_{z'} \cdot \mathbf{u}_x) \mathbf{u}_x + (\mathbf{u}_{z'} \cdot \mathbf{u}_y) \mathbf{u}_y + (\mathbf{u}_{z'} \cdot \mathbf{u}_z) \mathbf{u}_z, \quad (3.39)$$

onde

$$\mathbf{u}_{z'} \cdot \mathbf{u}_y = \mathbf{u}_{z'} (\kappa \mathbf{u}_x + \sigma \mathbf{u}_{y'}) = \kappa \cos \langle \mathbf{u}_{z'}, \mathbf{u}_{x'} \rangle + \sigma \cos \langle \mathbf{u}_{y'}, \mathbf{u}_{z'} \rangle. \quad (3.40)$$

Agora, substituindo  $\kappa$  e  $\sigma$  na equação (3.40),

$$\mathbf{u}_{z'} \cdot \mathbf{u}_y = \frac{-\cos \langle \mathbf{u}_{x'}, \mathbf{u}_{y'} \rangle \cos \langle \mathbf{u}_{x'}, \mathbf{u}_{z'} \rangle + \cos \langle \mathbf{u}_{y'}, \mathbf{u}_{z'} \rangle}{\sin \langle \mathbf{u}_{x'}, \mathbf{u}_{y'} \rangle}. \quad (3.41)$$

Portanto, determina-se  $\mathbf{u}_{z'} \cdot \mathbf{u}_z$  por

$$\mathbf{u}_{z'} \cdot \mathbf{u}_z = \sqrt{1 - \cos^2 \langle \mathbf{u}_{x'}, \mathbf{u}_{z'} \rangle - (\mathbf{u}_{z'} \cdot \mathbf{u}_y)^2}. \quad (3.42)$$

Desse modo, com a determinação de todos os produtos escalares, pode-se ortogonalizar os eixos de cada sistema, através da matriz  $\mathbf{O}$  de mudança de base

$$\mathbf{O} = \begin{bmatrix} 1 & \cos \langle \mathbf{u}_{x'}, \mathbf{u}_{y'} \rangle & \cos \langle \mathbf{u}_{z'}, \mathbf{u}_{x'} \rangle \\ 0 & \sin \langle \mathbf{u}_{x'}, \mathbf{u}_{y'} \rangle & \mathbf{u}_{z'} \cdot \mathbf{u}_y \\ 0 & 0 & \sqrt{\mathbf{u}_{z'} \cdot \mathbf{u}_z} \end{bmatrix}. \quad (3.43)$$

Assim, para obter o sistema de coordenadas ortogonais, multiplica-se a matriz  $\mathbf{O}$  pelos eixos não-ortogonais do anemômetro.

Como discutido anteriormente, com a estrutura de tetraedro da figura 3.5, tem-se até quatro sistemas não-ortogonais, ou seja,  $S_n(T_1/T_2, T_1/T_3, T_1/T_4)$ ,  $S_n(T_2/T_1, T_2/T_3, T_2/T_4)$ ,  $S_n(T_3/T_1, T_3/T_2, T_3/T_4)$  e  $S_n(T_4/T_1, T_4/T_2, T_4/T_3)$ . Esses sistemas não estão alinhados conforme a orientação dos eixos cartesianos  $x$ ,  $y$  e  $z$ . Desse modo, para a medição correta da direção do vento, é necessário rotacionar os eixos de cada sistema. O processo de rotação do sistema é obtido através da multiplicação das coordenadas por uma matriz de rotação, representada por uma sequência de ângulos de Euler. A matriz de rotação  $\mathbf{R}$  em 3 dimensões é calculada por

$$\mathbf{R} = \mathbf{R}_x \mathbf{R}_y \mathbf{R}_z, \quad (3.44)$$

onde

$$\mathbf{R}_x = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \xi & \sin \xi \\ 0 & -\sin \xi & \cos \xi \end{bmatrix}, \quad (3.45)$$

é a matriz de rotação em torno do eixo  $x$  e  $\xi$  é o ângulo a ser rotacionado no sentido horário,

$$\mathbf{R}_y = \begin{bmatrix} \cos \varsigma & 0 & -\sin \varsigma \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin \varsigma & 0 & \cos \varsigma \end{bmatrix}, \quad (3.46)$$

é a matriz de rotação em torno do eixo  $y$  e  $\varsigma$  é o ângulo a ser rotacionado no sentido horário, e

$$\mathbf{R}_z = \begin{bmatrix} \cos \psi & \sin \psi & 0 \\ -\sin \psi & \cos \psi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad (3.47)$$

é a matriz de rotação em torno do eixo  $z$  e  $\psi$  é o ângulo a ser rotacionado no sentido horário.

Considerou-se o  $S_1$  como o sistema de origem no transdutor  $T_1$ . Assim,  $S_1$  pode ser representado por  $S_o(T_1/T_2, T_1/T_3, T_1/T_4)$ . Esse sistema foi rotacionado sobre o eixo  $x$  (coincidente com o eixo formado pelos transdutores  $T_1$  e  $T_2$ ) até que o eixo formado pelos transdutores  $T_1$  e  $T_3$  coincidissem com o eixo  $y$ . Para isso, é necessário os ângulos de rotação  $\xi = 2\pi - \varrho$ ,  $\varsigma = 0$  e  $\psi = 0$ . Desse modo, a matriz de rotação do sistema  $S_1$  é dada por

$$\mathbf{R}_{S_1} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \varrho & -\sin \varrho \\ 0 & \sin \varrho & \cos \varrho \end{bmatrix}. \quad (3.48)$$

O sistema  $S_2$ , com origem no transdutor  $T_2$ , é representado por  $S_o(T_2/T_1, T_2/T_3, T_2/T_4)$ . Esse sistema foi rotacionado até coincidir com o sistema de referência ( $x, y$  e  $z$ ). Os ângulos de rotação são  $\xi = \varrho$ ,  $\varsigma = 0$  e  $\psi = \pi$ . Assim, tem-se a matriz de rotação dada por

$$\mathbf{R}_{S_2} = \begin{bmatrix} -1 & 0 & 0 \\ 0 & -\cos \varrho & \sin \varrho \\ 0 & \sin \varrho & \cos \varrho \end{bmatrix}. \quad (3.49)$$

O sistema  $S_3$  com origem no transdutor  $T_3$  foi rotacionado até coincidir com o sistema de referência ( $x, y$  e  $z$ ). Esse sistema é representado por  $S_o(T_3/T_1, T_3/T_2, T_3/T_4)$ . Os ângulos de rotação são  $\xi = \pi$ ,  $\varsigma = 2\pi - \varrho$  e  $\psi = 3\frac{\pi}{2}$ . Assim, tem-se a matriz de rotação

$$\mathbf{R}_{S_3} = \begin{bmatrix} 0 & -\cos \varrho & \sin \varrho \\ -1 & 0 & 0 \\ 0 & -\sin \varrho & -\cos \varrho \end{bmatrix}. \quad (3.50)$$

E por último, para o sistema  $S_4$  com origem no transdutor  $T_4$ , é representado por  $S_o(T_4/T_1, T_4/T_3, T_4/T_2)$ . Esse sistema também foi rotacionado até coincidir com o sistema de referência ( $x, y$  e  $z$ ). Os ângulos de rotação são  $\xi = 0$ ,  $\varsigma = \pi - \varrho$  e  $\psi = 3\frac{\pi}{2}$ . Assim, tem-se a matriz de rotação

$$\mathbf{R}_{S_4} = \begin{bmatrix} 0 & \cos \varrho & -\sin \varrho \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & -\sin \varrho & -\cos \varrho \end{bmatrix}. \quad (3.51)$$

Como visto, para se obter a velocidade do vento através do anemômetro 3D, é necessário: a) medir os tempos de trânsito nos eixos do tetraedro; b) com o auxílio da equação (3.11), determinar as projeções ortogonais do vetor velocidade em cada eixo; c) através das projeções ortogonais, calcular as projeções paralelas; d) realizar a ortogonalização através da matriz  $\mathbf{O}$  (equação (3.43)); e) rotacionar cada sistema obtido através das respectivas matrizes de rotação (equações (3.48), (3.49), (3.50) e (3.51)); f) calcular a velocidade resultante de cada sistema; g) determinar uma velocidade de vento final através da média das velocidades dos quatro sistemas para diminuir a incerteza do anemômetro.

### 3.3 Resultados Experimentais

Na análise do anemômetro proposto, foram realizados ensaios com dados reais e simulados. Ambos os ensaios são descritos a seguir.

#### 3.3.1 Resultados com Anemômetro Simulado

Pelo método proposto, para medição da velocidade 3D, são utilizadas a equação (3.11) e a matriz  $\mathbf{O}$  definida pela equação (3.43). Nessas equações, são utilizados os ângulos e o comprimento das arestas da estrutura em formato de tetraedro que suporta os transdutores de ultra-som. Assim, a exatidão das medições depende da precisão da construção dessa estrutura. Contudo, na prática, imprecisões podem ser cometidas na construção de tal estrutura. Nesta seção, deseja-se analisar como tais imprecisões influenciam no valor final da leitura. Para isto, foi construído um modelo do tetraedro no aplicativo MATLAB. Neste modelo, é possível

inserir erros em alguns ângulos e arestas. Evidentemente, a alteração de um ângulo ou uma dimensão altera toda estrutura do tetraedro, e, conseqüentemente, provocam erros de diferentes magnitudes em cada um dos sistemas de coordenadas.

Cada ensaio do experimento foi dividido nos passos a seguir.

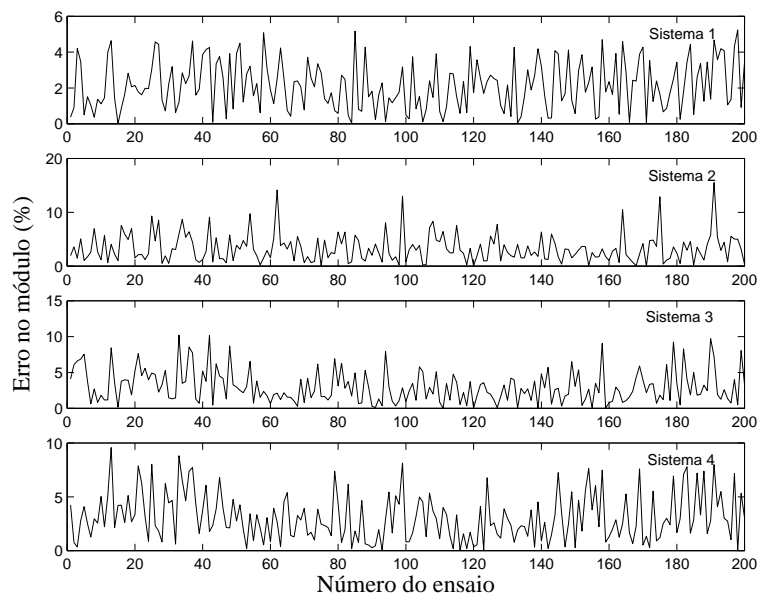
- a) Considerando que os ângulos entre os transdutores do anemômetro 3D possuam  $60^\circ$ , calculou-se a matriz  $\mathbf{O}$  dada pela equação (3.43);
- b) No modelo 3D do anemômetro, inseriu-se um erro em 3 arestas e dois ângulos da estrutura e calculou-se todas os demais ângulos e arestas;
- c) Com os ângulos e arestas calculados no item anterior, montou-se uma matriz  $\hat{\mathbf{O}}$  dada por (3.43);
- d) Aleatoriamente, escolheu-se o tempo de trânsito (em ambos os sentidos) de cada um dos eixos do tetraedro;
- e) Com os tempos de trânsitos calculados no item anterior e considerando  $d = 11$  cm (distância entre os sensores da estrutura do anemômetro 3D), através da equação (3.11), calcula-se as projeções ortogonais de  $\mathbf{v}_V$  em cada um dos eixos do anemômetro;
- f) Com as projeções ortogonais e o auxílio da equação (3.14), obtém-se  $\mathbf{v}_V$  em cada um dos 4 sistemas de coordenadas não-ortogonais do tetraedro;
- g) Com a matriz  $\mathbf{O}$ , ortogonaliza-se as coordenadas de  $\mathbf{v}_V$  em todos os 4 sistemas de coordenadas;
- h) Com as matrizes de  $\mathbf{R}_{S_1}$  a  $\mathbf{R}_{S_4}$ , rotaciona-se as coordenadas calculadas no item anterior para que todas estejam no mesmo sistema ortogonal de referência;
- i) Com as distâncias entre os sensores calculadas no item b) e os tempos de trânsitos do item d), através da equação (3.11), calcula-se as projeções ortogonais de  $\mathbf{v}_V$  em cada um dos eixos do anemômetro;
- j) Com as projeções ortogonais do item anterior, repete-se os itens de f) ao h).

Em cada ensaio, o erro inserido nas aresta e nos ângulos do tetraedro seguiu distribuições gaussianas de média zero. O desvio padrão de tais distribuições foi feito igual a 0,55 cm (5% de 11 cm) e a  $3^\circ$  para as arestas e para os ângulos, respectivamente. Os tempos obtidos aleatoriamente permitiram uma faixa dinâmica de 0,5 a 20 m/s.

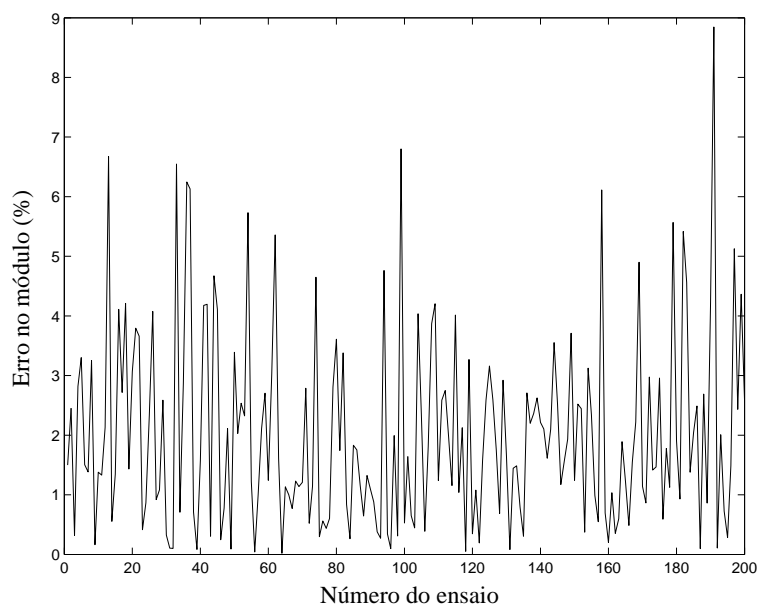
As coordenadas cartesianas obtidas no ensaio anterior foram convertidas para coordenadas polares, ou seja, o vetor velocidade foi dado pelo módulo e orientação azimutal e zenital. Buscando analisar a inserção de erros na estrutura do tetraedro, verificou-se primeiramente o erro no módulo do vetor velocidade em cada sistemas através do ensaio descrito anteriormente. Foram realizados 200 ensaios.

Na figura 3.7, são apresentados os gráficos dos erros de módulo do vetor velocidade em cada sistema de coordenadas versus o número do ensaio. Para confirmar que através da redundância dos quatro sistemas é possível aumentar a precisão das medições, calculou-se novos erros em relação a média da velocidade dos quatro sistemas. Este resultado pode ser visualizado na figura 3.8. Analisando a figura 3.7 e 3.8, pode-se observar que o erro na

construção do anemômetro interfere diferentemente para os casos de um sistema de coordenadas isolado e quatro sistemas de coordenadas. Foi empregado o cálculo da mediana dos duzentos erros adquiridos em cada sistema de coordenadas. Além disso, realizou-se também a mediana dos erros encontrados na figura 3.8. Tais medianas encontram-se na tabela 3.1. O resultado desta simulação demonstrou um desvio padrão entre a velocidade calculada para uma estrutura perfeita e as velocidades obtidas no  $S_1$ ,  $S_2$ ,  $S_3$  e  $S_4$  dos ensaios de 0,2177, 0,3134, 0,3104, 0,3225 respectivamente. Além disso, esta simulação demonstrou também um desvio padrão entre a velocidade calculada para uma estrutura perfeita e a velocidade obtida através da média dos quatro sistemas de 0,2080. Desse modo, através da tabela 3.1 e dos desvios padrões calculados, pode-se confirmar que, com a utilização dos quatro sistemas para mensurar a velocidade do vento, o erro final é menor. Assim, para erros de até 5% nas arestas e erros com variação máxima de  $3^\circ$  nos ângulos, é possível obter um erro médio de 1,6% no módulo da velocidade.



**Figura 3.7** – Erro no módulo do vetor velocidade em cada um dos sistemas de coordenadas do anemômetro 3D.

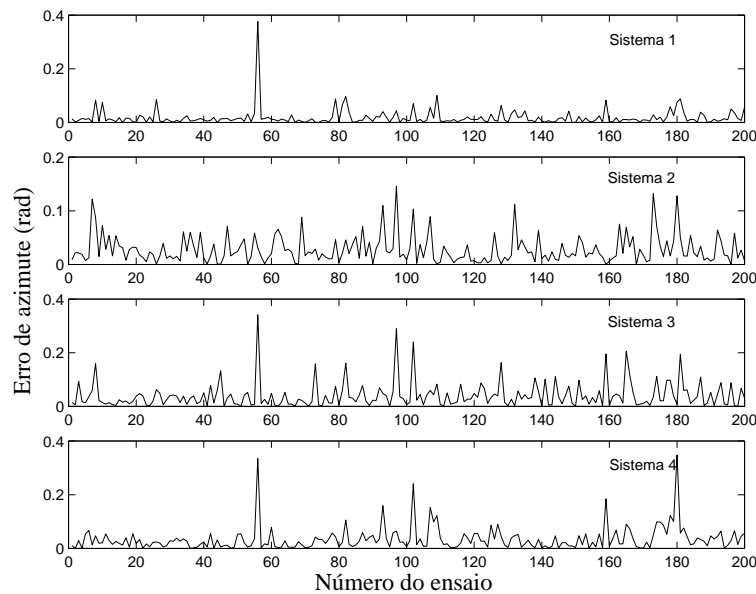


**Figura 3.8** – Erro no módulo do vetor velocidade em relação a média dos quatro sistemas de coordenadas do anemômetro 3D.

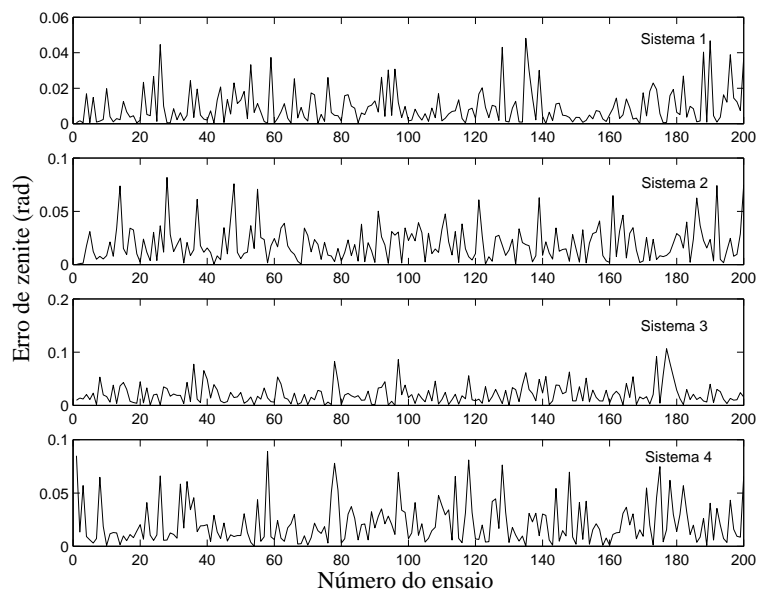
Origem	Mediana dos erros (%)
$S_1$	1,9656
$S_2$	2,7845
$S_3$	2,5116
$S_4$	2,6814
Média	1,6076

**Tabela 3.1** – Tabela com a mediana dos erros de módulo obtida em  $S_1$ ,  $S_2$ ,  $S_3$ ,  $S_4$  e em relação a média dos quatro sistemas.

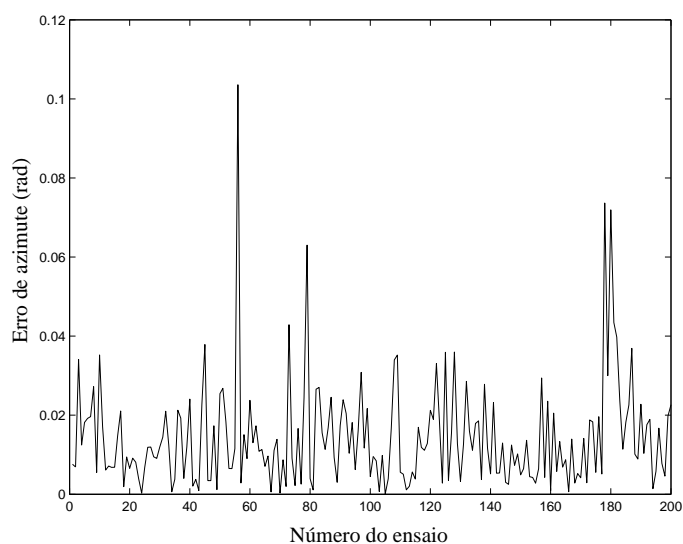
Os erros de cada sistema, na orientação azimutal e na zenital, são observados, respectivamente, nas figuras 3.9 e 3.10. Realizou-se o mesmo procedimento anterior para verificar que, através da redundância dos quatro sistemas, é possível diminuir a influência das imprecisões causadas na construção do anemômetro. Na figura 3.11, pode-se observar o erro de azimute em relação a média da direção azimutal dos quatro sistemas. Enquanto na figura 3.12, tem-se o erro de zenite em relação a média da direção zenital. Nas tabelas 3.2 e 3.3, encontram-se respectivamente, os valores da mediana dos erros de azimute e de zenite encontrados nas figuras 3.9, 3.10, 3.11 e 3.12. É possível, visualmente, confirmar que, para o caso da direção azimutal e zenital os erros calculados em relação a média das direções dos quatro sistemas apresentam uma queda se comparados com os erros das figuras 3.9 e 3.10. Esta confirmação também é afirmada através da mediana das tabelas 3.2 e 3.3. Desse modo, considerando a incerteza na construção do anemômetro, é possível obter erros médios de 0,0104 rad na direção azimutal e 0,0059 rad na direção zenital, os quais são irrelevantes para o uso proposto.



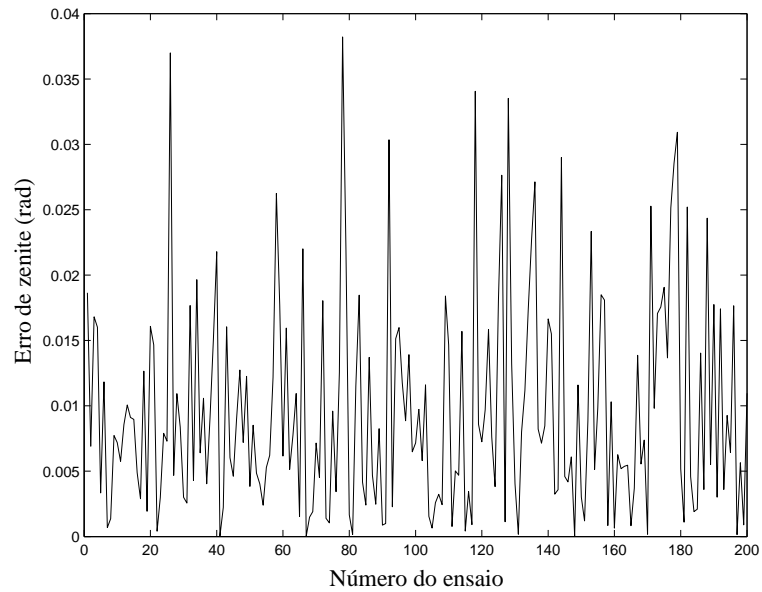
**Figura 3.9** – Erro de azimute em cada um dos sistemas de coordenadas do anemômetro 3D.



**Figura 3.10** – Erro de zenite em cada um dos sistemas de coordenadas do anemômetro 3D.



**Figura 3.11** – Erro em relação a média de azimuth dos quatro sistemas de coordenadas do anemômetro 3D.



**Figura 3.12** – Erro em relação a média de zenite dos quatro sistemas de coordenadas do anemômetro 3D.

Origem	Mediana dos erros (rad)
$S_1$	0,0114
$S_2$	0,0198
$S_3$	0,0267
$S_4$	0,0234
Média	0,0104

**Tabela 3.2** – Tabela com a mediana dos erros de azimute obtida em  $S_1$ ,  $S_2$ ,  $S_3$ ,  $S_4$  e em relação a média dos quatro sistemas.

Origem	Mediana dos erros (rad)
$S_1$	0,0061
$S_2$	0,0141
$S_3$	0,0134
$S_4$	0,0151
Média	0,0059

**Tabela 3.3** – Tabela com mediana dos erros de zenite obtida em  $S_1$ ,  $S_2$ ,  $S_3$ ,  $S_4$  e em relação a média dos quatro sistemas.

O desvio padrão encontrado entre a direção azimutal, dada pela estrutura perfeita, e a direção azimutal, dada pela estrutura com erros, no  $S_1$ ,  $S_2$ ,  $S_3$  e  $S_4$  foi de 0,0220, 0,0354, 0,0550 e 0,0438 respectivamente. Os valores da direção azimutal, calculados com base na média das direções, tiveram um desvio padrão de 0,0163. Na direção zenital, o desvio padrão nos  $S_1$ ,  $S_2$ ,  $S_3$  e  $S_4$  foi de respectivamente, 0,0144, 0,0240, 0,0258 e 0,0273. Enquanto que o desvio padrão percebido na média das direções zenital foi de 0,0118. Percebe-se que em ambas as direções, o desvio padrão foi menor na média das direções do que em qualquer um dos sistemas. Portanto, com a utilização de quatro sistemas é possível diminuir os erros de módulo e direção do vetor velocidade.

### 3.3.2 Resultados com Anemômetro Real

Uma foto do protótipo do anemômetro construído é apresentada na figura 3.13. Em tal protótipo, a distância entre os transdutores é de 11 cm. Os transdutores, escolhidos para construção do anemômetro oscilam na frequência fundamental de 40 kHz e são susceptíveis a intempéries climáticas.

Os testes em laboratório foram realizados para validar a instrumentação proposta pelo método da diferença de tempo. Contudo, a medição foi realizada apenas em um dos eixos do anemômetro, ou seja, considerou-se apenas o par  $T_1$  e  $T_2$ , pois os ensaios estavam limitados devido a falta de equipamentos apropriados, como um anemômetro comercial para calibração do sensor e um túnel de vento adequado. Além disso, encontrou-se dificuldades em realizar testes ao ar livre, pois os transdutores disponíveis para serem utilizados no protótipo estavam susceptíveis a intempéries climáticas. O anemômetro foi instalado em um ambiente fechado, no qual o vento foi considerado nulo. Desse modo, o anemômetro estava sujeito somente a influência da velocidade do som, o que possibilitou a estimativa do  $t_E$ .



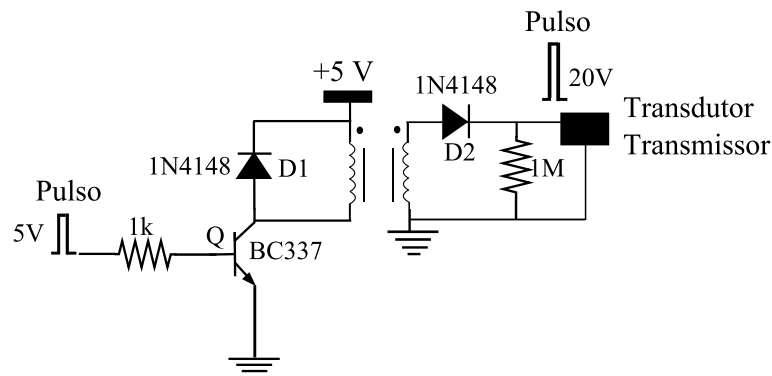
**Figura 3.13** – Protótipo do Anemômetro 3D.

O transdutor de ultra-som pode ser excitado com um sinal contínuo, um trem de pulsos ou ainda um único pulso. Quando excitado, o transdutor começa a oscilar na sua frequência natural, propagando a onda de ultra-som no ar.

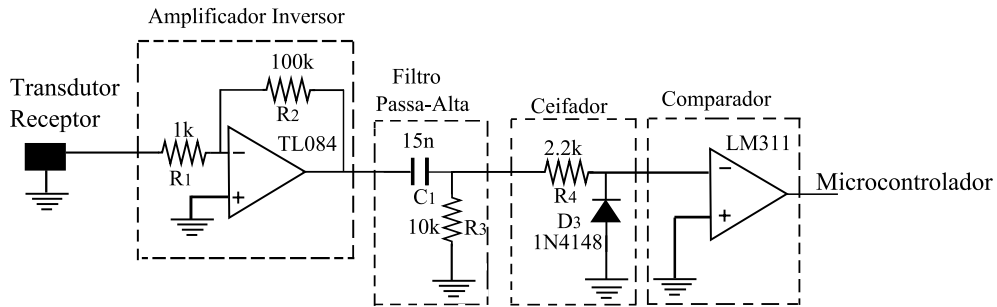
Para excitar o transdutor com um único pulso, é necessário uma tensão relativamente alta. Assim, o circuito da figura 3.14 foi utilizado para obter um pulso de aproximadamente 20 volts. Um pulso é emitido na base do transistor Q e aciona o transformador que, pela relação de espiras, eleva o pulso de 5 volts para 20 volts. Quando o transistor Q não está polarizado, o diodo  $D_1$  fornece um caminho para a corrente circular, evitando a saturação do núcleo do transformador.

Após a excitação, o sinal ultra-sônico percorre o meio até atingir o transdutor receptor. Um modo de tratar e condicionar o sinal de recepção do ultra-som pode ser observado na figura 3.15. A onda de ultra-som recebida, devido a fenômenos como reflexão e perda de energia pelo meio, é de baixa amplitude necessitando de um estágio de amplificação. Nesse estágio é utilizado um amplificador inversor, onde o sinal de ultra-som recebido é amplificado por um ganho de  $A_v \approx -100$ , que pode ser ajustado conforme a relação dos resistores  $R_1$  e  $R_2$  ( $A_v = -R_2/R_1$ ). Em seguida, o sinal amplificado é submetido a um filtro passa-alta, ou seja, é um filtro que permite a passagem de altas frequências e atenua as amplitudes dos sinais de baixas frequências. Através da constante de tempo ( $R_3 \times C_1$ ), é possível definir a frequência de corte do filtro. No filtro implementado, a frequência de corte escolhida foi de 1 kHz, de maneira que ruídos com frequência de 60 Hz possam ser atenuados. O circuito ceifador foi implementado com o objetivo de retirar a parte negativa do sinal de ultra-som, ou seja, quando a tensão do sinal de ultra-som for negativa, o diodo  $D_3$  conduz, alterando a tensão da entrada inversora para -0,7 V. Por último, o sinal é submetido a um comparador, onde é realizada a comparação do sinal de ultra-som na entrada inversora com o sinal de 0 V. Quando a tensão da entrada não-inversora (0 V) é superior a tensão da entrada inversora, o comparador produzirá uma saída de 5 V. Caso, ocorra o contrário, a tensão de saída do comparador será 0 V. Assim, enquanto o sinal de ultra-som não é detectado, a saída do comparador permanecerá em 5 V. No instante de detecção da onda de ultra-som, a saída do comparador é alterada para 0 V.

O microcontrolador utilizado foi o PIC18F4550. Esse microcontrolador pertence à família 18 da *Microchip* e pode trabalhar com uma frequência de até 48 MHz e tensão de operação a partir de 2 V até 5,5 V. Além disso, possui 13 entradas para conversão analógico/digital como uma resolução de 10 bits.



**Figura 3.14** – Diagrama esquemático do circuito para excitação do transdutor de ultra-som.



**Figura 3.15** – Diagrama esquemático do circuito para condicionar o sinal de recepção do ultra-som.

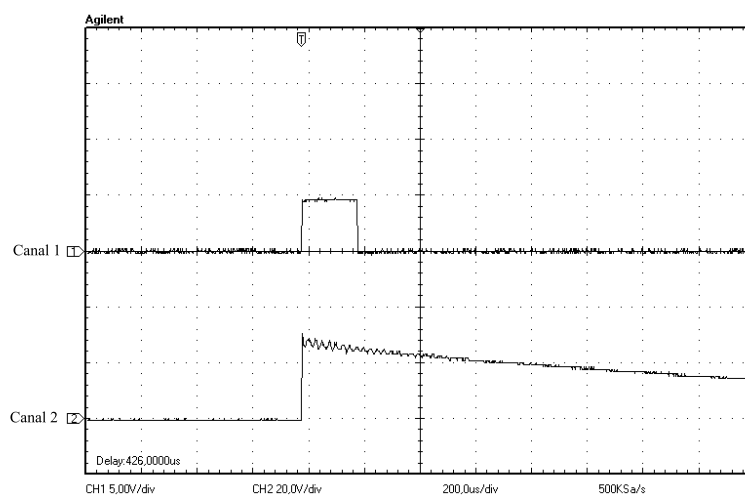
O pulso emitido no transistor Q (figura 3.14) é gerado pelo microcontrolador PIC18F4550 com duração de  $200\mu\text{s}$  e amplitude de 5 V. Para determinar o tempo de chegada da onda de ultra-som, foi utilizado o temporizador interno do PIC18F4550. Tal temporizador é de 16 bits e possui uma resolução de aproximadamente 83,33 ns.

Para medir o tempo de detecção da onda de ultra-som, é necessário armazenar o valor do temporizador interno do PIC18F4550 no instante em que é emitido um pulso 5 V. Além disso, o microcontrolador também deve ser responsável por monitorar o instante da chegada do pulso emitido (instante da alteração da saída do comparador para 0 V) através da entrada de captura do PIC18F4550. Quando isso acontece, é armazenado novamente o valor do temporizador. A partir desses valores, é possível calcular o tempo de chegada da onda de ultra-som. Infelizmente, o PIC18F4550 possui apenas uma entrada de captura, inviabilizando ainda mais a implementação para os quatro transdutores.

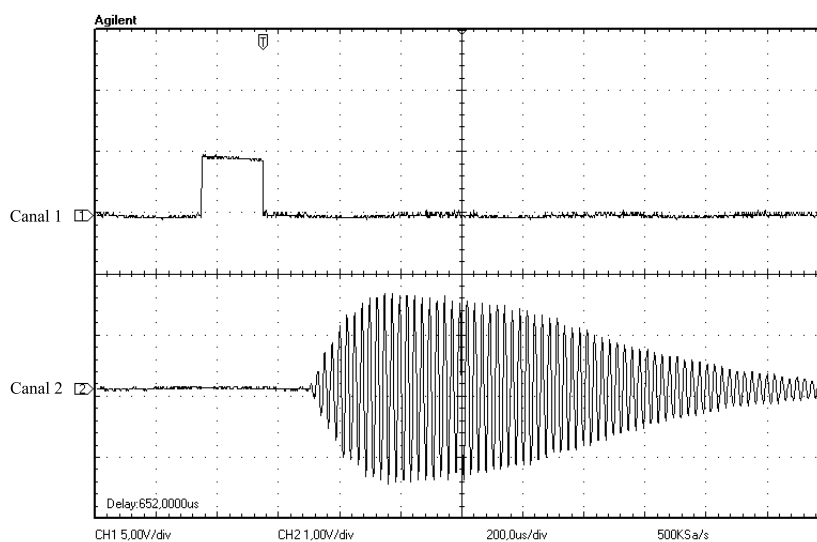
Implementou-se o circuito da figura 3.14 para o transdutor  $T_1$ . Na figura 3.16, tem-se o pulso de 5 V gerado pelo PIC18F4550 e o pulso de excitação, com um pico de aproximadamente 20 V, para  $T_1$ .

O circuito da figura 3.15 foi montado para o transdutor  $T_2$ . Assim, após a excitação de  $T_1$ , este envia o sinal de ultra-som para  $T_2$ . Na figura 3.17, pode-se observar o pulso de acionamento do transistor Q e o sinal de ultra-som recebido por  $T_2$  com o estágio de ganho. Nesta figura, também percebe-se o tempo de trânsito  $t_{12}$ , ou seja, o tempo que a onda de ultra-som leva para ser recebida.

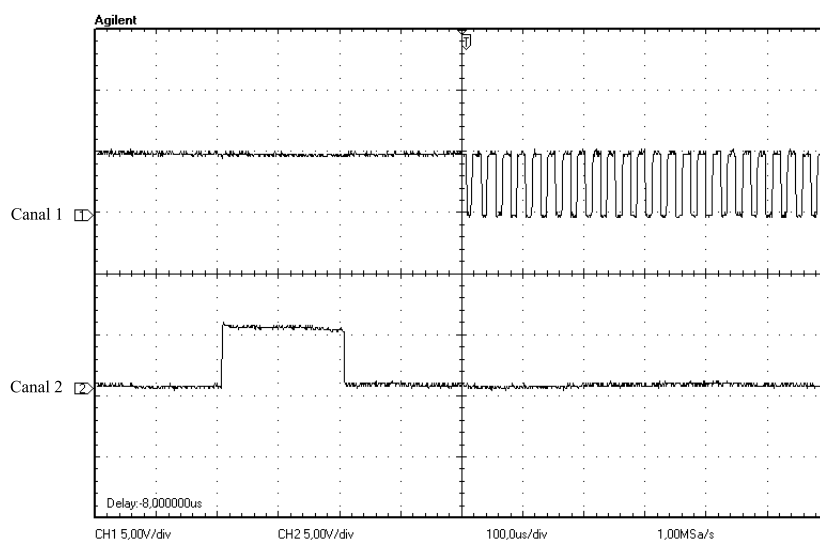
Na figura 3.18, apresenta-se a forma de onda medida na saída do circuito comparador da figura 3.15 e o instante do envio do pulso de excitação. Através dessa figura, pode-se confirmar a mudança de estado para 0 V na saída do comparador no instante de detecção da onda.



**Figura 3.16** – Pulso gerado pelo PIC18F4550 (canal 1) e pulso de excitação para  $T_1$  (canal 2).



**Figura 3.17** – Pulso gerado pelo PIC18F4550 (canal 1) e sinal de ultra-som recebido por  $T_2$  (canal 2).

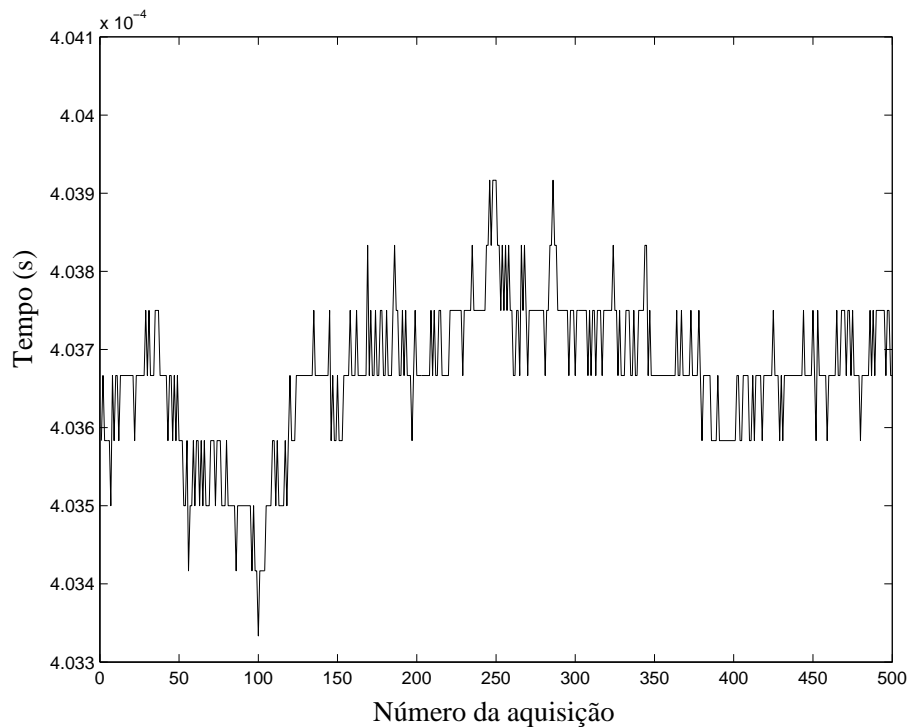


**Figura 3.18** – Saída do comparador inversor (canal 1) e pulso gerado pelo PIC18F4550 (canal 2).

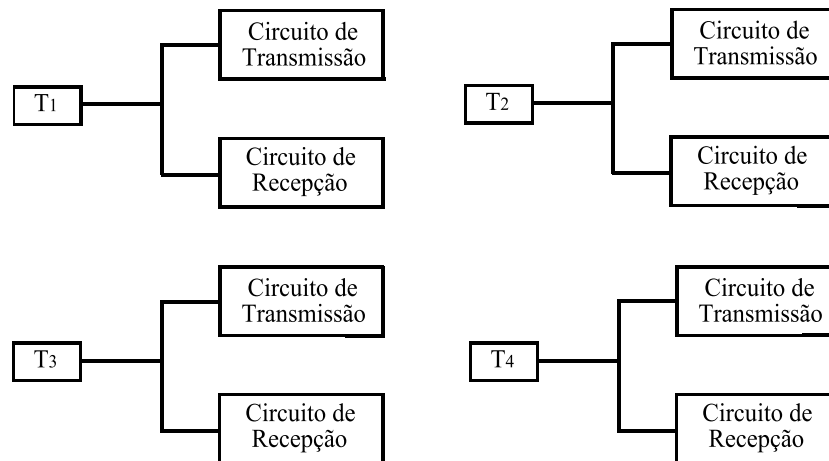
Foram adquiridas 500 medidas do tempo de trânsito da onda de ultra-som de  $T_1$  para  $T_2$ , que podem ser visualizadas no gráfico da figura 3.19. Nesta figura, observa-se a variação dos valores de tempo medidos. Calculando a média e o desvio padrão de tais valores, obteve-se, respectivamente, os seguintes valores  $403,67\mu\text{s}$  e  $9,0067 \times 10^{-8}$ . Assim, considerando que o ruído presente na medição segue uma distribuição normal, pode-se afirmar que a probabilidade dos tempos medidos serem encontrados no intervalo de  $403,39\mu\text{s}$  a  $403,94\mu\text{s}$  é 99,73%. A partir desse intervalo e da determinação do  $t_E$ , é possível estimar a incerteza do anemômetro.

Como visto, o  $t_E$  pode ser determinado através da equação (3.10). Desse modo, para aferir a  $v_S$ , foi necessário medir a temperatura do ambiente. Para uma maior precisão nas medidas, utilizou-se dois termômetros. Em um dos termômetros a temperatura aferida foi de  $24^\circ\text{C}$ , enquanto no outro foi de  $25^\circ\text{C}$ . Assim, considerou-se a média das temperaturas medidas, ou seja,  $24,5^\circ\text{C}$ . Sabe-se que nestas medições a velocidade de vento era nula. Assim, através da equação (3.9), calculou-se um  $v_S$  de  $345,80$  m/s. O tempo de atraso eletrônico determinado pela equação (3.10) foi de  $8,557 \times 10^{-5}$ s. Considerando o intervalo de tempo de trânsito, definido pela distribuição normal, e o  $t_E$  calculado, pode-se estimar uma incerteza na medida da velocidade de até  $0,3$  m/s. Percebe-se, portanto, que para aplicação desejada a incerteza apresentada pelo anemômetro não é significativa.

Sabe-se que, para medir a velocidade do vento através do método da diferença de tempo, é necessário configurar os transdutores como transmissores ou receptores. Desse modo, para o anemômetro ultra-sônico proposto, pode-se utilizar do diagrama da figura 3.20. Neste diagrama, tem-se quatro circuitos transmissores da figura 3.14, para excitar os transdutores, e quatro circuitos receptores da figura 3.15, para tratar e condicionar a recepção da onda de ultra-som. Cada transdutor deve ser conectado a um circuito transmissor e a um circuito receptor. Desse modo, o transdutor poderá operar como transmissor ou receptor.



**Figura 3.19** – Gráfico das 500 medidas de tempo de trânsito do sinal ultra-sônico de  $T_1$  para  $T_2$ .



**Figura 3.20** – Diagrama esquemático para medição da velocidade do vento utilizando os quatro transdutores do anemômetro 3D.

Conforme a distância a ser percorrida pela onda de ultra-som, variações na temperatura e na umidade do ar podem modificar  $t_E$ , pois a magnitude do sinal de ultra-som transmitido pode ser influenciada pelas condições atmosféricas. Contudo, no anemômetro proposto, a atenuação do sinal de ultra-som, devido ao meio, pode ser considerada desprezível, pois a distância entre os transdutores é irrelevante.

### 3.4 Conclusões

O vento é um fator importante para agricultura, podendo afetar desde a germinação até a maturação da planta. Por exemplo, a velocidade do vento pode definir o momento propício para realizar o controle químico, trazendo benefícios tanto para os agricultores quanto para os consumidores. Dentre tais benefícios, pode-se citar a utilização racional de fungicidas, a produção de alimentos mais saudáveis, a otimização da produção, a redução dos custos de produção e a diminuição da poluição do ambiente.

Neste trabalho, apresentou o projeto, a implementação e testes em um anemômetro 3D baseado em ultra-som. Tal anemômetro, com o arranjo 3D proposto, é de utilidade para medir a velocidade e direção vertical e horizontal do vento. Através dessas medidas, é possível tomar decisões para auxiliar o controle de epidemias de doenças em plantas. Além disso, o anemômetro ultra-sônico é mais robusto e confiável se comparado com os anemômetros de peças móveis, já que pode operar em qualquer meio físico.

Foram realizadas simulações para o anemômetro proposto. A partir dos resultados das simulações, pode-se concluir que, através da estrutura em formato de tetraedro, foi possível obter quatro sistemas de coordenadas diferentes. Nesta simulação, observou-se também que a variação do erro na estimativa da velocidade do vento interfere diferentemente para o caso de se considerar um sistema isolado ou quatro sistemas de coordenadas. Considerando erros na construção do anemômetro de até 5% nas arestas e uma variação máxima de  $3^\circ$  nos ângulos, foram observados erros médios de 0,0104 rad, 0,0059 rad e 1,6%, respectivamente, na direção azimutal, direção zenital e no módulo do vetor velocidade. Portanto, percebe-

se que a vantagem de medir a velocidade do vento em quatro sistemas de coordenadas é a redundância dos dados, aumentando a precisão do instrumento.

Os experimentos práticos realizados estavam limitados aos equipamentos disponíveis. Contudo, foi possível estimar o  $t_E$  com o auxílio do método da diferença de tempo. Considerando-se as diversas medidas de tempo de trânsito, chegou-se a uma precisão grande para o projeto proposto, pois o erro encontrado foi no máximo de 0,3 m/s nas velocidades medidas.

## Referências

- CHANDE, P. K., PAI, K. R., e RATHORE, T. S. (2008). Processing of ultrasonic echo envelopes for object location with nearby receivers. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 57:2751–2755.
- EGANÃ, A., SECO, F., e CERES, R. (1985). A microprocessor-based ultrasonic flow-velocity measurement system. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 34:456–458.
- HALLYDAY, R. W. (2002). *Fundamentos de Física 2, Gravitação, Ondas e Termodinâmica*. Livros Técnicos e Científicos Editora S.A, Rio de Janeiro.
- HAN, D., KIM, S., e PARK, S. (2008). Two-dimensional ultrasonic anemometer using the directivity angle of an ultrasonic sensor. *Microelectronics Journal*, 39:1195–1199.
- HUANG, A. N., HUANG, C. F., LI, Y. C., e YOUNG, M. S. (2002). High precision, fast ultrasonic thermometer based on measurement of speed of sound in air. *Scientific Instruments*, 7(11):4022–4027.
- KALACHE, L. (2007). Sistema de medição da espessura da camada muscular e adiposa via ultra-som. Dissertação de Mestrado, Centro Universitário Positivo.
- OTTONI, G. e LAGES, W. (2003). Navegação de robôs móveis em ambientes desconhecidos utilizando sonares de ultra-som. *Revista Controle & Automação*, 17(4):402–411.
- PEREIRA, R. V. (2007). Sensores e transdutores para um sistema automático de aquisição de dados agrometeorológicos. Dissertação de Mestrado, Universidade Estadual de Londrina.
- QUARANTA, A. A., APRILESI, G. C., CICCIO, G. D., e TARONIA, A. (1985). A microprocessor based, three axes, ultrasonic anemometer. *Scientific Instruments*.
- VICENTE, M. A. F. (1997). Estimação dos erros de uma máquina estacionária de medição de coordenadas. Dissertação de Mestrado, Universidade de Coimbra.

---

# Conclusão

---

O vento é uma variável ambiental importante para a produtividade vegetal e, portanto, a medição desta variável é de grande valia, principalmente para a agricultura. O anemômetro 3D baseado em ultra-som proposto poderá ajudar na aplicação de defensivos agrícolas, além de colaborar com a diminuição das perdas no cultivo.

A medição da direção e a velocidade do vento, através do anemômetro ultra-sônico, possui vários benefícios sobre os anemômetros convencionais. Dentre estes, a inexistência de peças móveis e a não necessidade da utilização da biruta juntamente com o anemômetro. A configuração 3D pode ser mais vantajosa que a configuração 2D, pois tal configuração pode medir as condições verticais do vento. Além disso, a configuração 3D utilizada possui vantagens em relação a configuração 3D comercial. Entre elas, pode-se citar, a utilização de apenas quatro transdutores, enquanto o transdutor comercial utiliza seis. Além disso, há redundância na medição dos dados, pois sua configuração possui seis eixos, enquanto o arranjo comercial possui três.

Neste trabalho, foram descritos os principais anemômetros e os diferentes métodos para medir a velocidade do vento através do anemômetro ultra-sônico. O método *Doppler* possui uma relação direta com o deslocamento de frequência e a velocidade do vento. Contudo, é necessário a existência de sólidos em suspensão.

No trabalho de PEREIRA (2007), a dificuldade em medir a velocidade do vento pelo método da diferença de fase é a limitação da faixa de velocidade. Neste método, o valor de  $n$  estimado para uma velocidade de vento zero é válido somente para uma determinada faixa de temperatura, pois a velocidade do som é variável com a temperatura. Além disso, a máxima diferença de fase detectada no trabalho de PEREIRA (2007) era de  $180^\circ$ . Assim, caso a diferença de fase ultrapasse  $180^\circ$ , tem-se como consequência uma velocidade mensurada com erros significativos.

O método que se mostrou mais favorável para o anemômetro baseado em ultra-som foi o método da diferença de tempo. Tal método consiste em medir a velocidade do vento através do tempo que a onda de ultra-som leva para ser recebida após emitida. A vantagem de se utilizar esse método é a faixa de medição ilimitada da velocidade. Neste método, verificou-se que o de tempo de atraso eletrônico é a principal grandeza que influencia na medição da velocidade do vento.

Atualmente, Tiago Polizer da Silva, aluno do quinto ano de Engenharia Elétrica da Universidade Estadual de Londrina, está implementando o anemômetro 3D proposto utilizando os quatro transdutores. Nesta implementação, é necessário medir os tempos de trânsito em todos os eixos do tetraedro, calcular a velocidade do vento em cada eixo, ortogonalizar os valores medidos, rotacionar cada sistema obtido para o sistema de referência, calcular a velocidade do vento resultante em cada sistema e por último, determinar a velocidade do vento através da média das velocidades do quatro sistemas. Além disso, é necessário ensaios com um anemômetro comercial para validar a instrumentação desenvolvida no trabalho.

---

 APÊNDICE A
 

---

# Simulação do Anemômetro 3D

---

O algoritmo a seguir foi implementado em MATLAB para construção do modelo da estrutura em formato de tetraedro e para os cálculos dos erros das velocidades em cada sistema.

```

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%Declarção de Variaveis
t_e=8.5e-5; %% Tempo de atraso eletrônico
w=200; %% número de ensaios
phi=asin(sqrt(3)/3);
gama=(pi/2)-phi; %% âng. entre cada aresta do tetraedro e plano oposto
alpha=pi/3; %% âng. entre as arestas do tetraedro
theta=pi/6;
d=0.11; %% comprimento das arestas

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%Cálculo do erro da distância entre T1 e T2
for m=1:1:w,
errodd1=(-5+10*rand)/100;
x12(m)=(d*errodd1)+d;
d12(m)=x12(m);
end
y12=zeros(1,w);
z12=zeros(1,w);

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%Cálculo do erro do ang. entre o eixo 12 e 14
for m=1:1:w,
erroang1=-3+(6*rand);

    ang12_14(m)=alpha+(erroang1*pi)/180;
end

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%Cálculo do erro da distância entre T1 e T4
for m=1:1:w,
errodd2=(-5+10*rand)/100;
d14(m)=(d*errodd2)+d;
x14(m)=d14(m)*cos(ang12_14(m));
y14(m)=d14(m)*sin(ang12_14(m));
z14(m)=0;
end

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%Cálculo da distância entre T2 e T4
for m=1:1:w,

```

```

x24(m)=x14(m)-x12(m);
    y24(m)=y14(m)-y12(m);
    d24(m)=sqrt(x24(m)^2+y24(m)^2);
z24(m)=0;
end

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%Cálculo do erro da distância entre T1 e T3
for m=1:1:w,
    errod3=(-5+10*rand)/100;
    d13(m)=(d*errod3)+d;
end
x13=zeros(1,w);
y13=zeros(1,w);
z13=zeros(1,w);

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%Cálculo do erro do âng. entre o plano e o vetor do eixo 13
for m=1:1:w,
    erroang3=-3+(6*rand);
    angp13_13(m)=gama+(erroang3*pi)/180;
    z13(m)=d13(m)*sin(angp13_13(m));
    p13(m)=d13(m)*cos(angp13_13(m));
end

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%Cálculo do erro do âng. entre o eixo 12 e a projecção do vetor do eixo 13 no plano
for m=1:1:w,
    x13(m)=p13(m)*cos(ang12_14(m)/2);
    y13(m)=p13(m)*sin(ang12_14(m)/2);
end

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%Cálculo da distancia entre T3 e T4
a=zeros(w,3);
b=zeros(w,3);
c=zeros(w,3);
k=zeros(w,3);
p=zeros(w,3);
q=zeros(w,3);
    for m=1:1:w,
a(m,:)=[x13(m), y13(m), z13(m)];
b(m,:)=[x14(m), y14(m), z14(m)];
k(m,:)=[x12(m), y12(m), z12(m)];
c(m,:)=a(m,:)-b(m,:);
    d34(m)=sqrt(c(m,1)^2+c(m,2)^2+c(m,3)^2);
end

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%Cálculo do âng. entre o eixo 13 e 14
for m=1:1:w,
ang13_14(m)=acos((-d34(m))^2+d13(m)^2+d14(m)^2)/(2*d13(m)*d14(m));
end

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%Cálculo da distância entre T2 e T3
f=zeros(w,3);
for l=1:1:w,
    f(l,:)=a(l,:)-k(l,:);
    d23(l)=sqrt(f(l,1)^2+f(l,2)^2+f(l,3)^2);
end

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%Cálculo dos ângulos do tetraedro
for m=1:1:w,
ang12_13(m)=acos((-d23(m))^2+d13(m)^2+d12(m)^2)/(2*d13(m)*d12(m));
ang21_23(m)=acos((-d13(m))^2+d23(m)^2+d12(m)^2)/(2*d23(m)*d12(m));
ang31_32(m)=acos((-d12(m))^2+d23(m)^2+d13(m)^2)/(2*d23(m)*d13(m));

```

```

ang41_43(m)=acos((-d13(m))^2+d14(m)^2+d34(m)^2)/(2*d14(m)*d34(m));
ang31_34(m)=acos((-d14(m))^2+d13(m)^2+d34(m)^2)/(2*d13(m)*d34(m));
ang42_43(m)=acos((-d23(m))^2+d34(m)^2+d24(m)^2)/(2*d34(m)*d24(m));
ang32_34(m)=acos((-d24(m))^2+d34(m)^2+d23(m)^2)/(2*d23(m)*d34(m));
ang24_23(m)=acos((-d34(m))^2+d23(m)^2+d24(m)^2)/(2*d23(m)*d24(m));
ang21_24(m)=acos((-d14(m))^2+d12(m)^2+d24(m)^2)/(2*d12(m)*d24(m));
ang41_42(m)=acos((-d12(m))^2+d14(m)^2+d24(m)^2)/(2*d14(m)*d24(m));
end

%%%%%%%%%%%%Matrizes de rotação
rot1=[1 0 0;0 cos(gama) -sin(gama);0 sin(gama) cos(gama)];
rot2=[-1 0 0;0 -cos(gama) sin(gama);0 sin(gama) cos(gama)];
rot3=[0 -cos(gama) sin(gama); -1 0 0;0 -sin(gama) -cos(gama)];
rot4=[0 cos(gama) -sin(gama);1 0 0;0 -sin(gama) -cos(gama)];

%%%%%%%%%%%%Matriz de ortogonalização
b=1-(cos(alpha))^2-[-(cos(alpha)^2)+cos(alpha)]/sin(alpha)]^2;
h=[1 cos(alpha) cos(alpha); 0 sin(alpha) -(cos(alpha)*cos(alpha))/sin(alpha)
+(cos(alpha))/sin(alpha); 0 0 sqrt(b)];

%%%%%%%%%%%%Matriz de ortogonalização do S1 com erro
h1=zeros(3,3,w);
b1=zeros(1,w);
for m=1:1:w,
b1(m)=1-(cos(ang12_14(m)))^2-[-(cos(ang12_13(m)))*(cos(ang12_14(m)))
+cos(ang13_14(m))]/sin(ang12_13(m))]^2;
h1(:, :, m)=[1 cos(ang12_13(m)) cos(ang12_14(m)); 0 sin(ang12_13(m))
-(cos(ang12_13(m))*cos(ang12_14(m)))/sin(ang12_13(m))+cos(ang13_14(m))/sin(ang12_13(m));
0 0 sqrt(b1(m))];
end

%%%%%%%%%%%%Matriz de ortogonalização do S2 com erro
h2=zeros(3,3,w);
b2=zeros(1,w);
for m=1:1:w,
b2(m)=1-(cos(ang21_23(m)))^2-[-(cos(ang21_24(m)))*(cos(ang21_23(m)))
+cos(ang24_23(m))]/sin(ang21_24(m))]^2;
h2(:, :, m)=[1 cos(ang21_24(m)) cos(ang21_23(m)); 0 sin(ang21_24(m))
-(cos(ang21_24(m))*cos(ang21_23(m)))/sin(ang21_24(m))+cos(ang24_23(m))/sin(ang21_24(m));
0 0 sqrt(b2(m))];
end

%%%%%%%%%%%%Matriz de ortogonalização do S3 com erro
h3=zeros(3,3,w);
b3=zeros(1,w);
for m=1:1:w,
b3(m)=1-(cos(ang32_34(m)))^2-[-(cos(ang31_34(m)))*(cos(ang32_34(m)))
+cos(ang31_32(m))]/sin(ang31_34(m))]^2;
h3(:, :, m)=[1 cos(ang31_34(m)) cos(ang32_34(m)); 0 sin(ang31_34(m))
-(cos(ang31_34(m))*cos(ang32_34(m)))/sin(ang31_34(m))+cos(ang31_32(m))/sin(ang31_34(m));
0 0 sqrt(b3(m))];
end

%%%%%%%%%%%%Matriz de ortogonalização do S4 com erro
h4=zeros(3,3,w);
b4=zeros(1,w);
for m=1:1:w,
b4(m)=1-(cos(ang41_43(m)))^2-[-(cos(ang42_43(m)))*(cos(ang41_43(m)))
+cos(ang41_42(m))]/sin(ang42_43(m))]^2;
h4(:, :, m)=[1 cos(ang42_43(m)) cos(ang41_43(m)); 0 sin(ang42_43(m))
-(cos(ang42_43(m))*cos(ang41_43(m)))/sin(ang42_43(m))+cos(ang41_42(m))/sin(ang42_43(m));
0 0 sqrt(b4(m))];
end

```

```

0 0 sqrt(b4(m));
end

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%Definição dos tempos aleatórios
for k=1:1:w,
t12(k)=(6e-4+4e-4*rand);
t21(k)=(6e-4+4e-4*rand);
t13(k)=(6e-4+4e-4*rand);
t31(k)=(6e-4+4e-4*rand);
t14(k)=(6e-4+4e-4*rand);
t41(k)=(6e-4+4e-4*rand);
t32(k)=(6e-4+4e-4*rand);
t42(k)=(6e-4+4e-4*rand);
t43(k)=(6e-4+4e-4*rand);
end

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%Cálculo da velocidade do S1
v_1=zeros(1,3,w);
o=zeros(1,3,w);
v_r1=zeros(1,3,w);
for m=1:1:w,
v_1(:, :, m)=[(d/2)*(1/(t12(m)-t_e)-1/(t21(m)-t_e));(d/2)*(1/(t13(m)-t_e)-1/(t31(m)-t_e));
(d/2)*(1/(t14(m)-t_e)-1/(t41(m)-t_e))];
v_r1(:, :, m)=h*v_1(:, :, m)';
o(:, :, m)=rot1*v_r1(:, :, m)';
end
ve=zeros(1,1,w); % vetor resultante
dire=zeros(1,1,w); % direção zenital
direx=zeros(1,1,w); % direção azimutal
for m=1:1:w,
ve(m)=sqrt(o(1,1,m)^2+o(1,2,m)^2+o(1,3,m)^2);
dire(m)=acos(sqrt(o(1,1,m)^2+o(1,2,m)^2)/ve(m));
direx(m)=acos(o(1,1,m)/sqrt(o(1,1,m)^2+o(1,2,m)^2));
end

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%Cálculo da velocidade do S1 com erros
v1=zeros(1,3,w);
o1=zeros(1,3,w);
vr1=zeros(1,3,w);
for m=1:1:w,
v1(:, :, m)=[(d/2)*(1/(t12(m)-te1(m))-1/(t21(m)-te1(m)));(d/2)*(1/(t13(m)-te1(m))-1/(t31(m)-te1(m)));
(d/2)*(1/(t14(m)-te1(m))-1/(t41(m)-te1(m)))]];
vr1(:, :, m)=h1*v1(:, :, m)';
o1(:, :, m)=rot1*vr1(:, :, m)';
end
ve1=zeros(1,1,w); %vetor resultante
dire1=zeros(1,1,w); %direção zenital
direx1=zeros(1,1,w); %direção azimutal
for m=1:1:w,
ve1(m)=sqrt(o1(1,1,m)^2+o1(1,2,m)^2+o1(1,3,m)^2);
dire1(m)=acos(sqrt(o1(1,1,m)^2+o1(1,2,m)^2)/ve1(m));
direx1(m)=acos(o1(1,1,m)/sqrt(o1(1,1,m)^2+o1(1,2,m)^2));
end
ev1=zeros(1,w); % Cálculo do erro da Velocidade
for m=1:1:w,
ev1(:, m)=(abs(ve(:, :, m)-ve1(:, :, m)))/ve(:, :, m);
end
ed1=zeros(1,w);

for m=1:1:w,
ed1(:, m)=abs(dire(:, m)-dire1(:, :, m)); %% erro na direção zenital

```

```

    edx(:,m)=abs(direx(:,m)-direx1(:,m)); %% erro na direção azimutal
end
mev1=Mediana(ev1)
mev1*100

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%Cálculo das velocidades nos demais sistemas
vr_2=zeros(1,3,w);
vr_3=zeros(1,3,w);
vr_4=zeros(1,3,w);
for m=1:1:w,
    vr_2(:,m)=inv(h)*(inv(rot2)*o(:,m)');
    vr_3(:,m)=inv(h)*(inv(rot3)*o(:,m)');
    vr_4(:,m)=inv(h)*(inv(rot4)*o(:,m)');
end
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%Cálculo dos tempos nos demais sistemas
for k=1:1:w,
    a_23(k)=(vr_2(1,2,k))/(d/2)+1/(t32(k)-t_e);
    t23(k)=(1+t_e*a_23(k))/a_23(k);
    b_24(k)=(vr_2(1,3,k))/(d/2)+1/(t42(k)-t_e);
    t24(k)=(1+t_e*b_24(k))/b_24(k);
    c_34(k)=(vr_3(1,1,k))/(d/2)+1/(t43(k)-t_e);
    t34(k)=(1+t_e*c_34(k))/c_34(k);
end

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%Cálculo da velocidade do S2
v_2=zeros(1,3,w);
o_2=zeros(1,3,w);
v_r2=zeros(1,3,w);
for m=1:1:w,
    v_2(:,m)=[(d/2)*(1/(t21(m)-t_e)-1/(t12(m)-t_e)) ;(d/2)*(1/(t23(m)-t_e)-1/(t32(m)-t_e));
    (d/2)*(1/(t24(m)-t_e)-1/(t42(m)-t_e)) ];
    v_r2(:,m)=h*v_2(:,m)';
    o_2(:,m)=rot2*v_r2(:,m)';
end
ve_2=zeros(1,1,w); % vetor resultante
dire_2=zeros(1,1,w); % direção zenital;
dire_x2=zeros(1,1,w); % direção azimutal;
for m=1:1:w,
    ve_2(m)=sqrt(o_2(1,1,m)^2+o_2(1,2,m)^2+o_2(1,3,m)^2);
    dire_2(m)=acos(sqrt(o_2(1,1,m)^2+o_2(1,2,m)^2)/ve_2(m));
    dire_x2(m)=acos(o_2(1,1,m)/sqrt(o_2(1,1,m)^2+o_2(1,2,m)^2));
end

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%Cálculo da velocidade do S2 com erros
v2=zeros(1,3,w);
o2=zeros(1,3,w);
vr2=zeros(1,3,w);
for m=1:1:w,
    v2(:,m)=[(d12(m)/2)*(1/(t21(m)-t_e)-1/(t12(m)-t_e));(d23(m)/2)*(1/(t23(m)-t_e)-1/(t32(m)-t_e));
    (d24(m)/2)*(1/(t24(m)-t_e)-1/(t42(m)-t_e))];
    vr2(:,m)=h2(:,m)*v2(:,m)';
    o2(:,m)=rot2*vr2(:,m)';
end
ve2=zeros(1,1,w); % vetor resultante
dire2=zeros(1,1,w); % direção zenital;
direx2=zeros(1,1,w); % direção azimutal;
for m=1:1:w,
    ve2(m)=sqrt(o2(1,1,m)^2+o2(1,2,m)^2+o2(1,3,m)^2);
    dire2(m)=acos(sqrt(o2(1,1,m)^2+o2(1,2,m)^2)/ve2(m));
    direx2(m)=acos(o2(1,1,m)/sqrt(o2(1,1,m)^2+o2(1,2,m)^2));
end

```

```

ev2=zeros(1,w);
for m=1:1:w,
    ev2(:,m)=(abs(ve_2(:,m)-ve2(:,m)))/ve_2(:,m); % Cálculo do erro da Velocidade
end
ed2=zeros(1,w);
for m=1:1:w,
    ed2(:,m)=abs(dire_2(:,m)-dire2(:,m)); %% erro na direção zenital
    edx2(:,m)=abs(dire_x2(:,m)-direx2(:,m)); %% erro na direção azimutal
end
mev2=Mediana(ev2)
mev2*100

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%Cálculo da velocidade do S3
v_3=zeros(1,3,w);
o_3=zeros(1,3,w);
v_r3=zeros(1,3,w);
for m=1:1:w,
    v_3(:,m)=[(d/2)*(1/(t34(m)-t_e)-1/(t43(m)-t_e));(d/2)*(1/(t31(m)-t_e)-1/(t13(m)-t_e)) ;
    (d/2)*(1/(t32(m)-t_e)-1/(t23(m)-t_e))];
    v_r3(:,m)=h*v_3(:,m)';
    o_3(:,m)=rot3*v_r3(:,m)';
end
ve_3=zeros(1,1,w); % vetor resultante
dire_3=zeros(1,1,w); % direção zenital;
dire_x3=zeros(1,1,w); % direção azimutal;
for m=1:1:w,
    ve_3(m)=sqrt(o_3(1,1,m)^2+o_3(1,2,m)^2+o_3(1,3,m)^2);
    dire_3(m)=acos(sqrt(o_3(1,1,m)^2+o_3(1,2,m)^2)/ve_3(m));
    dire_x3(m)=acos(o_3(1,1,m)/sqrt(o_3(1,1,m)^2+o_3(1,2,m)^2));
end

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%Cálculo da velocidade do S3 com erros
v3=zeros(1,3,w);
o3=zeros(1,3,w);
vr3=zeros(1,3,w);
for m=1:1:w,
    v3(:,m)=[(d34(m)/2)*(1/(t34(m)-t_e)-1/(t43(m)-t_e));(d13(m)/2)*(1/(t31(m)-t_e)-1/(t13(m)-t_e));
    (d23(m)/2)*(1/(t32(m)-t_e)-1/(t23(m)-t_e))];
    vr3(:,m)=h3(:,m)*v3(:,m)';
    o3(:,m)=rot3*vr3(:,m)';
end
ve3=zeros(1,1,w); % vetor resultante
dire3=zeros(1,1,w); % direção zenital;
direx3=zeros(1,1,w); % direção azimutal;
for m=1:1:w,
    ve3(m)=sqrt(o3(1,1,m)^2+o3(1,2,m)^2+o3(1,3,m)^2);
    dire3(m)=acos(sqrt(o3(1,1,m)^2+o3(1,2,m)^2)/ve3(m));
    direx3(m)=acos(o3(1,1,m)/sqrt(o3(1,1,m)^2+o3(1,2,m)^2));
end
ev3=zeros(1,w);
for m=1:1:w,
    ev3(:,m)=(abs(ve_3(:,m)-ve3(:,m)))/ve_3(:,m); % Cálculo do erro da Velocidade
end
ed3=zeros(1,w);
for m=1:1:w,
    ed3(:,m)=abs(dire_2(:,m)-dire2(:,m)); %% erro na direção zenital
    edx3(:,m)=abs(dire_x2(:,m)-direx2(:,m)); %% erro na direção azimutal
end
mev3=Mediana(ev3)
mev3*100

```

```

%%%%%%%%%%%%Cálculo da velocidade do S4
v_4=zeros(1,3,w);
o_4=zeros(1,3,w);
v_r4=zeros(1,3,w);
for m=1:1:w,
v_4(:, :, m)=[(d/2)*(1/(t43(m)-t_e)-1/(t34(m)-t_e));(d/2)*(1/(t42(m)-t_e)-1/(t24(m)-t_e));
(d/2)*(1/(t41(m)-t_e)-1/(t14(m)-t_e))];
v_r4(:, :, m)=h*v_4(:, :, m)';
o_4(:, :, m)=rot4*v_r4(:, :, m)';
end
ve_4=zeros(1,1,w);
dire_4=zeros(1,1,w);
dire_x4=zeros(1,1,w);
for m=1:1:w,
ve_4(m)=sqrt(o_4(1,1,m)^2+o_4(1,2,m)^2+o_4(1,3,m)^2);
dire_4(m)=acos(sqrt(o_4(1,1,m)^2+o_4(1,2,m)^2)/ve_4(m));
dire_x4(m)=acos(o_4(1,1,m)/sqrt(o_4(1,1,m)^2+o_4(1,2,m)^2));
end

%%%%%%%%%%%%Cálculo da velocidade do S4 com erros
v4=zeros(1,3,w);
o4=zeros(1,3,w);
vr4=zeros(1,3,w);
for m=1:1:w,
v4(:, :, m)=[(d34(m)/2)*(1/(t43(m)-t_e)-1/(t34(m)-t_e));(d24(m)/2)*(1/(t42(m)-t_e)-1/(t24(m)-t_e));
(d14(m)/2)*(1/(t41(m)-t_e)-1/(t14(m)-t_e))];
vr4(:, :, m)=h4(:, :, m)*v4(:, :, m)';
o4(:, :, m)=rot4*vr4(:, :, m)';
end
ve4=zeros(1,1,w);
dire4=zeros(1,1,w);
direx4=zeros(1,1,w);
for m=1:1:w,
ve4(m)=sqrt(o4(1,1,m)^2+o4(1,2,m)^2+o4(1,3,m)^2);
dire4(m)=acos(sqrt(o4(1,1,m)^2+o4(1,2,m)^2)/ve4(m));
direx4(m)=acos(o4(1,1,m)/sqrt(o4(1,1,m)^2+o4(1,2,m)^2));
end
ev4=zeros(1,w);
r=zeros(1,w);
y=0;
for m=1:1:w,
ev4(:, m)=(abs(ve_4(:, :, m)-ve4(:, :, m)))/ve_4(:, :, m);
r(:, m)=y+1;
y=y+1;
end
ed4=zeros(1,w);
for m=1:1:w,
ed4(:, m)=abs(dire_4(:, m)-dire4(:, :, m));
edx4(:, m)=abs(dire_x4(:, m)-direx4(:, :, m));
end
mev4=Mediana(ev4)
mev4*100

%%%%%%%%%%%%Gráfico do erro da velocidade em função dos 4 eixos
figure(1)
subplot(4,1,1), plot(r, ev1*100, 'k')
subplot(4,1,2), plot(r, ev2*100, 'g')
subplot(4,1,3), plot(r, ev3*100, 'r')
subplot(4,1,4), plot(r, ev4*100)

%%%%%%%%%%%%Gráfico do erro médio em relação aos 4 sistemas

```

```
figure(2)
plot(r,errof*100)
erf=100*mediana(errof)}
```

---

APÊNDICE B

---

# Artigos Publicados

---

Os artigos a seguir foram publicados no WCCA 2009 (World Congress on Computers in Agriculture).

# Anemometer 3D Based on Ultrasound

Marcela H. Koyama<sup>1</sup>; Rodger V. Pereira<sup>1</sup>; Tiago P. da Silva<sup>1</sup>; José A. de França<sup>1</sup>;  
Marcelo G. Canteri<sup>2</sup>; Dari O. Toginho Filho<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Departamento de Engenharia Elétrica, <sup>2</sup>Departamento de Agronomia, <sup>3</sup>Departamento de Física,  
Universidade Estadual de Londrina, Cx postal 6025, CEP 86051-980, Londrina, PR, Brazil.

*Abstract. The environmental variables influence in the development of plants and animals. One of these variables is the wind, which can be responsible to change the growing of plants and spread diseases. Therefore, the measure of wind speed is necessary to agriculture. Usually, such measuring is done by use of anemometers working with wind cocks which work in only two dimensions, measuring the wind speed and direction by a mechanical system. One disadvantage of this approach is the existence of mobile parts which does not render accurate speed measures, due to air friction and equipment inertia. In this work, an ultrasonic anemometer which measures the direction and speed of the air in three dimensions is presented. Such anemometer use only four piezoelectric sensors arranged in two orthogonal axes non-competitors. So that, joining together the points of each sensor it was get a structure in the form of a regular tetrahedron. The wind speed in three directions can be measured inferring the necessary time (transit time) so that a pulse of ultrasound, sent for one of the sensors, reaches the others three. Moreover, the tetrahedron-shaped structure allows to measure in four different coordinate systems. This adds redundancy to the system so that a better precision in the measures can be achieved. This measurement is performed by a microcontroller and is done to make the system immune to variations of temperature and air humidity. The microcontroller is also responsible for storage of data and later sending them to a microcomputer.*

*Keywords: 3D Anemometer, ultrasound, transit time, transducers.*

## Introduction

The wind influences the development of plants, may change its growth, reproduction and distribution in the field. For example, high wind speed brakes sheets tissues, branches, stem and may jeopardize a whole crop (MOTA, 1981). The wind can also spread plant diseases as asian rust, carrying spores and pollutants. Besides, one of the necessary cares in the moment of application of pesticides is to observe the wind speed, because such variable can be responsible to the pollution of neighbor crops and rivers, damaging the environment. Thereby, through the monitoring of wind direction and speed, it is possible to produce food healthier and cheaper, using pesticides intelligently so that the pollution of the environment can be reduced. This can be monitored through an ultrasonic anemometer. Such anemometer can measure wind speed with the aid of the transit time (ALMEIDA, 2004) which allows the measure of wind speed trough the measure of time which the ultrasonic pulse takes to be received after being transmitted. Such time varies depending on wind speed and sound. In this context, this work has a goal of projecting a 3D anemometer based on a technique which uses only four ultrasound piezoelectric sensors in order to measure wind speed. Such anemometer provides information about horizontal and vertical conditions of wind. This can be used to calculate the index of favorability to the appearance of plant diseases.

## Methods and Materials

The majority part of the available anemometers in industry today measures wind speed in only two directions, parallel to Earth's plane. However, ultrasound transducer can also be arranged to measure wind speed in three dimensions. Such arrangement has a goal of measuring the upward and downward air currents, verifying if these measures favor the development of diseases. In a previously published work (QUARANTA et al., 1985), an arrangement of six transducers arranged in six competitors orthogonal axes in order to measure wind speed in three dimensions is used. In this work, a different arrangement of transducers in order to measure the wind speed in 3D is proposed. The adopted configuration, shown on figure 1, uses four transducers working sometimes as emitter and as receiver. Such transducers are arranged in two orthogonal axes, non-competitors, so that, joining together the points of each transducer was get a structure in the form of a regular tetrahedron. The tetrahedron edges form between them an angle of 60°, while the  $\gamma$  angle, formed between each edge of the tetrahedron and the opposite plane is 54,7356103°. Each edge of tetrahedron corresponds to a path where ultrasonic wave goes through. Besides, with this arrangement to measure wind speed in up to seven different coordinates systems is possible. One of those systems is obtained considering transducer  $T_1$  as transmitter. Thereby, it is had that the  $S_{\alpha}(T_1/T_2, T_1/T_3, T_1/T_4)$  (non-orthogonal system with its origin in transducer  $T_1$ , formed by the paths of  $T_1$  to  $T_2$ , of  $T_1$  to  $T_3$  and of  $T_1$  to  $T_4$ ) can be seen on figure 2.

Using the method of transit time, the orthogonal projection,  $v_{12}^m$ , of the wind speed vector,  $\mathbf{v}_v$ , in the axes formed by transducers  $T_1$  and  $T_2$  is given by (PINTO, 2006),

$$v_{12}^m = \frac{d}{2} \left( \frac{1}{t_{12}} - \frac{1}{t_{21}} \right), \quad (1)$$

Where  $d$  is the distance between the transducers,  $t_{12}$  is the time to ultrasonic wave goes through the path from  $T_1$  to  $T_2$  and  $t_{21}$  is the time to ultrasonic wave goes through the path from  $T_2$  to  $T_1$ . So, the accuracy in the measure of wind speed depends on the measure of  $t_{12}$  and  $t_{21}$ . However, in majority of cases, there is an error in measuring these times. It is because, at the beginning, the signal arrives on the receptor very attenuated. So, by providing the exact time which the signal arrives electronically, there must be a difference between the arrival of the signal,  $t_{12}$ , and the time where the signal is detected,  $\hat{t}_{12}$ . Such difference of time is titled of  $t_E$ . Considering  $t_E$ , the time of arrival of the ultrasonic wave ( $t_{12}$ ) is given by

$$t_{12} = \hat{t}_{12} - t_E \quad (2)$$

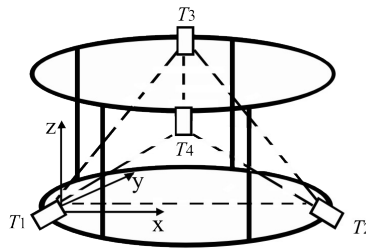


Figure 1: 3D Anemometer with transducers arranged in a tetrahedron shape.

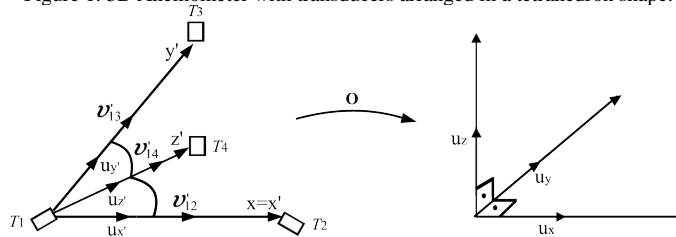


Figure 2: Coordinates system of the 3D Anemometer with transducers arranged in a tetrahedron shape.

In practice, the electronic delay can be calculated by a relation between the temperatures and wind speed (HALLYDAY, 2002). Considering zero wind speed, it is had the time to ultrasonic wave goes through the path between  $T_1$  and  $T_2$  is affected only by the sound speed ( $u_s$ ). So,  $t_E$  can be given by,

$$t_E = \hat{t}_{12} - d / v_s. \quad (3)$$

Due to this, to estimate the time of electronic delay, it is necessary to measure the environment temperature, besides to submit the ultrasonic anemometer into a zero wind speed.

It is known that, in the system  $S_n(T_1/T_2, T_1/T_3, T_1/T_4)$  of figure 2,  $\mathbf{v}_v$  is given by  $\mathbf{v}_v = [v'_{12} \quad v'_{13} \quad v'_{14}]^T$ ,

where  $v'_{12}$ ,  $v'_{13}$  and  $v'_{14}$  are the parallel projections of the vector  $\mathbf{v}_v$  on the  $x'$ ,  $y'$  and  $z'$  axes. On the other hand  $v'_{12}$ ,  $v'_{13}$  and  $v'_{14}$  can be obtained by the orthogonal projections measured, in other words,

$$\begin{bmatrix} v'_{12} \\ v'_{13} \end{bmatrix} = A^{-1} \begin{bmatrix} v^m_{12} \\ v^m_{13} \end{bmatrix}, \quad (4)$$

Where  $v^m_{12}$  and  $v^m_{13}$  are the parallel projections of the vector  $\mathbf{v}_v$  on  $x'$  and  $y'$  axes, obtained by (1), and

$$A = \begin{bmatrix} 1 & \cos \theta \\ \cos \theta & 1 \end{bmatrix}. \quad (5)$$

So, by equation (4), we can calculate  $v'_{14}$ .

It is also necessary to orthogonalize the coordinates of the axes of the triangle ( $v'_{12}$ ,  $v'_{13}$  and  $v'_{14}$ ) because, it is known the transducers are arranged on not orthogonal axes. Moreover, to orthogonalize the system  $S_n(T_1/T_2, T_1/T_3, T_1/T_4)$ , it is necessary a matrix  $\mathbf{O}$  of change from basis ( $u_{x'}, u_{y'}, u_{z'}$ ) to basis ( $u_x, u_y, u_z$ ) as seen on figure 2, in other words,

$$\mathbf{O} = \begin{bmatrix} 1 & \cos \langle u_{x'}, u_{y'} \rangle & \cos \langle u_{z'}, u_{x'} \rangle \\ 0 & \sin \langle u_{x'}, u_{y'} \rangle & \alpha \\ 0 & 0 & \sqrt{1 - \cos^2 \langle u_{x'}, u_{z'} \rangle - \alpha^2} \end{bmatrix}, \quad (6)$$

Where the basis vectors ( $u_{x'}, u_{y'}, u_{z'}$ ) and ( $u_x, u_y, u_z$ ) are unitary and,

$$\alpha = \frac{-\cos \langle u_{x'}, u_{y'} \rangle \cos \langle u_{x'}, u_{z'} \rangle + \cos \langle u_{y'}, u_{z'} \rangle}{\sin \langle u_{x'}, u_{y'} \rangle}. \quad (7)$$

So, to obtain a system of orthogonal coordinates, matrix  $\mathbf{O}$  is multiplied by the non-orthogonal axis of anemometer.

After orthogonalization of  $S_n(T_1/T_2, T_1/T_3, T_1/T_4)$ , an orthogonal system  $S_o(T_1/T_2, T_1/T_3, T_1/T_4)$  is obtained. However, this system is not aligned as the orientation of the Cartesian axes  $x$ ,  $y$  and  $z$ . Thereby, to obtain correct measurements of wind speed, it is necessary to rotate the axes of this system. The rotation process is obtained by multiplication of the coordinates of a rotation matrix, represented by a sequence of Euler angles (KUIPER, 1999).

The system  $S_o(T_1/T_2, T_1/T_3, T_1/T_4)$  must be rotated over the  $x$  axis (competitor with the axis formed by transducers  $T_1$  and  $T_2$ ) until the axis formed by the transducers  $T_1$  and  $T_3$  coincide with  $y$  axis. To do this, it is necessary rotation angles  $\xi = 2\pi - \gamma$  (angle to be rotated clockwise over  $x$  axis),  $\zeta = 0$  (angle to be rotated clockwise over  $y$  axis) and  $\psi = 0$  (angle to be rotated clockwise over  $z$  axis). So, the rotation matrix of the system is given by,

$$\mathbf{R} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \gamma & -\sin \gamma \\ 0 & \sin \gamma & \cos \gamma \end{bmatrix}. \quad (8)$$

## Experimental Results

### Results with the Simulated Anemometer

By the proposed method, equation (1) and the matrix  $\mathbf{O}$ , defined by equation (6), are used in order to measure 3D speed. In these equations, the angles and the length of the edges of the tetrahedron structure are used. Thereby, the exactness of the measure depends on the accuracy in the construction of this structure. Nevertheless, in practice, non-accuracy problems might happen in this process. In this section, it is wanted to analyze how such deficiencies influence in the final measured value. In order to do this, it was constructed a model of a tetrahedron in MATLAB software with the standard values of 11cm and  $60^\circ$  to edges and angles of the tetrahedron, respectively. In this model, it is possible to insert error on some angles and edges. Evidently, the change in an angle or in a dimension changes all the tetrahedron structure, and, consequently, it causes some error of different magnitudes in each of the coordinates system.

In each test, the error inserted in the edges and in the angles of the tetrahedron followed Gaussian distribution of zero average. The standard deviation of such distributions was made equal to 0,55cm (5% of the distance between the transducers) and to 3° to edges and angles, respectively. Moreover, in the simulation, it was considered winds with speeds from 0,5 to 20m/s.

In the analysis of results, the Cartesian coordinates obtained in tests were converted to polar coordinates, in other words, the speed vector was given by the modulus and the orientation by azimuth and zenith angles. It was performed 200 tests with different values of error. In the tests, the average error inserted on tetrahedron edges was 2,49%, while the maximum error was 5%. In the angles between the edges, the average error inserted was 1,5°, with a maximum error of 3°. After the simulation, the error inserted generated an average error in speed modulus of only 1,85%, while the maximum error reached 5,6%. About zenith and azimuth angles of wind speed, the average error was only 0,34°, while the maximum error reached 3,45°. By these simulation results, errors in the measurements change proportionally to errors in construction of anemometer were verified.

#### **Results with the Real Anemometer**

The prototype of the proposed anemometer can be observed on figure 3. In such prototype, the distance between each transducer is 11cm. Moreover, the transducers which were chosen for the construction of the anemometer oscillate in a fundamental frequency of 40 kHz.



Figure 3: 3D Anemometer.

The tests in the laboratory were performed to validate the proposed instrumentation circuit by the method of time difference. The measurement was only performed over one of the axes of the anemometer, in other words, it was only considered a pair of transducers  $T_1$  and  $T_2$ . The anemometer was installed in a closed environment where the wind speed was considered to be zero. Thereby, the anemometer was only exposed to the influence of sound speed. With this,  $t_E$  was estimated using equation (3).

In order to excite the transducer with one pulse, it is necessary a relatively high voltage (JOHANSSON et al, 2006), (MAIA, 2001), (NASCIMENTO, 2003). So, the circuit of figure 4 was used to obtain a pulse of 30V approximately on  $T_1$ .

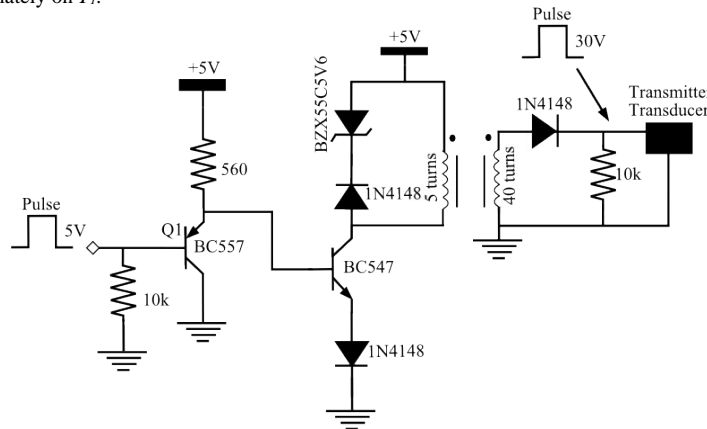


Figure 4: Schematic diagram of the circuit to excite transducer  $T_1$ .

It was used one zener diode to demagnetize the coil of transformer T1 (as shown on figure 4), in other words, the coil is magnetized with 5V and demagnetized with 5,6V which results to 52,83% of the maximum duty cycle allowed in order not to saturate the coil. In circuit of figure 4, it was used an EE 25/10/6 of IP6 material without gap, into the transformer's nucleus. The primary coil has five turns while the secondary has forty turns.

After the excitation, ultrasonic signal goes through the path until it reaches the receptor transducer. One way to instrument the reception of ultrasonic signal can be observed on figure 5. The circuit of this figure was implemented to transducer  $T_2$ . So, after excitation of  $T_1$ , it sends ultrasonic signal to  $T_2$ .

The pulse, applied on transistor Q1 (figure 4), is generated by the microcontroller PIC18F4550 with a duration of 1 $\mu$ s and a magnitude of 5V (in order not to saturate the coil, it is necessary this time of pulse). In order to measure the transit time of ultrasonic wave, it is necessary firstly to store the value of the PIC's timer (16 bit with a resolution of 83,3ns) at the same time which a pulse of 5V is emitted by microcontroller. This can be done with PIC's output compare pin. Besides, the microcontroller also needs to be responsible to monitor the arrival of the pulse emitted. This can be done with PIC's capture pin with the help of a instrumentation circuit of figure 5. It is stored again another value of timer when this happen. With these two values, the transit time of ultrasonic wave can be calculated. Unfortunately, PIC18F4550 has only three pins which are possible to work as output compare and input compare. However, to perform an implementation of a 3D system it is necessary at least four pins with these capabilities.

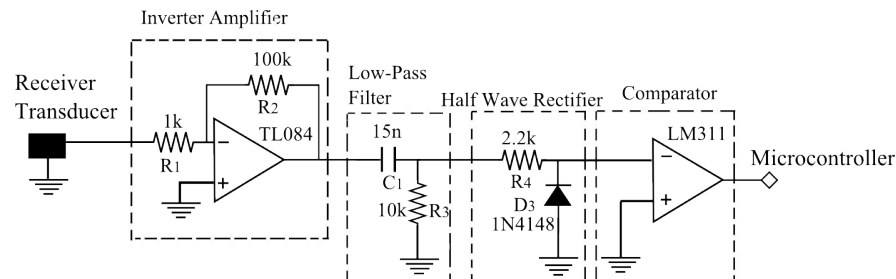


Figure 5: Schematic diagram of the circuit to instrument the reception of the ultrasonic wave.

In figure 6, a pulse which excites Q1 and ultrasonic wave received with the gain stage, can be seen. In this figure, it is also noticed the transit time ( $t_{t2}$ ), in other words, the time which the ultrasonic wave takes to be received.

It was acquired 500 measures of transit time of ultrasonic wave from  $T_1$  to  $T_2$ . Calculating the average and the standard deviation of such values, it was obtained, respectively: 403,64 $\mu$ s and 9,0067 $\times 10^{-8}$ . Thereby, to consider that the noise present in the measuring follow a normal distribution, it is possible to infer the probability of the measured times being found in the interval from 403,39 $\mu$ s to 403,94 $\mu$ s is of 99,73%. With this interval and the determination of  $t_E$ , the uncertainty of the anemometer can be estimated.

As seen, to estimate  $t_E$ , it is necessary to measure  $u_s$  that is determined by the measure of the environment temperature. In order to get a higher precision in the measures, it was used two thermometers. In one of these thermometers, the temperature measured was of 24°C, while the other was 25°C. So, it was considered an average of the temperatures measured (24,5°C). It is known that wind speed in these conditions was zero. With this,  $u_s$  was calculated and the result obtained was 345,8m/s and  $t_E$  of 8,557 $\times 10^{-5}$ s. It is also possible to determine some uncertainty in the measure of wind speed considering transit time, defined by normal distribution, and  $t_E$  calculated. It is noticed, therefore, in the desired application, the uncertainty shown by the anemometer is not significant.

It is known to measure the wind speed by method of time's difference, it is necessary to set transducers as transmitters and as receivers. Thereby, for the proposed anemometer, four transmitter's circuits (as seen on figure 4) and four receivers' circuits (as seen on figure 5) to put into operation the reception of the ultrasonic wave have been used. Each transducer must be connected to one transmitter circuit and one receiver circuit. So, transducer will be able to work as transmitter as receiver.

Tests with four transducers to measure wind speed in all coordinates systems are necessary, so that a whole implementation of the system of this proposed anemometer can be achieved. Also, calibration of the proposed anemometer must take place in a suitable wind tunnel and with the aid of a commercial anemometer.

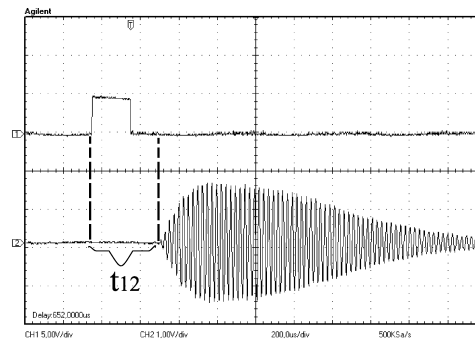


Figure 6: Pulse (channel 1 of oscilloscope) and the ultrasonic signal received (channel 2 of oscilloscope)

## Conclusion

The wind is an important factor to agriculture, because it can affect since germination until maturation of plants. For instance, the wind speed can define the right moment to perform a chemical control, bringing benefits to farmers and consumers. Beyond such benefits, we can cite the intelligent usage of fungicides, production of healthier and cheaper food, optimization of production of food and reduction of pollution of the environment.

In this work, a 3D anemometer based on ultrasound was proposed. Such anemometer, with a three-dimensional arrangement proposed, is useful to measure wind speed with its vertical and horizontal direction. With these information, important decisions concerning controlling certain epidemics can be taken.

It was performed simulation to the proposed anemometer. In these simulations, it was verified that errors calculated varied proportionally with errors inserted in construction of anemometer. To the speed vector modulus, the average error calculated was less than the average error of distance. On this anemometer, it is possible to measure wind speed in up to four different coordinates systems. The error calculus of speed can be decreased by redundancy of these systems.

As seen, by practical experiments, it was possible to estimated  $t_E$  with the help of transit time method. It was had a high accuracy in the proposed project considering miscellaneous measures of transit time because the error found was up to 0,3m/s in the measured speeds.

**Acknowledgements:** The authors thank Fundação Araucária – PR- Brazil, CAPES and CNPQ by financial support.

## References

- ALMEIDA, W. R. M. 2004. Anemômetro baseado no método e tempo de transito: Estudo comparativo de arquiteturas, avaliação de incertezas e implementação. Master's thesis, Universidade Federal do Maranhão.
- HALLYDAY, R. W. 2002. *Fundamentos da Física 2, Gravitação, Ondas e Termodinâmica*. Livros Técnicos e Científicos Editora S.A, Rio de Janeiro.
- JOHANSSON, J., GUSTAFSSON, M. and DELSING, J. 2006. Ultra-low power transmit/receive ASIC for battery operated ultrasound measurement systems. *Sensors and Actuators*, pages 317 to 328.
- KUIPER, J. 1999. *Quaternions and rotation sequences: a primer with applications to orbits, aerospace and virtual reality*. New Jersey, Princeton University Press.
- MAIA, J. M. 2001. Sistema ultra-sônico para auxílio ao diagnóstico de osteoporose. Master's thesis, Universidade Estadual de Campinas.
- MOTA, F. 1981. *Meteorologia Agrícola*. Livraria Nobel S.A.
- NASCIMENTO, V. M. 2003. Desenvolvimento de um protocolo para a construção e caracterização de transdutores de ultra-som. Master's thesis, Universidade Federal do Maranhão.
- PINTO, M. S. 2006. Especificações de projeto para medição de velocidade de vento utilizando anemômetro ultra-sônico com método de diferença de fase. Master's thesis, Universidade Federal do Maranhão.
- QUARANTA, A. A., APRILESI, G. C., CICCO, G. D., and TAONIA, A. 1985. A microprocessor based, three axes, ultrasonic anemometer. *Scientific Instruments*.

# Topology of a network for wireless transmission of data for use in precision agriculture

Alex L. Guedes<sup>1</sup>, Maria B. de M. França<sup>1</sup>, José A. de França<sup>1</sup>, Marcela H. Koyama<sup>1</sup>, Marcelo G. Canteri<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Departamento de Engenharia Elétrica, <sup>2</sup>Departamento de Agronomia, Universidade Estadual de Londrina, Cx postal 6025, CEP 86051-980, Londrina, PR, Brazil.

*Abstract. Weather conditions influences the plant disease progress. Precision agriculture, besides variability of soil, could measure meteorological variables like wetness and temperature for monitoring plant pathogens infection periods. This assessment is carried out in many points of crop area and data set could be sent remotely to a device called “coordinator”, using a cable as transmission line. However, a cable network in a crop area has a high cost and presents operational difficulties. The objective of this work was to develop a wireless data communication between meteorological stations. The “coordinator” device has total control over the network. It asks for data to be transmitted and which station will receive the data, creating a communication system type question/answer. The network also incorporates the multi-hop concept, where the data do not need to be transmitted directly, but through routers, increasing the depth of the network. This logic was implemented through the local address of each device. Prototypes of meteorological stations using microcontroller were built to tests the system. The results showed that the network work satisfactorily when the distance between meteorological stations was 1800 meters or less. This enables them to be installed throughout a crop area.*

*Keywords: wireless communication net, ZigBee, agro-meteorological station, climatic monitoring, precision farming.*

## Introduction

Climatic parameters like temperature and humidity determine beings' alive development (Sentelhas et al., 2004; Bonde et al., 2007; Vale and Zambolim, 1996). This way, with the knowledge of the climatic variables and of the way how these influence the organisms, can get efficient pests warning systems (Sentelhas et al., 2006). Usually, such systems use agro-meteorological stations to monitor the climate.

An agro-meteorological station can measure environmental greatness like air and soil temperature and humidity, wind speed and direction, solar radiation, precipitation or leaf wetness, among others. The measurement should occur at a constant rate, so that the climatic variations be measured satisfactorily, however, is not viable a monitoring system constant.

Influenced by conditions like the altitude, variables like the temperature and humidity can present great variations, even in small areas cultivation, creating micro-climate (Magarey et al., 2001). Thus, if necessary to improve precision in the data should be increased the numbers of agro-meteorological stations, creating an acquisition system of decentralized data. However, even in this kind of system, to facilitate the analysis, the data should be stored in a centralized form, in devices usually called coordinator, responsible for the measurement processing. That only is possible if the stations are in a network.

The connection of stations in a network is critical. The distance among stations and the working conditions in the field using agricultural machines became unviable the use of wires for communication. This work presents a low cost solution for the wireless communication among stations. A coordinator station has total control on the net, asking data and sending commands. The main characteristic is the use of the data multiple jumps concept, in other words, the coordinator station does not need to send directly one datum for a station, but do use other stations that can act like routers. It is possible to increase the net depth and number of the stations in a property to a relatively low cost.

This work will be integrated to a agro-meteorological station system for monitoring the temperature, leaf wetness, relative humidity, wind direction and intensity. In this system, the reads of every climatic variable will be made in an hour interval and the data will be made available daily for the coordinator station through of this proposed protocol (Koyama, 2009).

## Proposed System

The network was developed using the “tree” topology, being formed by two basic components: coordinator and router. A tree configuration or tree topology is a physical characterization of an object (agro-meteorological stations), that by its configuration resembles to a tree, in the sense in which its branches tend to converge for a root or a source (coordinator). By definition, a tree is constituted by knots. A knot of a tree is the unitary element of the tree. It could originate other knots. The Figure 1 presents an example of a tree configuration, where every number is a knot.

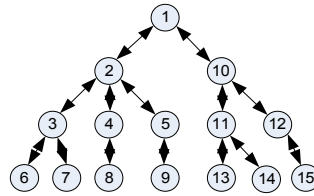


Figure 1: tree topology diagram.

The coordinator is the main knot of the net. Through its, the whole network can be commanded. All the other devices are named routers. They allow to expand the network, serving as a repeater of the received data. When the coordinator chooses a router to ask the data of his station, the same also can be named final device.

Physically, the data transmission is accomplished by the module X-Bee PRO from MaxStream, a communication device RF who follows the communication standard ZigBee, developed by the ZigBee Alliance close to IEEE (IEEE, 2003). The main characteristics of this standard are the low energy consumption, safety and low cost. It is an ideal standard to be used in systems that demand great energy autonomy, because the devices are able of “hibernate” (sleep) when not used. In Brazil, the nets ZigBee work on frequency of 2,4 GHz in 16 channels, without need a license for operation (IEEE, 2003). The device X-Bee PRO® owns serial communication RS232 and should be configured previously for transmission Broadcast (radial transmission where all the devices within reach of the signal receive the data).

A router is named primary when between him and the coordinator exists only a jump, in other words, occurs direct communication between him and the coordinator. A secondary or tertiary router is relative to the number of data jumps until reach him. The coordinator is the tree root so, the smaller degree routers have larger importance for the net. For example, if there are failure in a router, how much smaller the degree of the same, larger the number of devices that will be inaccessible to the coordinator, determining its importance for the network..

### Logic for the local addresses

Thee multiple jumps concept was implemented by a system of local address for the stations. Knowing the local address of a station was possible to determine all the routers that was between it and the coordinator. That enabled to determine the way that the data ran from the coordinator to the destiny, or from itself to the coordinator (question/answer system).

In the logic developed, the most significant number in a local address of a station is determined by the coordinator. There is only a coordinator in a net, so this first digit is common to all the devices. The second more significant digit is determined by the primary router of each tree branch, in other words, in that branch all the devices will have the same digit. The third more significant digit is determined by the secondary router, and so forth. The digit ‘0’ represents the nonexistence, or not importance, of the nearby routers for a specific transmission, in other words, if a destination address of a package of data is “XY00”, it is known that the addressee is a primary router, soon, secondary or tertiary routers are not important for the transmission of that data package.

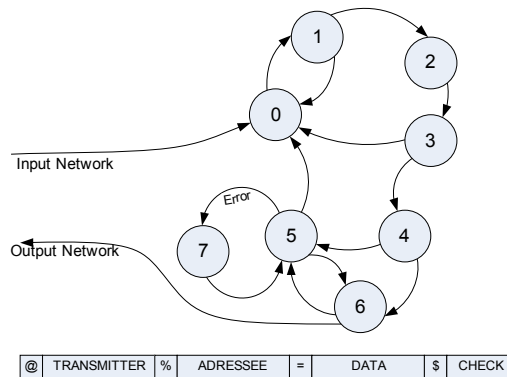
A system with four hexadecimal digits of address can implement up to three data jumps, and to shelter up to 3616 devices. The biggest advantage of this logic is that this address is done in the microcontroller of the station, not depending on the transmission device. That enables the enlargement of this logic until a net has the depth that was wished or shelter the number of necessary stations. The main disadvantage is the fact of this net to be fixed, in other words, the local address is specific for every station and should be established in microcontroller at the recording moment.

If the destination address of a package is “FFFF” it understands that the package had origin in the coordinator and this message is common to all net. This way, the routers should send again this package

before checking which the command was sent by coordinator. This option is important so that all the network can execute determined functions at the same time, such as enter low consumption way or to synchronize clocks.

**Implementation**

To implement the network with the definitions presented up to now, the routers program was developed starting from a state machine shown in Figure 2 and in the Table 1:



**Figure 2: Routers state machine and data frame used at the station network.**

**Table 1: Description of states of routers machine.**

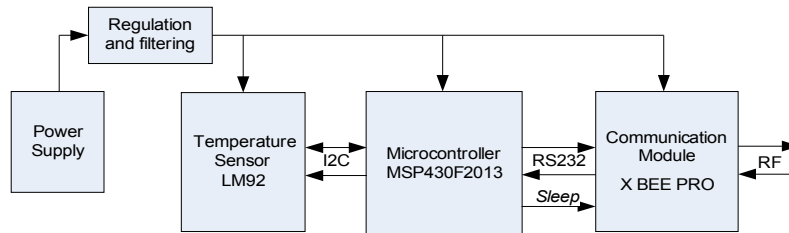
State	Task
Start definitions	Defined local address. XBEE® device configured for Broadcast transmission.
0	It expects receiving the byte at the beginning of the data package.
1	It receives a data package. If the package is correct then it goes to the state 2, else it comes back to the 0.
2	It determines if the received package is addressed to the coordinator.
3	Through the logic of local addresses, it determines if the data should be retransmitted (it goes to the state 4) or not (it comes back to the state 0).
4	It determines if the local station is the data package destination. If it is true, it goes to the state 6, if not, for the state 5.
5	It sends a data package. If the transmission occurs with success, it goes to the state 0, otherwise, to the state 7. If the data is a message for whole network, after the transmission the machine goes to the state 6.
6	If the destination is local station, it determines through the data received, which the answer that the coordinator waits and sends it in response to the state 5. The coordinator can send the net disconnection command, leaving the state machine.
7	It generates a mistake report indicating that the station did not receive a data package with success.

The Figure 2 shows the frame for transmission of a data package. For a package be successfully received, the transmitter should send the character '@' to mark the start of the data package and then to send its local address, followed by '%'. After it is sent addressee's address, followed by the character '='. After these transmission stages, is sent a data or command, that is concluded by '\$'. The validation is made through a check byte. This byte corresponds to the least significant of the sum of all the characters sent and received. Thus, if the validation byte is not alike so much in the transmitter as in the receiver, it is known that there was mistake in the transmission and the package is considered disable.

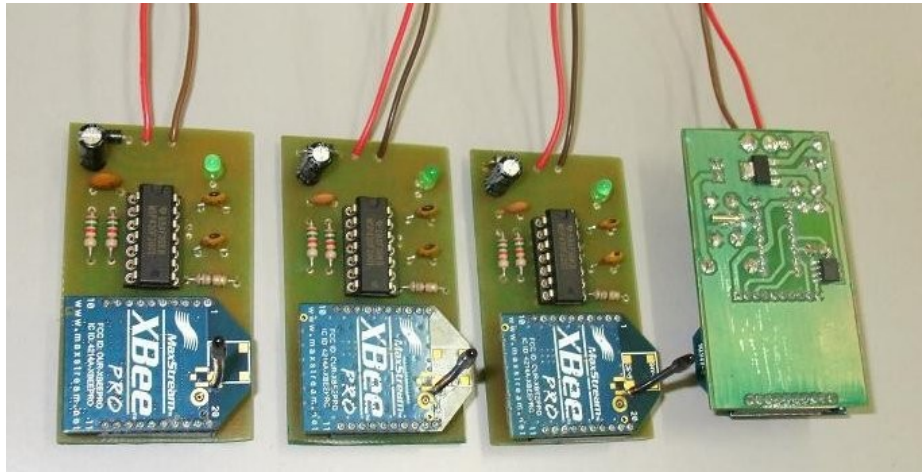
**Implementation of a Case**

The validation of the proposed system was made by a station network with five micro-stations and a coordinator. The micro-stations used MSP430F2013 microcontrollers from Texas Instruments and measured

the temperature through the sensor LM92, from National Semiconductors. The temperature sensor uses the serial communication I2C and read the temperature with resolution of 0.0625 °C. The blocks diagram of the micro-station is shown in Figure 3. The Figure 4 shows a Picture of the micro-station used in the test.



**Figure 3: Block diagram of the test micro-stations.**



**Figure 4: Micro-station used in the test.**

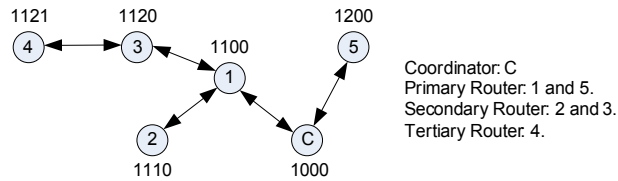
The coordinator was implemented with a microcontroller PIC16F877 using language C. It read uninterruptedly all the devices in the net, taking the ambient temperature of every micro-station and showing the measurement in a LCD display for about 2 seconds. This system is able to recognize up to four abnormal situations of operation: Mistake in the temperature sensor of a station, if the station did not recognize the asked data, if any device was turned off or with some mistake and if the data package was lost. It also is possible send commands for all the net devices through the coordinator. These commands will be used for clock synchronization.

In the test network a station can receive two packages of valid data: first one asks for temperature and the second one is a command to go out from the state machine. If it received a data package asking the temperature, the station read the LM92 through communication I2C and answers to the coordinator. If are not possible to do this reading, the station sends the answer that the solicitation was not attended because, or the temperature sensor or the communication I2C, have a mistake. If there is a command to go out from the state machine, the station will light a LED indicating not waiting data and will reboot, being off-line for about two seconds. If the data package contains some different solicitation, the station will answer to the coordinator who the package was not comprehended.

If some net device is damaged or for some reason do not answer when asked, the previous router generates a mistake report and sends it to the coordinator, in such a manner that the coordinator knows if any

net knot is not reviewing the data. If the coordinator sent a package with success, but do not receive answer in about 2 seconds, it supposes that there was an unknown mistake and the data was dispersed.

The local addresses were written with four hexadecimal digits using ASCII. The Figure 5 presents the net diagram, being possible to observe the system of multiple jumps, the "tree" topology, the numeration adopted for every station and its respective local address.



**Figure 5: Diagram for the implemented test net.**

To validate the algorithm, the net presented in the Figure 5 was tested in the Department of Electric Engineering of the State University of Londrina (UEL). First test was made with about 10 meters distance among stations. This distance allowed communication among stations without data loss caused by device XBEE PRO®, being possible to control the mistake situations. They were followed the next steps to test the net and the possible failures that could occur:

1. Sent an unknown question for every station.
2. Sent a valid data package with the stations turned off.
3. Provoked mistake in the temperature sensor reading of the stations.
4. Simulation of data dispersion. The coordinator sends a valid package, but does not receive answer or some mistake message of the cases 1, 2 or 3.
5. Transmission test of a same message for all the net simultaneously.
6. Normal operation of the net, sending and receiving valid packages contend the ambient temperature for every station.

In the situation 1, when receiving an unknown solicitation, the stations answer with the character scheduled to indicate that the question is disabling. This mistake can be caused by incompatibility between coordinator and routers or some mistake in the coordinator, therefore its minimum probability of occurrence. The situation 2 is common to happen in a real net, because can be caused by any problem that can forbid the station of receiving or to transmit a data, such as failure in the energy circuit or in reception/transmission RF. This way, as verified in this test, the previous router to that presents mistake elaborates a report and answers to the coordinator the local address of the station that failed. This way, it is possible to determine quickly a defective station.

The situation 3 occurs when there is some abnormality in the temperature sensor, or with interlinking with microcontroller. This mistake occurs if the bit acknowledge of the protocol I2C is not received by the master during the temperature reading. If there are any failure in transmission/reception of a data package during the answer of a station to the coordinator, it can describes by the situation 4, in other words, the data is considered lost. This mistake is unlikely of happen, because when sending coordinator's question, also does itself a stations test until the destiny device. Therefore it is unlikely that during the answer some device presents mistake. This failure can be detected or contoured with the transmission of a new question by the coordinator

If a message is common to whole net, there is the option of sending the data for all the stations simultaneously. This was the fifth step of the accomplished test. This option will be used to synchronize the stations clocks and to do the net enter low consumption way, however in this test, a LED was activated to indicate the receipt of this command.

The last accomplished test was a normal situation: all the stations turned on and the coordinator asking the ambient temperature of every one of time to time. In these tests was shown that the coordinator has net total control, recognizing problems and relating the data received with the respective station. The routers work without human intervention, and if the same is necessary, is possible to determine through the coordinator which station presents problems, turning the solution fast and direct.

## Conclusion

Agro-meteorological stations are used to climatic record. They are used in extensive areas and its necessary reliability for variable measure, so several stations need to work together and connected to a network. The construction of this net of agro-meteorological stations is critical, because long distance among them avoid using wires. In this work, it presented a solution for the communication using wireless. A coordinating device asks the data to be transmitted and which station will receive it, creating a system question/answer. The data does not need to be transmitted directly, could be reviewed until the destiny, through routers. Thus, the net depth increases and enables the stations installation along all a property for a low cost.

The accomplished tests showed that the proposed protocol is functional and not bolt or stays in loops. The tests used conditions that can occur in the net when installed in a plantation. Thus, it would be possible to determine through the coordinator which the failure and which station presented problem, in other words, the coordinator has total control on the implemented net.

The main advantage of the proposed system is the low cost. The net works directly in the microcontroller, without depending of the device of communication. This way, it can migrate easily for other RF's transmission/reception, and as the system is implemented with the multiple jumps concept, these devices need not necessarily to have a great reach of transmission.

The next step will be to join it to a low cost micro-stations system to be used in soybean plantations. In the future also will be studied a form of turning this protocol even more functional, making the coordinator distributes local addresses for the stations, what will facilitate in the system installation (Koyama, 2009).

**Acknowledgements:** The authors acknowledge to CNPq and the PROPPG from UEL for financial support.

## References

- Sentelhas, P.C., Gillespie, T.J., Gleason, M.L., Monteiro, J.E.B.A. And Helland, S.T., 2004. *Operational exposure of leaf wetness sensors*. Agricultural and Forest Meteorology, 126, 59–72.
- Bonde, M.R., Berner, D.K., Nester, S.E. and Frederick, R.D., 2007. *Effects of Temperature on Urediniospore Germination, Germ Tube Growth, and Initiation of Infection in Soybean by Phakopsora Isolates*. Ecology and Epidemiology, vol. 97, no. 27, 997-1003.
- Vale, F.X.R. and Zambolim, L., 1996. *Influência da Temperatura e da Umidade no Desenvolvimento de Doenças de Plantas*. Revisão Anual de Patologia de Plantas, vol. 4, 149-207.
- Sentelhas, P.C., Gillespie, T.J., Gleason, M.L., Monteiro, J.E.B.A., Pezzopane, J.R.M and Pedro Jr., M.J., 2006. *Evaluation of a Penman–Monteith approach to provide “reference” and crop canopy leaf wetness duration estimates*. Agricultural and Forest Meteorology, 141, 105–117.
- Magarey, R. D., Seem, R. C., Russo, J. M., Zack, J. W., Waight, K. T., Travis, J. W. and Oudemans, P. V., 2001. *Site-specific weather information without On-site Sensors*. Plant Disease, vol. 85, no. 12, 1216-1226.
- Koyama, M.H., 2009. *Desenvolvimento de um anemômetro 3D ultra-sônico baseado em apenas quatro transdutores*. Master's thesis, Universidade Estadual de Londrina, Londrina, PR, Brazil.
- IEEE, 2003. *Wireless Medium Access Control (MAC) and Physical layer (PHY) Specifications for low-Rate Wireless Personal Area Networks (LR-WPANs)*. IEEE Standart 802.15.4. The Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., New York, USA.

# System of microstations of data acquisition for wireless monitoring of the microclimate in crop areas

José A. de França<sup>1</sup>; Edson L. Burgo Júnior<sup>1</sup>; Marcela H. Koyama<sup>1</sup>; Rodger V. Pereira<sup>1</sup>; Marcelo G. Canteri <sup>2</sup>; Maria B. de Moraes França<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Departamento de Engenharia Elétrica, <sup>2</sup>Departamento de Agronomia, Universidade Estadual de Londrina, Cx postal 6025, CEP 86051-980, Londrina, PR, Brazil.

*Abstract. The weather is a key factor for outbreaks of plant diseases. Therefore, the monitoring of climate is essential to any intelligent system of cultivation. Usually, such monitoring is carried through agrometeorological stations that acquire data like temperature, humidity, wind speed and leaf wetness. Unfortunately, the high cost of stations limits the number of monitoring points within the same area. This forces the use of tools of mathematical interpolation. However, such procedure does not lead to good results in the estimation of precipitation and leaf wetness. In this work was developed a monitoring system, composed for a set of microstations of data acquisition. They presented low cost and highest autonomy. Therefore, they can be installed throughout the area of cultivation, collecting data like temperature and leaf wetness. The microstations communicate with each other through wireless communication. Thus, daily, the data collected are transferred to a central station, where become available for analysis. The system made it possible to monitor the entire area of cultivation, providing reliable data, which make it possible to characterize the microclimate. This makes it possible to, for example, the efficient use of pesticides, reducing production costs and generating healthy foods.*

*Keywords: ZigBee, meteorological stations, weather monitoring, precision farming.*

## Introduction

Tropical and subtropical plants are subject to diseases that are going to establish themselves depending on the environmental conditions. The meteorological variables that define the favorable terms to the diseases appearance are the temperature, the rain and the air humidity. The temperature works like a catalyzer, defining the infection speed. Then, the rain and the air humidity supply water, indispensable element to the spore germination.

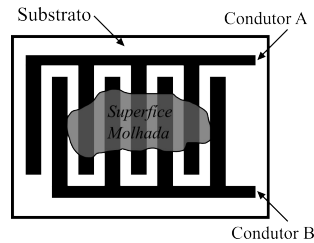
Almost all the processes involved in the disease cycle depend strongly of the temperature (Bonde et al., 2007; Vale et al., 1996). There are different types of temperature sensors, some of them are of very low cost and are used with success in the agriculture, there a long time ago. Moreover, in spite of depending strongly of the altitude, the temperature can be easily estimated and interpolated to distant geographical areas. On the other hand, leaf wetness, variable that defines the water quantity in the plant surface, it varies a lot in a same region and is hard to of being interpolated. Thus, wetness assessment in several points of a geographical region is indispensable to estimate the favorability to pathogens infection. Especially, such information can be used, for example, for a more intelligent use of pesticides, through a warning system of diseases, increasing farmer's profits and the food quality (Magarey, 2001).

The most efficient form of measuring leaf wetness is through electronic sensors. A meteorological station, installed in the region that intent do be monitored, collect and store leaf wetness data in electronic form. However, such stations usually are very expensive. So, the leaf wetness monitoring usually occurs in just some few points of the cultivation region. Not monitored regions need to be estimated for the leaf wetness, what can results little precision, mostly when are not consider the differences among micro-climate (Koyama, 2009).

Motivated by the aforesaid, it presents a low cost acquisition system of meteorological data, friendly and with wireless transmission to facilitate the data acquisition. The system is composite of a group of reduced scale meteorological station fed by battery and that do continuous acquisition of the temperature and leaf wetness, greatneses that own great variation inside the cultivation area. Such stations should not be used separately. A central station should also do data acquisition of other important greatneses, but that present little space variation, as, for example, wind speed and direction, relative humidity of the air, rain, etc. As well, at the present paper, it was described a wetness sensor based on capacitance sensors, different of the resistance sensors used at the other papers. It will be demonstrated that capacitance sensors present sensibility and larger exactness, besides presenting a much more lineal characteristic.

### Proposed System

The type comb electronic sensor is used to measure leaf wetness in most cases. It is composite for two conductive wires, in a comb form, separated by insulating material (air, ink latex, etc). The Figure 1 presents a typical sensor type comb. As the sensor surface becomes wet, they change the electric characteristics of the region among conductors A and B. So, it can be read the sensor surface area that is wet, supplying the leaf wetness estimative.

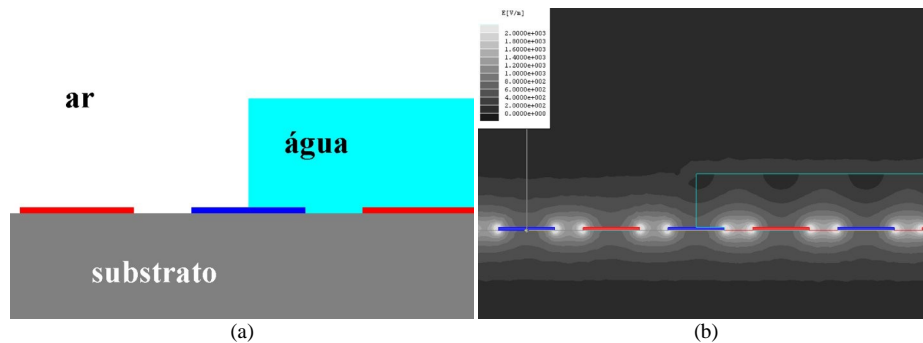


**Figure 1: The comb type electronic sensor presenting a board (Substrato), conductive ways (Condutor A and Condutor B) simulating a wetness area (Superfície molhada).**

The capacitance is an electric property of the type comb sensor that depends on its wet area. If the sensor surface is covered by insulating varnish, its resistance is made constant and can be considered infinite. This way, the capacitance effect of the type comb sensor is the dominant and can be used to estimate the sensor surface wet area.

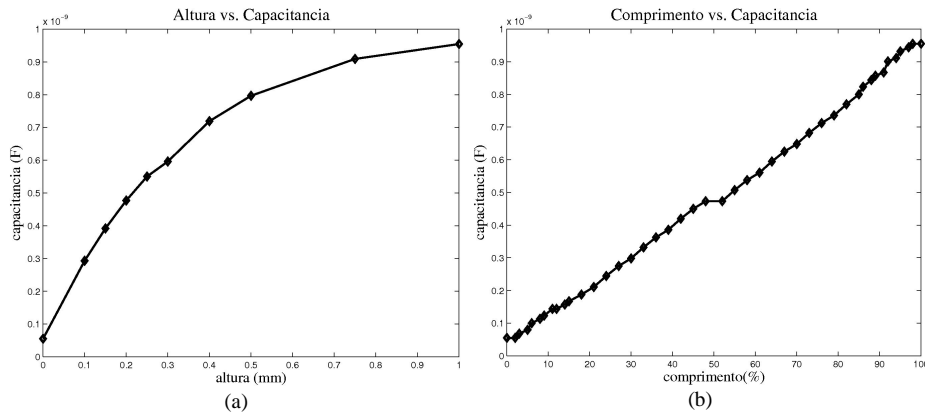
The type comb sensor capacitance modeling is not so evident. Because of this, in this work, the capacitance was modeled using the application Maxwell 2D to electromagnetic modeling of the company Ansoft.

The Figure 2(a) presents the type comb sensor modeled in a situation in which it is partially covered by water. It is possible to see the surface in which the gold footpaths of the sensor are assembled. As well, just part of the sensor surface is covered by water, while the remaining is in touch with the air. The Figure 2(b) shows the results of simulation for sensor electromagnetic characteristics. It realizes the electric field armature passing of a conductor for another. That is a typical situation found in capacitance components.



**Figure 2: (a) Modeled of a type comb sensor partially covered by water (água) and (b) result of simulation demonstrating the capacitance characteristics (see the text above).**

In the sensor simulation were considered two situations. In the first one, a constant area of the sensor surface was cover by a water layer, varying the height (h) of the layer. For each value of h, the sensor capacitance was retained. In this situation the capacitance was higher when the h value increased (Figure 3a). However, the increment was non-linear. This was an undesirable behavior. However, it can be minimized if the sensor surface was covered by ink latex. Sentelhas et al. (2004) described that an ink latex layer on the sensor makes its behavior looks like a leaf. Moreover, the ink latex absorbs the water, avoiding formation of not-uniform drops with exaggerated height.



**Figure 3: Capacitance variation for the wetness sensor when the height of the water layer was variable (a) and when the height of the water layer was constant (b).**

During second situation, the height of water layer was kept constant, while it varied the length of the region among conductors A and B of the sensor. Again, the corresponding variation in to capacitance was retained. A sensibility of 913,12 pF/mm and a linearity of 0,1 % was observed (Figure 3b), in other words, once the height of water layer can be considered constant, the sensor capacitance grows with the sensor area that is cover by water. Thus, it can express the leaf wetness, *m*, in capacitance function, *C<sub>s</sub>*, as being

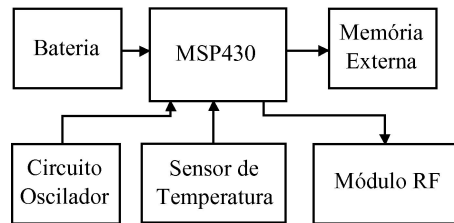
$$m = k1 C_s + k2, \tag{1}$$

where *k1* and *k2* are constant that should be determined via calibration

Of (1), if it was assessed the capacitance in a comb type sensor, it will measure the leaf wetness. In this work, the capacitance was measure indirectly, through an implemented oscillator with the integrated circuit LM555, where the oscillation period was proportional to *C<sub>s</sub>*.

In this work, the sensor used in the temperature mensuration was LM92 from National Instruments, who owns a precision of ±0,33 oC and 12 resolution bits. Its interface is digital (protocol I2C), what allowed easy assessment without the influence of external bias to the system.

The blocks diagram of the developed system of data acquisition is presented in the Figure 4. It was used a microcontroller for data acquisition of temperature and for the wetness sensor. Low cost microcontrollers concentrate in an only integrated circuit most of the peripherics (timers, converters A/D, memory, I/O doors and communication) necessities for data acquisition. In this work the microcontroller used was the MSP430F2013 of the Texas Instruments. Such microcontroller was chosen mostly by the low consumption (maximum of 220 uA to 1 MHz and 2,2 V), that enables larger autonomy to the system. As well, MSP430F2013 has a timer of 16 bits, allowing do acquisition of period oscillator of wetness sensor.



**Figure 4: Block diagram for the developed system: battery (Bateria), microcontroller (MSP430), external memory (memória externa), oscillator circuit (circuito oscilador), temperature sensor (sensor de temperatura) and RF module (módulo RF).**

The data were stored in a flash memory of 1 kbyte, external to microcontroller (chip 24AA08 of Microchip who also owns interface I2C). The data was saved every hour and corresponded of average values of sampling period. For each sensor were necessary 2 bytes for storage. The memory of 1 kbyte supplied autonomy for 10 days. The autonomy can be extended increasing the capacity of the external memory. For that, the changes in the system would be minimum.

When the system memory was full, the data were transmitted for a computer, for definitive storage. Because of this, the micro-stations system depends on an efficient data transmission method. The data of all micro-stations are centralized in an only location and are quickly available for analysis.

In this work, the wireless data transmission was made through a module XBee-PRO® from Digi International. This module allows send data using ZigBee protocol (Eady, 2007). It operates with low electric demand (transmission with 709,5 mW; reception with 181,5 mW and 33 uW in stand by) and work with cryptography of 128 bits to guarantee the data integrity (IEEE, 2003). The data reception was made using the board CON-USBEE from Rogercom Company, compatible with the XBee-PRO module. The CON-USBEE was connected through the USB connector of the computer. In the computer, the data were received by a very simple program that stores the temperature and leaf wetness data in a text file, where these are available for analysis. As well, aiming to amplify the reach of data transmission, every micro-station works with a router, in other words, the signal transmitted by a micro-station is retransmitted by neighboring stations, so that it can reach a larger distance.

### Experimental Results

The Figure 5 presents the wetness sensor. It was implemented as a board of printed circuit, where was used a varnish to eliminate the wetness influence in its electric resistance. Moreover, as described in the previous section, a latex layer on the sensor made the water spreads uniformly. In the accomplished tests, the oscillation frequency varied when the sensor is completely wet and completely dry.

The Figure 6 presents the agro-meteorological station developed yet without a water proof box. This way, few tests in field were done. The only tests in field conditions were made testing the wireless data transmission. The goal was to evaluate the maximum distance of data transmission. According to manufacturer's specifications, the module Xbee-PRO® can transmit data until a distance of 1,5 Km. However, in the tests, this distance was obtained only in a flat area, when there were not obstacles or water sources (rivers, lakes, etc). A typical cultivation region presents a great density of leaves among data transmission points and the distance transmission was limited to the order of 100 meters. That does not make unfeasible the system, just suggests that the antenna from data module transmission/reception should stay above of the foliage, in a height place, so the signal can propagate freely, without being obstructed by the vegetation.

### Conclusions

The environmental variables are important factors for the agriculture. They could affect since the germination until the plantation harvest. For example, the temperature changes metabolism of beings' alive, while the leaf wetness can contribute for the plants infection, mostly for fungi. Using agro-meteorological stations the measurement of variables are desirable and important. Such stations contribute for the rational utilization of agricultural defensive, collaborating for the cultivation of more healthy food and the profits increase.

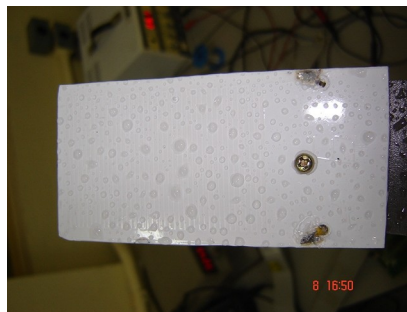
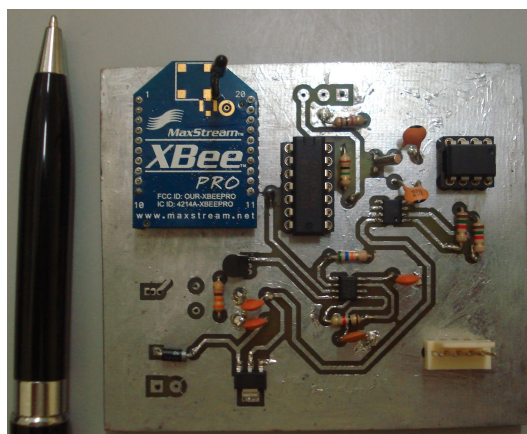


Figure 5: Wetness sensor comb type used for the tests.



**Figura 6: Micro-station developed.**

Monitoring a great area needs a great number of agro-meteorological stations. The high cost of such stations does not allow monitoring in many points of the cultivation region. So, the data of the not monitored areas are estimate by mathematical interpolation, reducing the precision.

In this work, it was presented an acquisition system for the more influential variables in the plant diseases development: temperature and leaf wetness. The system is low cost and easy handling, making possible to increase the rationality in plant diseases control as, for example, the Asian soybean rust. The agro-meteorological data can be collected with higher precision because the stations can be installed in a larger number.

In the leaf wetness estimation, besides the higher use of resistance sensor of comb type, was verified that the capacitance sensor has larger sensibility, presenting linear answer. In this work, to accomplish the instrumentation of the capacitance sensor, it was used a circuit oscillator, in which the oscillation period was proportional to the capacitance.

The data acquisition from micro-stations through wire transmission lines was unfavorable for the project. They needed to have big length, complicating the cultivation. So, it was used wireless communication. It facilitates the installation of new stations and present low-cost (due to the transmission long wire lines absence).

The system development has, as main benefits, the low-cost, that enables its acquisition for little properties, allow to decrease the economic impacts caused by diseases in the cultivation, allow reduction in the costs of agricultural production (due to the rational use of pesticides) and allow production of more healthy food and decrease of the contamination of the natural resources.

**Acknowledgements:** The authors thank the Foundation Araucaria and PROPPG/UEL by the financial support.

### References

- Eady, F., 2007. *Hands-On ZigBee: Implementing 802.15.4 with Microcontrollers*. Newnes, 1st Edition.
- Sentelhas, P.C., Gillespie, T.J., Gleason, M.L., Monteiro, J.E.B.A. And Helland, S.T., 2004. *Operational exposure of leaf wetness sensors*. *Agricultural and Forest Meteorology*, 126, 59–72.
- Bonde, M.R., Berner, D.K., Nester, S.E. and Frederick, R.D., 2007. *Effects of Temperature on Urediniospore Germination, Germ Tube Growth, and Initiation of Infection in Soybean by Phakopsora Isolates*. *Ecology and Epidemiology*, vol. 97, no. 27, 997-1003.
- Vale, F.X.R. and Zambolim, L., 1996. *Influência da Temperatura e da Umidade no Desenvolvimento de Doenças de Plantas*. *Revisão Anual de Patologia de Plantas*, vol. 4, 149-207.
- Sentelhas, P.C., Gillespie, T.J., Gleason, M.L., Monteiro, J.E.B.A., Pezzopane, J.R.M and Pedro Jr., M.J., 2006. *Evaluation of a Penman–Monteith approach to provide “reference” and crop canopy leaf wetness duration estimates*. *Agricultural and Forest Meteorology*, 141, 105–117.

- Magarey, R. D., Seem, R. C., Russo, J. M., Zack, J. W., Waight, K. T., Travis, J. W. and Oudemans, P. V., 2001. *Site-specific weather information without On-site Sensors*. *Plant Disease*, vol. 85, no. 12, 1216-1226.
- Koyama, M.H., 2009. *Desenvolvimento de um anemômetro 3D ultra-sônico baseado em apenas quatro transdutores*. Master's thesis, Universidade Estadual de Londrina, Londrina, PR, Brazil.
- IEEE, 2003. *Wireless Medium Access Control (MAC) and Physical layer (PHY) Specifications for low-Rate Wireless Personal Area Networks (LR-WPANs)*. IEEE Standard 802.15.4. The Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., New York, USA.