



Centro de Tecnologia e Urbanismo  
Departamento de Engenharia Elétrica

Giancarlo Michelino Gaeta Lopes

# Sistema de aquisição de dados para monitoramento da velocidade do vento em três dimensões baseado em ultrassom

Londrina, PR  
2016



Giancarlo Michelino Gaeta Lopes

# **Sistema de aquisição de dados para monitoramento da velocidade do vento em três dimensões baseado em ultrassom**

Dissertação apresentada ao Programa de  
Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Uni-  
versidade Estadual de Londrina para obtenção  
do Título de Mestre em Engenharia Elétrica.

Área de concentração: Sistemas Eletrônicos  
Especialidade: Instrumentação Eletrônica

Orientador:  
Prof. Dr. José Alexandre de França

Londrina, PR  
2016

## **Ficha Catalográfica**

Lopes, Giancarlo Michelino Gaeta

Sistema de aquisição de dados para monitoramento da velocidade do vento em três dimensões baseado em ultrassom. Londrina, PR, 2016. 110 p.

Dissertação (Mestrado) – Universidade Estadual de Londrina, PR. Departamento de Engenharia Elétrica .

1. Instrumentação Eletrônica. 2. Velocidade do Vento.  
3. Anemometria Ultrassônica. 4. Transdutores Ultrassônicos.  
I. Universidade Estadual de Londrina. Departamento de Engenharia Elétrica. Departamento de Engenharia Elétrica .

Giancarlo Michelino Gaeta Lopes

# Sistema de aquisição de dados para monitoramento da velocidade do vento em três dimensões baseado em ultrassom

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Estadual de Londrina para obtenção do Título de Mestre em Engenharia Elétrica.

Área de concentração: Sistemas Eletrônicos  
Especialidade: Instrumentação Eletrônica

## Comissão Examinadora

---

Prof. Dr. José Alexandre de França  
Departamento de Engenharia Elétrica  
Universidade Estadual de Londrina  
Orientador

---

Prof. Dr. Francisco Granziera Junior  
Departamento de Engenharia Elétrica  
Universidade Estadual de Londrina

---

Prof. Dr. Joaquim Miguel Maia  
Departamento de Eletrônica  
Universidade Tecnológica Federal do Paraná  
Campus Curitiba



---

Prof. Dra. Maria Bernadete de Moraes  
França  
Departamento de Engenharia Elétrica  
Universidade Estadual de Londrina

Londrina, 02 de setembro de 2016

# Agradecimentos

A Deus por ter me dado saúde e força para superar as dificuldades.

Aos meus familiares, em especial meus pais, Valdomiro e Carmela, e minha irmã Rafaela.

Ao professor Dr. José Alexandre de França pela oportunidade concedida, pela orientação, paciência e apoio para a realização deste trabalho.

À CAPES e à Fundação Araucária pelo financiamento das pesquisas.

Aos companheiros de laboratório, pela motivação e amizade.

A todos que direta ou indiretamente contribuíram neste trabalho.

# Resumo

O estudo da velocidade do vento é importante para varias áreas do conhecimento, como agricultura, biologia, engenharia civil, entre outras. Esta velocidade é mensurada por dispositivos conhecidos como anemômetros. Dentre os tipos de anemômetros, aquele que requer menor manutenção é o ultrassônico, sendo assim o mais indicado para a utilização em um sistema de medição remoto. O presente trabalho trata do desenvolvimento de um anemômetro ultrassônico tridimensional e um sistema de aquisição de dados. Foram desenvolvidos dois protótipos de anemômetro, envolvendo projeto mecânico estrutural e hardware: um com topologia posicional dos transdutores ortogonal e um não ortogonal, sendo avaliada qual das topologias possui maior precisão na aferição da velocidade do vento. O sistema de aquisição desenvolvido possui como principal característica a coleta, armazenamento e envio de dados de temperatura e velocidade do vento a um servidor remoto, por meio de um modem GPRS. A partir das simulações e testes realizados, chegou-se à conclusão de que a topologia proposta que sofre menor influência de sua própria estrutura na medição da velocidade do vento é a não ortogonal. Nos testes realizados com esta estrutura, o coeficiente de determinação obtido foi 0,995 quando feita a comparação do protótipo desenvolvido com o equipamento de referência, para velocidades do vento entre 0 e 138 km/h. Testes em campo foram realizados e validaram o funcionamento e a robustez do sistema desenvolvido como um todo.

# Abstract

The wind speed study is important to various areas of expertise such as agriculture, biology, civil engineering, among others. This speed is measured by devices known as anemometers. Among the types of anemometers, one that requires less maintenance is the ultrasonic, so it is most suitable for use in a remote measurement system. This paper deals with the development of a three-dimensional ultrasonic anemometer and a data acquisition system. Two anemometer prototypes were developed in structural and hardware levels: one with orthogonal and the other with non-orthogonal transducer positioning and the topologies were evaluated which one has best accuracy in measuring wind velocity. The developed acquisition system has as main characteristic the collection, storage and shipping data of temperature and wind speed to a remote server through a GPRS modem. From carried out simulations and tests, it is came to the conclusion that the proposed topology that suffers less interference from its own structure in the wind speed measurement is non-orthogonal. In tests conducted with this structure, the obtained coefficient of determination was 0.995 when compared the developed prototype to the reference equipment for wind speeds between 0 and 138 km / h. Field tests were carried out and validate the operation and robustness of the system developed as a whole.

# Sumário

## Lista de Figuras

## Lista de Abreviaturas

<b>1</b>	<b>Introdução</b>	<b>1</b>
1.1	Organização do trabalho . . . . .	5
<b>2</b>	<b>Fundamentação Teórica</b>	<b>7</b>
2.1	Anemometria ultrassônica, grandezas envolvidas e técnica de medição utilizada . . . . .	7
2.1.1	Vantagens da anemometria ultrassônica . . . . .	7
2.1.2	Técnica de medição por cálculo do tempo de trânsito . . .	8
2.2	Geometria posicional espacial dos transdutores . . . . .	11
2.2.1	Configuração tridimensional ortogonal . . . . .	12
2.2.2	Configuração tridimensional não ortogonal . . . . .	13
2.2.3	Interferência estrutural na medida da velocidade do vento .	16
<b>3</b>	<b>Metodologia</b>	<b>19</b>
3.1	Solução proposta . . . . .	19
3.2	Desenvolvimento dos protótipos dos anemômetros ultrassônicos 3D	20
3.2.1	<i>Hardware</i> . . . . .	21
3.2.2	Projeto mecânico . . . . .	27
3.3	Desenvolvimento do sistema de aquisição de dados . . . . .	33
3.3.1	Elementos do sistema de aquisição de dados . . . . .	34
3.3.2	Ciclo de funcionamento . . . . .	40

<b>4</b>	<b>Resultados e discussão</b>	<b>43</b>
4.1	Protótipos do anemômetro ultrassônico 3D . . . . .	43
4.1.1	Placa de instrumentação e sinais de transmissão e recepção	43
4.1.2	Estrutura mecânica . . . . .	47
4.2	Protótipo do sistema de aquisição de dados . . . . .	48
4.3	Formato do pacote de dados enviado ao servidor . . . . .	49
4.4	Simulação da influência da estrutura na medida da velocidade do vento . . . . .	52
4.5	Testes comparativos entre as estruturas . . . . .	55
4.5.1	Topologia ortogonal . . . . .	56
4.5.2	Topologia não ortogonal . . . . .	60
4.5.3	Vantagens da topologia não ortogonal . . . . .	62
4.6	Testes em campo . . . . .	63
<b>5</b>	<b>Conclusão</b>	<b>67</b>
	<b>Referências</b>	<b>69</b>
	<b>APÊNDICE A – Esquemas elétricos dos circuitos eletrônicos</b>	<b>76</b>
	<b>APÊNDICE B – Artigo publicado no XI IEEE/IAS <i>International Conference on Industry Applications</i> - INDUSCON 2014</b>	<b>78</b>
	<b>APÊNDICE C – Artigo publicado no X Congresso Brasileiro de Agroinformática - SBIAGRO 2015</b>	<b>86</b>
	<b>APÊNDICE D – Artigo submetido ao periódico IEEE <i>Transactions on Instrumentation and Measurement</i> em 2016</b>	<b>97</b>
	<b>ANEXO A – <i>Datasheet</i> do transdutor ultrassônico 400EP18A</b>	<b>106</b>
	<b>ANEXO B – <i>Datasheet</i> do anemômetro ultrassônico WindMaster 3D</b>	<b>108</b>

# Lista de Figuras

2.1	Diagrama de funcionamento da técnica de medição por tempo de trânsito. . . . .	8
2.2	Sinais de transmissão (a), recepção (b) e cruzamento por zero (c) da onda ultrassônica. . . . .	9
2.3	Geometria posicional ortogonal adotada e direção dos transdutores.	13
2.4	Geometria posicional não ortogonal adotada e direção dos transdutores. . . . .	14
2.5	Situação de turbulência na topologia ortogonal para ventos paralelos ao plano terrestre. . . . .	18
2.6	Situação de turbulência na topologia não ortogonal para ventos paralelos ao plano terrestre. . . . .	18
3.1	Diagrama geral do sistema proposto. . . . .	20
3.2	Circuito de excitação dos transdutores. . . . .	23
3.3	Circuito de condicionamento de sinais. . . . .	23
3.4	Trilhas da face superior da placa de circuito impresso. . . . .	27
3.5	Trilhas da face inferior da placa de circuito impresso. . . . .	27
3.6	Corpo do anemômetro e suas partes (topologia ortogonal). . . . .	28
3.7	Suporte dos transdutores em vista explodida e isométrica. . . . .	28
3.8	Anemômetro projetado em software de modelagem 3D com topologia ortogonal. . . . .	29
3.9	Eixos cartesianos relativos aos pares de transdutores do anemômetro com topologia ortogonal. . . . .	30
3.10	Anemômetro projetado em software de modelagem 3D com topologia não ortogonal. . . . .	31
3.11	Eixos cartesianos relativos aos pares de transdutores do anemômetro com topologia não ortogonal. . . . .	32

3.12 Disposição dos suportes dos transdutores no anemômetro não ortogonal. . . . .	32
3.13 Corte de seção do corpo do anemometro não ortogonal. . . . .	33
3.14 Diagrama de blocos do sistema de aquisição de dados. . . . .	34
3.15 Protocolo de comunicação entre o sistema de aquisição de dados e o anemômetro. . . . .	38
4.1 Placa de circuito impresso do anemômetro ultrassônico com os cabos dos transdutores, face superior e face inferior, respectivamente.	44
4.2 Sinal de transmissão gerado pelo microcontrolador. . . . .	44
4.3 Sinal de transmissão presente sobre o transformador de pulso. . .	45
4.4 Sinal de transmissão aplicado no transdutor ultrassônico. . . . .	46
4.5 Sinal de recepção obtido no transdutor ultrassônico. . . . .	46
4.6 Sinal de recepção após amplificação e filtragem analógica. . . . .	47
4.7 Protótipo de anemômetro ultrassônico 3D com topologia ortogonal.	48
4.8 Protótipo de anemômetro ultrassônico 3D com topologia não ortogonal. . . . .	48
4.9 Placa de circuito impresso do sistema de aquisição de dados, face superior e inferior, respectivamente. . . . .	49
4.10 Montagem em caixa plástica da placa de circuito impresso do sistema de aquisição de dados. . . . .	49
4.11 Formato do pacote de dados. . . . .	50
4.12 Simulação do vento incidindo a 45° sobre o suporte dos transdutores em vista isométrica. . . . .	53
4.13 Simulação do vento incidindo a 45° sobre o suporte dos transdutores em vista superior. . . . .	54
4.14 Simulação do vento incidindo paralelamente ao suporte dos transdutores em vista isométrica. . . . .	54
4.15 Simulação do vento incidindo paralelamente ao suporte dos transdutores em detalhe da vista superior. . . . .	55
4.16 Montagem experimental do protótipo com topologia ortogonal. . .	56



4.17	Montagem experimental do protótipo com topologia não ortogonal.	57
4.18	Teste com o anemômetro ortogonal posicionado com eixo X á 45° da frente do automóvel. . . . .	58
4.19	Regressão para o anemômetro ortogonal posicionado com eixo X á 45° da frente do automóvel. . . . .	58
4.20	Teste com o anemômetro ortogonal com o eixo X posicionado em paralelo com a frente do automóvel. . . . .	59
4.21	Regressão para o anemômetro ortogonal com o eixo x posicionado em paralelo com o automóvel. . . . .	60
4.22	Teste com o anemômetro não ortogonal. . . . .	61
4.23	Regressão linear para o anemômetro não ortogonal. . . . .	62
4.24	Instalação em campo do sistema desenvolvido na estação meteo- rológica do SIMEPAR, em Londrina-PR. . . . .	64
4.25	Dados obtidos em campo na primeira semana de testes. . . . .	65
4.26	Dados obtidos em campo na segunda semana de testes. . . . .	65
4.27	Dados obtidos em campo na terceira semana de testes. . . . .	66
A.1	Circuito completo de excitação dos transdutores e condicionamento de sinais. . . . .	76
A.2	Circuitos reguladores de tensão da placa eletrônica dos anemômetros.	77

# Lista de Abreviaturas

**APN** Access Point Name

**BC** Baixo Cima

**EEPROM** Electrically-Erasable Programmable Read-Only Memory

**FPU** Float Point Unit

**GPRS** General Packet Radio Services

**GSM** Groupe Special Mobile

**IAPAR** Instituto Agronômico do Paraná

**IP** Ingress Protection

**LO** Leste Oeste

**PWM** Pulse Width Modulation

**SIMEPAR** Sistema Meteorológico do Paraná

**SPI** Serial Peripheral Interface

**SN** Sul Norte

**TCP** Transmission Control Protocol

**TDT** Tempo de trânsito

**UART** Universal Asynchronous Receiver/Transmitter

**USB** Universal Serial Bus

# 1 Introdução

O estudo do vento, no que se trata do conhecimento de sua velocidade e direção, é tema de varias áreas do conhecimento como a agricultura (CLEUGH; MILLER; BÖHM, 1998), biologia (ÅKESSON; HEDENSTRÖM, 2000), engenharia civil (CHOOSAKUL; KAKSUNGNOEN; WITOONSET, 2015), geração de energia elétrica (WAGNER et al., 2009) e até mesmo para a própria segurança da população, como por exemplo em tornados e furacões. Desta forma, mensurar o vento possui grande valor científico para a sociedade.

Para se aferir a velocidade do vento são utilizados dispositivos conhecidos como anemômetros. Eles realizam a medição baseados em diferentes princípios de funcionamento, os mais conhecidos são o rotacional, termoeletrico e ultrassônico. Há ainda o anemômetro laser Doppler, em que a luz de um laser ilumina o fluido a ser medido e a luz dispersa é deslocada pelo efeito Doppler, contendo a informação de velocidade (TOBBEN; KARBSEK, 2000). Este princípio de funcionamento não é muito difundido comercialmente, contudo é objeto de estudo de pesquisas científicas na área (SOBOLEV; FESHENKO, 2006; SHU, 2001).

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

Já o anemômetro termoeletrico, também conhecido como anemômetro a fio quente, é baseado no aquecimento de um condutor elétrico que fica exposto ao vento a ser medido. Então, é avaliada eletronicamente a perda de calor do con-

dutor devido à passagem do vento, aferindo a temperatura do condutor e do ambiente. Assim, mede-se a variação da corrente aplicada no condutor para que sua temperatura seja mantida constante. Este método de medição possui uma boa resposta para velocidades baixas e ventos turbulentos, contudo, por ser frágil, requer uma manutenção periódica ocasionada por possíveis partículas que possam ficar depositadas sobre o condutor, alterando assim a sua resposta. É possível encontrar na literatura vários trabalhos que propõem o desenvolvimento de anemômetros de tal tipo (FERREIRA et al., 2001; OKAMOTO et al., 1994; KREIDER, 1973; BULLOCK; BREMHORST, 1969) ou fazem o estudo de características construtivas e eletrônicas destes equipamentos, como o trabalho de Bremhorst (1972) que avalia os efeitos causados pelo comprimento do condutor utilizado e de Kidron (1967) que analisa a relação sinal-ruído dos sinais de corrente e tensão. Outros trabalhos apresentam anemômetros que utilizam o mesmo princípio de funcionamento do equipamento a fio quente, contudo, ao invés de utilizar um condutor, é feito o uso de um termistor (FUJITA et al., 1995) ou transistor (BERA; MARICK, 2012) como elemento de aquecimento. A existência de vários trabalhos relacionados a este tipo de anemômetro indicam um elevado grau de desenvolvimento científico desta técnica de medição e também corroboram as limitações e fragilidades existentes.

Em um sistema de medição remoto, deseja-se que sua operação não necessite de manutenção por um longo período de tempo, portanto, dentre os tipos de anemômetros citados, aquele que satisfaz essa condição é o ultrassônico. Baseado neste princípio e focando uma aplicação geral do equipamento, este trabalho propõe o desenvolvimento de um anemômetro ultrassônico tridimensional e um sistema de aquisição de dados, que possibilite o acesso das medidas de velocidade do vento via internet.

A técnica de medição por ultrassom é utilizada em várias aplicações além da aferição da velocidade do vento na natureza (LYNNWORTH; LIU, 2006), como para, em conjunto com um sensor de gás, se rastrear e encontrar plumas de gás (ISHIDA; YOSHIKAWA; MORIIZUMI, 2004; USHIKU et al., 2006), medir o fluxo de gases em chaminés (OLMOS, 2004), mensurar o fluxo respiratório (ARAUJO et al., 2007), medir a vazão de líquidos (COMES et al., 2006; PAVKOVIC et al., 2014) e gases (YEH; ESPINA; OSELLA, 2001; ZHU et al., 2016), a incrustação de resíduos em canos e tubulações (SILVA et al., 2008) ou aferir ventos de baixa intensidade, dentro de estufas (WANG; YERNAUX; DELTOUR, 1999). Estas variadas aplicações comprovam a eficiência do método escolhido e permitem dizer que o desenvolvimento de um equipamento de tal tipo condiz com aquilo que está sendo estudado

no meio científico.

Para se mensurar o vento por ultrassom podem ser utilizados dois métodos, por tempo de trânsito (MARIOLI et al., 1992) ou vortex (HANS; WINDORFER, 2003). No método de medição por vortex é difícil se determinar a direção e sentido do vento, assim, quando se deseja obter esta informação o método por tempo de trânsito é utilizado. Com isso, a medição do tempo do trânsito pode ser feita aplicando um onda continua ou um trem de pulsos sobre o transdutor transmissor. Quando é aplicada uma onda continua, avalia-se a mudança de fase do sinal, o que requer um hardware complexo e necessita de mais de um transdutor como receptor (HAN; KIM; PARK, 2008). Portanto, o método mais simples é aquele em que um conjunto de pulsos irá trafegar pelo ar, demorando um tempo variável para chegar em um outro transdutor conforme o vento incidente. Isso permite que apenas um par de transdutores forme um eixo de medição. Outro fato relevante é que este método possui seu funcionamento já comprovado por vários autores (KUDO; MIZUTANI; ITOGA, 2005; BUCCI et al., 2013; VALLE et al., 2007), o que aumenta a sua confiabilidade, sendo o escolhido para ser utilizado neste trabalho.

A robustez na medição da velocidade do vento por ultrassom também pode ser comprovada com o funcionamento deste tipo de equipamento em condições adversas, como em atmosferas com diferentes concentrações de gases da que é normalmente encontrada no ambiente terrestre (BANFIELD; DISSLY, 2005) ou em situações climáticas de elevada umidade, onde há geração de neblina (EL-MADANY et al., 2013).

Além de obter a velocidade, em um anemômetro ultrassônico é possível obter também a direção e sentido do vento. Aprilesi, De Cicco e Taroni (1983), descrevem um equipamento que realiza medidas em três dimensões e medição de ventos a até 72 km/h, porém o trabalho é antigo e não são descritas muitas características do anemômetro. Outros trabalhos também desenvolvem anemômetros ultrassônicos, com faixas de medição variadas, que podem chegar a 220 km/h (HAN; PARK, 2011), contudo todos os protótipos realizam medidas bidimensionais (HAN; PARK, 2011; KUDO; MIZUTANI; ITOGA, 2005; BUCCI et al., 2013; VALLE et al., 2007; HAN; KIM; PARK, 2008). Isso limita as aplicações do equipamento, já que os ventos na maioria das vezes não são controlados, podendo estar em qualquer direção, assim um anemômetro que faça a medida em duas dimensões não consegue medir corretamente um vento aleatório.

Sabe-se que os anemômetros comerciais, que possuem um custo entre 2 e 3 mil dólares, possuem problemas relacionados a sua estrutura, que causam dis-

torção nas medidas (WIESER; FIEDLER; CORSMEIER, 2001). Mesmo assim, não se encontram trabalhos que visam realizar um estudo prévio da estrutura mecânica a ser adotada no equipamento proposto, não havendo qualquer preocupação neste aspecto, que pode afetar diretamente a precisão do anemômetro. Algo que é comprovado em Kudo, Mizutani e Itoga (2005), que percebem este tipo de erro nos testes que realizam com seu protótipo, gerando restrições operacionais ao equipamento. Observando o protótipo implementado por Han, Kim e Park (2008), percebe-se claramente que caso haja um vento incidente em qualquer ângulo que não seja paralelo ao eixo de medição haverá distorção na medida. Bucci et al. (2013) e Valle et al. (2007) propõem uma geometria posicional muito semelhante entre si, porém também não avaliam a possibilidade do vento se tornar turbulento no espaço compreendido entre os transdutores.

O local onde o anemômetro irá operar também é um parâmetro de projeto muito importante, que pode gerar limitações relacionadas a processos fabris e componentes comerciais. Verifica-se que normalmente é proposto o desenvolvimento de equipamentos para funcionamento em ambientes controlados, seja em laboratório ou em túnel de vento (KUDO; MIZUTANI; ITOGA, 2005; BUCCI et al., 2013; VALLE et al., 2007; HAN; KIM; PARK, 2008). Desta forma, não são tomados cuidados como a utilização de componentes resistentes a chuva ou o desenvolvimento de uma estrutura durável o suficiente para a instalação do equipamento em campo.

Sabe-se também que em âmbito nacional não se encontra qualquer fabricante de anemômetro ultrassônico, sendo que todos os modelos vendidos são importados, aumentando ainda mais o seu custo. Em vista disso, a existência de um equipamento nacional possui um grande potencial de mercado. Aliado ainda a um sistema de aquisição de dados robusto e funcional, se torna uma solução completa para aqueles que necessitam monitorar a intensidade do vento nos mais variados locais do país.

Visando as mais variadas aplicações, é proposto o desenvolvimento de um anemômetro tridimensional capaz de medir velocidades do vento de até 150 Km/h. Para isso, foi realizado um estudo prévio e tomadas medidas construtivas que possibilitaram ao equipamento medir a velocidade do vento na faixa proposta com a mínima interferência estrutural, propondo o desenvolvendo de dois protótipos, com topologias posicionais dos transdutores diferentes. Buscou-se também aplicar medidas que permitam o funcionamento do equipamento em ambientes externos, algo necessário, tendo em vista a aplicação geral do anemômetro.

Quando se deseja medir alguma grandeza física, são utilizados transdutores que convertem o fenômeno físico em um sinal elétrico. Estes sinais devem então ser coletados e disponibilizados para o usuário. O dispositivo responsável por isso é conhecido como sistema de aquisição de dados (ABDALLAH; ELKEELANY, 2009).

Usualmente tais sistemas fazem a leitura de sinais analógicos provenientes dos transdutores, os convertem para uma representação digital e os enviam para um computador. Todo esse processo é feito no local em que as medidas são efetuadas, onde os elementos são interligados via cabos e barramentos de comunicação. Algo que pode ser visto no trabalho de Shaout et al. (2014), em que é desenvolvida uma estação meteorológica que faz medidas de temperatura, velocidade e sentido do vento, e os dados coletados são enviados a um computador para o seu armazenamento e processamento.

Desta forma, quando se deseja medir alguma grandeza em um local remoto, as opções comerciais se tornam escassas. Ainda mais quando se deseja coletar dados de um equipamento não existente no mercado. Com isso, se tornou necessário o desenvolvimento de um sistema de aquisição de dados exclusivo para o anemômetro criado.

Como há o objetivo de se monitorar a velocidade do vento em qualquer local, o sistema de aquisição de dados deve possuir algumas características especiais. O funcionamento sem a necessidade de manutenção é algo primordial, assim o sistema deve ser autônomo e possuir um modo de transmitir os dados coletados sem a necessidade de um computador ou armazená-los por um longo período de tempo. Estas podem ser consideradas as principais diretrizes adotadas durante o desenvolvimento do sistema apresentado neste trabalho.

## 1.1 Organização do trabalho

Este trabalho está subdividido da seguinte forma:

O capítulo 2, constituído por duas seções, apresenta uma breve fundamentação teórica, tratando das vantagens da anemometria ultrassônica e da técnica de medição utilizada no trabalho. Também esclarece as diferenças entre as topologias tridimensionais dos anemômetros, bem como a maneira que a estrutura do anemômetro pode influenciar as medidas.

No capítulo 3, é apresentada inicialmente uma visão geral sobre o sistema desenvolvido na seção 3.1. O projeto dos protótipos de anemômetros desenvol-

vidos e do sistema de aquisição de dados estão presentes nas seções 3.2 e 3.3, respectivamente.

Os protótipos implementados são apresentados nas seções 4.1 e 4.2, que integram o capítulo 4, também constituído pelas seções 4.3, que mostra como o pacote de dados advindo do sistema de aquisição de dados chega ao servidor, 4.4, que apresenta as simulações do fluxo de vento incidente sobre o anemômetro, 4.5, que exhibe os testes realizados nos anemômetros e as vantagens e desvantagens encontradas em cada topologia e 4.6, que mostra os resultados obtidos durante os testes realizados em campo.

Por fim, o capítulo 5 apresenta as conclusões do trabalho e prospectos de desenvolvimento.



## 2 Fundamentação Teórica

### 2.1 Anemometria ultrassônica, grandezas envolvidas e técnica de medição utilizada

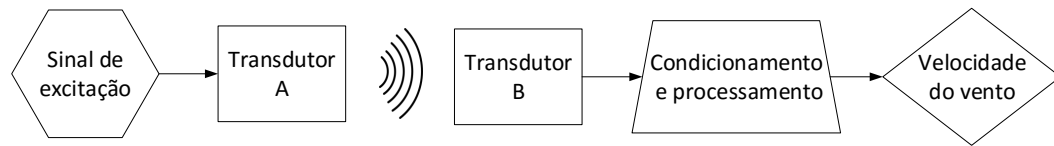
Existem vários tipos de equipamento que fazem a medição da velocidade do vento. Neste trabalho a medição será feita por meio de uma onda ultrassônica. Para a obtenção da velocidade do vento desta forma é calculado o tempo de trânsito da onda. A maneira que isto é feito e a diferença entre os tipos de anemômetros é apresentada de maneira resumida nesta seção.

#### 2.1.1 Vantagens da anemometria ultrassônica

Anemômetros termoelétricos são muito rápidos, ou seja, é possível obter a velocidade do vento instantaneamente com este tipo de transdutor. Entretanto, tais equipamentos são extremamente frágeis, pois são constituídos de um filamento muito fino de metal, geralmente tungstênio, que deve ficar exposto ao vento para poder efetuar as medições. Portanto, são utilizados apenas em aplicações muito específicas, quando se deseja caracterizar ventos turbulentos.

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

A mesma necessidade de manutenção existente para os anemômetros rotacionais, aplica-se aos tubos de Pitot, uma vez que estes transformam velocidade do vento em pressão e, para isto, o vento deve atravessar um orifício estreito.

**Figura 2.1** – Diagrama de funcionamento da técnica de medição por tempo de trânsito.

Fonte: Autor.

Normalmente, após longos períodos de exposição, este tubo é obstruído por detritos frequentemente encontrados em ventos provenientes de lugares abertos. Por conta disso, anemômetros baseados em tubo de Pitot também não são os mais indicados para monitoramento da velocidade do vento por um longo período de tempo.

Devido a estas características, é consenso que os anemômetros a ultrassom são os mais indicados quando é necessário o monitoramento da velocidade do vento nas condições supracitadas. Isto porque esses instrumentos, caso expostos por longos períodos de tempo à umidade e a temperatura, não perdem a sua sensibilidade. Por isso, esse foi o tipo de anemômetro escolhido para medir-se a intensidade e a direção do vento neste trabalho.

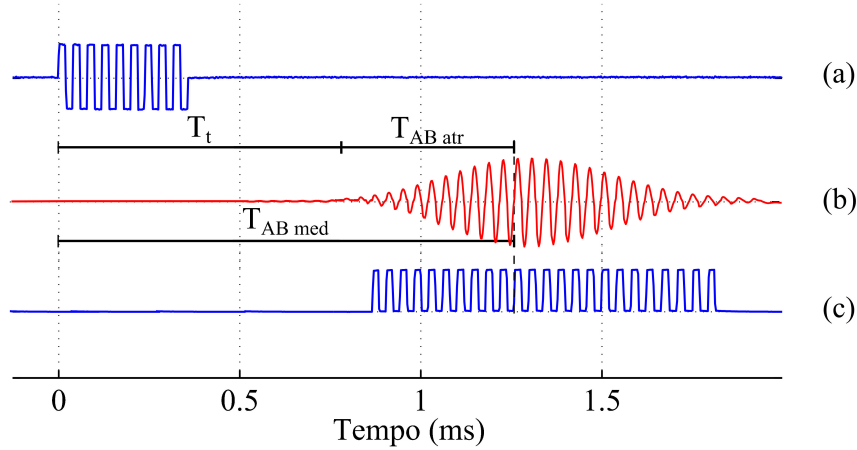
As principais vantagens dos transdutores ultrassônicos para a medição de velocidade em fluidos são: boa exatidão; respostas rápidas; ausência de partes móveis, e; linearidade em ampla faixa de frequência.

### 2.1.2 Técnica de medição por cálculo do tempo de trânsito

Um anemômetro ultrassônico pode utilizar-se de várias técnicas para aferição da velocidade do vento. Neste trabalho a técnica utilizada será a medição por cálculo do tempo de trânsito de um pulso ultrassônico, tal como descrita no trabalho de Schotland (1955). Um diagrama de blocos que exemplifica o funcionamento desta técnica pode ser observado na Figura 2.1.

Na Figura 2.1, o anemômetro ultrassônico é formado por um bloco que gera um sinal de referência, o qual é enviado ao transdutor-transmissor (A). Este, por sua vez, emite o sinal ultrassônico, o qual viaja através do ar, sofrendo interferência do vento. Com isso, analisa-se o tempo que a onda emitida pelo transmissor demora para chegar ao receptor (B), colocado na frente do transdutor A. Este tempo, chamado de tempo de trânsito, varia conforme a velocidade de propagação do som, que é dependente da umidade e temperatura do ar, e a

**Figura 2.2** – Sinais de transmissão (a), recepção (b) e cruzamento por zero (c) da onda ultrassônica.



velocidade e sentido do vento presente entre o transmissor e o receptor.

Desta forma, o sinal ultrassônico emitido pelo transmissor (A) chega ao receptor (B) após um intervalo de tempo definido como  $T_t$ , como pode ser visto na Figura 2.2. Este sinal ultrassônico é convertido em um sinal elétrico ao chegar no receptor (onda 'b' da Figura 2.2). Este sinal possui duas informações a serem analisadas: o tempo total de trânsito da onda ultrassônica, representado por  $T_{ABmed}$ , e a amplitude do sinal, obtida por sua envoltória. Observa-se ainda na Figura 2.2 o tempo definido como  $T_{ABatr}$ , que é o atraso eletrônico do sinal, que também pode ser definido como a diferença entre o tempo de trânsito,  $T_t$ , e  $T_{ABmed}$ . Apresenta-se também nesta figura o formato das ondas de transmissão e da onda recebida após sua passagem pelo detector de cruzamento por zero.

Existem modelos matemáticos que descrevem o cálculo do tempo de trânsito para anemômetros ultrassônicos do tipo pulsado. Este trabalho faz o uso de um modelo matemático próximo ao apresentado nos trabalhos de Cuerva e Sanz-Andrés (2000), Dong e Jun (2013), Tang, Federspiel e Auslander (2003). Assim, a técnica utilizada para a obtenção do tempo de trânsito da onda ultrassônica, e consequentemente da velocidade do vento é baseada no equacionamento que é apresentado a seguir e serve para a obtenção da velocidade do vento tridimensional.

Considerando a incidência de um vento com sentido paralelo ao eixo formado pela distância dos transdutores A e B, é possível se obter a velocidade do vento entre os transdutores a partir da aferição do tempo de trânsito da onda ultrassônica conforme a relação,

$$V_{AB} = \frac{d_{AB}}{T_{ABmed} - T_{ABatr}} - V_{som}, \quad (2.1)$$

onde  $d_{AB}$  é a distância entre os transdutores e  $V_{som}$  representa a velocidade do som. Lembrando que  $T_{ABmed}$  é o tempo total de trânsito da onda ultrassônica e  $T_{ABatr}$  é o atraso eletrônico do sinal.

No caso da incidência de vento não paralelo ao eixo dos transdutores, em que ele pode ser decomposto na somatória de dois vetores, um paralelo e um perpendicular ao eixo, a Equação 2.1 não pode ser utilizada. Desta forma, para se obter uma relação válida, é possível considerar a equação apresentada no trabalho de Schotland (1955),

$$(x - V_x \cdot T_t)^2 + (y - V_y \cdot T_t)^2 + (z - V_z \cdot T_t)^2 = (V_{som} \cdot T_t)^2, \quad (2.2)$$

tal que  $x$ ,  $y$  e  $z$  são as coordenadas da posição do transdutor receptor em relação ao transmissor em um plano tridimensional e  $V_x$ ,  $V_y$  e  $V_z$  são as componentes vetoriais de velocidade do vento.

Sabendo-se da relação,

$$T_t = T_{ABmed} - T_{ABatr} \quad (2.3)$$

e considerando que o par de transdutores, A (transmissor) e B (receptor), está localizado sobre o mesmo eixo X de um plano cartesiano, a uma distância  $d_{AB}$  entre eles, fazendo a substituição de 2.3 em 2.2, se obtém após alguns rearranjos matemáticos (SCHOTLAND, 1955),

$$V_{AB} = \frac{d_{AB}}{T_{ABmed} - T_{ABatr}} - \sqrt{V_{som}^2 - V_y^2 - V_z^2}. \quad (2.4)$$

Essa equação possui caráter mais genérico que a Equação 2.1, já que pode ser utilizada para vento incidente em qualquer sentido, contudo é necessário que os valores de  $V_{som}$ ,  $V_y$  e  $V_z$  sejam conhecidos.

Em uma segunda situação, em que o sinal ultrassônico é transmitido em sentido contrário, sendo o transdutor B transmissor e A receptor, obtêm-se

$$V_{BA} = \frac{d_{AB}}{T_{BAmed} - T_{BAatr}} + \sqrt{V_{som}^2 - V_y^2 - V_z^2}. \quad (2.5)$$

Calculando-se a média dos valores obtidos em 2.4 e 2.5, é possível se definir

uma nova equação para o cálculo da velocidade do vento entre os transdutores (SCHOTLAND, 1955),

$$V_{AB} = \frac{d_{AB}}{2} \left( \frac{1}{T_{ABmed} - T_{ABatr}} - \frac{1}{T_{BAmed} - T_{BAatr}} \right). \quad (2.6)$$

Desta forma, o conhecimento de variáveis mais complexas, como a velocidade do vento em sentidos diferentes daquele que estão posicionados os transdutores, não são necessárias. Também não se torna necessário o conhecimento da velocidade do som, que é uma variável difícil de se obter, já ela varia conforme a temperatura e umidade do ar.

Por conseguinte, neste trabalho, para se obter a velocidade do vento paralela ao eixo formado por dois transdutores, são realizadas duas transmissões em sentidos opostos. Desta forma, o transdutor deve funcionar como transceptor, o que deve ser considerado para o desenvolvimento do circuito de acionamento. E, como o anemômetro proposto deve possuir a capacidade de efetuar medidas tridimensionais, este dispositivo possui então, três pares de transdutores, que estão distribuídos no espaço conforme está apresentado na Secção 2.2.

A constante  $T_{BAatr}$ , presente na Equação 2.6, é definida baseada na escolha do cruzamento por zero de referência, que é um dos cruzamentos presentes na onda recebida pelo transdutor após passar pelo estágio detector, que pode ser implementado digitalmente. Esse cruzamento ocorre quando a envoltória do sinal de recepção possui seu valor máximo ao mesmo tempo que a velocidade do vento é nula. Quando a velocidade do vento difere de zero, há um deslocamento do cruzamento por zero de referência, esse deslocamento é utilizado para se calcular a velocidade do vento.

## 2.2 Geometria posicional espacial dos transdutores

Em um anemômetro ultrassônico, para se obter também o sentido do vento além de seu módulo, é possível aumentar a quantidade de transdutores ultrassônicos e posicioná-los de forma que se possibilite uma medida tridimensional, ou seja, posicionando pares de transdutores nos diferentes eixos cartesianos. Desta forma é necessário que várias medidas unidimensionais de velocidade do vento gerem uma medida tridimensional. Para isso, caso os transdutores não estejam po-

sicionados nos eixos convencionais, é necessária a ortogonalização das medidas unidimensionais.

O posicionamento de dois transdutores frente a frente, como foi abordado anteriormente, permite somente uma medida unidimensional. Como o trabalho foca uma medida tridimensional da velocidade do vento, são abordados neste capítulo como são obtidas as medidas tridimensionais, para o sistema com configuração ortogonal e não ortogonal.

Quando se trata de anemômetros ultrassônicos comerciais, existem estudos que realizam experimentos comparativos entre estruturas ortogonais e não ortogonais, e mostram que o equipamento com topologia não-ortogonal pode subestimar a medida de velocidade do vento (FRANK; MASSMAN; EWERS, 2013). Por outro lado, sabe-se que os anemômetros não ortogonais possuem uma maior exatidão em ventos horizontais devido ao fato do sombreamento dos tradutores ser minimizado (NAKAI et al., 2006). Desta forma, este trabalho busca com o desenvolvimento das duas topologias, verificar se estas prerrogativas também se aplicam aos protótipos desenvolvidos, que possuem uma distribuição espacial dos sensores diferentes dos modelos comerciais.

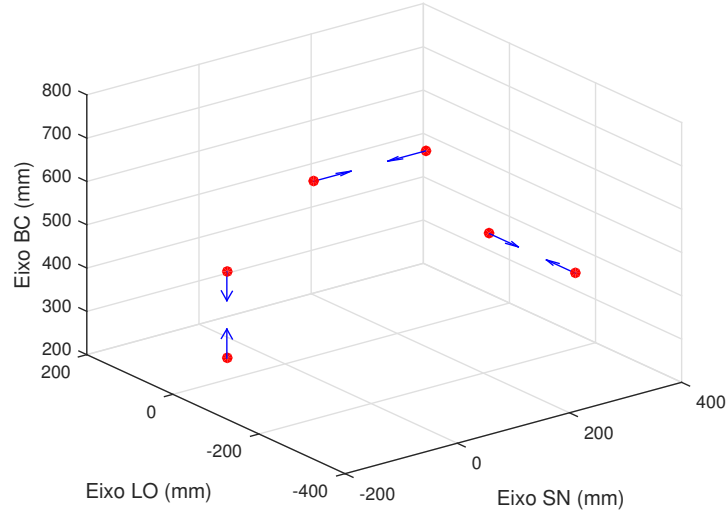
Ainda é explorada neste capítulo a maneira em que a estrutura mecânica do anemômetro influencia as medidas e como a alteração da geometria posicional dos transdutores pode reduzir esta influência.

### 2.2.1 Configuração tridimensional ortogonal

Para um sistema ortogonal, ou seja, com os vetores de velocidade do vento perpendiculares entre si, a obtenção das velocidades nos eixos cartesianos convencionais fica simples. No caso desse trabalho, para a configuração ortogonal, optou-se por colocar os planos de medição paralelos com eixos convencionais, X, Y e Z, convencionando-se os nomes como Sul Norte, Leste Oeste e Baixo Cima, respectivamente, para facilitar a compreensão. Assim, utilizando três pares de transdutores e posicionando cada par em um dos eixos citados, a obtenção da velocidade do vento se torna imediata. Portanto, analisando-se o tempo de trânsito da onda ultrassônica gerada em cada eixo, a velocidade do vento nos eixos convencionais é obtida sem a necessidade de ortogonalizar ou transladar os vetores de velocidade.

A Figura 2.3 mostra o posicionamento dos transdutores no espaço para sistema com topologia ortogonal, como especificado anteriormente.

**Figura 2.3** – Geometria posicional ortogonal adotada e direção dos transdutores.



Fonte: Autor.

A utilização deste tipo de topologia posicional reduz o custo computacional do equipamento, já que não é necessária a aplicação de qualquer matriz de conversão para a obtenção das velocidades ortogonais nos eixos convencionais.

Possuindo as velocidades em cada eixo, pode-se obter o módulo da velocidade do vento,  $|V|$ , aplicando a relação

$$|V| = \sqrt{V_{SN}^2 + V_{LO}^2 + V_{BC}^2}, \quad (2.7)$$

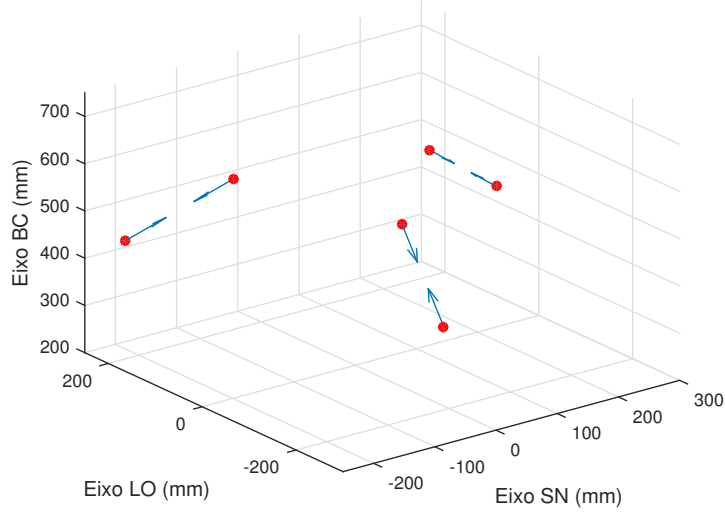
em que  $V_{SN}$  representa a velocidade no eixo Sul Norte,  $V_{LO}$  a velocidade no eixo Leste Oeste e  $V_{BC}$  a velocidade no eixo Baixo Cima.

### 2.2.2 Configuração tridimensional não ortogonal

Quando se considera um sistema não ortogonal, para que se obtenha a velocidade do vento nos eixos cartesianos convencionais é necessário que seja aplicado um processo de ortogonalização das velocidades. Esse processo será apresentado a seguir.

Esta topologia também faz o uso de seis transdutores ultrassônicos, divididos em três pares. Cada par é capaz de medir a velocidade do vento em seu respectivo eixo e, se utilizado as três medidas, se obtêm uma aferição tridimensional. A Figura 2.4 mostra a geometria posicional dos tradutores ultrassônicos no espaço para a topologia não ortogonal que será utilizada neste trabalho.

**Figura 2.4** – Geometria posicional não ortogonal adotada e direção dos transdutores.



Fonte: Autor.

Tomando os eixos cartesianos convencionais, SN, LO e BC, é possível escrever matricialmente a posição dos transdutores no espaço

$$X_{T_1} = \begin{bmatrix} x_1 \\ y_1 \\ z_1 \end{bmatrix}, X_{T_2} = \begin{bmatrix} x_2 \\ y_2 \\ z_2 \end{bmatrix}, \dots, X_{T_6} = \begin{bmatrix} x_6 \\ y_6 \\ z_6 \end{bmatrix}, \quad (2.8)$$

em que  $x_1$  a  $x_6$  representam suas posições no eixo SN,  $y_1$  a  $y_6$  representam as posições no eixo LO e  $z_1$  a  $z_6$  representam as posições no eixo BC.

Ao agrupar as posições de todos os 6 transdutores em uma única matriz,  $X_P$ , tem-se

$$X_P = \begin{bmatrix} x_1 & x_2 & x_3 & x_4 & x_5 & x_6 \\ y_1 & y_2 & y_3 & y_4 & y_5 & y_6 \\ z_1 & z_2 & z_3 & z_4 & z_5 & z_6 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X_{T_1} & X_{T_2} & X_{T_3} & X_{T_4} & X_{T_5} & X_{T_6} \end{bmatrix}. \quad (2.9)$$

A topologia proposta na Figura 2.4 possui o norte rotacionado no sentido horário com um ângulo  $\theta = 15^\circ$  em relação os par de transdutores 1 e 2 no plano SN-LO. Devido a isso é necessário que seja aplicada uma matriz de rotação,  $M_{ROT}(\theta)$ , que é definida como



$$M_{ROT}(\theta) = \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \sin(\theta) & 0 \\ -\sin(\theta) & \cos(\theta) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad (2.10)$$

sobre a matriz de posições, resultando na matriz de posições rotacionada,  $X_P'$ ,

$$X_P' = M_{ROT}(15^\circ)X_P. \quad (2.11)$$

Definido o posicionamento dos transdutores no espaço, pode-se escrever os versores da posição  $X_P'$  relativos ao vetor formado pelas posições de cada par de transdutor,

$$U_{12} = \frac{X_{T_2}' - X_{T_1}'}{\|X_{T_2}' - X_{T_1}'\|}; U_{34} = \frac{X_{T_4}' - X_{T_3}'}{\|X_{T_4}' - X_{T_3}'\|}; U_{56} = \frac{X_{T_6}' - X_{T_5}'}{\|X_{T_6}' - X_{T_5}'\|}; \quad (2.12)$$

em que  $X_{T_n}'$  é a posição tridimensional rotacionada do transdutor  $n$ . Estes versores compõem a matriz versora,  $M_{VER}$ ,

$$M_{VER} = \begin{bmatrix} U_{12}^T \\ U_{34}^T \\ U_{56}^T \end{bmatrix}. \quad (2.13)$$

Representando-se a velocidade do vento em cada par de transdutor não ortogonalizado,  $V_{NO}$ , por meio de uma única matriz, obtém-se

$$V_{NO} = \begin{bmatrix} V_{12} & V_{34} & V_{56} \end{bmatrix}, \quad (2.14)$$

por conseguinte, se torna possível a resolução do processo de ortogonalização

$$V_O M_{VER} = V_{NO} \quad (2.15)$$

$$V_O = V_{NO} M_{VER}^{-1}. \quad (2.16)$$

Considerando a matriz de ortogonalização como sendo

$$M_O = M_{VER}^{-1}, \quad (2.17)$$

a Equação 2.16, que define a velocidade do vento ortogonalizada, pode ser reescrita da forma

$$V_O = \begin{bmatrix} V_{SN} & V_{LO} & V_{BC} \end{bmatrix} = V_{NO} M_O. \quad (2.18)$$

Assim sendo, é possível afirmar que para a obtenção da velocidade do vento ortogonal a partir de uma topologia não ortogonal, deve ser feita a multiplicação de uma matriz com as velocidades do vento obtidas no sistema não usual, por uma matriz de ortogonalização. Esta operação gera um custo computacional que é evitado com a topologia ortogonal, contudo, no decorrer do trabalho é mostrado que essa desvantagem se torna irrelevante quando comparada as vantagens do uso da topologia não ortogonal.

### 2.2.3 Interferência estrutural na medida da velocidade do vento

Há o conhecimento prévio de que é existente uma influência da estrutura e do posicionamento dos sensores na medida da velocidade do vento em anemômetros ultrassônicos (WIESER; FIEDLER; CORSMEIER, 2001; CHENG et al., 2015). Sabe-se também que existem erros de medição associados ao ângulo de incidência do vento sobre o anemômetro (GRELLE; LINDROTH, 1994; NAKAI et al., 2006; NAKAI; SHIMOYAMA, 2012; NAKAI et al., 2014), principalmente quando é feita uma calibração em túnel, com vento laminar, e o equipamento é posteriormente colocado em ambiente externo (HÖGSTRÖM; SMEDMAN, 2004). Assim, este trabalho busca avaliar estas influências sobre o protótipo desenvolvido, buscando uma alternativa de distribuição espacial dos transdutores que as minimize.

A condição ideal para a aferição da velocidade do vento é que ele incida sobre os eixos de medição de forma laminar, ou seja, com as partículas se movendo de forma ordenada, sem variação de sua posição relativa. Sabe-se que um vento puramente laminar e controlado, somente pode ser obtido em um túnel de vento, contudo, o vento presente naturalmente no ambiente, apesar de ser turbulento, pode ser considerado laminar no espaço compreendido entre os dois transdutores que efetuam a medição de velocidade. Assim, neste trabalho o fluxo é considerado turbulento e desordenado quando ele ocorre no espaço onde trafega a onda ultrassônica.

Por consequência, para que ocorra uma turbulência que afete a medição, esta deve ser gerada pela própria estrutura do anemômetro. Portanto, é importante

que seja desenvolvida uma topologia que evite esta situação.

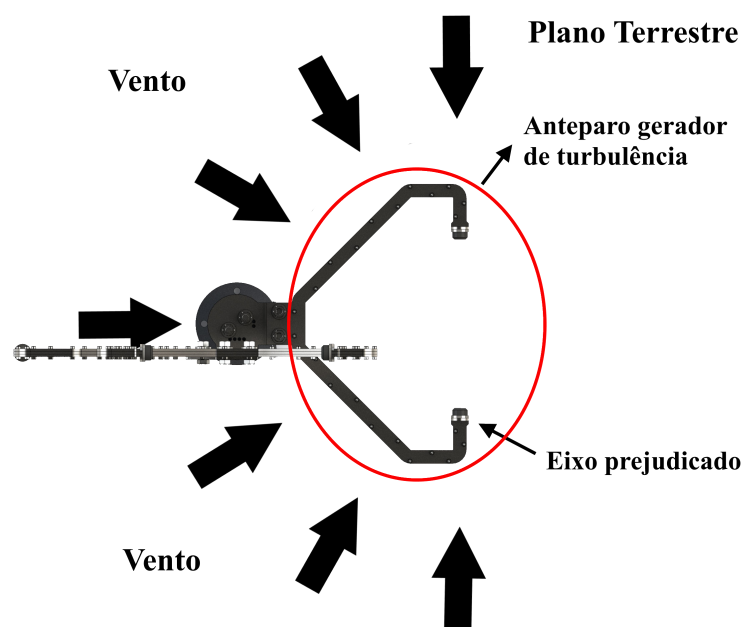
Para que a turbulência fosse melhor avaliada, foram feitas simulações com o vento incidindo em uma das peças do anemômetro, onde os transdutores ficam fixados. As simulações estão apresentadas no capítulo 4.4 e mostram as linhas de fluxo do vento ao se encontrar com a estrutura.

A partir das simulações realizadas, fica claro que caso haja incidência do vento no mesmo sentido dos eixos de medição, haverá uma grande turbulência no caminho que a onda ultrassônica deve percorrer. Como na topologia ortogonal as medidas são diretas, sendo os eixos de medição os mesmos que os convencionais, existem várias condições factíveis para que isso aconteça.

A Figura 2.5 mostra que na topologia ortogonal, o fluxo turbulento pode se tornar presente quando o vento atinge a estrutura em  $180^\circ$  do plano terrestre, possivelmente ocasionando problemas para a medida em um dos eixos. Os resultados que estão apresentados no capítulo 4.5 mostram se, de fato, a interferência que a estrutura causa no vento é prejudicial para as medidas.

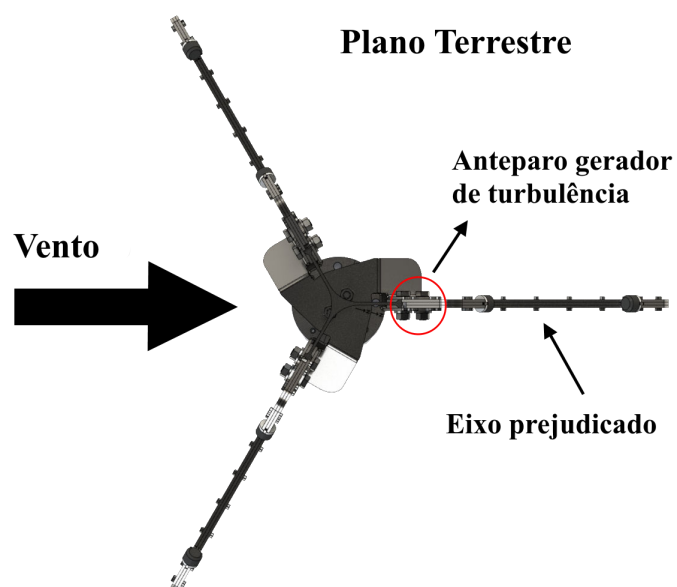
Ao passar por um anteparo, além do vento se tornar turbulento, ele perde a sua velocidade, com isso, caso haja um anteparo posicionado antes de um eixo de medição, a medida efetuada será errônea. Isso só ocorre em uma situação na topologia não ortogonal proposta, como pode ser visto na Figura 2.6, em que há um anteparo no caminho do vento entre o eixo prejudicado. Nesta situação, fica evidente que haverá geração de turbulência. Caso a velocidade do vento seja elevada, haverá a possibilidade de perda de dados para o eixo prejudicado.

**Figura 2.5** – Situação de turbulência na topologia ortogonal para ventos paralelos ao plano terrestre.



Fonte: Autor.

**Figura 2.6** – Situação de turbulência na topologia não ortogonal para ventos paralelos ao plano terrestre.



Fonte: Autor.

## 3 Metodologia

### 3.1 Solução proposta

A partir da problemática apresentada buscou-se desenvolver uma solução que melhor atendesse os principais requisitos do projeto, visando a implementação de um sistema autônomo e robusto, que pudesse ser aplicado em várias situações e funcionasse em regiões remotas sem necessidade de manutenção.

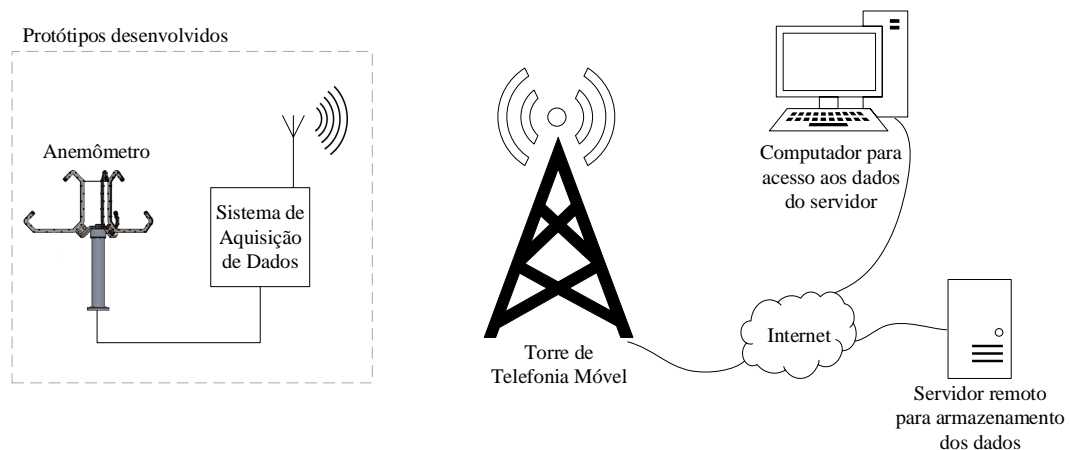
Visando a obtenção da melhor solução para medição da velocidade do vento, foram desenvolvidos dois protótipos de anemômetros ultrassônicos tridimensionais, um deles com uma configuração posicional dos transdutores de forma ortogonal e um segundo com uma configuração não ortogonal. Consequentemente, foi feito um comparativo entre ambos, possibilitando a avaliação de qual das configurações possuía melhor resposta e avaliando possíveis interferências nas medidas ocasionadas pela estrutura do próprio anemômetro em cada uma das topologias.

Para ambos os protótipos, foi desenvolvida e utilizada uma mesma placa de circuito impresso, que gera os sinais de transmissão da onda ultrassônica e os condiciona em sua recepção, além de interfacear com o sistema de aquisição de dados.

O sistema de aquisição de dados proposto, além de coletar e armazenar as medidas de velocidade do vento, faz também a aferição da temperatura. Assim, estes dados coletados são enviados para um servidor remoto por meio de um modem GPRS, possibilitando o acesso via internet.

No processo de envio dos dados, o modem presente no sistema de aquisição de dados inicialmente conecta-se junto à operadora de telefonia móvel e obtém o acesso a internet. Com o acesso à internet, o sistema realiza a sua conexão ao servidor escolhido e inicia o envio dos dados. Estes dados são recebidos pelo servidor e salvos em arquivos de texto, que podem ser acessados a qualquer momento por qualquer dispositivo conectado a internet.

Caso o local da instalação do equipamento não possua rede de telefonia móvel

**Figura 3.1** – Diagrama geral do sistema proposto.

Fonte: Autor.

que permita a sua conexão com a internet para o envio dos dados, a memória do equipamento possui capacidade suficiente para que os dados sejam salvos por um período de até 6 meses, conforme suas configurações. Neste caso, os dados devem ser coletados via USB antes da memória ser totalmente preenchida. Caso isto não ocorra, os novos dados coletados serão descartados.

A Figura 3.1 apresenta um esboço do sistema proposto como um todo. Nela, podem ser identificados os protótipos desenvolvidos neste trabalho, bem como outros elementos pertinentes.

O sistema proposto pode ser considerado autônomo já que é alimentado por uma bateria carregada por painéis solares. Esta característica permite que o sistema seja instalado em lugares remotos e torna praticamente nula a necessidade de manutenção.

## 3.2 Desenvolvimento dos protótipos dos anemômetros ultrassônicos 3D

Como dito nesse trabalho, foram desenvolvidos dois protótipos de anemômetro, com topologias diferentes, um com posicionamento dos transdutores de modo ortogonal e o outro não ortogonal. Estes dois protótipos diferem apenas em sua estrutura mecânica e no *firmware* do microcontrolador, sendo que a placa eletrônica é a mesma para ambos.

### 3.2.1 *Hardware*

Para a excitação dos transdutores ultrassônicos, coleta dos sinais e seu processamento foi desenvolvida a placa de circuito impresso que será apresentada nesta seção. Basicamente, a placa possui um microcontrolador que faz o controle e processamento dos sinais, circuitos que geram o nível de tensão necessário para o acionamento dos transdutores e circuitos de condicionamento que amplificam e filtram o sinal ultrassônico recebido.

#### 3.2.1.1 Microcontrolador

O controlador escolhido para o desenvolvimento dos protótipos, que possui FPU Cortex-M4, é o STM32F429, da STMicroelectronics. Esse é um microcontrolador que trabalha a 180 MHz, possui 2 Mbytes de memória para código, memória RAM de 256 kb e três canais de conversão AD com resolução de 12 bits e taxa de amostragem de 2,4 milhões de amostras por segundo. Essa última característica possibilitou que o sinal ultrassônico de recepção fosse digitalizado por completo pelo microcontrolador, permitindo o processamento do sinal de forma totalmente digital.

Possuindo o sinal digitalizado, foi possível a aplicação de filtros digitais, reduzindo-se drasticamente os erros de medição e tornando o cálculo do tempo de trânsito da onda ultrassônica mais preciso.

Como já foi apresentado, a estrutura mecânica possui três pares de transdutores, assim foi convencionado que a cada instante um dos transdutores de cada par será o transmissor e o outro o receptor. Com isso, devido ao fato do microcontrolador utilizado possuir três canais de conversão A/D, são gerados e coletados três sinais ultrassônicos ao mesmo tempo, tornando possível uma taxa de amostragem interna de até 200 Hz.

Possuindo várias medidas de tempo de trânsito da onda ultrassônica, são aplicados algoritmos de tratamento de dados e então, é calculada a velocidade do vento que é enviada ao sistema de aquisição de dados.

#### 3.2.1.2 Transdutores de ultrassom

O transdutor ultrassônico utilizado é o modelo 400EP18A, fabricado pela Prowave. Ele opera na frequência de 40 kHz e possui ângulo de abertura de apenas 85 graus, isso justifica a necessidade de se montar uma estrutura mecânica

com os transdutores em pares, frente a frente. Este transdutor é do tipo fechado, permitindo a sua utilização em ambientes externos, sendo resistente a intempéries, algo que é necessário para a aplicação em questão. O *Datasheet* deste componente, com todas as suas especificações técnicas, está apresentado no Anexo A.

Existem comercialmente transdutores que operam em uma frequência diferente de 40 kHz, contudo a utilização de um componente com uma frequência acima de 100 kHz ocasionaria dificuldades no cálculo do tempo de trânsito, podendo limitar a faixa de medição. Como os transdutores da frequência selecionada possuem vários modelos disponíveis comercialmente, foi possível encontrar um modelo que satisfizesse as necessidades de projeto.

Devido à sua robustez mecânica, este transdutor possui uma menor facilidade de vibrar se comparado aos de tipo aberto, assim para que a onda ultrassônica gerada possua amplitude equivalente aos de tal tipo, ele deve ser excitado com um sinal de amplitude pico-a-pico de ao menos 120 V. Com isso, o fabricante recomenda o uso de um transformador de pulso com relação 1:10, para elevar a tensão a ser aplicada nos terminais do transdutor, o que foi feito nesse caso.

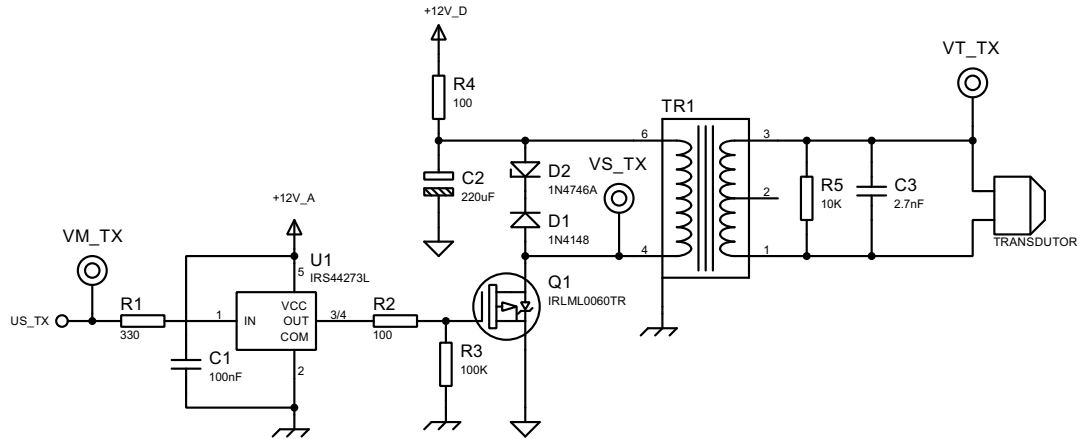
O transformador utilizado para esse transdutor é o modelo K4000004, também fabricado pela Prowave, sendo necessária a utilização de um transformador para cada transdutor. Portanto, para a estrutura desenvolvida, que utiliza 6 transdutores, é necessária uma placa de condicionamento de sinais com seis canais de transmissão e recepção.

Como a tensão aplicada nos terminais do transdutor é relativamente alta, o esforço mecânico gerado internamente também se torna significante. Assim, o fabricante recomenda que sejam feitos intervalos de acionamento, para que o componente não seja danificado. Portanto, o transdutor é excitado com um sinal de 20 pulsos na frequência de 40 kHz e fica em descanso por um período de 50 ms.

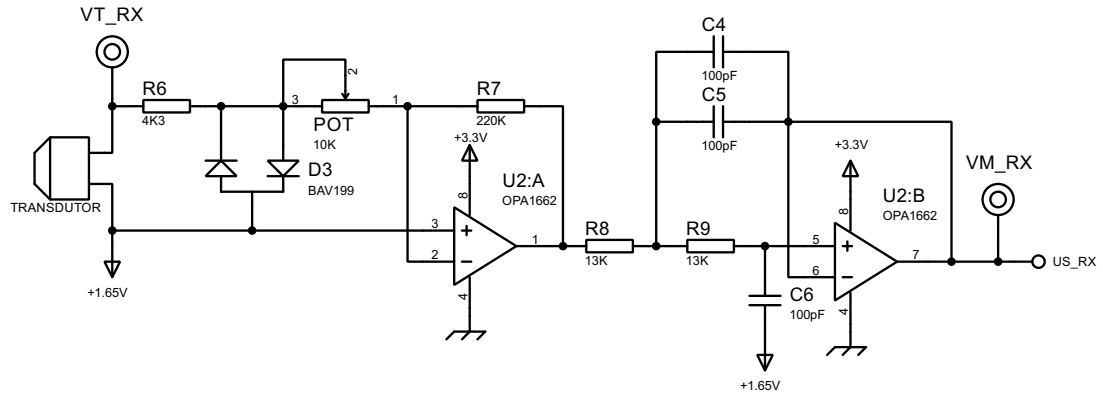
### 3.2.1.3 Excitação dos transdutores e condicionamento de sinais

A Figura A.1, presente no Apêndice A, apresenta o esquema elétrico do circuito eletrônico utilizado na transcepção do sinal ultrassônico. Esse mesmo circuito aparece dividido em duas partes, na Figura 3.2, com o circuito de excitação dos transdutores, para a transmissão da onda ultrassônica, e na Figura 3.3, com o circuito de condicionamento do sinal ultrassônico recebido. Lembrando que, para cada anemômetro são utilizados seis transdutores, assim, na placa de circuito impresso foram montados seis circuitos iguais ao apresentado, sendo um para cada



**Figura 3.2** – Circuito de excitação dos transdutores.

Fonte: Autor.

**Figura 3.3** – Circuito de condicionamento de sinais.

Fonte: Autor.

transdutor.

No circuito apresentado na Figura 3.2, o sinal pulsado na frequência de 40 kHz gerado pelo microcontrolador passa por um driver de acionamento, U1, não isolado, colocado com a função de proteção, desacoplando o sinal vindo do microcontrolador. Saindo do driver, o sinal é aplicado no gate do mosfet Q1, responsável pelo chaveamento do transformador de pulso. Optou-se pela utilização de um mosfet em detrimento a um transistor com objetivo de se reduzir as perdas de condução e consequente o consumo do circuito como um todo.

Alimentação que chega ao transformador passa antes por um filtro RC passa-baixa, formado por R4 e C2. Este filtro possui uma frequência de corte em aproximadamente 7 Hz e tem como objetivo filtrar quaisquer ruídos presentes na alimentação que possam prejudicar o acionamento correto do transformador. Outra medida tomada com o objetivo de se atenuar os ruídos advindos da alimentação foi a separação dos terras do circuito, que vem da mesma fonte, contudo

estão separados fisicamente na placa.

Em paralelo com o primário do transformador de pulso existem dois diodos. Um diodo de sinal, D1, com função de dar um caminho para a corrente durante o descarregamento do transformador, que ocorre quando o mosfet não estiver em condução, protegendo-o. D2, que é um diodo zener, faz com que a tensão induzida pelo primário do transformador, durante seu descarregamento, seja ao menos seu valor de tensão de ruptura (13 V), somada a tensão de condução de D1. A colocação do diodo zener causa uma menor distorção na forma de onda que irá aparecer no secundário do transformador e será responsável por excitar o transdutor. Caso ele não fosse colocado, o valor RMS da onda aplicada sobre o transdutor seria menor, resultando em uma menor excitação do transdutor, tanto na transmissão, quanto na recepção, ocasionando um sinal de recepção mais ruidoso e de menor amplitude.

O transformador de pulso possui a função de elevar a tensão a ser aplicada no transdutor. O resistor R5 e o capacitor C3 tem como função proporcionar um caminho para o descarregamento da energia armazenada no transdutor, reduzindo a distorção e aumentando a amplitude do sinal de excitação.

O circuito eletrônico responsável por adequar o sinal de recepção para ser amostrado, apresentado na Figura 3.3, possui dois estágios de condicionamento. Pode-se perceber também que todo o circuito possui uma tensão de *offset* de 1,65 V, possibilitando a amostragem completa do sinal pelo microcontrolador.

O diodo duplo D3 e o resistor R6 protegem o circuito de recepção das altas tensões que são aplicadas no transdutor no momento em que ele está sendo utilizado como transmissor, limitando a amplitude do sinal que chega aos amplificadores operacionais. Medida que foi tomada pelo fato do circuito, apesar de estar apresentado em partes, é um só, permitindo que o transdutor funcione como transceptor.

O primeiro estágio de condicionamento possui um amplificador inversor, aplicando um ganho ao sinal de ao menos 22 vezes, que pode ser ajustado pelo potenciômetro POT1. Após a montagem o ajuste é feito de forma que o sinal resultante na saída do circuito possua amplitude pico-a-pico máxima de 1,65 V, fazendo com que os limites do conversor A/D, que possuem um maior erro, não sejam utilizados.

O segundo estágio é um filtro passa-baixa de segunda ordem com topologia Sallen-Key, ganho unitário, resposta Butterworth e frequência de corte em apro-

ximadamente 86 kHz, que tem o objetivo de filtrar os ruídos presentes no sinal e na amostragem do conversor A/D. A função de transferência do filtro pode ser escrita como sendo,

$$H(s) = \frac{1}{1 + (C_4//C_5) \cdot (R_8 + R_9) \cdot s + C_6 \cdot (C_4//C_5) \cdot R_8 \cdot R_9 \cdot s^2} \quad (3.1)$$

$$H(s) = \frac{1}{1 + 5,20 \cdot 10^{-6} \cdot s + 3,38 \cdot 10^{-6} \cdot s^2} \quad (3.2)$$

e o seu fator de qualidade é

$$Q = \frac{\sqrt{R_8 \cdot R_9 \cdot C_6 \cdot (C_4//C_5)}}{C_6 \cdot (R_8 + R_9)} = 0,7071 \quad (3.3)$$

o que caracteriza um filtro com resposta Butterworth.

A frequência de corte do filtro foi selecionada com o objetivo de preservar a harmônica de primeira ordem do sinal ultrassônico, que possui informação pertinente para o posterior processamento e também devido aos valores de resistência e capacitância existentes comercialmente.

Os componentes utilizados no filtro são elementos de precisão, com erros máximos de 1 % e com maior estabilidade em relação à temperatura se comparados aos convencionais. Proporcionando assim, que a sua resposta seja mais próxima ao que foi projetada e que não varie com o passar do tempo, independente do local onde o sistema estiver alocado.

Caso o filtro analógico não estivesse presente no circuito o sinal amostrado seria muito ruidoso e mesmo com a aplicação de filtros digitais, o cálculo do tempo de trânsito da onda ultrassônica ficaria prejudicado.

As ondas de transmissão e recepção obtidas com o circuito apresentado são parte constituinte da seção 4.1.1.

#### 3.2.1.4 Outros elementos

Além dos circuitos responsáveis por excitar os transdutores, também fazem parte da placa de instrumentação outros elementos, sendo eles: reguladores de tensão lineares de 3,3 V e 1,65 V, filtros EMI, regulador de referência e uma memória EEPROM. A Figura A.2 apresenta os reguladores de tensão utilizados no projeto.

Pode-se perceber na Figura A.2 que foram utilizados dois reguladores ajustáveis para se gerar a tensão de 1,65 V, que serve como referência para a onda ultrassônica durante a recepção. Esses reguladores ficam posicionados nas extremidades da placa, à direita e à esquerda, sendo cada um utilizado em três circuitos de condicionamento.

Foi inserida uma memória EEPROM na placa para serem salvos os dados de calibração. Colocou-se também um conector mini-USB para permitir o tráfego de dados entre o microcontrolador e outros dispositivos, como um computador, sem a necessidade do anemômetro estar ligado a placa de aquisição de dados. Esta comunicação é essencial para a coleta de dados durante o desenvolvimento, além de permitir que futuramente o dispositivo opere em conjunto com um computador.

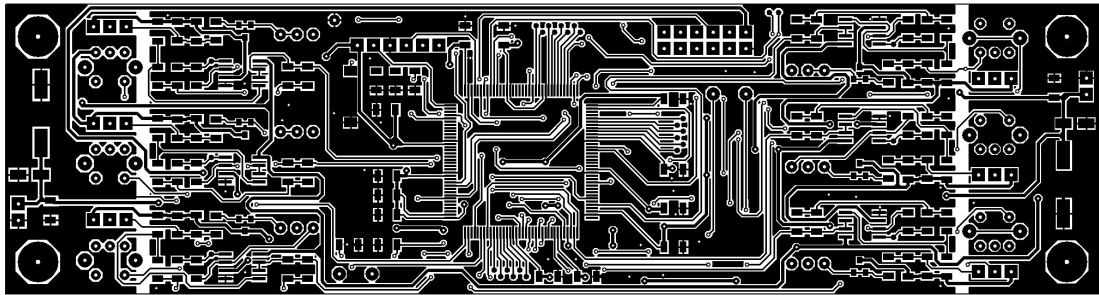
### 3.2.1.5 Medidas para redução do ruído

Com o objetivo de reduzir o ruído presente na placa e consequentemente melhorar a qualidade dos sinais, foram incluídos alguns componentes e aplicados certos procedimentos durante o desenvolvimento da placa de circuito impresso. Foram colocados na alimentação da placa, como pode ser visto na Figura A.2, filtros EMI (F1, F2, F3 e F4), que possuem a função de filtrar ruídos de alta frequência vindos pelos cabos de alimentação, além de não permitir que o ruído gerado no acionamento dos transdutores afete os outros circuitos da placa.

Também com o objetivo de reduzir o ruído gerado pelo acionamento dos transdutores, a placa foi projetada dividindo fisicamente os circuitos relacionados aos transdutores em trios, colocando, assim, três circuitos na direita e três na esquerda da placa. Com isso no momento em que um trio está transmitindo os sinais ultrassônicos, o outro trio, localizado do outro lado da placa, está recebendo estes sinais. Desta maneira, os circuitos que estão recebendo os sinais serão pouco afetados pelo ruído irradiado gerado pelos componentes durante a transmissão. Uma outra medida adotada foi a colocação dos circuitos de transmissão na face inferior da placa e os circuitos de recepção na face superior da placa. A divisão física dos circuitos, e principalmente das malhas de terra, pode ser observada nas Figura 3.4 e Figura 3.5, que mostram as trilhas da face superior e inferior da placa, respectivamente.

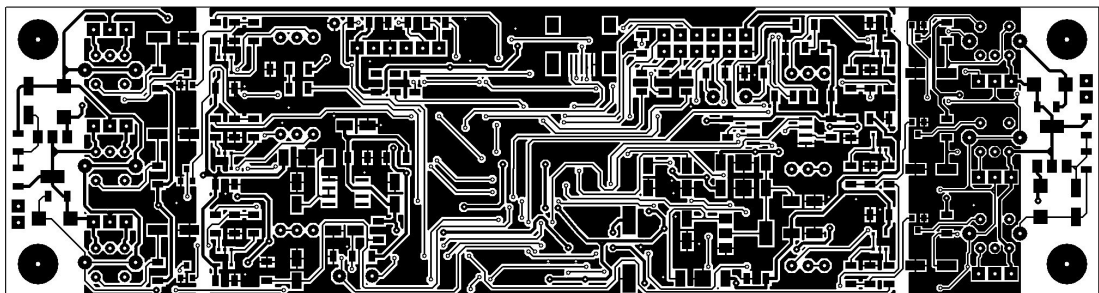
A placa desenvolvida recebe alimentação por três pontos, que possuem +12 V e GND totalmente separados, são elas: o dois circuito de geração do sinal ultrassônico, posicionados nas duas extremidades da placa, e a alimentação do restante da placa, incluindo o microcontrolador e os circuitos de condicionamento.

**Figura 3.4** – Trilhas da face superior da placa de circuito impresso.



Fonte: Autor.

**Figura 3.5** – Trilhas da face inferior da placa de circuito impresso.



Fonte: Autor.

Essa foi uma prática empregada também para reduzir o ruído nos circuitos mais sensíveis.

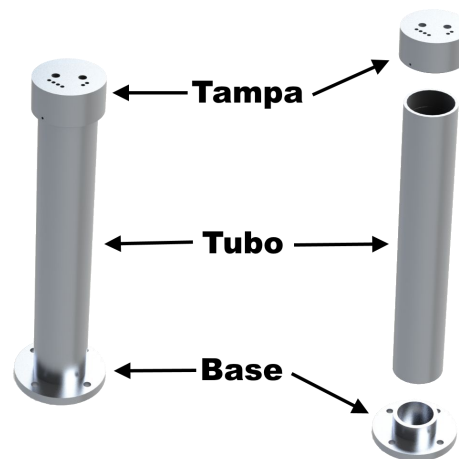
### 3.2.2 Projeto mecânico

Os projetos mecânicos dos protótipos dos anemômetros foram desenvolvidos no *software* de modelagem 3D *Solidworks*. Desta forma, as imagens tridimensionais apresentadas nesta seção foram geradas diretamente por este *software*.

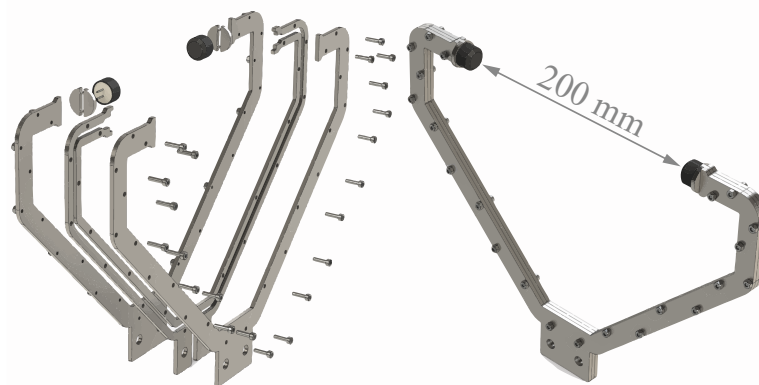
Nas duas topologias desenvolvidas existem algumas peças semelhantes, são elas: o corpo do anemômetro, formado por base, tubo e tampa e o suporte dos transdutores, que é uma montagem de várias peças feitas com chapa de aço cortado a laser.

A Figura 3.6 mostra o corpo do anemômetro e identifica as suas partes. O modo de fixação destas partes, umas as outras, é diferente entre as duas topologias, contudo as mesmas peças são partes presentes em ambas configurações, com pequenas diferenças.

Cada anemômetro possui no total seis transdutores ultrassônicos, em que cada par forma um eixo de medição, totalizando assim três eixos. Os pares de transdutores formam a montagem chamada aqui de suporte dos transdutores,

**Figura 3.6** – Corpo do anemômetro e suas partes (topologia ortogonal).

Fonte: Autor.

**Figura 3.7** – Suporte dos transdutores em vista explodida e isométrica.

Fonte: Autor.

que pode ser visto na Figura 3.7. Nesta montagem, os dois transdutores ficam colocados frente a frente, a uma distância de 20 cm, distância esta que é garantida pelo corte a laser das peças. A montagem possui no total seis peças, excluindo-se parafusos, porcas e transdutores, como pode ser visto na vista explodida presente na Figura 3.7. A chapa de aço utilizada na fabricação deve possuir 3 mm de espessura para que não haja diferenças entre o projeto e o protótipo final.

A distância de 20 cm entre os transdutores foi selecionada baseada na frequência de operação dos mesmos e também levando em consideração a turbulência gerada pela passagem do vento. Como discutido na Seção 2.1, na anemometria ultrassônica existe o problema relacionado à escolha do cruzamento por zero de referência e quanto menor a distância entre os transdutores, menor será a quantidade total de pulsos da qual deve ser selecionado o correto. Contudo, se for adotada uma distância muito pequena, as medidas serão prejudicadas pelas dimensões físicas dos transdutores e também pela estrutura, gerando muitos casos

**Figura 3.8** – Anemômetro projetado em software de modelagem 3D com topologia ortogonal.



Fonte: Autor.

em que não haverá fluxo de vento entre eles, impossibilitando as medidas. Esta situação pode ser observada nas simulações apresentadas na Seção 4.4. Baseado nestas prerrogativas chegou-se empiricamente à distância adotada.

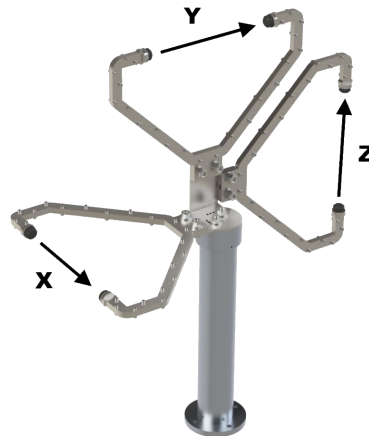
#### 3.2.2.1 Configuração ortogonal

Inicialmente, foi desenvolvido um anemômetro com os eixos de medição dispostos de forma ortogonal, como pode ser visto na Figura 3.8 que apresenta a vista isométrica do protótipo desenvolvido. Nesta topologia, as medidas de velocidade do vento calculadas por cada par de transdutores representam diretamente a velocidade do vento em cada sentido do plano. Esta representação direta fica evidente se observarmos a Figura 3.9, em que os eixos cartesianos estão relacionados aos seus respectivos pares de transdutores.

Lembrando que a placa de instrumentação fica alojada dentro do corpo do anemômetro e, nesta montagem, os fios dos transdutores ficam expostos no percurso entre o suporte e a entrada no corpo do anemômetro, o que não está ilustrado na Figura 3.8. Um outro detalhe a ressaltar é que as partes do corpo do anemômetro, base, tubo e tampa, são fixas uma a outra por meio de rosca torneada nas peças. A Figura 3.6 exhibe peças do corpo do anemômetro com topologia ortogonal.

Observando-se a topologia ortogonal, verifica-se que caso haja vento em apenas uma direção, como, por exemplo, no eixo x, apenas o par de transdutores deste sentido estará efetuando medidas, já que nos outros eixos haverá um vento

**Figura 3.9** – Eixos cartesianos relativos aos pares de transdutores do anemômetro com topologia ortogonal.



Fonte: Autor.

totalmente perpendicular, refletindo em uma medida nula. Isto indica que neste momento a medida será baseada em apenas um par de transdutores, assim caso haja uma interferência qualquer neste eixo, a medida será errada. Portanto, conclui-se que quanto mais eixos receberem algum vento, mais confiável será a medida.

Lembrando que na maioria dos casos o vento no eixo z é de amplitude muito baixa, assim teremos vento apenas nos eixos x e y, com isso, como a medida com esta topologia ortogonal é direta, qualquer influência nestes eixos irá causar erros nas medidas.

### 3.2.2.2 Configuração não ortogonal

No sistema não ortogonal projetado, os transdutores estão dispostos conforme a Figura 3.10. São presentes três eixos formados pelos pares de transdutores. Cada eixo é disposto no plano tridimensional de forma a minimizar ao máximo a influência da estrutura sobre o vento. Esta influência se apresenta como geração de turbulência, provocando erro na determinação da velocidade do vento. No pior caso, o vento encontra um anteparo da própria estrutura do anemômetro antes de passar entre os transdutores e o eixo formado por estes transdutores apresenta leituras prejudicadas pela turbulência gerada pelo anteparo.

Para o sistema ortogonal, não há a possibilidade de ignorar a leitura de um eixo prejudicado, pois isso acarretaria na perda de um dos sentidos da leitura do vento tridimensional. Além disto, os problemas relacionados à turbulência são mais propensos a acontecer quando a velocidade do vento no eixo prejudicado é



**Figura 3.10** – Anemômetro projetado em software de modelagem 3D com topologia não ortogonal.



Fonte: Autor.

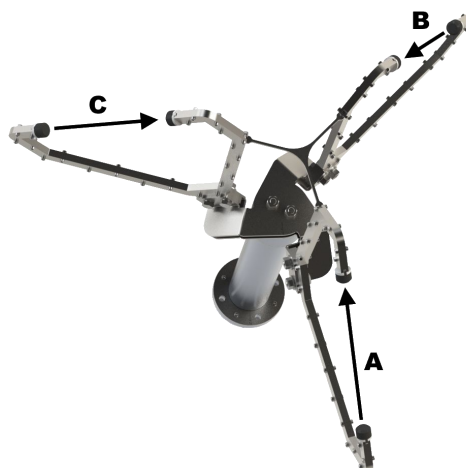
maior. Portanto, no sistema ortogonal, os eixos mais predispostos a este tipo de problema são aqueles paralelos ao plano terrestre, onde a magnitude do vento é maior. Quando há grande velocidade de fluxo de ar em campo aberto, a velocidade medida no eixo perpendicular ao plano terrestre (eixo Z) apresentará leituras muito menores do que nos outros dois eixos. Partindo destes pressupostos, foi projetado o sistema não ortogonal.

A Figura 3.11 mostra os eixos cartesianos para a topologia não ortogonal. Como o sistema não é mais ortogonal (X, Y e Z), os eixos possuem agora nomenclaturas diferentes (A, B e C). Com isso, as medidas de velocidades do vento obtidas nos eixos não ortogonais devem passar por uma matriz de ortogonalização (Equação 2.17) para que sejam obtidas as velocidades nos eixos convencionais conforme a Equação 2.18. A Figura 3.12 mostra a disposição dos suportes dos transdutores nesta estrutura não ortogonal, onde os eixos de medição formam um ângulo de  $45^\circ$  com o plano terrestre.

Nessa topologia, convencionou-se que o norte do anemômetro estaria posicionado rotacionado  $15^\circ$  no sentido horário em relação ao eixo A. Esta medida foi tomada para reduzir a influência da estrutura durante uma possível calibração, onde o anemômetro recebe vento paralelo ao eixo Sul Norte (X).

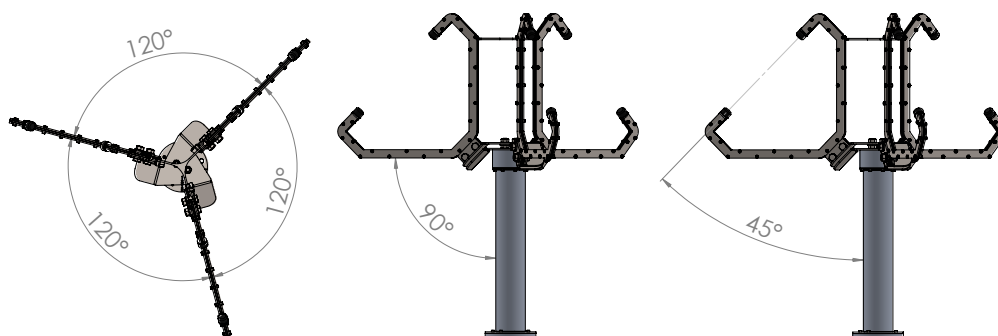
O projeto desta segunda topologia, além de alterar o posicionamento dos transdutores no espaço, visou também trazer melhorias ao projeto inicial. A principal melhoria está na maneira em que as partes do corpo do anemômetro são fixadas uma a outra. Na topologia ortogonal, a fixação era feita por meio de

**Figura 3.11** – Eixos cartesianos relativos aos pares de transdutores do anemômetro com topologia não ortogonal.



Fonte: Autor.

**Figura 3.12** – Disposição dos suportes dos transdutores no anemômetro não ortogonal.



Fonte: Autor.

**Figura 3.13** – Corte de seção do corpo do anemometro não ortogonal.

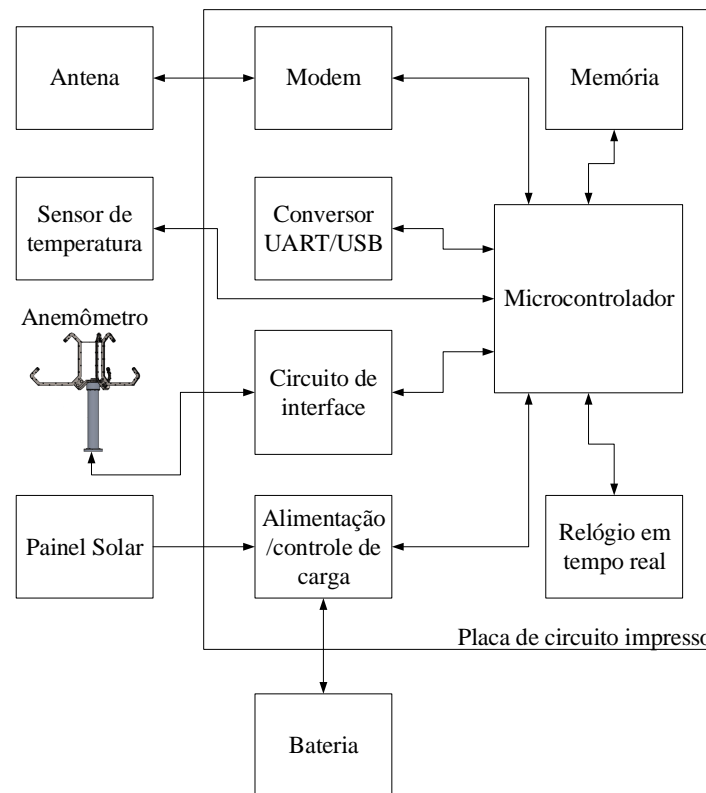
Fonte: Autor.

rosca torneada no alumínio. Contudo, devido ao fato do alumínio ser maleável, a rosca se desconfigurava após poucas aberturas, inutilizando as peças. Assim, para a nova topologia optou-se por fixar as peças utilizando semi-círculos feitos em chapa inox. Desta forma, foram feitos veios no tubo de alumínio, para que os semi-círculos, de diâmetro levemente menor que o tubo, o envolvesse e fosse parafusado nas outras duas peças. Esse novo método de fixação pode ser visto na Figura 3.13 que é um corte em seção do corpo do anemômetro.

Nesse projeto, com objetivo de aumentar a resistência mecânica da estrutura, foi projetada uma treliça na parte superior do anemômetro, para unir os suportes dos transdutores. Esta medida reduz a possibilidade de torção e vibração dos suportes com ventos de alta intensidade, algo que foi verificado em testes preliminares. Com o mesmo objetivo, e também com a função de proteger os cabos dos transdutores, foi projetada uma segunda peça que fixa os suportes ao corpo do anemômetro.

### 3.3 Desenvolvimento do sistema de aquisição de dados

Para a coleta de dados de velocidade do vento obtidas pelo protótipo de anemômetro foi desenvolvido também um sistema de aquisição de dados completo. Esse sistema, além de receber as velocidades do vento, é responsável pelo armazenamento e envio destas medidas para um servidor remoto. Ele é autônomo,

**Figura 3.14** – Diagrama de blocos do sistema de aquisição de dados.

Fonte: Autor.

sendo alimentado por uma bateria, carregada por um painel solar.

Esta seção apresenta a lógica de funcionamento do sistema de aquisição de dados, descrevendo o *firmware* desenvolvido, bem como os elementos existentes na placa de circuito impresso que foi projetada.

### 3.3.1 Elementos do sistema de aquisição de dados

O sistema de aquisição de dados desenvolvido possui como principal elemento um modem GPRS, responsável por enviar os dados coletados via internet para um servidor remoto. Fazem também parte do sistema: o microcontrolador, que faz o controle do sistema; uma memória não volátil, para armazenamento temporário dos dados; um sensor de temperatura; um relógio em tempo real, para agendamentos e sincronia do tempo; bateria, painel solar e circuito de controle de carga; e um conversor UART/USB, para configuração e comunicação do sistema com um computador. A Figura 3.14 mostra os blocos do sistema de aquisição de dados, expondo todos os elementos deste sistema, tanto aqueles que estão internos à placa de circuito impresso quanto os externos.

### 3.3.1.1 Modem GPRS e processo de envio dos dados

Para o envio dos dados coletados via internet, possibilitando assim o seu acesso sem a necessidade de se deslocar ao local de instalação do equipamento, foi colocado um modem GSM/GPRS no sistema. O modelo escolhido é o GC864-QUAD V2 da fabricante Telit.

Para o funcionamento do modem é necessário que seja colocado nele um chip de telefonia móvel. O modem utiliza a rede de dados para se conectar à internet, portanto o local de instalação do equipamento deve possuir sinal de tal tipo da operadora escolhida. Em condições normais, os pacotes a serem enviados são pequenos, totalizando cerca de 100 kbytes por dia, com isso, não é necessária a contratação de um plano de dados com grande franquia.

Conforme especificações do fabricante, o modem deve ser alimentado com tensão de 3,8 V. Devido a isto, e também pelo fato de que durante a transmissão ocorrem picos de consumo de corrente próximos a 2 A a cada 4 ms, foi colocado um regulador de tensão exclusivo para este módulo. O componente selecionado foi o LM350 com encapsulamento TO-220.

O modem se comunica com o microcontrolador presente no sistema via serial UART. Antes de se iniciar o envio dos dados é necessário se enviar alguns comandos de configuração ao modem. Estes comandos devem ser feitos de maneira sequencial e tem como objetivo: busca de sinal da operadora; registro na rede; estabelecimento de conexão na internet; e conexão ao servidor de recepção dos dados. Este processo, acrescentado o tempo ao envio dos dados, dura cerca de 30 s, caso não ocorra nenhum erro.

Durante o processo de busca por sinal da operadora, o modem retorna ao microcontrolador uma medida da intensidade do sinal. Esta medida varia em uma escala de 0 a 31, em que 0 representa um sinal com intensidade de -113 dBm ou menor e 31 com intensidade de -51 dBm ou maior. Valores intermediários variam 2 dBm por valor da escala. Por exemplo, o valor de 19 representa a intensidade de -75 dBm. Esta informação é enviada no pacote de dados, servindo como parâmetro para o utilizador em caso de futuras falhas na transmissão.

A comunicação com o servidor é feita por meio de uma conexão TCP, portanto, a partir do momento em que a conexão é estabelecida, o tráfego de dados no canal de comunicação é confiável. Para garantir que o servidor não salve informações de qualquer dispositivo que tente se conectar a ele, estabelecida a conexão, o equipamento envia uma mensagem, que serve como uma senha, para

que o servidor comece a armazenar os dados.

O pacote de dados enviado pode ser dividido em duas partes: cabeçalho e medidas. O cabeçalho identifica e informa as características e status de funcionamento do equipamento. As medidas são os valores de temperatura e velocidade do vento, médias e máximas em cada eixo, ocorridas no intervalo configurado pelo usuário. Na parte de resultados, no capítulo 4.3 está apresentado o pacote de dados enviado pelo modem e recebido pelo servidor.

Ao final de um pacote de dados, é enviado para o servidor um sinalizador. Ao identificá-lo, o servidor responde ao equipamento uma mensagem, indicando que o pacote foi recebido com sucesso. Somente com o recebimento desta mensagem que dispositivo irá liberar a área da memória em que os dados enviados estavam salvos para a gravação de novos dados.

Cada equipamento possui um nome e número de identificação. O nome pode ser configurado pelo usuário via USB. O número é gerado pelo equipamento baseado na data e hora atuais, a partir de uma requisição do usuário, também via USB. Estas configurações permitem que, caso hajam vários equipamentos em funcionamento simultaneamente, eles possam ser diferenciados no servidor.

Como o sistema é alimentado por baterias, para reduzir o consumo geral, optou-se por não manter o modem ligado durante todo o tempo. Assim, a cada período de tempo, configurável pelo usuário via USB entre 15 minutos e 24 horas, o microcontrolador liga o modem e procede com envio dos dados acumulados na memória.

Devido a problemas relacionados à estabilidade da rede de telefonia, foi observado em testes preliminares que o envio de pacotes muito grandes poderia falhar, dessa forma, foi implementado um algoritmo que limita o tamanho máximo do pacote. Com isso, cada pacote terá no máximo 300 medidas, sendo que cada medida contém valores de velocidade do vento e temperatura.

Para o funcionamento do modem devem ser configuradas algumas informações relativas à operadora utilizada e ao servidor que irá receber os dados. Estas informações podem ser enviadas via USB pelo usuário a qualquer momento. Para o estabelecimento da conexão com a internet devem ser informados o ponto de acesso (APN), usuário e senha da operadora de telefonia móvel escolhida. Devem também ser informados o domínio e a porta do servidor que irá receber os dados.

### 3.3.1.2 Interface de comunicação com o anemômetro

A comunicação com o anemômetro é feita por uma interface baseada em ondas PWM. Optou-se por não utilizar uma comunicação serial como uma forma de aumentar a robustez do sistema, já que uma comunicação de tal tipo, na presença de altos níveis de ruído se torna susceptível a falhas. Outra justificativa está relacionada ao histórico do projeto, inicialmente havia a ideia de instalar o anemômetro com uma distância longa do sistema de aquisição, algo em torno de 10 m. Distância que está relacionada ao padrão de medição de velocidade do vento, assim previa-se colocar o anemômetro em tal altura e o sistema de aquisição no solo. Contudo como o sistema final ficou compacto, esse tipo de instalação poderia ser feita com todo o sistema a 10 m de altura. Desta forma, como a interface de comunicação já havia sido implementada com ondas PWM, preferiu-se, por conveniência, não alterar o projeto.

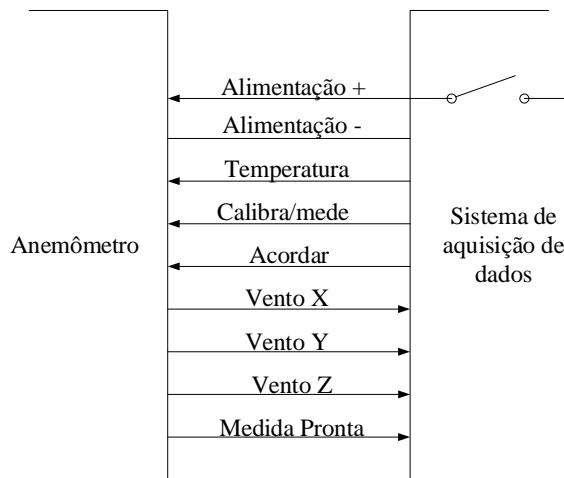
O cabo de comunicação entre o anemômetro e o sistema de aquisição de dados possui 9 vias, duas de alimentação, três em que são enviadas informações do sistema de aquisição de dados para o anemômetro e quatro no sentido inverso. O sentido do tráfego das informações e nomes dados às vias estão apresentados na Figura 3.15. Os sinais gerados pelo sistema são: Acordar, nível lógico responsável por sinalizar para que o anemômetro inicie uma nova medida; Temperatura, informada via PWM para que possa ser feita a medida; Calibra/mede, sinalização que indica se deve ser feita uma medida ou efetuada a calibração. Os sinais enviados pelo anemômetro são: Medida pronta, sinal lógico que indica a finalização de uma medida e Ventos X, Y e Z, que são ondas PWM que representam a velocidade do vento em cada eixo cartesiano ortogonal. As ondas PWM são geradas e lidas utilizando-se uma resolução de 16 bits, o que minimiza as perdas na conversão.

Todas as vias de comunicação, exceto as de alimentação, possuem MOSFET's em suas saídas, protegendo assim os pinos dos microcontroladores presentes nos dois dispositivos.

Como pode-se perceber na Figura 3.15, o sistema de aquisição de dados possui o controle da alimentação do anemômetro. Este controle é feito por um relé de estado sólido que possibilita o desligamento do anemômetro para a economia de energia quando a bateria do sistema está em níveis críticos.

O ciclo de funcionamento do protocolo, quando se quer efetuar uma medida de velocidade do vento, ocorre da seguinte forma: inicialmente o sistema disponibiliza a onda PWM com a temperatura, indica que deve ser feita uma medida

**Figura 3.15** – Protocolo de comunicação entre o sistema de aquisição de dados e o anemômetro.



Fonte: Autor.

e sinaliza com um pulso na via Acordar para que seja iniciada a medição; o anemômetro então lê o valor da temperatura, verifica que deve ser feita uma medida pela via Calibra/mede e inicia o processo de aferição e cálculo da velocidade do vento; finalizada a medida, o anemômetro disponibiliza os três sinais referentes a velocidade do vento em cada eixo e sinaliza na via Medida Pronta que a medição foi concluída e os dados podem ser lidos. Este ciclo ocorre a cada 3 s, contudo neste intervalo são feitas dezenas de medidas no anemômetro, assim o que é informado ao sistema é uma média dos valores obtidos neste intervalo.

### 3.3.1.3 Memória e formato de armazenamento dos dados

O armazenamento temporário dos dados é feito por uma memória F-RAM de 2 Mb (256k x 8), que se comunica com o microcontrolador por SPI a uma frequência de 6,25 MHz. A memória em questão é a FM25V20A, fabricada pela Cypress.

O armazenamento dos dados é feito de forma sequencial na memória. São utilizados 7 bytes para cada medida, três para velocidade máxima do vento em cada eixo, três para velocidade média do vento em cada eixo e um para temperatura ambiente. Estes dados são armazenados a cada intervalo de tempo denominado “tempo entre medidas”, que pode ser configurado entre 1 e 60 min pelo usuário via USB.

Como há o objetivo de medir velocidades do vento de até 150 km/h, com a finalidade de reduzir o consumo de memória, decidiu-se que as velocidades seriam gravadas na memória com uma resolução de 2 km/h. Com isso é necessário 1 byte



por eixo, assim as velocidades podem variar entre -254 km/h e 254 km/h. Como já foi dito são salvos valores de velocidade do vento média e máxima para cada eixo, o que totaliza 6 bytes. Mais um byte é utilizado para a temperatura, que é salva com resolução de 1 °C.

Com as definições de armazenamento citadas anteriormente, a memória é capaz de armazenar dados de um período de até 28 dias, com o tempo entre medidas configurado em seu mínimo, 1 min. Vale ressaltar que, quando um envio de dados ao servidor é concluído com sucesso, os endereços de memória dos dados enviados é liberado para a gravação de novos dados. Assim, caso não ocorram falhas no envio, a memória nunca será preenchida por completo.

Para se evitar a perda de dados em caso de desligamento do sistema, há um campo na memória que efetua um registro provisório das medidas. Este campo é atualizado a cada medida, ou seja, 3 s, desta forma, ao fim de cada período de tempo entre medidas o registro provisório é transferido para o registro histórico normal.

Além dos valores medidos dos sensores, são armazenados na memória alguns sinalizadores que podem indicar: ocorrência de reset do sistema; nova referência de data e hora para as medidas subsequentes; ou a ocorrência de problema em algum dos periféricos. Dessa forma, quando os dados armazenados forem enviados via modem ou coletados via USB, será possível identificar corretamente o horário de cada medição, bem como determinar quando um problema ocorreu ou se houve desligamento do sistema.

Como a velocidade de acesso da memória é relativamente alta, o seu funcionamento é verificado constantemente pelo microcontrolador, em que a cada escrita de dados, é realizada também a leitura, para garantir que o dado desejado tenha sido armazenado corretamente.

#### **3.3.1.4 Microcontrolador e outros elementos**

Para o controle e gerenciamento dos dados foi utilizado um microcontrolador de 16 bits fabricado pela *Freescale/NXP*, modelo MC9S12E128CFU. Este componente foi configurado para trabalhar com frequência de 50 MHz.

O controle do tempo de requisição dos dados, armazenamento e envio é feito por um relógio em tempo real. O modelo utilizado é o PCF8563, fabricado pela NXP, e se comunica com o microcontrolador via I<sup>2</sup>C.

Para possibilitar a comunicação do sistema com um computador, foi utili-

zando o conversor UART/USB FT232, da fabricante FTDI. Por este canal de comunicação é possível enviar as configurações de acesso do modem, os tempos de envio e de armazenamento das medidas da memória, latitude e longitude, alterar o nome do equipamento, gerar o número de identificação, ajustar data e hora, verificar o status de funcionamento e ler os dados armazenados.

O sensor de temperatura escolhido foi o SHT75, que possui resolução de 14 bits e exatidão de  $\pm 0,3$  °C. Além de servir como parâmetro para a medida do anemômetro, o valor da temperatura ambiente também é armazenado juntamente com as velocidades do vento.

A alimentação do sistema é feita por uma bateria de chumbo-ácido estacionária de 36 Ah. Esta bateria é carregada por dois painéis solares fotovoltaicos com capacidade de fornecer 20 W nominais de potência cada, possuem tensão nominal de 17,5 V, corrente nominal de 1,14 A e eficiência de 18%. Estima-se que o conjunto de baterias tenha autonomia para alimentar o equipamento por um período de tempo máximo de três dias, para o caso de total falta de sol. Na prática, este tempo é mais que suficiente para que o sistema volte a ser carregado, visto que a total e consecutiva ausência de raios solares durante todo este tempo é pouco provável. Com a configuração adotada, verificou-se empiricamente que os painéis são capazes de carregar o consumo de um dia do equipamento em aproximadamente 3 horas de sol intenso.

O controle da carga da bateria é feito pela verificação de sua tensão. O painel solar fica ligado à bateria por meio dos contatos comum e normalmente fechado de um relé, quando a tensão da bateria ultrapassa 13,8 V o relé é acionado, interrompendo o carregamento. A bateria volta a ser carregada quando sua tensão chega a 13,3 V.

A utilização do contato normalmente fechado do relé foi feita pois caso ocorra a descarga total da bateria, os painéis solares ainda permanecerão ligados a ela, possibilitando assim o seu carregamento e o consequente reinício de funcionamento do sistema.

### 3.3.2 Ciclo de funcionamento

Apresentados os elementos presentes no sistema, pode-se descrever o seu ciclo de funcionamento, que é baseado basicamente em dois intervalos de tempo que podem ser configurados pelo usuário, o tempo entre medidas e o período de envio do modem.

A cada 3 s é feita uma medida de temperatura e uma medida de velocidade do vento, estes valores são acumulados e finalizado o intervalo do tempo entre medidas, os dados são salvos no registro histórico da memória.

O modem é ligado a cada período de envio e inicia o processo de conexão com o servidor. Finalizado este processo, os dados são enviados conforme foram salvos no registro histórico da memória. Durante este período as medidas são efetuadas normalmente, não afetando as bases de tempo. Caso haja alguma falha na conexão ou transmissão, o sistema tentará um novo envio depois de 15 minutos. Havendo uma nova falha, uma nova tentativa será feita somente no próximo período agendado.

O sistema possui uma metodologia de verificação de seu status, assim, caso haja algum problema de comunicação do microcontrolador com a memória, relógio em tempo real, anemômetro ou sensor de temperatura, ou então a bateria esteja baixa, um alarme interno é gerado. Este alarme, se possível, é salvo na memória e é iniciado um envio ao servidor com o objetivo de que o usuário remoto fique ciente do problema que ocorreu e proceda com a manutenção necessária.

Também é gerado um alarme caso a velocidade do vento ultrapasse um valor configurado pelo usuário. Este alarme, assim como o da tensão da bateria, pode ser habilitado ou não, conforme escolha do usuário. Eles possuem caráter de status, ou seja, caso a tensão da bateria volte aos níveis normais ou a velocidade do vento volte a ser menor que o limiar configurado, o respectivo alarme é desativado, o que também gera um envio ao servidor. Os outros alarmes possuem caráter histórico, portanto caso eles ocorram, só poderão ser desativados pelo usuário via USB.

Os alarmes são salvos internamente no microcontrolador em uma variável de 8 bits, em que cada bit é relativo a um alarme, como pode ser visto na Tabela 3.1. Caso algum dos alarmes seja ativado, o respectivo bit é colocado em um. Em cada envio de dados ao servidor, esta variável relativa aos alarmes é enviada em formato numérico, permitindo a identificação do problema ocorrido pelo usuário.

**Tabela 3.1** – Bits referentes a cada tipo de alarme

Bit	Alarme
0	Problema no sensor de temperatura
1	Problema no relógio em tempo real
2	Problema na memória
3	Problema no anemômetro
4	Velocidade do vento acima do limite configurado
5	Tensão da bateria baixa
6	Não utilizado
7	Não utilizado

## 4 Resultados e discussão

### 4.1 Protótipos do anemômetro ultrassônico 3D

Foram desenvolvidos dois protótipos de anemômetro. As montagens mecânicas dos equipamentos com topologia ortogonal e não ortogonal estão apresentados a seguir, bem como a placa de circuito impresso desenvolvida.

#### 4.1.1 Placa de instrumentação e sinais de transmissão e recepção

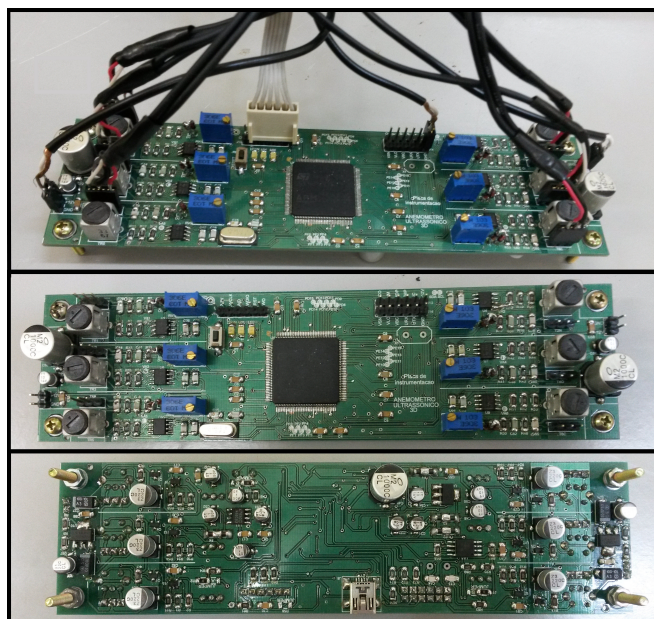
A Figura 4.1 exibe a placa de instrumentação desenvolvida e montada vista por cima, por baixo e com os cabos de ligação. Nessa figura é possível observar a divisão dos circuitos entre transmissão (face inferior) e recepção (face superior), bem como identificar os seis circuitos de condicionamento replicados, um para cada transdutor. Observa-se também a divisão das malhas de terra e o posicionamento dos circuitos de condicionamento em extremidades opostas da placa.

A placa desenvolvida possui comprimento de 170 mm e largura de 45 mm, estas medidas foram adotadas para que a placa ficasse acondicionada dentro do corpo do anemômetro, que é fabricado tendo como matéria prima um tubo de alumínio de 2 1/4".

A seguir serão apresentadas as ondas de transmissão e recepção do sinal ultrassônico, que tem como objetivo validar o funcionamento do circuito de excitação e condicionamento, apresentados nas Figuras 3.2 e 3.3.

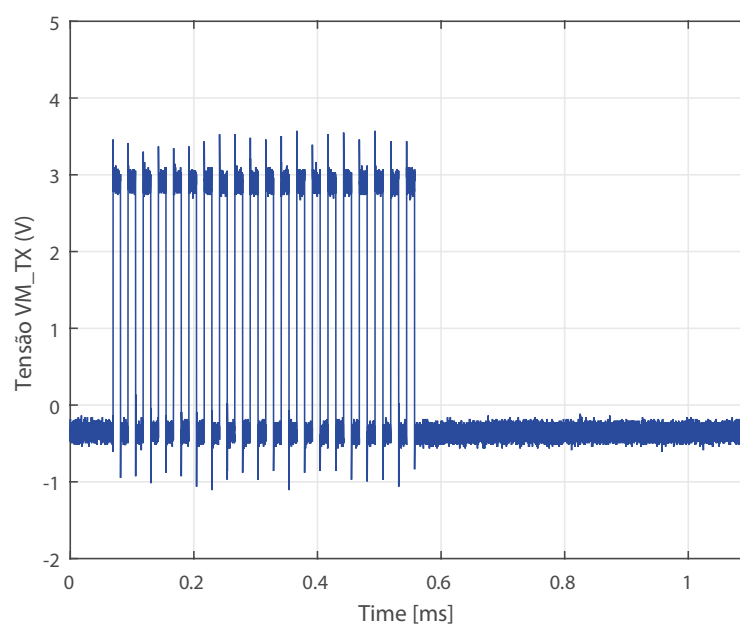
Inicialmente é apresentado na Figura 4.2 o sinal de transmissão gerado pelo microcontrolador. Esse sinal possui pulsos na frequência de 40 kHz e razão cíclica de 50%, e é encontrado no ponto identificado como "VM\_TX" no circuito da Figura 3.2. Este sinal, passa por um driver, e chega ao gate de um MOSFET, responsável por acionar o primário do transformador de pulso. O sinal presente no dreno do MOSFET ("VS\_TX" da Figura 3.2) está apresentado na Figura 4.3.

**Figura 4.1** – Placa de circuito impresso do anemômetro ultrassônico com os cabos dos transdutores, face superior e face inferior, respectivamente.

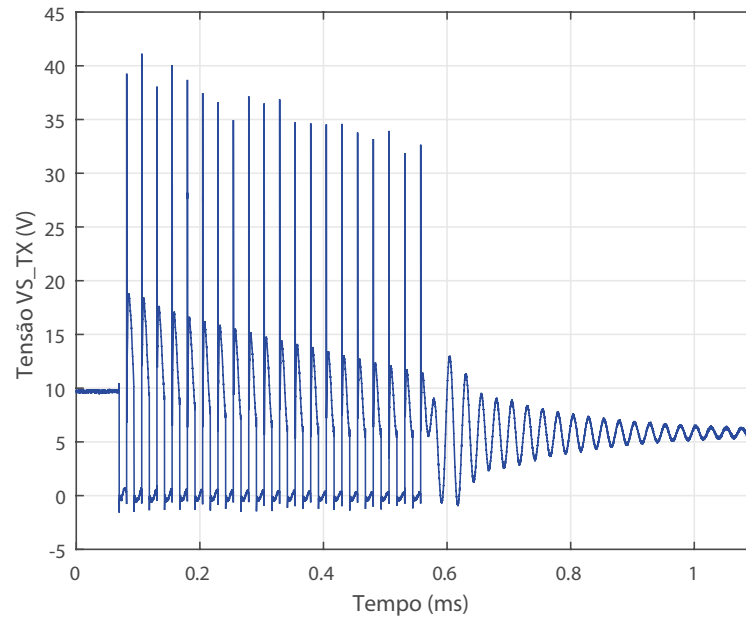


Fonte: Autor.

**Figura 4.2** – Sinal de transmissão gerado pelo microcontrolador.



Fonte: Autor.

**Figura 4.3** – Sinal de transmissão presente sobre o transformador de pulso.

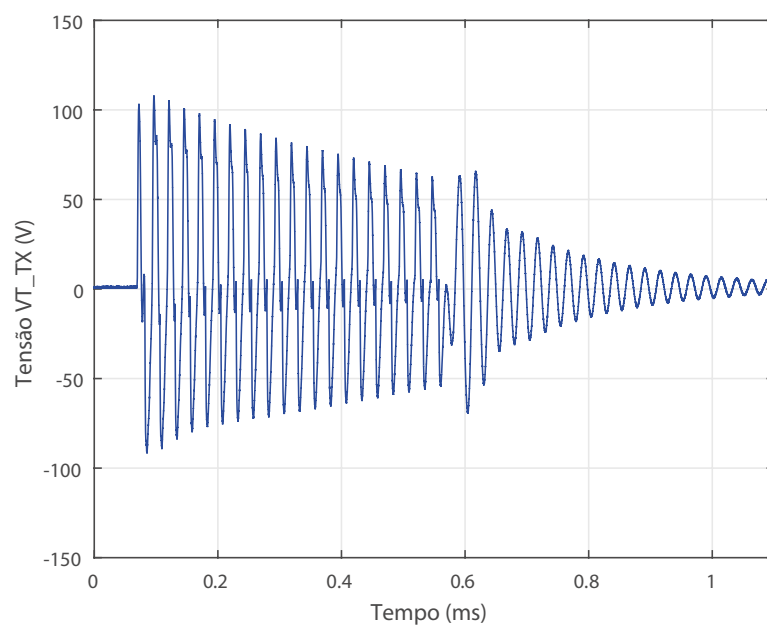
Fonte: Autor.

A Figura 4.4 exibe o sinal elétrico aplicado sobre o transdutor para a transmissão da onda ultrassônica. O ponto de coleta desse sinal está identificado como “VT\_TX” no circuito da Figura 3.2. Essa onda possui tal amplitude e formato, de aproximadamente 230 V pico-a-pico, devido principalmente ao transformador de pulso presente no circuito e a impedância do transdutor.

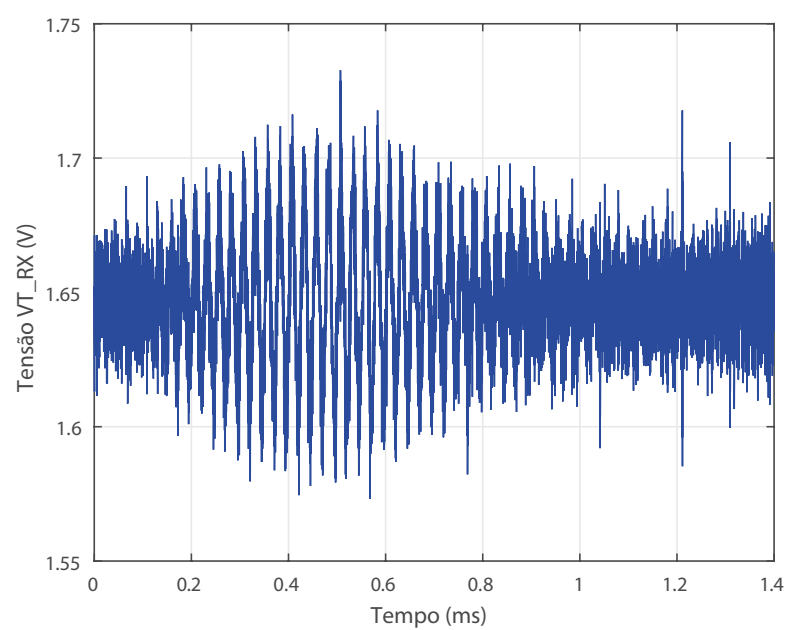
É perceptível que as ondas aplicadas sobre o transdutor possuem um período oscilatório mesmo após o fim dos pulsos de acionamento, isto ocorre devido, principalmente, à energia que fica armazenada no transformador. Que se descarrega por meio dos diodos colocados em seu primário. Caso o diodo zener não fosse colocado a amplitude da oscilação seria menor, havendo ou não os pulsos, reduzindo assim a relação sinal ruído da recepção e, conseqüentemente, prejudicando a resposta do sistema.

Apresentada a onda de transmissão, a Figura 4.5 expõe o sinal recebido pelo transdutor, localizado a 20 cm do transmissor, sem qualquer tratamento. Esse sinal foi coletado no ponto indicado como “VT\_RX” no circuito da Figura 3.3. Pode-se perceber que a onda é muito ruidosa e o sinal referente a onda ultrassônica é praticamente imperceptível, justificando assim a necessidade de condicionamento e das medidas para redução do ruído tomadas no processo de desenvolvimento da placa.

O sinal de recepção, que é lido pelo microcontrolador após a passagem pelo circuito de condicionamento, está apresentado na Figura 4.6 e foi coletado no

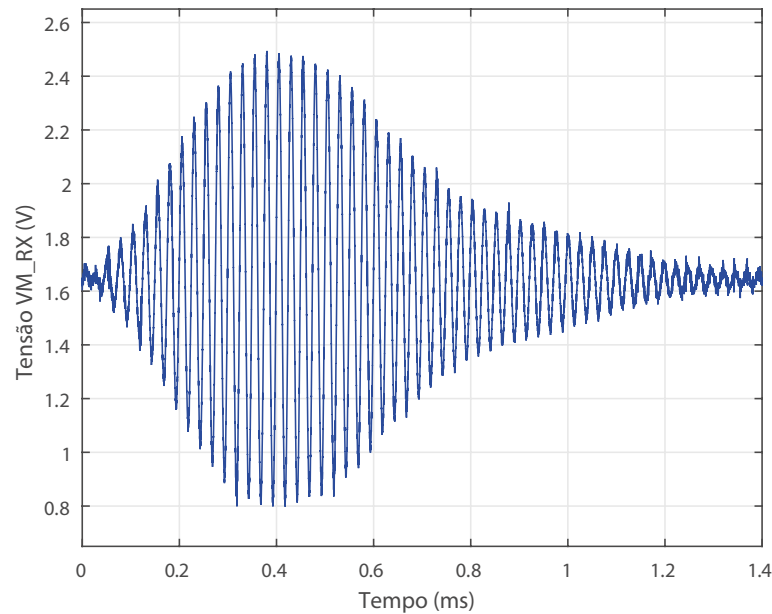
**Figura 4.4** – Sinal de transmissão aplicado no transdutor ultrassônico.

Fonte: Autor.

**Figura 4.5** – Sinal de recepção obtido no transdutor ultrassônico.

Fonte: Autor.



**Figura 4.6** – Sinal de recepção após amplificação e filtragem analógica.

Fonte: Autor.

ponto identificado como “VM\_RX” do circuito da Figura 3.3. Verifica-se que os dois estágios do circuito, a amplificação e a filtragem, funcionaram de maneira satisfatória, obtendo-se um sinal com amplitude pico-a-pico de aproximadamente 1,7 V, com níveis de ruído aceitáveis.

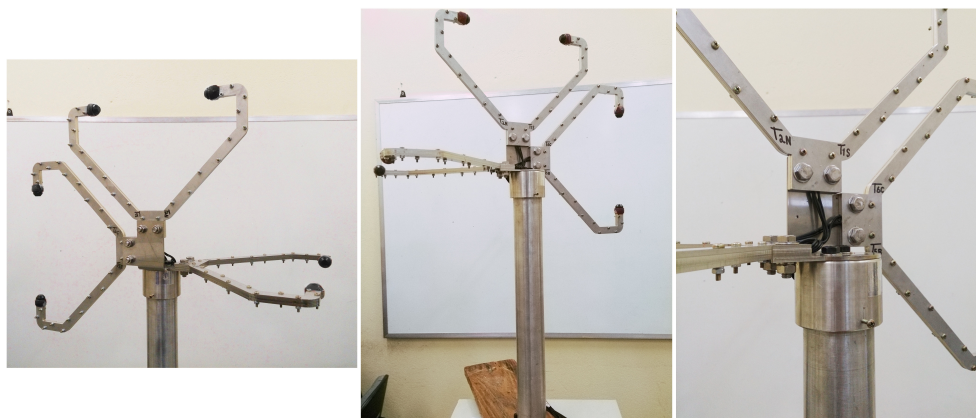
O sinal apresentado na Figura 4.6 possui esta característica sem qualquer interferência acontecendo entre os tradutores. Caso haja, por exemplo, um vento incidindo sobre o sistema, o formato de onda terá a sua envoltória alterada. Caso o vento seja turbulento, o sinal de recepção será ainda mais ruidoso, portando a implementação de um circuito eletrônico como o que foi proposto é de extrema importância quando se deseja utilizar ondas ultrassônicas para aferir grandezas.

#### 4.1.2 Estrutura mecânica

Como o anemômetro fica exposto ao tempo, as peças foram fabricadas com materiais inoxidáveis. No corpo do anemômetro foram utilizados perfis de alumínio esculpido em torno. As peças restantes são todas montagens feitas com peças fabricadas utilizando chapa de aço inoxidável com espessura de 3 mm cortadas a laser. Com isso, os suportes dos transdutores possuem a espessura total de 9 mm, já que é feita a sobreposição de três peças, garantindo robustez e resistência mecânica a eles.

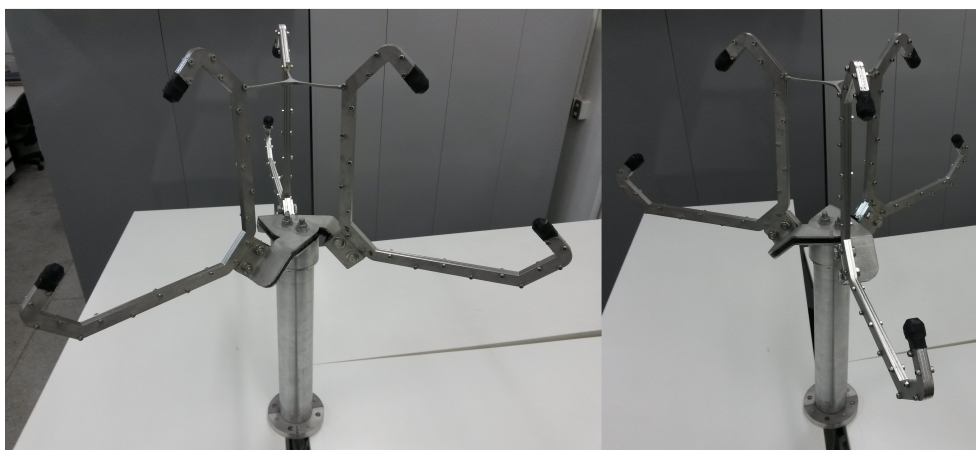
As Figuras 4.7 e 4.8 apresentam os protótipos de anemômetros desenvolvidos

**Figura 4.7** – Protótipo de anemômetro ultrassônico 3D com topologia ortogonal.



Fonte: Autor.

**Figura 4.8** – Protótipo de anemômetro ultrassônico 3D com topologia não ortogonal.



Fonte: Autor.

com topologia ortogonal e não ortogonal, respectivamente.

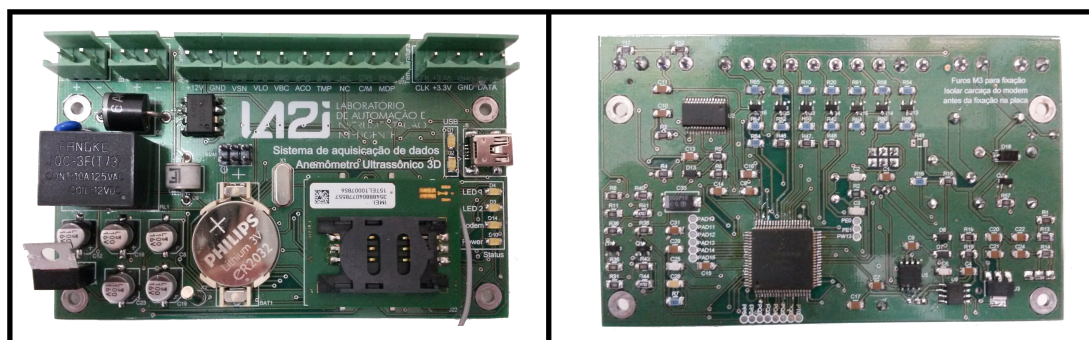
Em ambas as montagens os furos para as passagens dos fios dos transdutores, foram vedados com a utilização de silicone, evitando assim a entrada de água no corpo do anemômetro, local em que está abrigada a placa de instrumentação.

## 4.2 Protótipo do sistema de aquisição de dados

Para o sistema de aquisição de dados foi desenvolvida a placa de circuito impresso que está apresentada na Figura 4.9, exibindo a face superior à esquerda e a inferior a direita.

Nesta placa, para a ligação dos elementos externos (anemômetro, sensor de temperatura, bateria e painel solar) foram utilizados conectores do tipo plug, que facilitam a montagem e uma eventual manutenção. Optou-se também por colocar

**Figura 4.9** – Placa de circuito impresso do sistema de aquisição de dados, face superior e inferior, respectivamente.



Fonte: Autor.

**Figura 4.10** – Montagem em caixa plástica da placa de circuito impresso do sistema de aquisição de dados.



Fonte: Autor.

a placa em suporte para trilho DIN com o mesmo objetivo.

A placa fica alocada dentro de uma caixa plástica com proteção UV, como pode ser visto na Figura 4.10. Para uma maior proteção da placa foi colocada uma proteção em acrílico sobre a mesma e para a entrada dos cabos foram utilizados prensa-cabos.

Visando a proteção dos componentes eletrônicos presentes na placa, foram inseridos pacotes de sílica gel na caixa, controlando assim a umidade interna.

## 4.3 Formato do pacote de dados enviado ao servidor

Está apresentado na 4.11 um pacote de dados enviado pelo sistema de aquisição de dados e recebido pelo servidor. Nele, aparecem os dados referentes a 30 minutos de funcionamento, com o equipamento configurado para salvar uma medida

a cada 1 minuto.

**Figura 4.11** – Formato do pacote de dados.

```

1 LA2I% TESTE
2
3 % Nome identificacao: TESTE
4 % Num identificacao: 1510161844
5 % 16/12/15 15:30:22
6 % Intens.sinal: 19,0
7 % --- Config.atual: ---
8 % Tempo entre medidas [min]: 01
9 % Tempo entre envios[min]: 0030
10 % Operadora: sercomtel
11 % APN: sercomtel.com.br
12 % Usuario: sercomtel
13 % Senha: sercomtel
14 % Dominio: daemon.la2i.com
15 % Porta: 4000
16 % Alarme alimentacao: habilitado
17 % Alarme vel.vento: habilitado
18 % Vel.vento limite[km/h]: 100
19 % Latitude: -23.359496
20 % Longitude: -51.164707
21 % --- Status ---
22 % Tensao bateria [V]: 12,1
23 % Alarmes: 0000
24 % Prox.transm.GPRS: 16:00
25 % INICIO DE DADOS
26 T [oC] Vmax_SN Vmax_LO Vmax_BC Vmed_SN Vmed_LO Vmed_BC [km/h]
27 % Data: 16/12/15 15:01:00
28 % Tempo entre medidas [min]: 01
29 25      000      006      000      000      004      000
30 25      000      004      000      000      004      000
31 25      002      004      000      000      004      000
32 25      002      004      000      000      002      000
33 25      000      004      000      000      002      000
34 25      002      004      000      000      004      000
35 25      002      004      000      000      002      000
36 25      000      004      000      000      004      000

```

37	25	000	006	000	000	004	000
38	25	000	006	000	000	004	000
39	25	002	004	000	000	002	000
40	25	002	004	000	000	002	000
41	25	002	004	000	000	002	000
42	25	000	004	000	000	002	000
43	25	002	004	000	000	004	000
44	25	000	004	000	000	002	000
45	25	000	004	000	000	002	000
46	25	002	004	000	000	002	000
47	25	002	004	000	000	002	000
48	25	002	004	000	000	002	000
49	25	000	004	000	000	004	000
50	25	000	006	000	000	002	000
51	25	002	004	000	000	002	000
52	25	002	004	000	000	002	000
53	25	000	004	000	000	002	000
54	25	002	004	000	000	004	000
55	25	000	004	000	000	002	000
56	25	000	004	000	000	002	000
57	25	000	004	000	000	002	000
58	25	002	004	000	000	002	000
59	% Total medidas: 00030						
60	% FIM DE DADOS						

Fonte: Autor.

No pacote de dados apresentado, podemos verificar em sua primeira linha, a mensagem “LA2I” que serve como senha para que o servidor inicie o armazenamento dos dados, seguida pelo nome no equipamento, “TESTE”, neste caso. A partir deste ponto, todas as linhas iniciadas com “%” representam informações relacionadas ao equipamento ou ao pacote, as linhas sem este carácter são efetivamente as medidas.

As linhas de 3 a 6 apresentam informações de identificação do equipamento, seu nome, número, data e hora e a intensidade do sinal de telefonia móvel. As linhas 7 a 20 são relativas às configurações do equipamento, que podem ser alteradas pelo usuário via USB. Nestes campos podemos ver, na ordem em que aparecem: o tempo entre medidas, que indica o intervalo de tempo que um dado

será salvo na memória; o tempo entre envios do modem; as configurações de conexão do modem (APN, usuário e senha) que variam conforme a operadora de telefonia móvel escolhida; os dados do servidor (Domínio e porta); a indicação se os alarmes de alimentação e velocidade do vento estão habilitados; o limite da velocidade do vento, valor que caso seja ultrapassado ira gerar um alarme no sistema; e por fim, latitude e longitude do local em que o sistema foi instalado.

Finalizando o cabeçalho, temos o status de funcionamento do sistema, nas linhas de 21 a 24, com a tensão de alimentação, a indicação dos alarmes e do momento que será realizada a próxima transmissão de dados.

A partir da linha 25, com a mensagem “INICIO DE DADOS”, estão localizadas as medidas. Temos inicialmente um indicativo de como os dados estarão distribuídos nas colunas, sendo assim ordenados: temperatura média, velocidades do vento máximas nos eixos Sul Norte, Leste Oeste e Baixo Cima e velocidades médias nos mesmos eixos, para o intervalo denominado tempo entre medidas. Na linha 27 há um marcador de data e hora da primeira medida e na 28 a indicação do intervalo de tempo entre as medidas.

Os dados estão, efetivamente, nas linhas de 29 a 58. Cada linha possui as medidas de um intervalo, assim, se analisarmos, por exemplo, a linha 29, podemos dizer que entre às 15:00 e 15:01 do dia 16/12/15, a temperatura média foi de 25 °C, as velocidades máximas foram 0, 6 e 0 km/h e as médias 0, 4 e 0 km/h nos eixos SN, LO e BC, respectivamente.

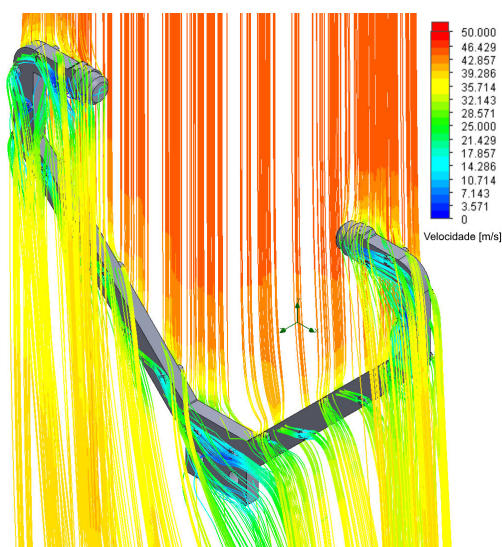
As velocidades que aparecem no pacote de dados apresentado são baixas pois no momento em que os dados foram coletados o anemômetro se encontrava dentro do laboratório, recebendo vento de maneira forçada, por meio de um ventilador.

Ao final do pacote é escrito o total de medidas que foram enviadas, como pode ser visto na linha 59, seguido da mensagem “FIM DE DADOS”, que serve como sinalizador para o servidor, indicando o final do pacote. Ao receber este sinalizador, o servidor envia uma mensagem ao equipamento, indicando que os dados foram recebidos com sucesso.

## 4.4 Simulação da influência da estrutura na medida da velocidade do vento

Para comprovar a hipótese levantada na seção 2.2.3, de que a própria estrutura pode causar influências na medida da velocidade do vento, foram fei-

**Figura 4.12** – Simulação do vento incidindo a  $45^\circ$  sobre o suporte dos transdutores em vista isométrica.



Fonte: Autor.

tas duas simulações utilizando o complemento de *Flow Simulation* do software *Solidworks*®. Em ambos os casos, avaliou-se o fluxo do vento sobre o suporte dos transdutores, que é parte constituinte de ambas as topologias. Na simulação inicial, o vento incidiu sobre a peça com um ângulo de  $45^\circ$  e, posteriormente, o vento foi aplicado no sentido paralelo a peça, como está apresentado a seguir. Foi simulada a ação de um vento laminar com velocidade de 162 km/h (45 m/s) nos dois posicionamentos.

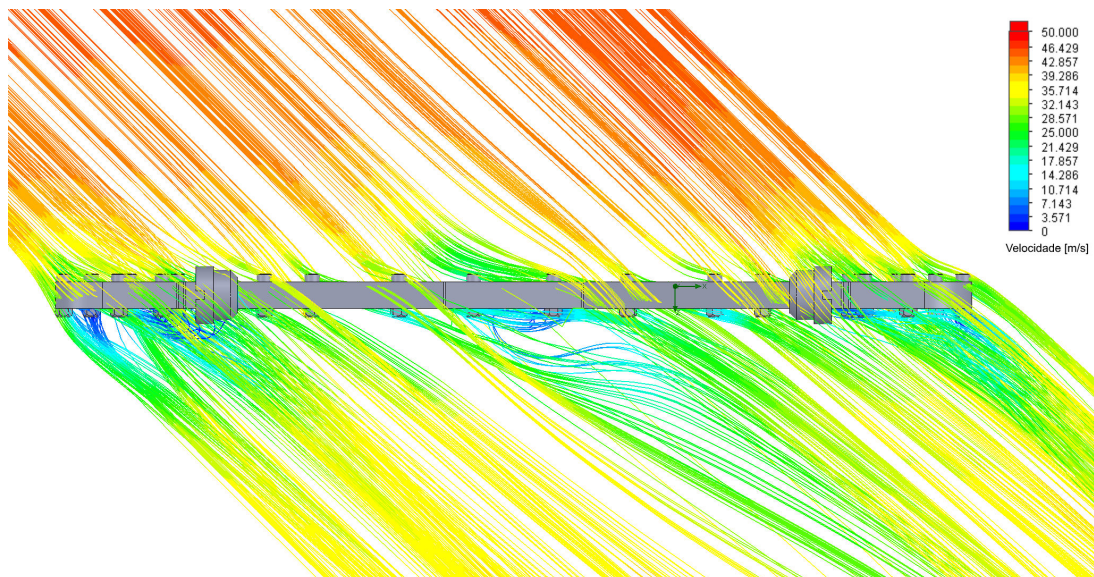
A simulação de quando há a incidência do vento sobre o suporte dos transdutores com um ângulo de  $45^\circ$  está apresentada na Figura 4.12, com uma vista isométrica da peça e das linhas de fluxo do vento que a atravessa. A Figura 4.13 exibe a mesma simulação, agora com vista superior, possibilitando a análise de como o vento atravessa o espaço entre os transdutores.

Observando-se as figuras apresentadas, com o vento incidente em um ângulo de  $45^\circ$ , pode-se concluir que quando a estrutura é atingida, nenhuma turbulência é gerada entre os transdutores, mantendo a velocidade do vento constante neste espaço. Com isso, a onda ultrassônica é deslocada normalmente pela ação do vento, permitindo que a aferição da velocidade seja feita sem problemas.

Na Figura 4.14 é apresentada a simulação em que o vento de velocidade 162 km/h (45 m/s) é aplicado no mesmo eixo de medição que os transdutores, ou seja, em paralelo com a peça, em vista isométrica. Pela análise desta imagem é perceptível o modo em que o vento possui seu fluxo alterado pela peça, havendo uma grande variação de velocidade em toda a estrutura e principalmente entre os transdutores.

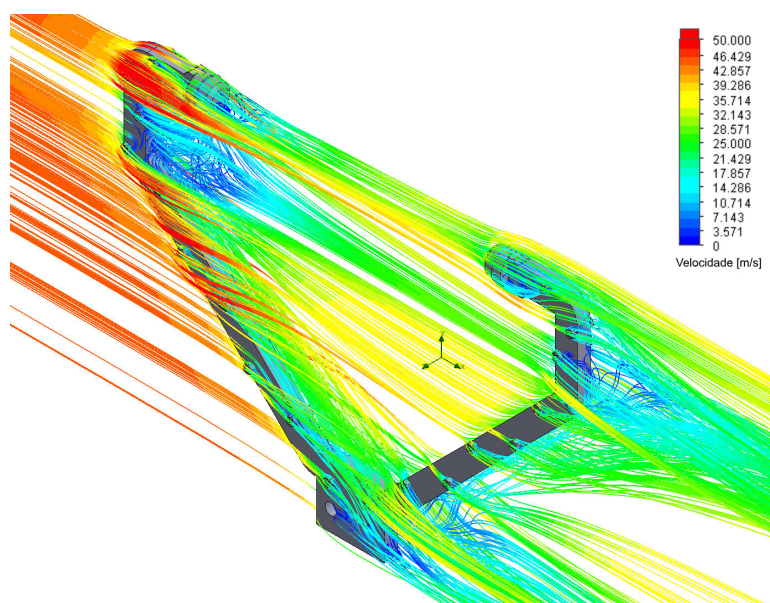


**Figura 4.13** – Simulação do vento incidindo a  $45^\circ$  sobre o suporte dos transdutores em vista superior.



Fonte: Autor.

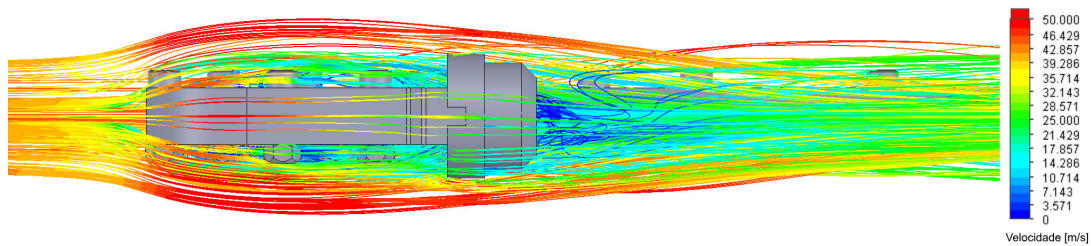
**Figura 4.14** – Simulação do vento incidindo paralelamente ao suporte dos transdutores em vista isométrica.



Fonte: Autor.



**Figura 4.15** – Simulação do vento incidindo paralelamente ao suporte dos transdutores em detalhe da vista superior.



Fonte: Autor.

De toda a estrutura que está sendo avaliada, a parte mais importante é aquela compreendida entre os tradutores, com isso, para uma melhor avaliação, está apresentada na Figura 4.15 a vista superior do transdutor, que recebe o vento diretamente em sua haste de sustentação. Observando-se esta imagem, verifica-se que uma grande turbulência é gerada logo após o transdutor, o que certamente afetaria a velocidade medida. Percebe-se também que o vento possui sua intensidade alterada, chegando a aproximadamente 90 km/h (25 m/s) no espaço entre os transdutores.

Conforme o que foi apresentado, fica claro que uma medida de velocidade será errônea caso seja efetuada com o vento incidindo no mesmo eixo em que é feita medida, já que a onda ultrassônica sofrerá ação da turbulência e seu tempo de trânsito não será influenciado pelo mesmo vento que chega a estrutura. Com isso fica comprovada a teoria apresentada na seção 2.2.3, de que para a obtenção de medidas confiáveis, o vento não deve, preferencialmente, incidir nos mesmos eixos em que as medidas são feitas.

## 4.5 Testes comparativos entre as estruturas

Para validar o funcionamento do anemômetro, foram feitos testes com os protótipos desenvolvidos comparando os valores de velocidade do vento obtidos com um anemômetro comercial, também ultrassônico e tridimensional, modelo WindMaster 3D fabricado pela Gill Instruments. A folha de dados deste equipamento, com suas especificações, pode ser consultada no Anexo B.

Para que não houvesse dependência das condições climáticas para que ocorressem grandes velocidades do vento e assim, validar o equipamento desenvolvido, optou-se por utilizar um método não convencional para atingir maiores velocidades, controladamente. Fixar o anemômetro e fazer incidir sobre ele um fluxo de

**Figura 4.16** – Montagem experimental do protótipo com topologia ortogonal.



Fonte: Autor.

ar é equivalente a deslocar o equipamento à velocidade desejada. Desta forma, utilizou-se então um automóvel para dar mobilidade ao anemômetro e realizar os testes.

Tanto para a topologia ortogonal quanto para a não ortogonal, foi colocado sobre o automóvel o protótipo a ser analisado e o anemômetro comercial, lado a lado, de forma que a velocidade do vento incidente sobre eles, bem como a direção e sentido pudessem ser consideradas as mesmas. Assim, colocou-se o automóvel em movimento e se coletou os dados de velocidade do vento de ambos os dispositivos, com a taxa de um valor de velocidade a cada três segundos. Os dados dos dois equipamentos foram coletados via porta USB por um notebook no interior do veículo e com o auxílio do software *Matlab*<sup>®</sup> estes dados foram analisados para a verificação das velocidades do vento e geraram os resultados aqui apresentados.

A Figura 4.16 apresenta a montagem do equipamento com topologia ortogonal e do dispositivo comercial sobre o automóvel. A Figura 4.17 é referente a montagem não ortogonal.

#### 4.5.1 Topologia ortogonal

Apresenta-se a seguir os dados coletados com o anemômetro de topologia ortogonal sobre o carro, em que o equipamento foi posicionado de duas maneiras distintas, primeiramente com o eixo X (ou SN) apontado à 45° da frente do carro e posteriormente com este mesmo eixo em paralelo com a frente do carro.

Primeiramente, podemos observar na Figura 4.18 o funcionamento correto do sistema, observando as velocidades do vento para cada sentido, em que o anemômetro estava posicionado com seu eixo X apontado à 45° da frente do carro.

**Figura 4.17** – Montagem experimental do protótipo com topologia não ortogonal.



Fonte: Autor.

Observando os gráficos verifica-se que o equipamento desenvolvido acompanha o sistema de referência, com um pequeno erro diferencial, que pode ser corrigido por meio de devida calibração.

A Figura 4.19 ilustra uma regressão linear comparativa, do módulo das velocidades do vento, entre o anemômetro ortogonal projetado e o comercial, indicando que apesar do erro encontrado, as medidas ainda podem ser consideradas satisfatórias. O coeficiente de determinação do modelo obtido,  $R^2$ , foi 0,992 e a equação da reta que ajusta o modelo é

$$y = -0,6085 + 0,9705x. \quad (4.1)$$

Realizou-se então outro ensaio, posicionando o eixo X do anemômetro desenvolvido em paralelo com a orientação do veículo, com isso, o vento incidente sobre o equipamento seria aferido em sua maior parte por este eixo. O gráfico da Figura 4.20 apresenta os resultados relativos a este teste.

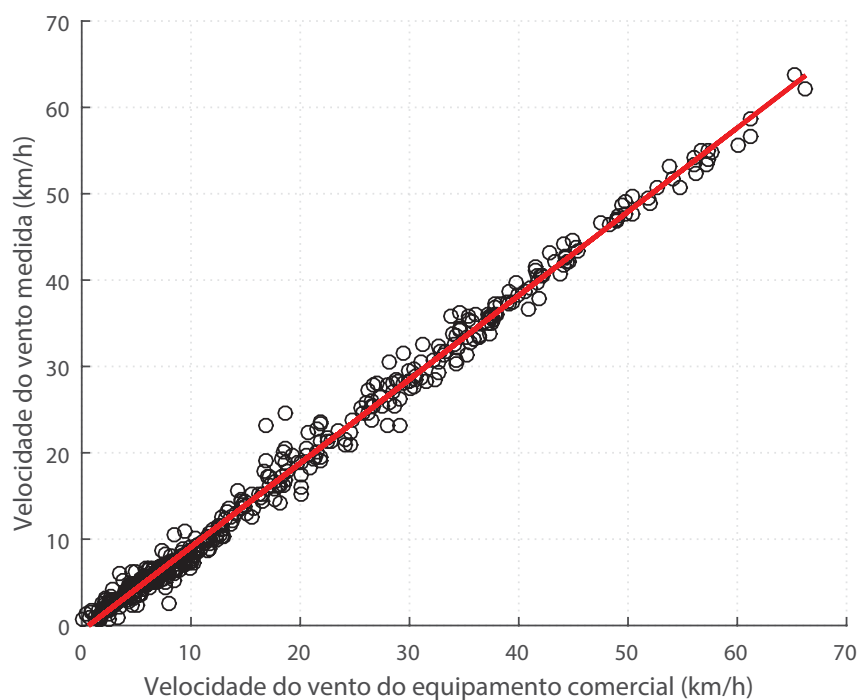
O problema ocasionado nas velocidades acima de 30 km/h para o eixo X, é o descrito na Seção 2.2.3 e comprovado pelas simulações apresentadas na Seção 4.4, em que a onda ultrassônica não é influenciada em toda a sua excursão pelo vento ali incidente, devido ao obstáculo causado por sua estrutura. Isto justifica a grande diferença de amplitude entre o protótipo e o equipamento de referência. Para velocidades ainda mais altas, acima dos 100 km/h, a turbulência gerada logo após a passagem do vento pelo transdutor, que pode ser vista na simulação já apresentada na Figura 4.15, gera uma grande quantidade de ruído na onda ultrassônica. Desta forma, no momento em que o sinal é recebido pelo outro

**Figura 4.18** – Teste com o anemômetro ortogonal posicionado com eixo X á  $45^\circ$  da frente do automóvel.



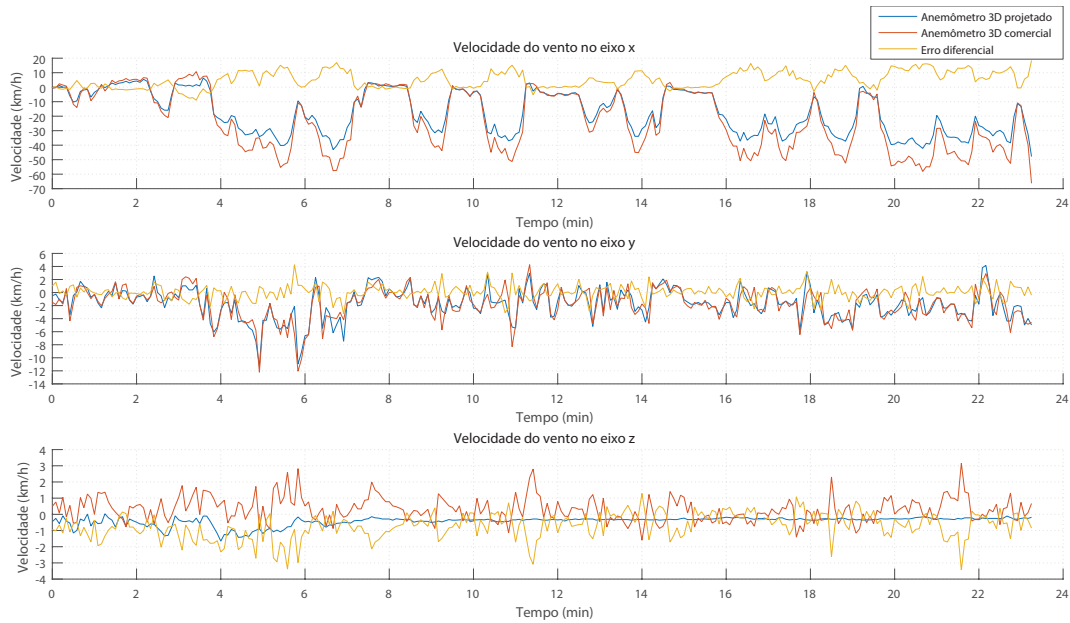
Fonte: Autor.

**Figura 4.19** – Regressão para o anemômetro ortogonal posicionado com eixo X á  $45^\circ$  da frente do automóvel.



Fonte: Autor.

**Figura 4.20** – Teste com o anemômetro ortogonal com o eixo X posicionado em paralelo com a frente do automóvel.



Fonte: Autor.

transdutor, o condicionamento analógico e digital efetuados sobre o sinal, não são suficientes para filtrar os ruídos, impossibilitando a verificação dos cruzamentos por zero da onda e, conseqüentemente, cálculo do tempo de trânsito e da velocidade do vento.

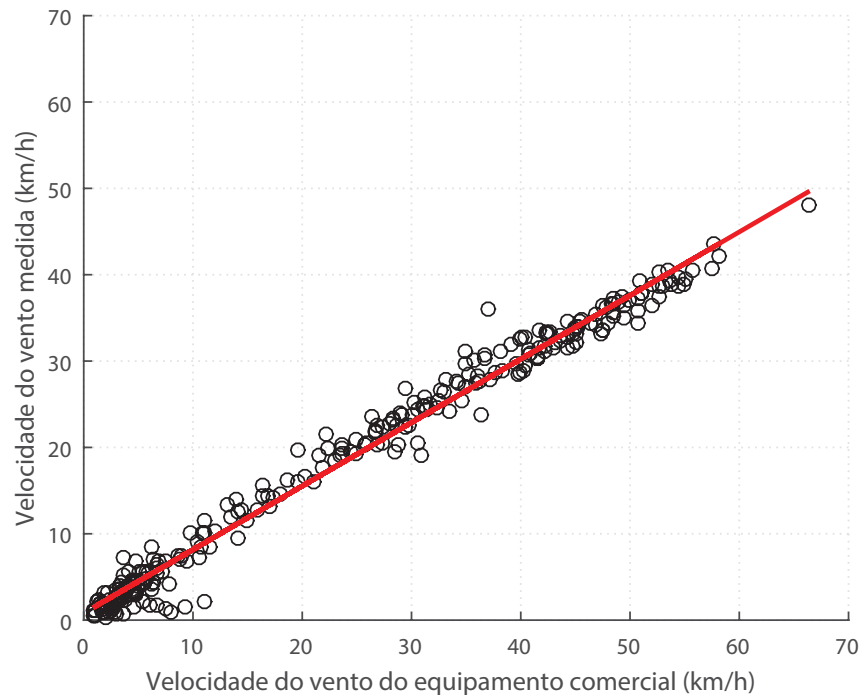
A Figura 4.21 exibe uma regressão linear comparativa entre o anemômetro ortogonal projetado e o comercial, para o período de dados da Figura 4.20, utilizando o módulo da velocidade do vento adquirida em ambos equipamentos. O coeficiente de determinação do modelo obtido,  $R^2$ , foi 0,984 e a equação da reta que ajusta o modelo é

$$y = 0,8192 + 0,7356x. \quad (4.2)$$

Além do problema já citado, percebe-se, analisando o coeficiente de determinação, que com este posicionamento, com o eixo SN paralelo ao automóvel, a precisão obtida pelo equipamento foi menor se comparado ao teste realizado previamente. Com isso, conclui-se que para esta topologia, a precisão do equipamento é variável conforme o sentido do vento, algo que não pode ser controlado, desta forma a sua confiabilidade fica prejudicada.

Os problemas causados na topologia ortogonal, incentivaram o desenvolvimento da topologia não ortogonal, visando a redução da influência da própria

**Figura 4.21** – Regressão para o anemômetro ortogonal com o eixo x posicionado em paralelo com o automóvel.



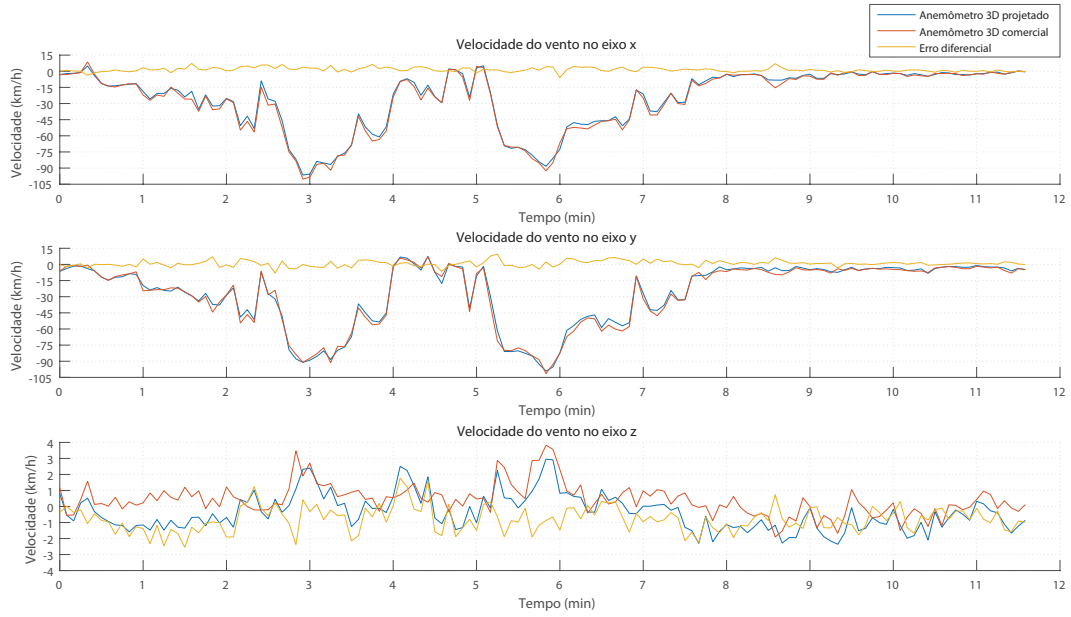
Fonte: Autor.

estrutura nas medidas e um aumento de sua precisão. Para isso, como foi apresentado na Seção 3.2.2.2, os eixos de medição foram posicionados com um ângulo de  $45^\circ$  em relação ao plano terrestre, que possui as velocidades do vento mais altas. Analisando-se os resultados apresentados até então, sabe-se que com este ângulo a influência da estrutura sobre as medidas é praticamente nula, assim foram obtidos melhores resultados para essa outra topologia.

#### 4.5.2 Topologia não ortogonal

Conforme a montagem experimental apresentada na Figura 4.17, foram feitos os testes para se avaliar o funcionamento do anemômetro com topologia não ortogonal. Os dados coletados de velocidade do vento do protótipo desenvolvido e do equipamento de referência, bem como o erro diferencial entre eles, para cada eixo, estão apresentados na Figura 4.22.

Para avaliar a precisão do anemômetro desenvolvido, foi gerada a regressão linear apresentada na Figura 4.23, relativa ao módulo da velocidade do vento do equipamento de referência e o desenvolvido. O coeficiente de determinação do modelo obtido,  $R^2$ , foi 0,995 e a equação da reta que ajusta o modelo é

**Figura 4.22** – Teste com o anemômetro não ortogonal.

Fonte: Autor.

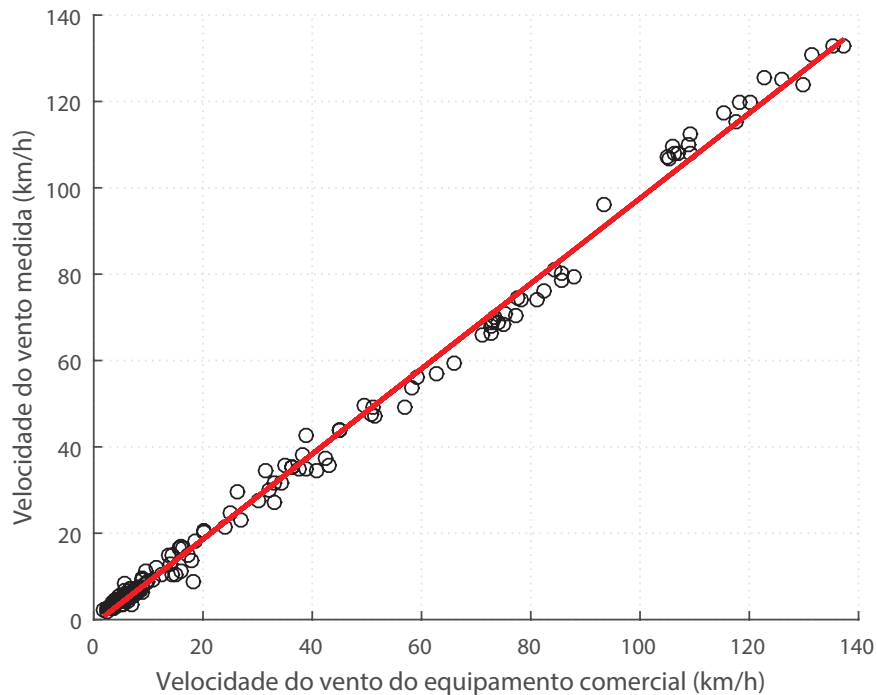
$$y = -1,1226 + 0,9869x. \quad (4.3)$$

Dentre os ensaios realizados, a topologia que obteve um coeficiente de determinação mais próximo de 1 foi a não ortogonal, podendo ser considerada mais precisa que a ortogonal. Com isso, o maior custo computacional gerado pela necessidade de ortogonalização das medidas do anemômetro com esta topologia, se torna sem importância, já que a confiabilidade das medidas é maior.

Fazendo a análise do coeficiente angular da reta, percebe-se que o índice mais próximo de 1 dentre os experimentos efetuados, é aquele obtido com a topologia não ortogonal. Com isso, fica claro que, ao efetuar uma calibração neste equipamento, ele possuirá medidas tão confiáveis quanto o equipamento de referência.

Verificou-se também que, como o esperado, o problema causado pela influência da estrutura sobre as medidas não ocorreu nesta topologia, podendo-se afirmar que os resultados foram satisfatórios. Desta forma, para o prosseguimento dos testes do anemômetro em funcionamento juntamente com o sistema de aquisição de dados, a topologia utilizada foi a não ortogonal.



**Figura 4.23** – Regressão linear para o anemômetro não ortogonal.

Fonte: Autor.

### 4.5.3 Vantagens da topologia não ortogonal

Como discutido anteriormente, o sistema ortogonal apresentou problemas de leitura quando o sentido do vento é paralelo a um dos eixos do anemômetro e a velocidade é maior que 30 km/h, provocando uma grande diferença entre o valor medido e o de referência, em que conforme havia o aumento da velocidade, maior era o erro encontrado. Essa é considerada uma grande desvantagem desta topologia.

Para evitar este tipo de problema, foi desenvolvido o anemômetro com topologia não ortogonal. A partir das simulações realizadas e dos testes com o protótipo ortogonal, verificou-se que quando o vento incide sobre os eixos de medição com um ângulo de  $45^\circ$ , a turbulência gerada entre os transdutores é desprezível. Desta maneira, pode-se elencar a principal vantagem desta topologia, o fato de todos os eixos de medição receberem o vento paralelo ao eixo terrestre, onde ocorrem as rajadas de maior intensidade, com um ângulo de  $45^\circ$ .

Seguindo o mesmo raciocínio, na topologia não ortogonal, a influência da estrutura sobre a medida só ocorreria em três casos: com o vento incidindo no mesmo sentido que o de medição, que é algo pouco provável devido a inclinação aplicada ao suporte dos transdutores; com a influência dos suportes dos transdutores uns sobre os outros, o que não ocorre devido ao fato de estarem posicionados



com um ângulo de  $120^\circ$  entre si (Figura 3.12); e caso o vento incida conforme foi mostrado na Figura 2.6, paralelo ao suporte dos transdutores, mas não ao eixo de medição. Neste último caso, será gerada uma turbulência, afetando o fluxo de vento que será aferido por tal eixo, prejudicando a medida. Porém, caso isto ocorra, ainda haverão outros dois eixos totalmente funcionais. Como discutido anteriormente, a velocidade no sentido perpendicular ao plano terrestre (eixo BC) é muito menor do que as velocidades nos eixos SN e LO. Dessa forma, no caso de problemas na leitura em um par de transdutores devido à turbulência, pode-se considerar que a velocidade no eixo BC é desprezível, e o cálculo da velocidade nos eixos SN e LO é realizado com os dois eixos de transdutores restantes. Então, como pode-se observar na Figura 2.6, sempre haverá pelo menos dois eixos sem interferência de turbulência gerada pelo próprio equipamento. Dessa forma, com o processo de ortogonalização, a medida da velocidade do vento no sentido paralelo ao plano terrestre é garantida. Algo que não poderia acontecer com a topologia ortogonal, onde os eixos de medição são os mesmos que os eixos convencionais, ou seja, não há o processo de ortogonalização.

A partir do que foi discutido até então, pode haver a impressão de que se houvesse um vento paralelo ao plano, tomado sempre por pelo menos dois eixos isentos de turbulência, haveria uma solução para o problema da influência de estrutura sobre a medida, mesmo eles sendo ortogonais. Contudo, a problemática está relacionada a como tal vento seria garantido, já que as condições presentes na natureza não podem ser controladas. Desta forma, a solução encontrada que minimiza ao máximo a possibilidade de influência foi a montagem de uma topologia não ortogonal como a apresentada.

## 4.6 Testes em campo

Para os testes em campo, o equipamento foi instalado por um período de 3 semanas na estação meteorológica do SIMEPAR, que fica localizada dentro da sede do IAPAR, na cidade de Londrina, Brasil. Neste local são aferidos os dados meteorológicos oficiais da cidade, portanto é possível a comparação com o protótipo desenvolvido, sem a necessidade de instalação de um equipamento de referência.

O anemômetro escolhido para a instalação foi o de topologia não ortogonal, que se saiu melhor nos testes comparativos. O equipamento foi fixado em um tubo metálico, fincado ao solo, a uma altura de aproximadamente 2 m. A caixa contendo a placa de aquisição de dados, o sensor de temperatura, com seu abrigo,

**Figura 4.24** – Instalação em campo do sistema desenvolvido na estação meteorológica do SIMEPAR, em Londrina-PR.

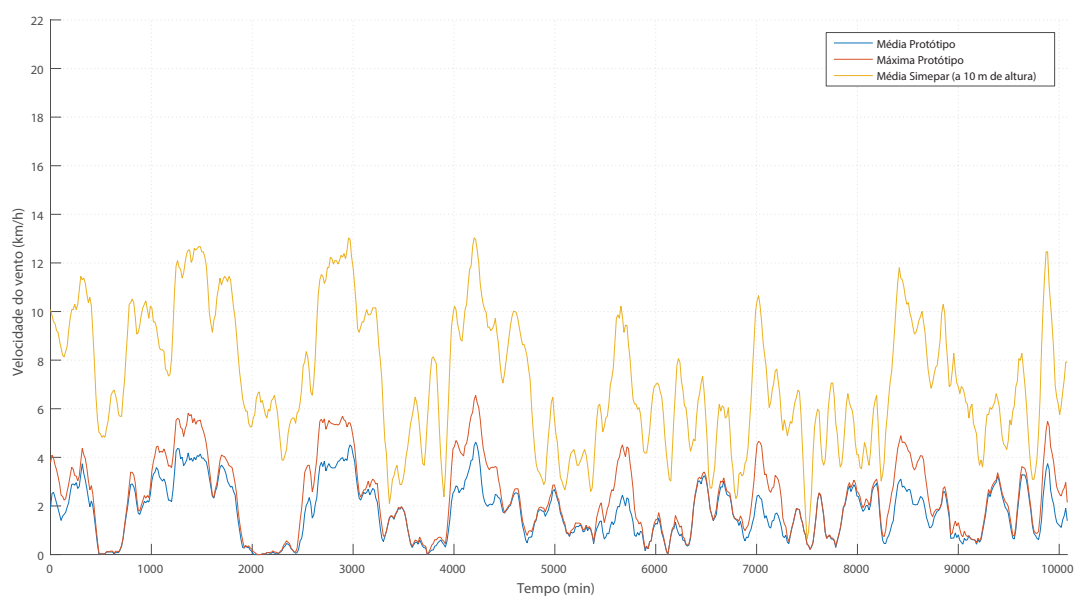


Fonte: Autor.

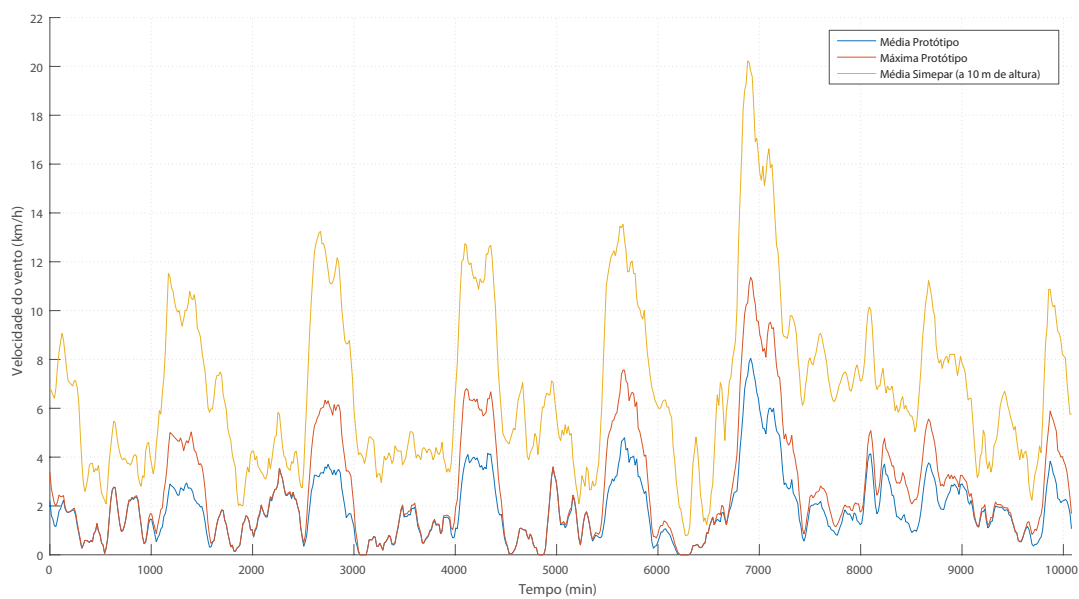
os painéis solares e uma segunda caixa contendo a bateria, ficaram todos também fixados ao tubo. A instalação realizada pode ser vista na Figura 4.24.

O período de coleta dos dados foi das 15 horas do dia 24/06/2016 até as 15 horas do dia 17/07/16. Para a melhor visualização, foram gerados três gráficos apresentados nas Figuras 4.25, 4.26 e 4.27, em que cada um corresponde a uma semana de testes. Estão apresentados nas figuras a velocidade do vento média e máxima obtidas pelo protótipo e a velocidade do vento média, medida pela estação meteorológica do SIMEPAR. O valor mensurado pela estação é feito a uma altura de 10 m do solo, assim, é normal que possua uma maior amplitude que o valor medido pelo protótipo, localizado a 2 m de altura.

Observando os dados coletados, é possível dizer que o equipamento desenvolvido se portou de maneira satisfatória durante os testes. Isso pode ser dito, pois, apesar da amplitude dos dados ser discrepante, o que é ocasionado pela diferença de altura da medição e também pela influência de medidores presentes na estação, a envoltória dos gráficos é muito semelhante. Verifica-se portanto, que nos momentos em que havia um aumento ou redução da intensidade do vento medida pelo equipamento de referência, este aumento também era detectado pelo protótipo.

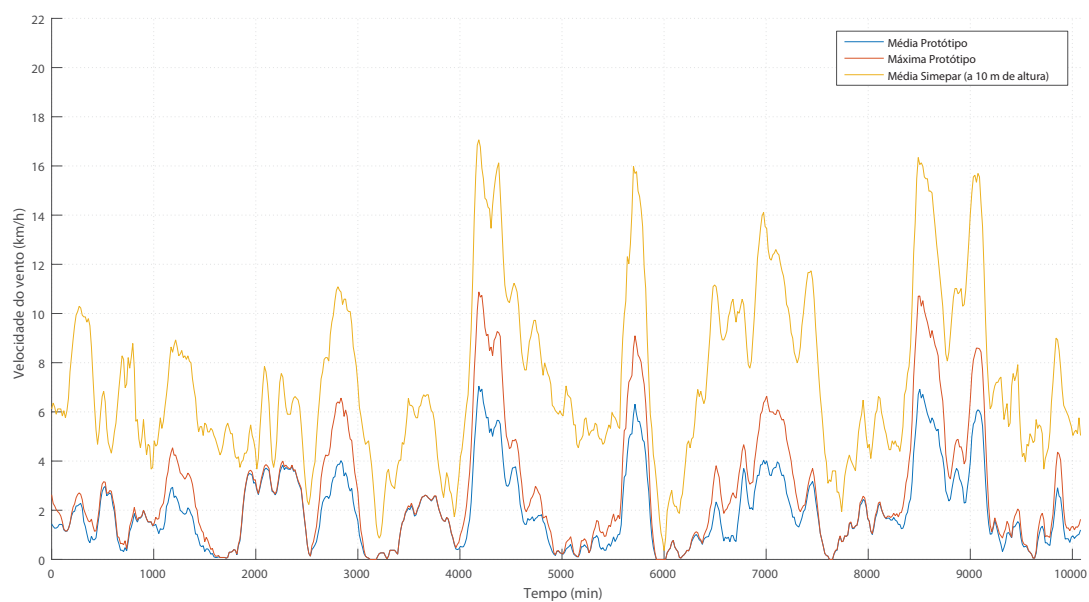
**Figura 4.25** – Dados obtidos em campo na primeira semana de testes.

Fonte: Autor.

**Figura 4.26** – Dados obtidos em campo na segunda semana de testes.

Fonte: Autor.

**Figura 4.27** – Dados obtidos em campo na terceira semana de testes.



Fonte: Autor.

## 5 Conclusão

O presente trabalho apresentou uma solução completa para a aferição da velocidade do vento, incluindo um anemômetro ultrassônico e um sistema de aquisição de dados.

Foram apresentados dois protótipos de anemômetros, um com geometria posicional dos transdutores de forma ortogonal e outro não ortogonal. A partir dos testes realizados verificou-se que a topologia ortogonal ocasionava uma grande turbulência no vento dependendo de seu ângulo de incidência, que afetava diretamente as medidas, tornando-as impraticáveis em alguns casos. Sabendo-se que a turbulência era causada pela própria estrutura do anemômetro, foi proposto o protótipo não ortogonal. Este segundo protótipo se mostrou eficiente, conseguindo um erro aceitável para a faixa de operação do mesmo e precisão maior que a topologia ortogonal.

O sistema de aquisição de dados desenvolvido cumpriu com seus objetivos, realizando o envio dos dados coletados para o servidor. Os testes também mostraram que as medidas tomadas para a redução das falhas no envio do modem foram satisfatórias, já que durante os testes no local escolhido, não ocorreu nenhuma falha no envio.

A partir dos testes realizados em campo validou-se a resistência do protótipo a intempéries do ambiente e sua autonomia, ainda mais devido ao fato de que enquanto ficou instalado, ocorreram períodos de chuva sobre o equipamento.

O equipamento foi validado para velocidades de até aproximadamente 150 km/h, contudo, espera-se que ele possa medir velocidades maiores. Desta forma, caso haja uma forma de que o vento incida no anemômetro com velocidade maior que a foi aplicada neste trabalho, sugere-se que o protótipo seja submetido a novos testes em trabalhos futuros.

Foi dito que utilizando uma topologia tridimensional não ortogonal, ao ocorrer problema em um dos eixos, seja por turbulência ou mal funcionamento dos transdutores, é possível desprezá-lo e ainda será obtida uma medida bidimensio-

nal confiável. Assim, sugere-se para trabalhos futuros o desenvolvimento de um anemômetro com quatro eixos de medição, desta forma, caso haja problema em um dos eixos, ainda será possível se obter uma medida tridimensional confiável. Este trabalho, propôs uma topologia não ortogonal onde os eixos são posicionados a cada  $120^\circ$  no plano XY, assim, considerando que os resultados foram satisfatórios, pode ser montado um protótipo com quatro eixos, distribuídos a cada  $90^\circ$ .

# Referências

- ABDALLAH, M.; ELKEELANY, O. A Survey on Data Acquisition Systems DAQ. In: *2009 International Conference on Computing, Engineering and Information*. IEEE, 2009. p. 240–243. ISBN 978-0-7695-3538-8. Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=5328141>>.
- ÅKESSON, S.; HEDENSTRÖM, A. Wind selectivity of migratory flight departures in birds. *Behavioral Ecology and Sociobiology*, Springer, v. 47, n. 3, p. 140–144, 2000.
- APRILESI, G.; De Cicco, G.; TARONI, A. A Microprocessor-Based, Three Axes, Ultrasonic Anemometer. In: *1983 Ultrasonics Symposium*. IEEE, 1983. v. 384, p. 295–298. Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=1535002>>.
- ARAÚJO, G. A. L.; JUNIOR, R. T. L.; FREIRE, R. C. S.; SILVA, I. S. S.; SILVA, J. F. da; CATUNDA, Y. S. C.; CARVALHO, E. A. N. Ultrasonic Anemometer for the Measurement of Respiratory Flow in the Forced Oscillation Technique. In: *2007 IEEE International Workshop on Medical Measurement and Applications*. IEEE, 2007. p. 1–4. ISBN 1-4244-1079-7. Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=4285149>>.
- BANFIELD, D.; DISSLY, R. A Martian sonic anemometer. In: *2005 IEEE Aerospace Conference*. IEEE, 2005. v. 2005, p. 641–647. ISBN 0-7803-8870-4. ISSN 1095323X. Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=1559354>>.
- BERA, S. C.; MARICK, S. Study of a Simple Linearization Technique of p-n-Junction-Type Anemometric Flow Sensor. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, v. 61, n. 9, p. 2545–2552, sep 2012. ISSN 0018-9456. Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=6185672>>.
- BREMHORST, K. The Effect of Wire Length and Separation on X-Array Hot-Wire Anemometer Measurements. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, v. 21, n. 3, p. 244–248, 1972. ISSN 0018-9456. Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=4314010>>.
- BUCCI, G.; CIANCETTA, F.; FIORUCCI, E.; GALLO, D.; LANDI, C.; LUISO, M. A low-cost ultrasonic wind speed and direction measurement system. In: *2013 IEEE International Instrumentation and Measurement Technology Conference (I2MTC)*. IEEE, 2013. p. 505–510. ISBN 978-1-4673-4623-8. Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=6555469>>.
- BULLOCK, K. J.; BREMHORST, K. Hot Wire Anemometer Measurements in Flows Where Direction of Mean Velocity Changes

during a Traverse. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, v. 18, n. 3, p. 163–166, 1969. ISSN 0018-9456. Disponível em: <[http://ieeexplore.ieee.org/xpls/abs\\_all.jsp?arnumber=4313794](http://ieeexplore.ieee.org/xpls/abs_all.jsp?arnumber=4313794)  
<http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=4313794>>.

CHENG, X.; PENG, Z.; HU, F.; ZENG, Q.; LUO, W.; ZHAO, Y.; HONG, Z. Measurement errors and correction of the UAT-2 ultrasonic anemometer. *Science China Technological Sciences*, v. 58, n. 4, p. 677–686, apr 2015. ISSN 1674-7321. Disponível em: <<http://link.springer.com/10.1007/s11431-014-5728-5>>.

CHOOSAKUL, N.; KAKSUNGNOEN, K.; WITOONSET, A. The influence of buildings to wind velocity and direction. In: *2015 International Conference on Science and Technology (TICST)*. IEEE, 2015. p. 489–491. ISBN 978-1-4673-7670-9. Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=7369404>>.

CLEUGH, H.; MILLER, J.; BÖHM, M. Direct mechanical effects of wind on crops. *Agroforestry Systems*, Springer, v. 41, n. 1, p. 85–112, 1998.

COMES, M.; DRUMEA, P.; BLEJAN, M.; DUTU, I.; VASILE, A. Ultrasonic Flowmeter. In: *2006 29th International Spring Seminar on Electronics Technology*. IEEE, 2006. p. 386–389. ISBN 1-4244-0550-5. ISSN 00014966. Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=4216065>>.

CUERVA, A.; SANZ-ANDRÉS, A. On sonic anemometer measurement theory. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, v. 88, n. 1, p. 25–55, nov 2000. ISSN 01676105. Disponível em: <<http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0167610500000234>>.

DONG, H.; JUN, Y. High Accuracy Time of Flight Measurement for Ultrasonic Anemometer Applications. In: *2013 Third International Conference on Instrumentation, Measurement, Computer, Communication and Control*. IEEE, 2013. p. 61–64. ISBN 978-0-7695-5122-7. Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=6840410>>.

EL-MADANY, T. S.; GRIESSBAUM, F.; FRATINI, G.; JUANG, J.-Y.; CHANG, S.-C.; KLEMM, O. Comparison of sonic anemometer performance under foggy conditions. *Agricultural and Forest Meteorology*, Elsevier B.V., v. 173, p. 63–73, may 2013. ISSN 01681923. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.agrformet.2013.01.005>  
<http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0168192313000105>>.

FERREIRA, R.; FREIRE, R.; DEEP, C.; de Rocha Neto, J.; OLIVEIRA, A. Hot-wire anemometer with temperature compensation using only one sensor. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, v. 50, n. 4, p. 954–958, 2001. ISSN 00189456. Disponível em: <[http://ieeexplore.ieee.org/xpls/abs\\_all.jsp?arnumber=948306](http://ieeexplore.ieee.org/xpls/abs_all.jsp?arnumber=948306)  
<http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=948306>>.

FRANK, J. M.; MASSMAN, W. J.; EWERS, B. E. Underestimates of sensible heat flux due to vertical velocity measurement errors in non-orthogonal sonic anemometers. *Agricultural and Forest Meteorology*, Elsevier B.V., v. 171-172, p. 72–81, apr 2013. ISSN 01681923.



Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.agrformet.2012.11.005>  
<<http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0168192312003425>>.

FUJITA, H.; OHHASHI, T.; ASAKURA, M.; YAMADA, M.; WATANABE, K. A thermistor anemometer for low-flow-rate measurements. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, v. 44, n. 3, p. 779–782, jun 1995. ISSN 00189456. Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=387331>>.

GRELLE, A.; LINDROTH, A. Flow Distortion by a Solent Sonic Anemometer: Wind Tunnel Calibration and Its Assessment for Flux Measurements over Forest and Field. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, v. 11, n. 6, p. 1529–1542, dec 1994. ISSN 0739-0572. Disponível em: <<http://journals.ametsoc.org/doi/abs/10.1175/1520-0426%281994%29011%3C1529%3AFDBASS%3E2.0.CO%3B2>>.

HAN, D.; KIM, S.; PARK, S. Two-dimensional ultrasonic anemometer using the directivity angle of an ultrasonic sensor. *Microelectronics Journal*, v. 39, n. 10, p. 1195–1199, oct 2008. ISSN 00262692. Disponível em: <<http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S002626920800116X>>.

HAN, D.; PARK, S. Measurement range expansion of continuous wave ultrasonic anemometer. *Measurement: Journal of the International Measurement Confederation*, Elsevier Ltd, v. 44, n. 10, p. 1909–1914, 2011. ISSN 02632241. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.measurement.2011.08.030>>.

HANS, V.; WINDORFER, H. Comparison of pressure and ultrasound measurements in vortex flow meters. *Measurement*, v. 33, n. 2, p. 121–133, mar 2003. ISSN 02632241. Disponível em: <<http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S026322410200057X>>.

HARTLEY, G. The development of electrical anemometers. *Proceedings of the IEE - Part II: Power Engineering*, v. 98, n. 64, p. 430–437, aug 1951. ISSN 2054-0639. Disponível em: <<http://www.sciencemag.org/content/221/4611/640.short>  
<http://www.sciencemag.org/cgi/doi/10.1126/science.221.4611.640>  
<http://digital-library.theiet.org/content/journals/10.1049/pi-2.1951.0123>>.

HÖGSTRÖM, U.; SMEDMAN, A.-S. Accuracy of Sonic Anemometers: Laminar Wind-Tunnel Calibrations Compared to Atmospheric In Situ Calibrations Against a Reference Instrument. *Boundary-Layer Meteorology*, v. 111, n. 1, p. 33–54, apr 2004. ISSN 0006-8314. Disponível em: <<http://link.springer.com/10.1023/B:BOUN.0000011000.05248.47>>.

ISHIDA, H.; YOSHIKAWA, K.; MORIIZUMI, T. Three-dimensional gas-plume tracking using gas sensors and ultrasonic anemometer. In: *Proceedings of IEEE Sensors, 2004*. IEEE, 2004. p. 1175–1178. ISBN 0-7803-8692-2. Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=1426387>>.

KAGANOV, E.; YAGLOM, A. Errors in wind-speed measurements by rotation anemometers. *Boundary-Layer Meteorology*, v. 10, n. 1, p. 15–34, mar 1976. ISSN 0006-8314. Disponível em: <<http://link.springer.com/10.1007/BF00218722>>.

KIDRON, I. The Signal-to-Noise Ratios of Constant-Current and Constant-Temperature Hot-Wire Anemometers. *IEEE Transactions on Instrumentation*

*and Measurement*, v. 16, n. 1, p. 68–73, 1967. ISSN 0018-9456. Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=4313586>>.

KREIDER, J. F. A Simple Stable Constant-Temperature Hot-Wire Anemometer. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, v. 22, n. 2, p. 190–191, 1973. ISSN 0018-9456. Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=4314139>>.

KUDO, K.; MIZUTANI, K.; ITOGA, K. A Simple Technique for Realizing an Ultrasonic Anemometer Using a Loudspeaker. *Japanese Journal of Applied Physics*, v. 44, n. 6B, p. 4407–4410, jun 2005. ISSN 0021-4922. Disponível em: <<http://stacks.iop.org/1347-4065/44/4407>>.

LIHUA, W.; DAWEI, Y. Study of anemometer for wind power generation. In: *2014 International Conference on Mechatronics and Control (ICMC)*. IEEE, 2014. p. 657–661. ISBN 978-1-4799-2538-4. Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=7231636>>.

LYNNWORTH, L.; LIU, Y. Ultrasonic flowmeters: Half-century progress report, 1955-2005. *Ultrasonics*, v. 44, n. SUPPL., p. e1371–e1378, dec 2006. ISSN 0041624X. Disponível em: <<http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0041624X06000849>>.

MARIOLI, D.; NARDUZZI, C.; OFFELLI, C.; PETRI, D.; SARDINI, E.; TARONI, A. Digital time-of-flight measurement for ultrasonic sensors. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, v. 41, n. 1, p. 93–97, 1992. ISSN 00189456. Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=126639>>.

NAKAI, T.; IWATA, H.; HARAZONO, Y.; UEYAMA, M. An inter-comparison between Gill and Campbell sonic anemometers. *Agricultural and Forest Meteorology*, Elsevier B.V., v. 195-196, p. 123–131, sep 2014. ISSN 01681923. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.agrformet.2014.05.005>> <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0168192314001221>>.

NAKAI, T.; MOLEN, M. van der; GASH, J.; KODAMA, Y. Correction of sonic anemometer angle of attack errors. *Agricultural and Forest Meteorology*, v. 136, n. 1-2, p. 19–30, jan 2006. ISSN 01681923. Disponível em: <<http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S016819230600027X>>.

NAKAI, T.; SHIMOYAMA, K. Ultrasonic anemometer angle of attack errors under turbulent conditions. *Agricultural and Forest Meteorology*, Elsevier B.V., v. 162-163, p. 14–26, sep 2012. ISSN 01681923. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.agrformet.2012.04.004>> <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0168192312001347>>.

OKAMOTO, K.; OHHASHI, T.; ASAKURA, M.; WATANABE, K. A digital anemometer. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, Cambridge University Press, Cambridge, v. 43, n. 2, p. 116–120, apr 1994. ISSN 00189456. Disponível em: <<http://ebooks.cambridge.org/ref/id/CBO9781107415324A009>> <http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=293406>>.

OLMOS, P. Ultrasonic velocity meter to evaluate the behaviour of a solar chimney. *Measurement Science and Technology*, v. 15, n. 7, p. N49–N53, jul 2004. ISSN

0957-0233. Disponível em: <<http://www.scopus.com/inward/record.url?eid=2-s2.0-3242735040&partnerID=40&md5=8541877da7e257d583c09098b67d6969>>  
<<http://stacks.iop.org/0957-0233/15/i=7/a=N01?key=crossref.a395cc5e549036e67499b1e119743df3>>.

PAVKOVIC, B.; DUDA, A.; HWANG, W.-J.; THEOLEYRE, F. Efficient topology construction for RPL over IEEE 802.15.4 in wireless sensor networks. *Ad Hoc Networks*, v. 15, p. 25–38, apr 2014. ISSN 15708705. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1570870513001716>>.

SCHOTLAND, R. M. The Measurement of Wind Velocity by Sonic Means. *Journal of Meteorology*, v. 12, n. 4, p. 386–390, aug 1955. ISSN 0095-9634. Disponível em: <<http://journals.ametsoc.org/doi/abs/10.1175/1520-0469%281955%29012%3C0386%3ATMOWVB%3E2.0.CO%3B2>>.

SHAOUT, A.; Yulong Li; ZHOU, M.; AWAD, S. Low cost embedded weather station with intelligent system. In: *2014 10th International Computer Engineering Conference (ICENCO)*. IEEE, 2014. p. 100–106. ISBN 978-1-4799-5241-0. Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=7050439>>.

SHU, W.-Q. Cramer-Rao bound of laser Doppler anemometer. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, v. 50, n. 6, p. 1770–1772, 2001. ISSN 00189456. Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=982978>>.

SILVA, J. J. da; WANZELLER, M. G.; de Almeida Farias, P.; da Rocha Neto, J. S. Development of Circuits for Excitation and Reception in Ultrasonic Transducers for Generation of Guided Waves in Hollow Cylinders for Fouling Detection. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, v. 57, n. 6, p. 1149–1153, jun 2008. ISSN 0018-9456. Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=4505419>>.

SOBOLEV, V.; FESHENKO, A. Accurate Cramer-Rao Bounds for a Laser Doppler Anemometer. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, v. 55, n. 2, p. 659–665, apr 2006. ISSN 0018-9456. Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=1608615>>.

TANG, S.; FEDERSPIEL, C.; AUSLANDER, D. Pulsed type ultrasonic anemometer based on a double FFT procedure. In: *Proceedings of IEEE Sensors 2003 (IEEE Cat. No.03CH37498)*. IEEE, 2003. v. 1, p. 326–331. ISBN 0-7803-8133-5. Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=1278951>>.

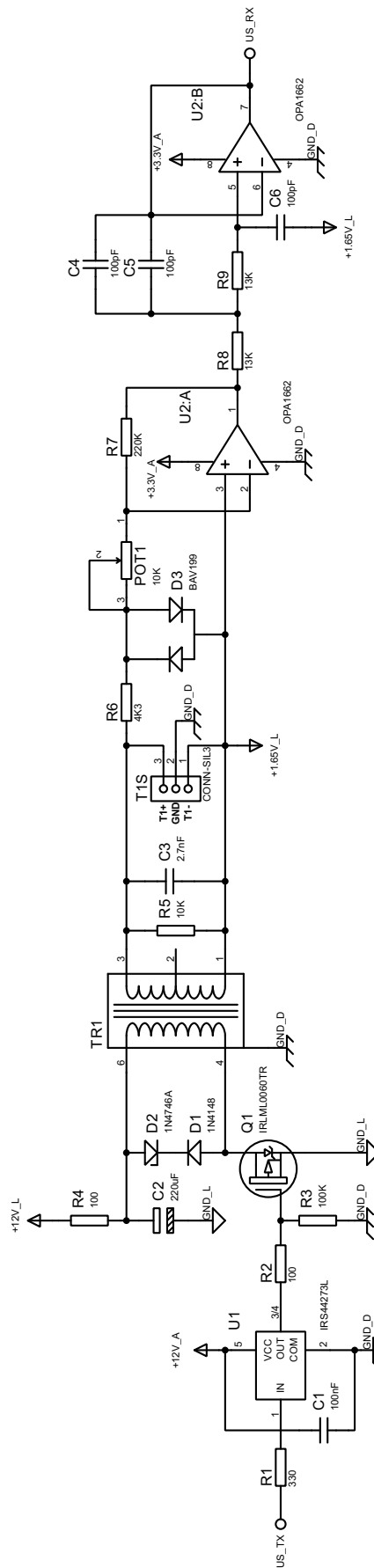
TOBBEN, H.; KARBSEK, M. Experimental and numerical results of optical preamplification in a laser Doppler anemometer receiving head. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, v. 49, n. 1, p. 10–13, 2000. ISSN 00189456. Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=836300>>.

USHIKU, T.; SATOH, N.; ISHIDA, H.; TOYAMA, S. Estimation of Gas-Source Location Using Gas Sensors and Ultrasonic Anemometer. In: *2006 5th IEEE Conference on Sensors*. IEEE, 2006.

- p. 420–423. ISBN 1-4244-0375-8. ISSN 1930-0395. Disponível em:  
<<http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=4178647>>.
- VALLE, M. P. del; CASTELAN, J. A. U.; MATSUMOTO, Y.; MATEOS, R. C. Low Cost Ultrasonic Anemometer. In: *2007 4th International Conference on Electrical and Electronics Engineering*. IEEE, 2007. p. 213–216. ISBN 978-1-4244-1165-8. Disponível em:  
<<http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=4345008>>.
- WAGNER, R.; ANTONIOU, I.; PEDERSEN, S. M.; COURTNEY, M. S.; JØRGENSEN, H. E. The influence of the wind speed profile on wind turbine performance measurements. *Wind Energy*, Wiley Online Library, v. 12, n. 4, p. 348–362, 2009.
- WANG, S.; YERNAUX, M.; DELTOUR, J. A Networked Two-Dimensional Sonic Anemometer System for the Measurement of Air Velocity in Greenhouses. *Journal of Agricultural Engineering Research*, v. 73, n. 2, p. 189–197, 1999. ISSN 0021-8634. Disponível em:  
<<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0021863498904036>>.
- WIESER, A.; FIEDLER, F.; CORSMEIER, U. The Influence of the Sensor Design on Wind Measurements with Sonic Anemometer Systems. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, v. 18, n. 10, p. 1585–1608, oct 2001. ISSN 0739-0572. Disponível em: <<http://journals.ametsoc.org/doi/abs/10.1175/1520-0426%282001%29018%3C1585%3ATIOTSD%3E2.0.CO%3B2>>.
- YEH, T.; ESPINA, P.; OSELLA, S. An intelligent ultrasonic flowmeter for improved flow measurement and flow calibration facility. In: *IMTC 2001. Proceedings of the 18th IEEE Instrumentation and Measurement Technology Conference. Re-discovering Measurement in the Age of Informatics (Cat. No.01CH 37188)*. IEEE, 2001. v. 3, p. 1741–1746. ISBN 0-7803-6646-8. ISSN 1091-5281. Disponível em:  
<<http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=929499>>.
- ZHU, W.-j.; XU, K.-j.; FANG, M.; WANG, W.; SHEN, Z.-W. Mathematical Modeling of Ultrasonic Gas Flow Meter Based on Experimental Data in Three Steps. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, v. 65, n. 8, p. 1726–1738, aug 2016. ISSN 0018-9456. Disponível em:  
<<http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=7469811>>.

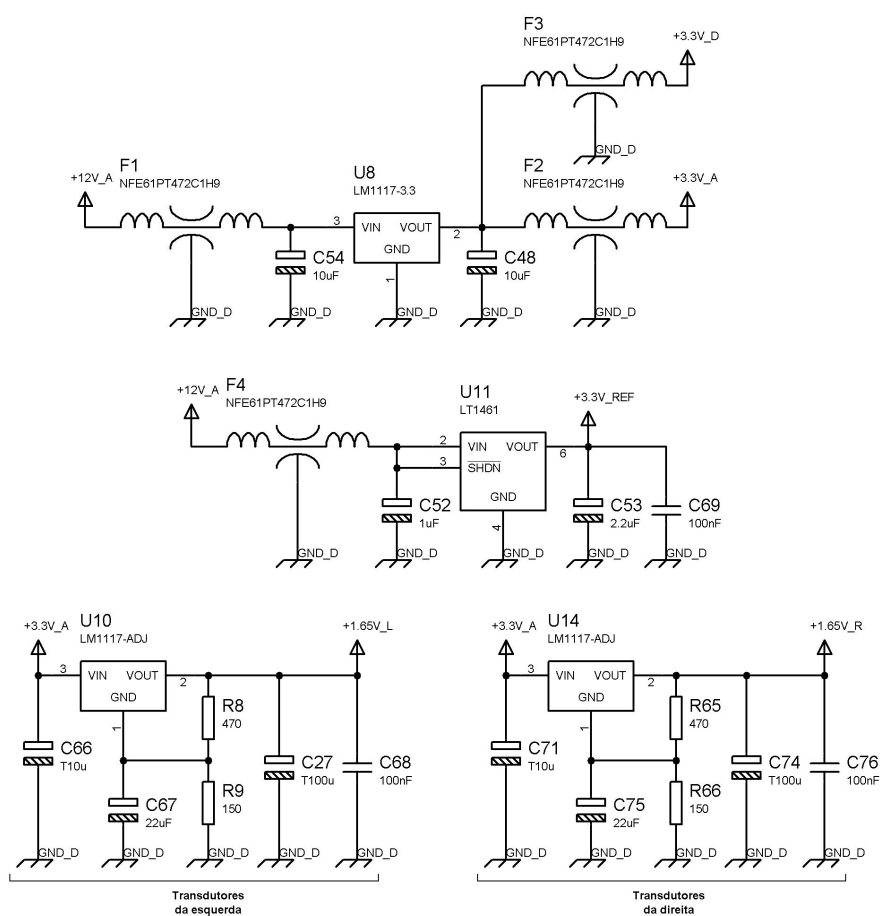
## APÊNDICE A – Esquemas elétricos dos circuitos eletrônicos

**Figura A.1** – Circuito completo de excitação dos transdutores e condicionamento de sinais.



Fonte: Autor.

**Figura A.2** – Circuitos reguladores de tensão da placa eletrônica dos anemômetros.



Fonte: Autor.

**APÊNDICE B – Artigo publicado no  
XI IEEE/IAS *International Conference  
on Industry Applications* - INDUSCON  
2014**



# Um Anemômetro 3D Baseado em Ultrassom Aplicado à Determinação de Velocidade Máxima e Direção de Ventos Incidentes em Linhas de Transmissão Aéreas

Giancarlo Michelino Gaeta Lopes; David Pereira Silva Junior; Lucas de Souza Ribeiro; Maurício Moreira; Alex Lemes Guedes; José Alexandre de França; Maria Bernadete de Moraes França

Universidade Estadual de Londrina - UEL

Laboratório de Automação e Instrumentação Inteligente

PR 455 KM 308, Londrina, PR, 86057-970, Brasil

Emails: giancarlologaetalopes@gmail.com, davidjunior3e@gmail.com, lucassribeiro12@gmail.com, mauromauriciomoreira@hotmail.com, alexlem16@yahoo.com.br, jaf@jaf.eng.br, mbmoraes@uel.br.

<http://www.la2i.com/>

**Abstract**—Gauging the wind speed is very important for various applications, such as agriculture, aviation and power generation. It is known that the main cause of downfall of transmission towers is the wind, so the existence of a device that makes the measurement of maximum winds applied to transmission towers becomes important. For this application, accepting an error in measures up to 5Km/h, where the wind can reach a few hundred of km/h, has developed a device that performs measurements of winds up to 250 Km/h. There are several techniques to measure the wind speed, this work will be addressed using an ultrasonic signal. Instrumentation circuitry responsible to excite an ultrasonic transducer and to condition the signal received by another transducer has been developed. This circuit has the objective of obtaining the transit time of the ultrasonic wave and consequently the speed of the wind. Is also presented a method of orthogonalization of the velocity measurements, allowing to determine, in addition to the module, the direction of the wind speed. To confirm what has been proposed was developed a three-dimensional ultrasonic anemometer, with a tetrahedron topology, and tests were carried out in a wind tunnel. As a result, there is a maximum deviation of 2.99 km / h, for speeds ranging between 0 and 160.86 km / h, comparing the developed with a reference equipment.

## I. INTRODUÇÃO

A aferição da velocidade do vento é muito importante para várias aplicações, dentre as mais utilizadas pode-se citar a agricultura, aviação e geração de energia elétrica. Verifica-se também uma grande importância em sistemas de transmissão de energia elétrica. Nesta aplicação o conhecimento da velocidade do vento no local onde será instalada uma linha de transmissão favorece o projeto e a manutenção das torres e cabos elétricos, aumentando a rentabilidade do projeto e a confiabilidade da linha. Como este tipo de sistema deve funcionar de maneira ininterrupta, um possível tombamento de uma torre de transmissão irá afetar todo o sistema de distribuição [1], [2]. Isto pode causar inúmeros problemas para toda a rede elétrica, como a sobrecarga de outras linhas, que agora devem suprir a falta linha interrompida, a oscilação da tensão entregue ao

usuário, a possível interrupção do funcionamento de unidades geradoras ou até mesmo a interrupção do fornecimento de energia elétrica ao consumidor.

Sabe-se ainda que um dos principais motivos de quedas de torres de transmissão é o vento [1]–[3]. Desta forma se conhecer a velocidade do vento em que estas torres são submetidas se torna um fator ainda mais importante. Este trabalho dá enfoque ao dispositivo responsável por aferir a velocidade do vento nestas torres.

Para a determinação de ventos máximos em torres de transmissão, que podem, durante ciclones extra tropicais, que no Brasil acontecem mais comumente na região sul do país, ultrapassar os 200 Km/h, aceita-se um desvio na medida de até 5 Km/h. Assim o equipamento proposto busca atender este pré-requisito, além de efetuar medidas de ventos de até 250 Km/h.

Encontra-se na literatura brasileira um trabalho que trata de um sistema de aquisição de dados em torres de transmissão, contudo são utilizados vários sensores meteorológicos, incluindo um equipamento que mede a velocidade do vento, contudo são todos sensores comerciais [4], assim, pode-se dizer, que o desenvolvimento de um sistema como o proposto aqui é algo muito pouco explorado.

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

O anemômetro de rotação é constituído de copos ou hélices que são presos a um eixo que permite sua rotação, seja na posição horizontal ou vertical. Baseado na velocidade de rotação das hélices, a velocidade do vento é obtida aplicando-se relações matemáticas. Esta forma de medição não permite se determinar o sentido do vento, apenas a sua velocidade em módulo e é recomendada para a aferição de velocidades

médias ou altas [5]. Já o anemômetro termoelétrico, também conhecido como anemômetro a fio quente, é baseado no aquecimento de um condutor elétrico que fica exposto ao vento a que se deseja medir. Pode-se medir eletronicamente a perda de calor do condutor, devido a passagem do vento, aferindo-se a temperatura do condutor e do ambiente ou se avalia a variação da corrente aplicada no condutor para que ele se mantenha com sua temperatura constante. Este método de medição possui uma boa resposta para velocidades baixas e por ser frágil requer uma manutenção periódica ocasionada por possíveis partículas que possam se depositar sobre o condutor e assim alterar a sua resposta [6], [7].

O anemômetro ultrassônico faz uso do tempo de trânsito de uma onda ultrassônica para efetuar a medida da velocidade do vento. O tempo de trânsito é considerado o tempo que a onda demora para sair de um transdutor ultrassônico e chegar a outro, assim conforme o sentido e a intensidade do vento este tempo será maior ou menor que o tempo com vento zero. Desta forma, avaliando a diferença dos tempos de trânsito a velocidade do vento é obtida [8], [9].

Como a aplicação em questão exige que o sistema fique exposto ao clima, e o local a ser instalado, sob uma torre de transmissão de energia elétrica, na maioria das vezes não é de fácil acesso, é recomendada a utilização de um anemômetro que funcione por um longo período de tempo sem a necessidade de manutenção, assim o princípio de funcionamento mais recomendado é o ultrassônico.

Em um anemômetro ultrassônico, para se obter também o sentido do vento, além de seu módulo, pode-se aumentar a quantidade de transdutores ultrassônicos e posicioná-los de forma que se possibilite uma medida tridimensional, ou seja, posicionando pares de transdutores nos diferentes eixos cartesianos. Desta forma é necessário que varias medidas unidimensionais de velocidade do vento, gerem uma medida tridimensional. Para isso é necessária a ortogonalização das medidas unidimensionais. Neste trabalho é apresentado um método de ortogonalização de medidas para um anemômetro que faz uso de quatro transdutores, permitindo assim que a direção e sentido do vento sejam determinadas.

Para se melhorar a medida da velocidade do vento em um anemômetro ultrassônico, no caso de uma medida em apenas uma dimensão, é necessário que o transdutor funcione em um instante como transmissor e em outro instante como receptor [10]. Assim, o projeto do circuito eletrônico de acionamento do transdutor deve considerar este requisito, tornando o seu desenvolvimento mais complexo que o convencional. Em uma montagem tridimensional, onde é necessária a utilização de mais de um par de transdutores, este requisito de projeto se torna muito mais importante e, por sua vez, o circuito eletrônico ainda mais complexo.

Neste trabalho está apresentado um anemômetro ultrassônico tridimensional, que tem como função a determinação de ventos máximos aplicados a torres de transmissão. Este equipamento faz o uso de quatro transdutores, posicionados nos vértices de um tetraedro. Com isso será avaliado o tempo de trânsito tomando cada um dos

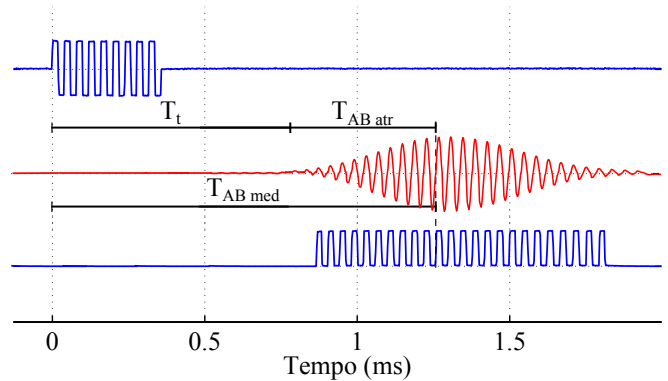


Fig. 1. Sinais de transmissão, recepção e cruzamento por zero [10].

transdutores como referência, ou seja, a medição será feita em quatro etapas, onde em cada etapa, um dos transdutores estará transmitindo o sinal ultrassônico e os outros três irão estar recebendo este sinal. Desta forma serão obtidas varias velocidades do vento, que serão transladadas para o eixo cartesiano tridimensional utilizando as transformações matemáticas descritas, obtendo o vetor de velocidade do vento. Apresenta-se também neste a trabalho a maneira em que os transdutores ultrassônicos foram excitados, para que o propósito do projeto fosse atingido.

## II. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Para se medir a velocidade do vento por meio de ondas ultrassônicas, analisa-se o tempo que uma onda emitida por um transmissor demora para chegar ao receptor. Este tempo, chamado de tempo de trânsito, varia conforme a velocidade de propagação do som e a velocidade e sentido do vento presente entre o transmissor e o receptor. Portanto, o sinal ultrassônico emitido pelo transmissor (A) chega ao receptor (B) após um intervalo de tempo definido como  $T_t$ , como pode ser visto na Figura 1. Este sinal é então convertido em um sinal elétrico que possui duas informações a serem analisadas, os tempos em que ocorrem os cruzamentos por zero do sinal, representados por  $T_{ABmed}$  e a amplitude do sinal, obtida pela envoltória do sinal. Observa-se também na Figura 1 o tempo definido como  $T_{ABatr}$  que é a diferença entre, o tempo de trânsito,  $T_t$  e  $T_{ABmed}$ , além do formato das ondas de transmissão, recepção e da onda recebida após sua passagem por um comparador [10].

Para a obtenção do tempo de trânsito da onda ultrassônica, e consequentemente da velocidade do vento, foi desenvolvida, pelo mesmo grupo de pesquisa que apresenta este trabalho, uma nova técnica de cálculo [10]. Esta nova técnica está apresentada a seguir de maneira resumida e serve como base para a obtenção da velocidade do vento tridimensional.

Como descrito em [10], considerando dois transdutores, A e B, caso sejam feitas duas avaliações do tempo de trânsito, utilizando primeiramente o transdutor A como transmissor e o transdutor B como receptor e em um segundo instante, se inverter o papel dos transdutores, conhecendo-se a distância

entre eles ( $d_{AB}$ ) pode-se definir a velocidade do vento entre os transdutores como sendo

$$v_{AB} = \frac{d_{AB}}{2} \left( \frac{1}{T_{ABmed} - T_{ABatr}} - \frac{1}{T_{BAmed} - T_{BAatr}} \right). \quad (1)$$

Desta forma, o conhecimento de variáveis mais complexas, como a velocidade do vento em sentidos diferentes daquele que estão posicionados os transdutores, não são mais necessárias. Também não se torna mais necessário o conhecimento da velocidade do som.

Com isso, neste trabalho, para se obter a velocidade do vento paralela ao eixo formado por dois transdutores, são realizadas duas transmissões, em sentidos opostos.

A constante  $T_{BAatr}$  é definida baseada na escolha do pulso de referência, que é um daqueles presentes na onda recebida pelo transdutor após passar pelo estágio detector de cruzamento por zero. Este pulso ocorre quando a envoltória do sinal de recepção possui seu valor máximo quando a velocidade do vento é nula. Quando há velocidade do vento diferente de zero há um deslocamento do pulso de referência, este deslocamento é utilizado para se calcular a velocidade do vento. Contudo para altas velocidades do vento, há um deslocamento do pulso superior a meio período da onda, o que pode causar a escolha errônea do pulso de referência, e consequentemente o cálculo errado da velocidade do vento. Para contornar este problema utiliza-se a técnica descrita em [10], em que algumas condições devem ser satisfeitas para que o pulso correto seja escolhido, que levam em consideração a envoltória da onda recebida.

### III. SOLUÇÕES PROPOSTAS

Nesta seção é apresentada a instrumentação eletrônica utilizada para gerar e receber o sinal de ultrassom e o condicionamento utilizado para se ortogonalizar as medidas de velocidade do vento realizadas pelo anemômetro ultrassônico tridimensional proposto.

#### A. Método de excitação e recepção de sinal do transdutor ultrassônico

Para a geração do sinal ultrassônico, bem como para a recepção deste sinal pelos transdutores, foi desenvolvido o circuito eletrônico apresentado em diagrama de blocos na Figura 2. Este circuito, assim como o *firmware* desenvolvido para o microcontrolador, foi projetado para que o equipamento possa medir velocidades do vento de até 250 Km/h, assim o sinal de recepção deve ser analisado pelos pulsos gerados no detector de passagem por zero e também por sua envoltória.

Para a seleção entre transmissão e recepção do transdutor é utilizado um relé de estado sólido. Este componente funciona como uma chave, em que quando a chave está fechada, indica o funcionamento do transdutor como transmissor.

O circuito empregado na excitação do transdutor é composto por um driver de acionamento, responsável por aumentar a amplitude e a potência do sinal gerado pelo microcontrolador, e por uma chave seletora que habilita a aplicação do sinal sobre

o transdutor. Este mesmo circuito é aplicado para cada um dos transdutores e no microcontrolador são gerados dois sinais para cada um deles, que são ondas quadradas com polaridade invertida, assim ao passar pelo driver, o sinal é amplificado em uma maior escala, como pode ser visto na Figura 2.

Para a recepção aplica-se inicialmente um ganho sobre o sinal recebido. Após o estágio de amplificação, com o uso de um multiplexador, seleciona-se de qual dos transdutores o sinal será lido. Em que o multiplexador foi empregado com o objetivo da redução de custo e tamanho do circuito de condicionamento.

Após o multiplexador, encontra-se um filtro passa-faixa, projetado para permitir a passagem somente do sinal com a frequência de operação dos transdutores, filtrando assim eventuais ruídos.

Filtrados os ruídos do sinal, ele é então duplicado, onde segue, em um dos caminhos, para um detector de passagem por zero, convertendo o sinal, que era uma algo próximo a uma senoide, para uma onda quadrada, que é utilizada como base para a obtenção do tempo de trânsito da onda ultrassônica. Pelo outro caminho, o sinal passa por um filtro passa-baixa, que gera a envoltória da onda ultrassônica recebida. O pico desta envoltória é utilizado para a seleção do par de pulsos correto da onda quadrada gerada ao final do primeiro caminho. A seleção do par de pulsos correto permite o cálculo do tempo de trânsito da onda e posteriormente a obtenção da velocidade do vento.

A partir do circuito apresentado, pode-se dizer que, mesmo havendo mais, apenas dois transdutores são utilizados a cada instante, um como transmissor e um como receptor. Para o transmissor, um sinal de excitação é gerado e a chave seletora é fechada e para o receptor, apenas se seleciona o que irá receber o sinal naquele instante por meio do multiplexador.

O microcontrolador utilizado no projeto foi escolhido de forma a possuir periféricos suficientes para aplicação. Assim foram utilizados principalmente os periféricos de onda PWM e de captura de sinal, que são responsáveis por gerar e amostrar os sinais de ultrassom, respectivamente, após passarem pelos seus circuitos de condicionamento.

#### B. Processo de ortogonalização da velocidade do vento

A obtenção das velocidades unidimensionais é baseada no tempo de trânsito da onda ultrassônica entre dois transdutores como foi abordado em [10]. Assim apresenta-se aqui uma solução em que várias medidas realizadas em apenas uma dimensão geram o vetor tridimensional de velocidade do vento.

Tendo como base a montagem em apenas uma dimensão, bem como a técnica de obtenção da velocidade do vento, está apresentada a seguir uma montagem tridimensional, em forma tetraédrica, utilizando quatro transdutores ultrassônicos para a aferição da velocidade e direção do vento.

O posicionamento dos transdutores em relação ao eixo de coordenadas utilizado pode ser visto na Figura 3. A referência do sistema de coordenadas foi posicionada no centro do tetraedro, desta forma os transdutores ficam posicionados de

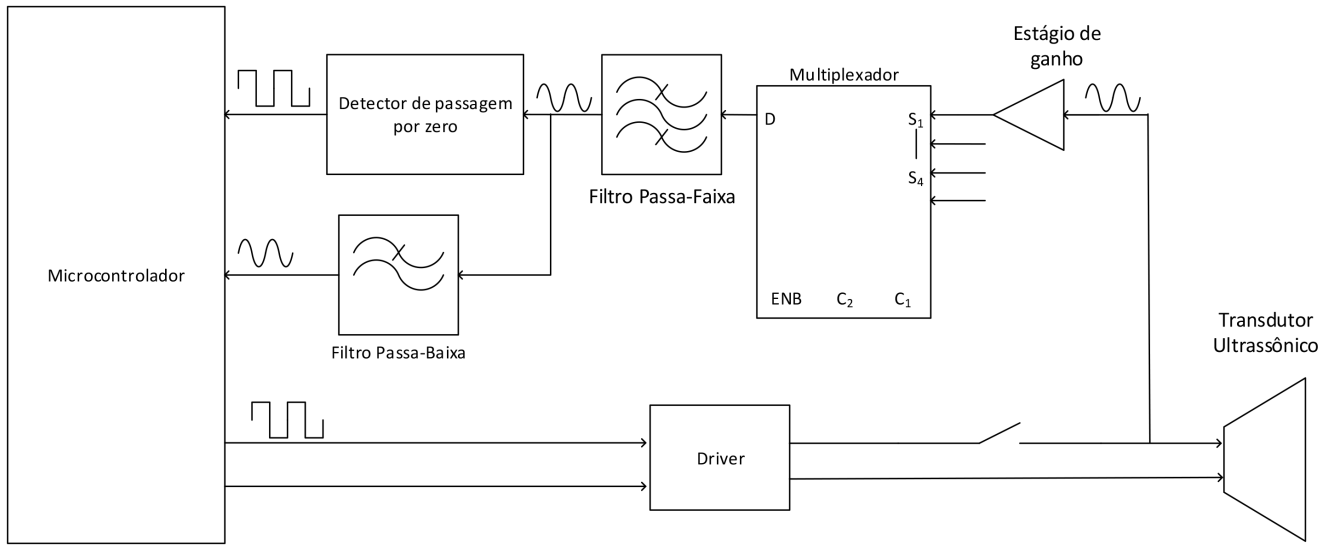


Fig. 2. Diagrama de blocos do circuito utilizado para a transmissão e recepção do sinal de ultrassom.

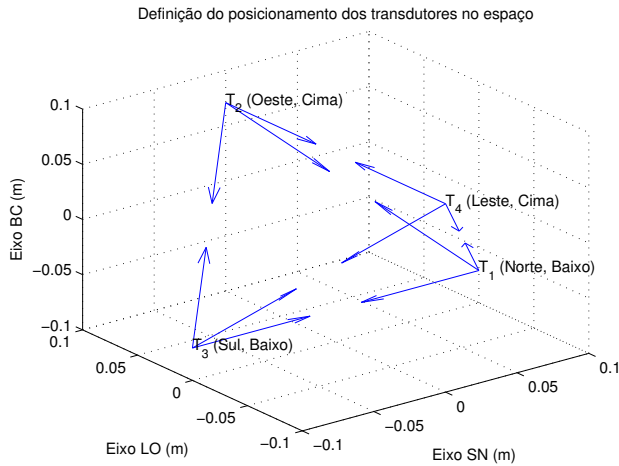


Fig. 3. Posicionamento dos transdutores em relação ao eixo de coordenadas utilizado.

maneira equidistante à origem. Preferiu-se adotar a nomenclatura dos eixos cartesianos de sul norte, leste oeste e baixo cima, em contrapartida ao x, y e z com o objetivo de se possibilitar uma melhor compreensão do resultado final do equacionamento.

Baseado na montagem proposta, verifica-se que tomando um dos quatro transdutores como referência, é possível se obter uma velocidade do vento em relação a cada um dos outros três transdutores, assim se obtém um vetor de velocidade em um eixo não ortogonal, que tem como origem um dos transdutores. Desta forma é necessário passar as medidas de velocidade do sistema de coordenadas em que elas foram obtidas, para o sistema de coordenadas usual, ou seja, aplicar a ortogonalização sobre as velocidades do vento obtidas. Este processo é apresentado a seguir.

Como são utilizados quatro transdutores ultrassônicos, a cada aferição são geradas doze medidas de tempo de trânsito entre os transdutores. Estas medidas podem ser escritas em um vetor com doze valores

$$\mathbf{T}_{ij} = [T_{41}, T_{31}, T_{21}, T_{42}, T_{32}, T_{22}, T_{43}, T_{23}, T_{13}, T_{34}, T_{24}, T_{14}], \quad (2)$$

em que  $\mathbf{T}_{ij}$  representa o tempo de trânsito do sinal ultrassônico entre os transdutores  $i$  e  $j$ .

Devido a geometria utilizada, as doze medidas de tempo de trânsito resultam em seis velocidades do vento, que também podem ser escritas como componentes de um vetor

$$\mathbf{v}_{ij} = [v_{12}, v_{13}, v_{14}, v_{23}, v_{24}, v_{34}], \quad (3)$$

em que  $\mathbf{v}_{ij}$  representa a velocidade do vento entre os transdutores  $i$  e  $j$ .

Tomando o transdutor 1 como referência, pode-se escrever a relação que possibilita a obtenção da velocidade do vento tridimensional

$$\mathbf{A} \begin{bmatrix} V_{1SN} \\ V_{1LO} \\ V_{1BC} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v_{12} \\ v_{13} \\ v_{14} \end{bmatrix} \quad (4)$$

$$\begin{bmatrix} V_{1SN} \\ V_{1LO} \\ V_{1BC} \end{bmatrix} = \mathbf{A}^{-1} \begin{bmatrix} v_{12} \\ v_{13} \\ v_{14} \end{bmatrix}, \quad (5)$$

em que  $V_{1SN}$  representa a velocidade no eixo sul norte,  $V_{1LO}$  a velocidade no eixo leste oeste e  $V_{1BC}$  a velocidade no eixo baixo cima, todas obtidas por meio das velocidades calculadas a partir das medidas de tempo de trânsito do relativas ao transdutor 1.

A matriz  $\mathbf{A}$  pode ser considerada uma matriz de conversão, que relaciona as distâncias entre os transdutores e a origem do sistema de coordenadas, que foi posicionada no centro do tetraedro formado pelos transdutores. Assim, a partir dos 4

vértices da geometria utilizada, onde estão posicionados os transdutores, podem ser definidos 4 pontos, que indicam as suas posições:

$$U_{1NB} \equiv P_1 = \left\{ \frac{d}{2}, 0, -\frac{d\sqrt{2}}{4} \right\}; \quad (6)$$

$$U_{2OC} \equiv P_2 = \left\{ 0, \frac{d}{2}, \frac{d\sqrt{2}}{4} \right\}; \quad (7)$$

$$U_{3SB} \equiv P_3 = \left\{ -\frac{d}{2}, 0, -\frac{d\sqrt{2}}{4} \right\}; \quad (8)$$

$$U_{4NB} \equiv P_4 = \left\{ 0, -\frac{d}{2}, \frac{d\sqrt{2}}{4} \right\}; \quad (9)$$

onde  $d$  representa a distância entre os transdutores, de modo em que todas as distâncias devem ser iguais para que seja formado um tetraedro perfeito e as equações que regem a ortogonalização sejam válidas.

Devido as posições dos transdutores no plano cartesiano, pode-se então definir a matriz  $\mathbf{A}$ , em relação ao transdutor 1,

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} u_{12} \\ u_{13} \\ u_{14} \end{bmatrix} \quad (10)$$

em que  $u_{12}$ ,  $u_{13}$  e  $u_{14}$  são os versores relativos ao transdutor 1, definidos como sendo

$$u_{12} = \frac{P_2 - P_1}{\|P_2 - P_1\|}; \quad (11)$$

$$u_{13} = \frac{P_3 - P_1}{\|P_3 - P_1\|}; \quad (12)$$

$$u_{14} = \frac{P_4 - P_1}{\|P_4 - P_1\|}. \quad (13)$$

Com isso pode-se definir a velocidade ortogonalizada obtida tomando o transdutor 1 como referência,

$$V_{O1} = \begin{bmatrix} V_{1SN} \\ V_{1LO} \\ V_{1BC} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -v_{13} \\ v_{12} - v_{14} \\ \frac{\sqrt{2}}{2} \cdot (v_{12} - v_{13} + v_{14}) \end{bmatrix}. \quad (14)$$

Analogamente, obtêm-se a velocidade ortogonalizada tomando os transdutores 2, 3 e 4 como referência, respectivamente, assim:

$$V_{O2} = \begin{bmatrix} V_{2SN} \\ V_{2LO} \\ V_{2BC} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -v_{12} - v_{23} \\ -v_{24} \\ \frac{\sqrt{2}}{2} \cdot (v_{12} - v_{23} + v_{24}) \end{bmatrix}; \quad (15)$$

$$V_{O3} = \begin{bmatrix} V_{3SN} \\ V_{3LO} \\ V_{3BC} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -v_{13} \\ -v_{23} - v_{34} \\ \frac{\sqrt{2}}{2} \cdot (v_{13} - v_{23} + v_{34}) \end{bmatrix}; \quad (16)$$

$$V_{O4} = \begin{bmatrix} V_{4SN} \\ V_{4LO} \\ V_{4BC} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v_{34} - v_{14} \\ -v_{24} \\ \frac{\sqrt{2}}{2} \cdot (v_{14} - v_{24} + v_{34}) \end{bmatrix}. \quad (17)$$



Fig. 4. Anemômetro ultrassônico tridimensional desenvolvido.

Determinados os vetores de velocidade do vento obtidos tomando cada um dos 4 transdutores como referência, faz-se então a media destas velocidades ortogonalizadas, resultando em um único vetor que é utilizado como a medida final da velocidade do vento.

Teoricamente, as velocidades ortogonalizadas para as diferentes referências utilizadas devem ser iguais, contudo como existem erros de medição, a média destes valores é aplicada com o objetivo de se reduzir o erro presente na medida final.

Portanto a velocidade do vento ortogonalizada é definida como sendo

$$V_O = \frac{V_{O1} + V_{O2} + V_{O3} + V_{O4}}{4}. \quad (18)$$

#### IV. MONTAGEM EXPERIMENTAL

O anemômetro tridimensional desenvolvido, com formato tetraédrico, está apresentado na Figura 4. O dispositivo foi montado em estrutura de alumínio e utiliza 4 transdutores ultrassônicos que oscilam na frequência de 25,3 KHz. Os transdutores estão posicionados a uma distância de 0,2m entre um e outro.

A placa de instrumentação desenvolvida, responsável pela excitação dos transdutores e condicionamento dos sinais de ultrassom, apresentada em diagrama de blocos pela Figura 2, pode ser observada já montada na Figura 5.

Para validar o equipamento, foram realizados testes no túnel de vento presente no laboratório de aerodinâmica das construções da Universidade Federal do Rio Grande do Sul. A Figura 6 mostra o dispositivo em funcionamento durante a realização dos testes. O túnel possui dimensões de 1,30m x 0,90m x 9,32m (largura x altura x comprimento) e a velocidade máxima do escoamento de ar é de 150Km/h, em que as hélices do ventilador são acionadas por um motor elétrico de 100 HP.

Para efeito de comparação dos resultados, foi utilizada uma velocidade de referência. Esta velocidade foi obtida



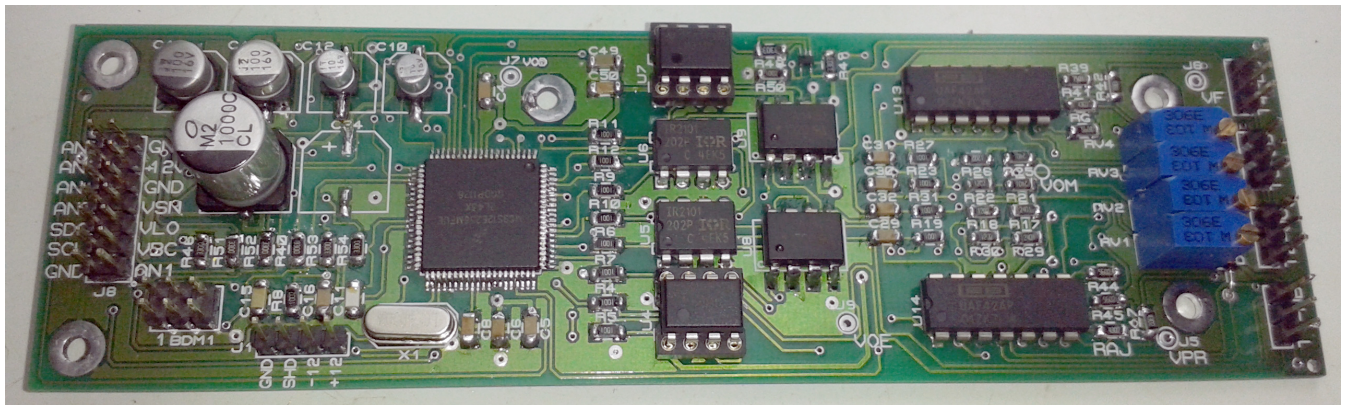


Fig. 5. Placa de instrumentação desenvolvida.

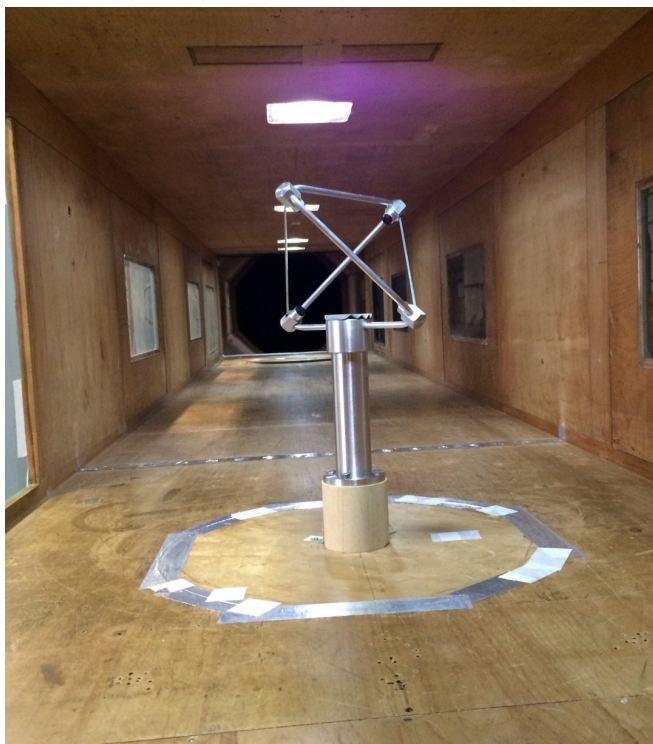


Fig. 6. Montagem experimental no túnel de vento utilizado nos ensaios.

através de micromanômetro modelo ManoAir 500, através da diferença de pressões entre dois anéis piezométricos instalados no túnel onde o equipamento foi testado e no ambiente. Este equipamento em questão, que é parte integrante do túnel de vento, é de ótima precisão já que serve como referência para a calibração de diversos tipos de anemômetros que são avaliados.

## V. RESULTADOS

Para se coletarem os dados de velocidade do vento, o equipamento desenvolvido foi colocado no túnel de modo em que ele ficasse posicionado em seu centro. Assim o fluxo

TABLE I  
TESTE COMPARATIVO REALIZADO EM TÚNEL DE VENTO ENTRE O  
ANEMÔMETRO DE REFERÊNCIA E O DESENVOLVIDO.

Referência (Km/h)	Desenvolvido (Km/h)	Desvio (Km/h)
15,08	13,00	-2,09
22,32	20,74	-1,58
32,87	31,75	-1,12
43,52	42,48	-1,04
54,11	53,17	-0,94
64,94	63,83	-1,12
75,74	74,95	-0,79
86,40	85,57	-0,83
97,99	97,13	-0,86
108,22	108,07	-0,14
118,48	118,26	-0,22
129,06	129,13	0,07
141,66	142,99	1,33
151,92	154,37	2,45
160,85	163,84	2,99

de vento é maior e os distúrbios e oscilações do vento são menores, favorecendo as medidas. A temperatura ambiente no momento em que os testes foram realizados era de 22 graus celsius.

No teste aumentou-se gradativamente a velocidade do vento, na faixa de 14 e 162 Km/h, coletando-se os dados que estão apresentados na Tabela 1. Observa-se que os dados obtidos pelo equipamento desenvolvido se aproximam daqueles encontrados no anemômetro de referência, desta forma pode-se dizer que o circuito eletrônico e a montagem tridimensional proposta satisfazem os requisitos técnicos necessários para o funcionamento equivalente ao equipamento comercial.

A comparação gráfica entre o anemômetro de referência e o desenvolvido está apresentada na Figura 7. O equipamento de referência possui os dados apresentados em azul, já o anemômetro desenvolvido possui os dados apresentados em vermelho. Analisando o gráfico em questão, percebe-se a resposta do sistema desenvolvido, devido a grande faixa de velocidade a que o equipamento foi submetido, foi satisfatória.

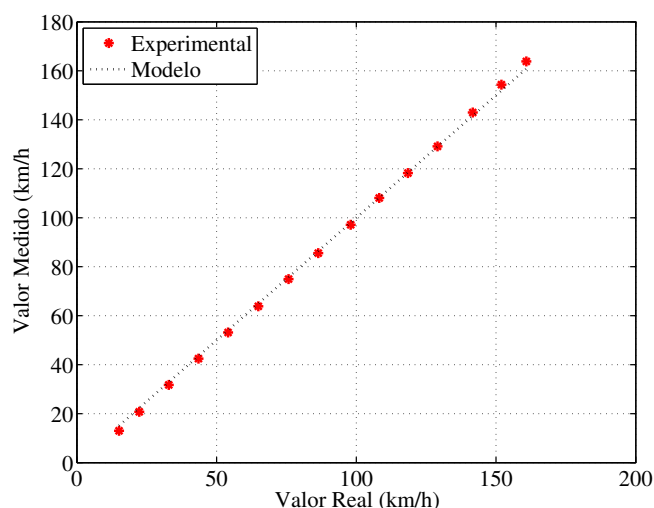


Fig. 7. Gráfico comparativo entre o anemômetro comercial e o desenvolvido relativo ao primeiro ensaio.

No ensaio realizado verificou-se que o máximo desvio entre as medidas foi de 2,99 Km/h assim pode-se dizer que o anemômetro desenvolvido satisfaz a condição necessária para a aplicação desejada, de se medir a máximas velocidades de vento em torres de transmissão. Isso pode ser dito pois o erro aceitável neste caso é de até 5 Km/h.

Observando os dados coletados, observa-se que para velocidades médias, entre aproximadamente 75 e 130 Km/h o erro encontrado foi menor que 1 Km/h, isso demonstra que o funcionamento ótimo do anemômetro desenvolvido ocorre nesta faixa. Pode-se dizer também que o maior erro foi encontrado na velocidade mais alta a que o equipamento foi submetido, ou seja, aproximadamente 160Km/h.

## VI. CONCLUSÃO

Este artigo apresentou um método de excitação de transdutores ultrassônicos aplicados em um anemômetro capaz de aferir a velocidade do vento com sentido e direção. Apresentou-se também a metodologia utilizada para se efetuar a medição de maneira tridimensional partindo de várias medidas em apenas uma dimensão. A metodologia utilizada, bem como o circuito eletrônico desenvolvido, se mostraram eficientes, como pode ser observado pelos gráficos apresentados. Com a comparação dos dados coletados do anemômetro projetado com o anemômetro de referência utilizado nos testes, verificou-se um desvio máximo de 2,99 Km/h. Mesmo com os testes do equipamento desenvolvido serem feitos analisando-se apenas o módulo da velocidade do vento, pode-se dizer que a metodologia de ortogonalização foi validada, permitindo que o equipamento realize medidas tridimensionais com exatidão. Os resultados são preliminares, sendo necessário se avaliar a incerteza da medição. Para trabalhos futuros sugere-se realizar o teste do equipamento com velocidades do vento maiores que as utilizadas neste trabalho, com objetivo de confirmar o funcionamento até máximo valor que o instrumento foi

projetado para medir, 250 Km/h.

## REFERENCES

- [1] R. C. Battista, R. S. Rodrigues, and M. S. Pfeil, "Dynamic behavior and stability of transmission line towers under wind forces," *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, vol. 91, no. 8, pp. 1051–1067, Aug. 2003. [Online]. Available: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0167610503000527>
- [2] a. Hamada and a.a. El Damatty, "Behaviour of guyed transmission line structures under tornado wind loading," *Computers & Structures*, vol. 89, no. 11-12, pp. 986–1003, June 2011. [Online]. Available: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0045794911000162>
- [3] N. Prasad Rao, G. S. Knight, N. Lakshmanan, and N. R. Iyer, "Investigation of transmission line tower failures," *Engineering Failure Analysis*, vol. 17, no. 5, pp. 1127–1141, July 2010. [Online]. Available: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S135063071000018X>
- [4] F. d. C. Magina and L. E. de Souza, "Rede automática de coleta de dados meteorológicos para utilização em projetos e operação de linhas de transmissão de energia elétrica," in *XIII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto*, Florianópolis, 2007, pp. 7071–7078.
- [5] G. Hartley, "The development of electrical anemometers," *Proceedings of the IEE - Part II: Power Engineering*, vol. 98, no. 64, pp. 430–437, August 1951.
- [6] J. F. Kreider, "A simple stable constant-temperature hot-wire anemometer," *Instrumentation and Measurement, IEEE Transactions on*, vol. 22, no. 2, pp. 190–191, June 1973.
- [7] R. Ferreira, R. Freire, G. Deep, J. de Rocha Neto, and A. Oliveira, "Hot-wire anemometer with temperature compensation using only one sensor," *Instrumentation and Measurement, IEEE Transactions on*, vol. 50, no. 4, pp. 954–958, Aug 2001.
- [8] H. Y. Jeon, H. Zhu, R. Derksen, E. Ozkan, and C. Krause, "Evaluation of ultrasonic sensor for variable-rate spray applications," *Computers and Electronics in Agriculture*, vol. 75, no. 1, pp. 213–221, Jan. 2011. [Online]. Available: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0168169910002310>
- [9] G. Bucci, F. Ciacetta, E. Fiorucci, D. Gallo, C. Landi, and M. Luiso, "A low-cost ultrasonic wind speed and direction measurement system," in *Instrumentation and Measurement Technology Conference (I2MTC), 2013 IEEE International*, May 2013, pp. 505–510.
- [10] L. d. S. Ribeiro, J. Silva, David P. da, M. Moreira, A. L. Guedes, J. A. de França, and M. B. d. M. França, "Uma nova técnica de cálculo de velocidade do vento para anemômetros ultrassônicos baseada na fusão de dados entre múltiplos tempos de trânsito e correlação cruzada entre envoltórias de recepção," in *20th Congresso Brasileiro de Automática*, Belo Horizonte - MG, 2014.

**APÊNDICE C – Artigo publicado no X  
Congresso Brasileiro de  
Agroinformática - SBIAGRO 2015**



## **Projeto e Desenvolvimento de um Anemômetro 3D com Tecnologia Ultrassônica**

*David Pereira da Silva Junior<sup>1</sup>, Giancarlo Michelino Gaeta Lopes<sup>1</sup>,  
Lucas de Souza Ribeiro<sup>1</sup>, José Alexandre de França<sup>1</sup>*

<sup>1</sup>Universidade Estadual de Londrina - UEL  
PR 445 KM 308, Londrina, PR, 86057-970, Brasil  
Emails: davidjunior3e@gmail.com, giancarlogaetalopes@gmail.com,  
lucassribeiro12@gmail.com, jaf@jaf.eng.br

### **RESUMO**

Já é do conhecimento e aceitação comum a importância do estudo dos fatores climáticos para a agrometeorologia e para a agricultura de precisão. Sendo o vento um dos principais fatores, o anemômetro é um equipamento muito utilizado nas medidas de direção e intensidade desta grandeza. Ao longo dos anos, diferentes tipos de anemômetros foram desenvolvidos com o objetivo de se obter medições mais confiáveis e equipamentos mais resistentes às intempéries. A tecnologia mais recente aplicada a estes equipamentos consiste na utilização de transdutores ultrassônicos como elementos de medição. Com base no exposto, foi então desenvolvido um anemômetro ultrassônico tridimensional, ou 3D, diferenciando-se da maioria dos anemômetros, que realizam medidas em duas dimensões apenas. A falta de fabricantes nacionais deste tipo de equipamento encarece o produto e deixa uma lacuna na detenção local desta tecnologia. A técnica utilizada para compor as medidas de velocidade do vento tem base na teoria da obtenção do tempo de trânsito ultrassônico, a partir de circuitos eletrônicos. O protótipo pronto foi submetido a testes com vento, e como comparativo foi utilizado um anemômetro ultrassônico 3D importado. Os resultados obtidos superaram as expectativas, mostrando-se tão bons quanto o equipamento comercial importado, porém com o privilégio do desenvolvimento de uma tecnologia totalmente local com custo muito reduzido.

**PALAVRAS-CHAVE:** Anemômetro 3D, Instrumentação Eletrônica, Velocidade do Vento.

### **ABSTRACT**

The importance of the study of climatic factors for agrometeorology and precision agriculture is already known and commonly accepted. As the wind is a key among these factor, the anemometer is a device widely used in measures of direction and intensity of this magnitude. Over

the years, different types of anemometers have been developed with the objective of obtaining more accurate measurements and more resistant to weathering equipment. The latest technology applied to these equipments is based on the use of ultrasonic transducers and sensors. Based on the described, it was developed a three-dimensional ultrasonic anemometer, or 3D, differing from most anemometers, because them perform measurements in two dimensions only. The lack of Brazilian manufacturers of such equipment makes the product expensive and leaves a gap in terms of local detention of this technology. The technique used to determine wind speed measurements is based on the theory of obtaining the ultrasonic transit time, using electronic circuits. The final prototype was subjected to wind speed testing, while was used as reference an imported 3D ultrasonic anemometer. The results exceeded expectations, being as good as the commercial equipment imported. In addition, we have the privilege of developing an entirely local technology with very low cost.

**KEYWORDS:** 3D Anemometer, Electronic Instrumentation, Wind Speed.

## INTRODUÇÃO

Os estudos dos fatores climáticos proveem ferramentas para uma maior compreensão dos fenômenos naturais que afetam a agricultura. A tendência de crescimento da demanda de estações meteorológicas automatizadas em diversos setores no Brasil, tem grande relevância no desenvolvimento de novas propostas de estudo em topologias de equipamentos para esse fim (TURCO; BARBOSA, 2008). Como a medida do vento é um fator indispensável em tais estações, o anemômetro assume um papel essencial na composição destas.

Dependendo da aplicação, diferentes tipos de anemômetros podem ser utilizados, cada um com suas vantagens relativas ou limitações. Há o obsoleto (SILVA, 2006) Cata Vento de Wild e há os anemômetros do tipo rotativos, que se dividem entre os do tipo hélice e os do tipo concha. Para baixas velocidades há o anemômetro do tipo fio quente. Também muito utilizado é o tubo de *Pitot*, e por fim, os anemômetros a ultrassom.

Os anemômetros ultrassônicos são eletrônicos, uma alternativa que traz relevantes diferenças em relação aos anteriormente mencionados, como: boa exatidão, resposta rápida, não é invasivo, não possui partes móveis, é linear em uma ampla faixa de frequência e ainda pode ser utilizado para medição do fluxo de fluidos corrosivos, sem risco para os transdutores (PEREIRA; ANGELOCCI; SENTELHAS, 2007).

Os transdutores piezoelétricos ultrassônicos, utilizado em anemômetros, convertem uma tensão que é aplicada aos seus terminais em um deslocamento do elemento piezo. Tal deslocamento induz a geração de uma onda mecânica oscilatória que propaga pelo fluido.

No caso do ar, a onda propaga à velocidade do som quando não há vento. Caso contrário, a onda propagará mais lenta ou rapidamente, consoante o sentido do vento. Eis portanto o princípio essencial da medição da velocidade do vento por ultrassom: verificar a variação temporal de uma onda que deixa um transmissor e chega a um receptor. Tal tempo de propagação é conhecido na literatura como tempo de trânsito.

Com um par transmissor e receptor,  $T_x$  e  $R_x$ , obtém-se os tempos de trânsito necessários para a detecção da velocidade do vento em uma direção. Assim, neste trabalho foram utilizados três pares de transdutores, a fim de produzir um anemômetro 3D.

Extensas pesquisas foram feitas sobre fabricantes de anemômetros. Até a data da submissão deste trabalho, não foi encontrada nenhuma empresa que fabricasse um equipamento com as mesmas características em território nacional.

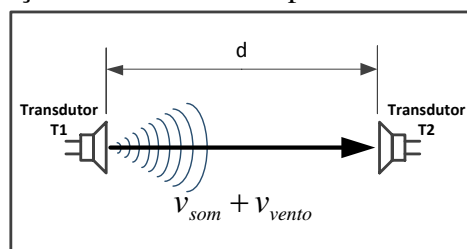
Motivados pelo exposto, surgiu a proposta do desenvolvimento de um anemômetro ultrassônico tridimensional. Tal protótipo contou com o desenvolvimento dos circuitos para compor a placa de instrumentação, bem como com a escrita de algoritmos para a filtragem e processamento digital dos sinais adquiridos por um microcontrolador. Também foram objetivos a idealização, confecção e montagem da parte estrutural do equipamento. Também, definiu-se como pré-requisito um erro máximo de  $5 \text{ km/h}$  nas medidas.

## MATERIAL E MÉTODOS

Inicialmente foi feita uma busca intensiva por fabricantes de anemômetros importados ou nacionais, e os modelos que estes disponibilizam para venda. O objetivo de tais informações foi verificar se havia inovação e avaliar a contribuição do projeto proposto. Um resumo de tal pesquisa será apresentado na seção de resultados.

O anemômetro ultrassônico 3D utiliza, em cada eixo, a teoria de obtenção da velocidade unidimensional do vento. Para tal, utiliza-se dois transdutores, onde um age como transmissor e outro como receptor. Busca-se assim obter os tempos de trânsito da onda ultrassônica que é emitida pelo transmissor, assim que esta chega ao receptor. A figura 1 mostra duas cápsulas transdutoras dispostas em posição de confronto, para medição da velocidade do fluxo do vento constatável em seu eixo.

Figura 1: Representação dos transdutores para o método do tempo de trânsito.



A propagação da onda de  $T_x$  para  $R_x$  se dará na velocidade do som, acrescida da influência da velocidade vetorial do vento, relacionando-se com a distância conforme a relação

$$v_{som} + v_{vento} = \frac{d}{t_{T_x \rightarrow R_x}}. \quad (1)$$

Um problema com a equação (1) é que a temperatura do ar influencia diretamente na velocidade do som (VALLE et al., 2007), relacionando-se por  $v_{som} \approx 20.074\sqrt{T_K}$ , onde  $T_K$  é a temperatura absoluta em *Kelvin*.

Uma estratégia para eliminar o problema da influência da temperatura nas medidas, é realizar uma medida em cada sentido consecutivamente, trocando as funções  $T_x$  e  $R_x$  em cada par de transdutores. Realiza-se então uma medida de tempo de trânsito no sentido  $T1 \rightarrow T2$ ,  $t_{12}$ , e no momento seguinte, uma medida no sentido  $T2 \rightarrow T1$ ,  $t_{21}$ . Matematicamente tem-se

$$v_{som} + \nu_{12} = \frac{d}{t_{12}}, \quad v_{som} + \nu_{21} = \frac{d}{t_{21}}, \quad (2)$$

desde que a troca de funções e a consequente medição do tempo de trânsito seja feita consecutivamente à primeira, e em um curto intervalo de tempo tal que se possa desprezar a variação real da velocidade do vento. Assim, é possível achar uma relação entre as duas medidas que favorece e simplifica o modo de obter a velocidade do vento.

A partir das equações (2), chega-se a uma relação (3) que expressa a velocidade do vento objetivada. Elimina-se assim o inconveniente da dependência da temperatura nas medidas de velocidade do vento:

$$v_{12} = \frac{d}{2} \left( \frac{1}{t_{12}} - \frac{1}{t_{21}} \right). \quad (3)$$

Como a velocidade  $\nu_{12}$  deve ser simétrica à  $\nu_{21}$ , definiu-se a nomenclatura  $v_{12}$  como a velocidade do vento experimentada no sentido  $T_1$  para  $T_2$ , sendo  $v_{12} = \nu_{12} = -\nu_{21}$ .

Após o conhecimento da teoria, procurou-se selecionar transdutores ultrassônicos comerciais para continuar o desenvolvimento. Existem diversos tipos disponíveis, que podem ser escolhidos conforme o tipo de utilização. Os fabricantes disponibilizam sensores ultrassônicos para ar, líquidos e sólidos, e ainda tipos abertos e outros hermeticamente fechados, para aplicações externas. Como o objetivo do anemômetro proposto foi medir velocidades de vento natural, foi selecionado um sensor resistente à intempéries como sol e chuva, do fabricante *Prowave*®.

Em relação aos transdutores do tipo aberto, um transdutor resistente à intempéries conta com um invólucro fechado e espesso de alumínio. Contudo, a robustez do encapsulamento demanda uma tensão 10x maior na excitação do transdutor como transmissor e ainda reduz a sensibilidade deste em 2000x quando opera como receptor, comparativamente aos transdutores do tipo aberto.

Foi um desafio projetar um circuito eficaz para o condicionamento de sinais dos transdutores, tendo em conta altas tensões no  $T_x$  e baixas tensões no  $R_x$ . Como solução, foram utilizados transformadores de elevação no circuito eletrônico do transmissor, e amplificadores operacionais para os elevados ganhos necessários na recepção.

Houve também cuidados significativos no projeto da placa de circuito impresso para acondicionamento dos circuitos. Com tensões na ordem de dezenas de milivolts na recepção, o circuito fica muito susceptível a ruídos. Problema ainda mais agravado pela utilização de transformadores na mesma placa que, inerentemente, geram muita interferência eletromagnética. Para contornar os inconvenientes, foram utilizadas técnicas de separação de

malhas e blocos de circuitos no roteamento da placa de circuito impresso. Também, filtros supressores de ruído do tipo ferrite foram utilizados.

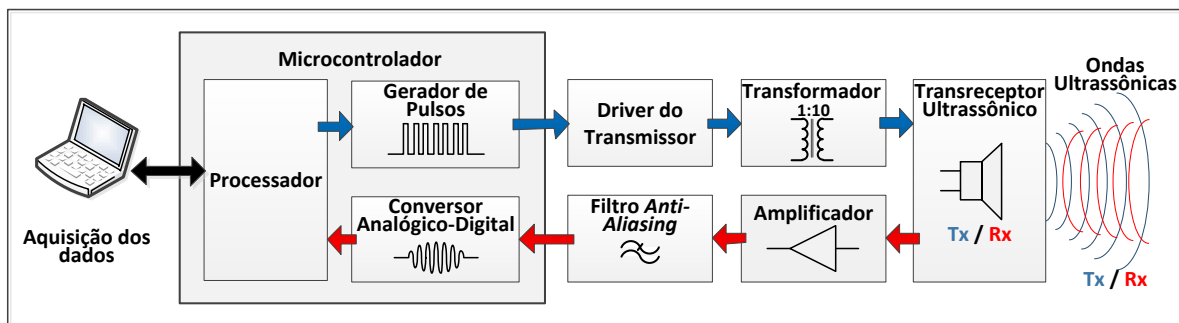
A geração dos sinais de excitação  $T_x$  e o tratamento digital dos sinais  $R_x$  foram feitos utilizando um microcontrolador da *ST Microelectronics*, com núcleo de processamento digital de sinais (DSP) em *hardware*. Mais especificamente, foi utilizado o modelo *STM32F429*, um dos mais completos em periféricos da família *STM32F4*.

Os sinais de recepção foram amostrados por um conversor analógico-digital integrado ao microcontrolador, a 500 mil amostras por segundo. Como é indispensável a sinais amostrados, a partir da frequência de ressonância do transdutor e da taxa de amostragem, foi projetado também um filtro *anti-aliasing* analógico, para evitar sobreposição do espectro ao reconstituir o sinal  $R_x$  digitalmente.

Como se tem no  $R_x$  sinais ressonantes mais tênues e consequente relação sinal ruído menores, houve a necessidade de se aplicar também filtros digitais ao sinal amostrado. Como o microcontrolador tem suporte em hardware para cálculo em ponto flutuante, filtros de alta ordem foram facilmente implementados. Após a amostragem, foram aplicados filtros digitais do tipo *Finite Impulse Response (FIR)*, para proporcionar um trabalho de detecção dos tempos de trânsito e cálculo das velocidades apenas com o sinal de interesse, livre de ruídos.

O transdutor utilizado é um transreceptor, portanto o circuito eletrônico para cada um deve conter o condicionamento tanto da transmissão quanto da recepção, conforme figura 2.

Figura 2: Diagrama do circuito de condicionamento dos sinais  $T_x$  e  $R_x$  para cada transdutor



O diagrama de blocos da figura 2 pode ser analisado separadamente para as duas funções do transdutor, da seguinte forma:

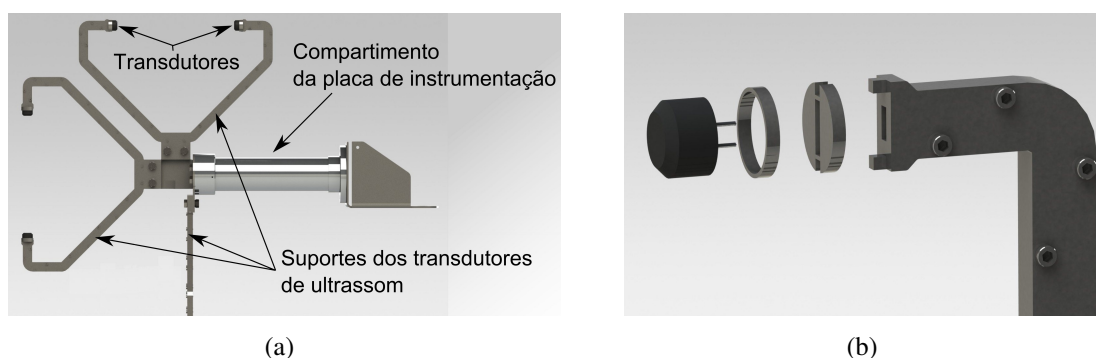
- Como  $T_x$  : representado pelos indicadores azuis. O microcontrolador gera os pulsos que acionam o *driver* controlador do transformador, então este amplifica o sinal de tensão em 10 vezes. O transdutor é assim excitado e oscila, transmitindo uma onda ultrassônica.
- Como  $R_x$  : representado pelos indicadores vermelhos. Quando o transdutor atua como receptor, a onda que chega do transmissor excita-o, gerando uma tensão. Esta é então amplificada e filtrada, afim de evitar sobreposição no processo de amostragem do conversor A.D. do microcontrolador. Por conseguinte, o sinal é processado para se obter as velocidades.

Pode-se verificar ainda na figura 2, que foi utilizado um computador para adquirir os dados resultantes do processamento.

Como o objetivo é um anemômetro 3D, foram utilizados seis transdutores. Portanto, o circuito representado em blocos na figura 2 foi replicado seis vezes na placa. Também, os circuitos do microcontrolador, de comunicação *USB* e de regulação de tensões foram projetados.

A parte estrutural do anemômetro tridimensional foi projetada para ser resistente às intempéries, utilizando aço inox e alumínio como matéria prima. Toda a estrutura foi projetada utilizando o *software CAD SolidWorks®*. A imagem 3a mostra a previsão da montagem física, e a figura 3b detalha a posição do transdutor na estrutura.

Figura 3: Projeto do anemômetro 3D utilizando o *software CAD SolidWorks®*



Para realizar os testes em campo e validar o funcionamento do equipamento, há de se levar em conta a questão da dependência das condições climáticas para que ocorram grandes velocidades de vento. Contudo, fixar o anemômetro e fazer incidir sobre ele um fluxo de ar, é equivalente a deslocar o equipamento à velocidade desejada. Utilizou-se então um automóvel para dar mobilidade ao anemômetro e realizar os testes.

Também, foi utilizado como referência um anemômetro 3D da *Gill Instruments*, modelo *Windmaster Pro 3-Axis*, adquirido para os testes.

Além do experimento com o automóvel, o equipamento projetado foi exposto a sol e chuva, para verificação da resistência dos transdutores às intempéries naturais e hermeticidade do compartimento da placa de instrumentação.

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

A pesquisa inicial sobre fabricantes de anemômetros resultou na tabela 1, onde foram listados os nomes das empresas e a quantidade de modelos tipo 2D (bidimensional) e 3D que disponibilizam em seu catálogo.

Conforme a tabela 1, foram encontradas mundialmente 17 empresas que fabricam anemômetros. Destas, apenas 8 disponibilizam algum tipo de anemômetro 3D. O resultado mais importante desta pesquisa foi a constatação de que não foi encontrado nenhum fabricante nacional para anemômetros ultrassônicos. Quanto aos custos do anemômetro projetado, não ultrapassou 10 % do valor do anemômetro 3D comercial adquirido para comparação.

Tabela 1: Tabela de fabricantes e modelos de anemômetros.

Fabricante	Mod.2D	Mod.3D	Fabricante	Mod.2D	Mod.3D
1 Gill Instruments;	2	3	10 Delta Ohm;	1	1
2 Thies Clima;	2	1	11 Deif;	1	-
3 Vaisala;	1	-	12 Siemens	1	-
4 Lufft;	3	-	13 LCJ Capteurs;	1	-
5 Young;	1	1	14 Climatronics;	3	-
6 Metek;	3	1	15 Theodor Friedrichs;	1	1
7 Decagon Devices;	1	-	16 FT Technologies;	2	-
8 Applied Technologies;	2	5	17 Enercorp;	1	-
9 Campbell Scientific;	-	1			

A partir do projeto dos circuitos eletrônicos do anemômetro, foi fabricada uma placa de circuito impresso. Todos os componentes foram montados em laboratório, resultando na placa de instrumentação da figura 4.

Figura 4: Placa de instrumentação eletrônica do anemômetro projetado.

Esquerda: vista frontal, direita: vista traseira



A placa de circuito impresso da figura 4 foi projetada para ficar alojada dentro do tubo circular de alumínio de sustentação do anemômetro, que pode ser observado na imagem da figura 5a.

Figura 5: Anemômetro 3D projetado e montagem experimental



(a)



(b)

Os três suportes para os pares de transdutores foram feitos em aço inox e dispostos de maneira a formar uma geometria ortogonal, para medidas de velocidades em três dimensões (figura 5a). Na extremidade de cada suporte, estão fixados os transdutores de ultrassom.

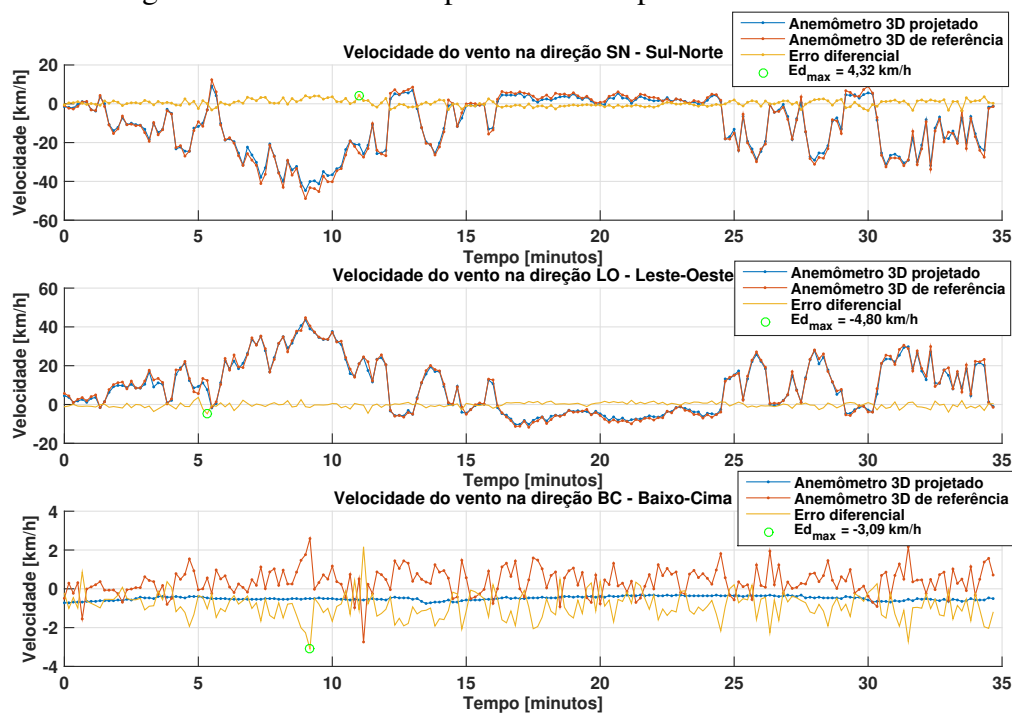


Na imagem da figura 5b, pode-se verificar a montagem experimental para testes de velocidade do vento. Foram montados lado a lado os anemômetros 3D projetado e o comercial, para referência. Os dados experimentais foram obtidos utilizando um computador portátil como interface.

O experimento foi conduzido com amostragem em tempo real dos dados de ambos os anemômetros, enquanto o veículo deslocava-se pelas ruas com velocidades aleatórias.

Os resultados comparativos constam nos gráficos da figura 6. A posição dos anemômetros foi de aproximadamente  $45^\circ$  para o experimento, o que resulta em respostas aproximadamente idênticas (em módulo) para os eixos SN (Sul→Norte) e LO (Leste→Oeste). Como o vento é predominante em direções do plano terrestre, a velocidade no eixo BC (Baixo→Cima) foi sempre próximo de zero.

Figura 6: Resultados comparativos do experimento com vento



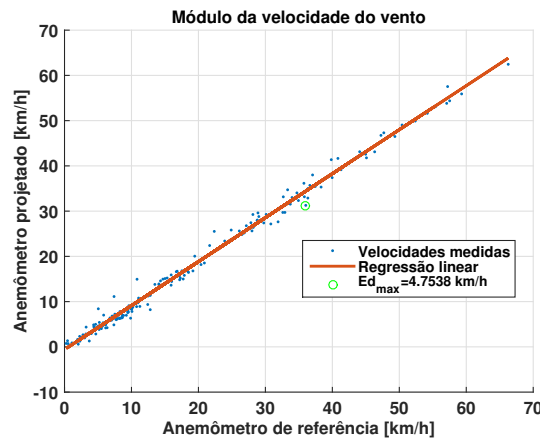
Observa-se também nos gráficos da figura 6, o erros diferenciais ( $v_{proj} - v_{ref}$ ), sendo  $v_{proj}$  a medida de velocidade do anemômetro 3D projetado e  $v_{ref}$  a medida do anemômetro comercial de referência. Nota-se que o erro máximo entre os dois anemômetros foi de  $4,3 \text{ km/h}$ ,  $-4,8 \text{ km/h}$  e  $-3,1 \text{ km/h}$  para as direções *SN*, *LO* e *BC*, respectivamente.

Tomando o módulo das velocidades ortogonais para ambos os anemômetros e comparando suas amplitudes, realizou-se uma análise de regressão linear, conforme a figura 7.

Verifica-se pelos gráficos da figura 7 que a velocidade máxima de vento que os anemômetros foram submetidos foi próxima de  $70 \text{ km/h}$ , em módulo. Durante as medições, foi verificado um erro diferencial máximo do módulo da velocidade de  $4,7 \text{ km/h}$ , conforme identificado no gráfico.



Figura 7: Análise de regressão entre os dois anemômetros



A regressão linear dos dados resultou em uma equação que relaciona as medidas de velocidade dos dois anemômetros, dada por

$$v_{proj} = 0,9721v_{ref} - 0,6017. \quad (4)$$

Computando o coeficiente de determinação para a regressão linear observada no gráfico da figura 7, resulta  $R^2 = 0,9933$ . Isto demonstra que a equação linear (4) explica 99,33% da variância contida nos dados de  $v_{proj}$ .

No experimento de resistência à intempéries a que o equipamento foi submetido, o anemômetro projetado resistiu à sol e chuva durante muitos dias em campo, não perdendo suas funcionalidades de medição. Também, visual e estruturalmente permaneceu intacto, visto a utilização de materiais não susceptíveis à corrosão por água em sua construção.

## CONCLUSÕES

A não constatação de fabricantes nacionais que comercializassem anemômetros ultrassônicos, tampouco 3D, contribuiu muito no interesse do desenvolvimento de um protótipo do tipo.

Os transdutores ultrassônicos utilizados são comerciais e mostraram robustez ao resistir às intempéries às quais foram submetidos nos testes. Apesar das dificuldades de se trabalhar, na mesma placa de instrumentação, com tensões da ordem de milhares de vezes de diferença na amplitude de tensão entre  $T_x$  e  $R_x$ , houve sucesso na criação dos circuitos eletrônicos.

O microcontrolador com processamento digital de sinais de ponto flutuante em *hardware* também teve papel fundamental na implementação de filtros digitais. Eles foram essenciais para se extrair os tempos de trânsito da informação contida nos sinais de recepção, resultando finalmente nas velocidades de vento.

Não menos importante foi a concepção estrutural do anemômetro 3D, utilizando um modelamento ortogonal e metais resistentes à corrosão por água como alumínio e aço inox.

Os experimentos para demonstrar as medições de velocidade do vento funcionaram muito bem. Pôde-se verificar leituras de velocidades instantâneas muito próximas entre ambos os

anemômetros, comercial e projetado. A análise estatística do coeficiente de determinação da regressão dos dados amostrados, indica que 99,33% da variância contida nos dados pode ser explicada por uma relação linear. Além disso, os erros diferenciais entre o anemômetro 3D projetado e o comercial ficaram abaixo de 5 *km/h*, respeitando o valor máximo de erro previsto inicialmente.

Por fim, obteve-se um anemômetro ultrassônico 3D funcional, capaz de realizar medições de velocidades do vento em três dimensões: Sul→Norte, Leste→Oeste e Baixo→Cima. Foram plenamente atingidos os objetivos de conceber um dispositivo completo, com a detenção de toda a tecnologia em território nacional, por um custo cerca de dez vezes menor que um importado.

## REFERÊNCIAS

APRILESI, G.; De Cicco, G.; TARONI, A. A Microprocessor-Based, Three Axes, Ultrasonic Anemometer. In: *1983 Ultrasonics Symposium*. [S.l.]: IEEE, 1983. p. 295–298.

HIGUERA, J.; POLO, J. Tiny and autonomous IEEE1451 Sonic Anemometer to deploy in environmental Wireless Sensor Network. In: *2010 Seventh International Conference on Networked Sensing Systems (INSS)*. [S.l.]: IEEE, 2010. p. 183–186. ISBN 978-1-4244-7911-5.

HUANG, K. N. et al. High precision, fast ultrasonic thermometer based on measurement of the speed of sound in air. *Review of Scientific Instruments*, v. 73, n. 11, p. 4022, 2002. ISSN 00346748.

MARLOW, D. G.; NISEWANGER, C. R.; CADY, W. M. A Method for the Instantaneous Measurement of Velocity and Temperature in High Speed Air Flow. *Journal of Applied Physics*, v. 20, n. 8, p. 771, 1949. ISSN 00218979.

PEREIRA, A. R.; ANGELOCCI, L. R.; SENTELHAS, P. C. *Meteorologia Agrícola*. Piracicaba, SP, Brasil: USP, 2007. 202 p.

SILVA, M. A. V. *Meteorologia e Climatologia*. Segunda edição. Recife, PE, Brasil: Versão Digital, 2006.

TURCO, J. P.; BARBOSA, J. C. Avaliação de duas estações meteorológicas automatizadas, para estimativa diária da evapotranspiração de referência obtida pelo método de penman monteith. *Irriga, Centro Científico Conhecer*, Botucatu, São Paulo, v. 13, número 3, p. 339 a 354, maio 2008.

VALLE, M. del et al. Low cost ultrasonic anemometer. In: *Electrical and Electronics Engineering, 2007. ICEEE 2007. 4th International Conference on*. [S.l.: s.n.], 2007. p. 213-216.

APÊNDICE D – Artigo submetido ao  
periódico IEEE *Transactions on*  
*Instrumentation and Measurement* em  
2016

# Development of 3D ultrasonic anemometer, with non-orthogonal geometry, for the determination of high-intensity winds

Giancarlo Michelino Gaeta Lopes, David Pereira da Silva Junior, José Alexandre de França, Maria Bernadete de Moraes França, Maurício Moreira, Pitstone Elias

**Abstract**—The wind speed is an important quantity in various areas of knowledge. Among the existing types of anemometers, the ultrasonic is the one that requires less maintenance and may be used in most applications. This paper presents the development of an ultrasonic anemometer that measures wind speed in three dimensions. It discusses important aspects of the mechanical structure of the equipment in order to minimize its influence in measurements. It also presents the electronic circuits used in the excitement and in the conditioning of signals of the transducers that make up the instrument. The equipment was calibrated in a wind tunnel, with a coefficient of determination  $R^2 = 0.999994$ , in relation to the reference method. In addition, results of field tests comparing two different mechanical structures are presented. Empirically, it is shown that a non-orthogonal arrangement for the anemometer favors the accuracy of the measurements. The results showed that the proposed equipment has an excellent accuracy for the measurement of up to 160 km/h.

**Index Terms**—Wind tunnel; ultrasonic transducer; wind speed measurement.

## I. INTRODUCTION

The measurement of fluid speed based on ultrasonic transducers has been used in various areas of knowledge. For example, for tracking and finding gas plumes [1, 2]; measuring gas flow in chimneys [3]; measuring the respiratory flow [4], the flow of liquids [5] and gases [6] or the incrustation of waste into pipes [7]. In particular, the study of wind for the determination of its speed and direction is the subject of several areas of knowledge such as agriculture [8], biology [9], civil engineering [10], electricity generation [11], etc. Among the various techniques used to measure the wind speed, one can highlight the one based on ultrasonic transducers. This is because this type of anemometer is usually more robust and requires little maintenance. Also, they allow to measure wind speed in three dimensions. Therefore, this type of anemometer is used in adverse conditions. For example, we can cite the study of Banfield and Dissly [12], for measuring different concentrations of gases normally found in the terrestrial environment, and their use in situations of high humidity climate where there is formation of fog [13].

In addition to the intensity, with an ultrasonic anemometer, it is also possible to obtain the direction and sense of the wind

speed. Aprilesi et al. [14] describe an equipment that performs measurements in three dimensions and with measuring range up to 72 km/h, but they do not detail many features of the anemometer. Other authors have also developed ultrasonic anemometers with various measuring ranges, which can reach 220 km/h [15]. However, all these prototypes perform two-dimensional measurements [15–19]. In some cases, the air flow can have a significant vertical component. Thus, the wind speed measurement in only two dimensions may be a significant limitation.

In general, to measure the wind speed by ultrasound, two methods may be used: either through transit time [20] or through vortex [21]. In the measuring method through vortex, it is difficult to determine the wind direction and sense. So, when one wants to get this information, the method through transit time is used. For this, the measurement of the transit time can be achieved by applying a continuous signal or a pulse train to the transmitter transducer. In the case of the continuous signal, the phase shifting of the signal is assessed, which requires a complex hardware and requires more than one transducer as a receiver [19]. Therefore, the simplest method is the one in which a number of pulses will travel through the air and take a variable time to reach the other transducer. This time will depend on the intensity and direction of the incident wind. This allows only one pair of transducers to form a measuring axis.

It is known that many commercial anemometers have problems related to their structure, which interfere in measurements [22]. Nevertheless, in the literature, there is little discussion about this interference. An exception is the work of Kudo et al. [16], which analyzes this type of error and recommends operational restrictions to their equipment. On the other hand, looking at the prototype implemented by Han et al. [19], it can be observed that, if there is an incident wind at any angle other than parallel to the measurement axis, there will be great influence of the structure in the measurements. Also, Bucci et al. [17] and del Valle et al. [18] proposed very similar mechanical structures, but they did not assess the possibility of the wind becoming turbulent in the space between the transducers.

In this paper, we present an ultrasonic anemometer capable of measuring, in three dimensions, the wind intensity and direction. The instrument uses the technique of estimating the transit time of a sequence of ultrasound pulses. For this, we used six ultrasonic transducers in a structure forming three

The authors are with the Departamento de Engenharia Elétrica, Universidade Estadual de Londrina, Londrina, 86057-970, Brazil (e-mail: giancarlologaetalopes@gmail.com; davidjunior3e@gmail.com; franca@la2i.com; mbmorais@uel.br; mauromauriciomoreira@hotmail.com; pitstone.elias@hotmail.com).

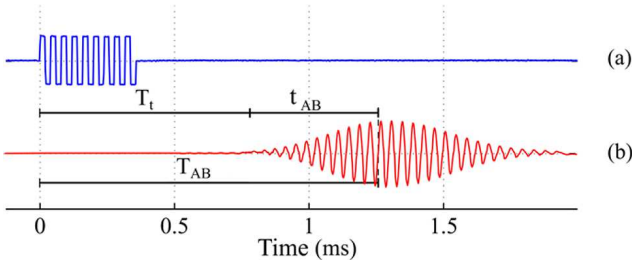


Fig. 1. Signals of transmission (a) and reception (b) of the ultrasonic wave.

non-orthogonal axes. We discuss constructive aspects of its physical structure, which was designed with a focus on the mechanical strength and on the reduction of the wind obstruction. We evaluated the advantages of using a non-orthogonal structure and cases in which the proposed mechanical structure may interfere in the wind passage. Also, the electronics used to excite and to condition the transducers' signals are presented. The equipment was calibrated in a wind tunnel for speeds up to 160 km/h and achieved a coefficient of determination  $R^2 = 0.999994$ . Field tests were also conducted and the proposed equipment was compared to other commercial ones.

## II. MEASUREMENT TECHNIQUE

In this study, to measure the wind speed, we used the technique of calculating the transit time a train of ultrasonic pulses. In this technique, a reference signal is applied to the transmitter transducer (A), which emits the ultrasonic signal, as illustrated in Figure 1. This signal propagates through air and is influenced by wind. Then, we analyze the time that the emitted signal takes to reach the receiver transducer (B) (Figure 1). This time ( $T_t$ ), which is called transit time, varies according to the sound propagation speed and to the wind speed and direction between the transducers. Unfortunately, usually there is a delay in the detection of the received signal. So, normally, the measured time is  $T_{AB}$ . Thus, as shown in Figure 1, there is a time referred to as  $t_{AB}$ , which is the electronic delay, that is, the difference between  $T_{AB}$  and  $T_t$ , which has to be estimated.

Considering the incidence of a wind with direction parallel to the axis formed by the transducers A and B, it is evident that it is possible to obtain the wind speed by the measurement of the ultrasonic wave transit time. On the other hand, in the case of incidence of wind non-parallel to the axis formed by the transducers (transmitter and receiver), it can be decomposed into two vectors: one parallel (whose magnitude is  $v_{AB}$ ) and another perpendicular to the axis. Thus, it is possible to consider the equation proposed by Schotland [23], i.e.,

$$v_{AB} = \frac{d_{AB}}{2} \left( \frac{1}{T_{AB} - t_{AB}} - \frac{1}{T_{BA} - t_{BA}} \right), \quad (1)$$

where  $d_{AB}$  is the distance between the transducers and  $t_{XY}$  and  $T_{XY}$  are, respectively, the electronic delay and the time that the ultrasonic pulse takes to travel from transducer X to Y.

From (1), it is noted that, to measure  $v_{AB}$ , it is necessary to measure the time it takes for the pulses to arrive in both

senses. Also, fortunately, it is not necessary to know the speed of sound. In addition, the determination of the times in (1) is strictly related to the correct choice of the reference zero-crossing of the received ultrasonic wave. This zero-crossing will determine the time when the transmitted wave really reaches the receiver. Thus, in our study, an initial calibration is performed which determines the position of this zero-crossing when the wind speed is zero. Thus, with the increase of the wind speed, this reference zero-crossing shifts and it indicates  $v_{AB}$ .

## III. GEOMETRY OF THE ANEMOMETER

From the study of Wieser et al. [22], it is known that the geometry of the mechanical structure supporting the transducers in an ultrasonic anemometer has great influence on the accuracy of the measurements. This is because, depending on the angle of incidence, the wind flow can be greatly disturbed by the structure. Therefore, the uncertainty increases as a function of the wind incidence angle. In fact, authors such as Cheng et al. [24] have proposed correction tables, according to the angle of incidence, for some specific models of commercial anemometers. This approach is satisfactory in some cases [25]. This problem is illustrated in Figure 2. In this figure, a basic structure with two ultrasonic transducers was simulated in an environment with wind of 162 km/h wind, flowing parallel to the axis formed by the two transducers. It is observed that the mechanical structure changes the wind speed between the two transducers, where the speed dropped to half. On the other hand, for measuring the three-dimensional wind speed, the ultrasonic transducers must be arranged in a geometry that allows the formation of at least three axes in the 3D space. One possibility is an arrangement in which the transducers form three orthogonal axes. Unfortunately, in this case, the phenomenon shown in Figure 2 will cause a greater influence on the speed measurement. This is because, if there is wind parallel to the earth plane, which is the most common condition in practice, and it happens that one axis be exactly in the condition shown in Figure 2, the other two orthogonal axes will lead to a measurement of almost zero, since the wind is perpendicular to the other axes. Thus, the wind speed measurement depends almost entirely on axis that is in the condition of Figure 2. Therefore, in this paper, we propose a non-orthogonal mechanical structure. This causes winds parallel to the earth plane (the most common situation in practice) not to have components near zero in two axes, when the third one is in the condition of Figure 2. It greatly reduces the uncertainty of the measurements.

As already discussed, for measuring the three-dimensional wind speed, the ultrasonic transducers must be arranged in a geometry that allows the formation of at least three axes in the 3D space. Depending on the angle of beam of the transducers, it is possible to make an arrangement in which two of them can receive the signal of a single transducer. In this case, with only three transducers, it is possible to form two axes in the 3D space. This allows the development of 3D anemometers with a reduced number of transducers. However, in practice it is more common to find ultrasonic transducers with narrow

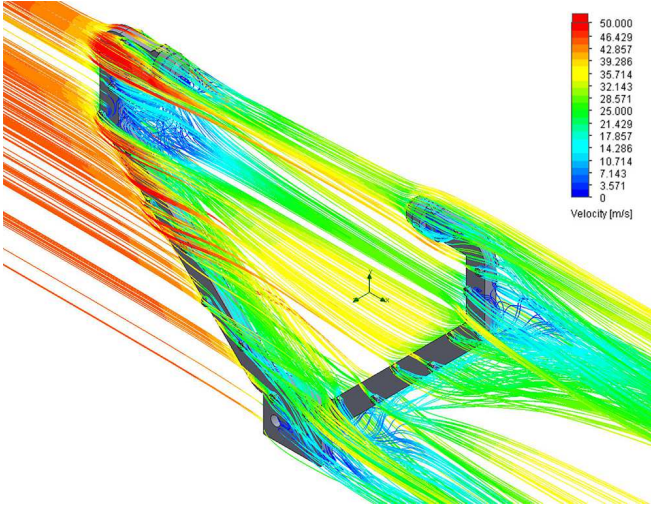


Fig. 2. Simulation of the wind flow when it blows parallel to a measurement axis.

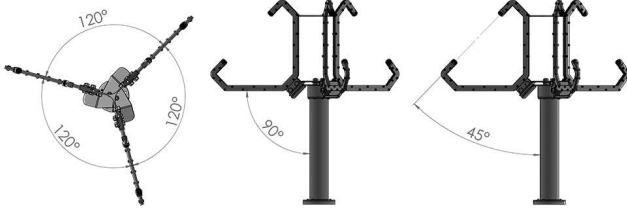


Fig. 3. Non-orthogonal positional geometry adopted in the developed prototype..

angles. Therefore, in this study, we opted for an arrangement in which each axis of the coordinate system is defined by a pair of ultrasonic transducers. Thus, it was necessary a total of six ultrasonic transducers, one pair for each axis 3D. More specifically, the pairs of transducers form the arrangement shown in Figure 3. In this arrangement, the two transducers are placed face to face, at a distance of 20 cm. In addition, the entire structure was assembled with stainless steel plates cut by laser, as illustrated in Figure 4. This allows all distances to be obtained with great accuracy, thus avoiding errors. Also, this approach makes the instrument more robust against mechanical shock. This is important because the instrument is designed for external use. Finally, to increase the mechanical strength of the structure, we inserted a truss in the upper part of the anemometer, joining all axes. This reduces the possibility of twisting and vibration of the structure with speeds above 100 km/h.

By analyzing the Figure 3, one may observe that the anemometer structure was made so that, in most cases, it does not obstruct the passage of the wind flow through the transducers. A flow parallel to the earth plane does not suffer obstruction of the structure. The same happens when the wind blows from up to down. The exception is when the flow occur from down to up. Figure 3 makes it clear that, in this case, the axes of the anemometer would be in a similar situation to that of Figure 2. Fortunately, this is an unusual situation in

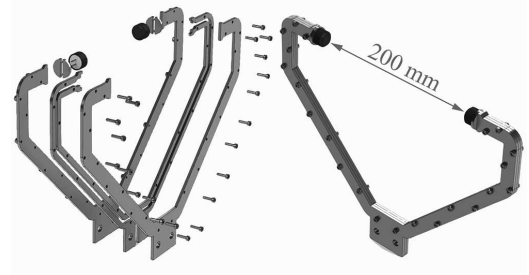


Fig. 4. Support of the transducers in exploded and isometric views.

practice. Furthermore, in an application where upward winds are common, one can use redundancy, that is, insert more pairs of transducers in a geometric arrangement that ensures at least one pair of transducers without obstruction.

The distance between the ultrasonic transducers belonging to a same axis is an important parameter of the design. If too small, depending on the intensity and direction of the wind, the fluid between the transducers will be very turbulent. On the other hand, a greater distance increases the ambiguity when estimating the transit time of the ultrasonic pulse. More specifically, as discussed in Section II, when measuring the transit time, it is necessary to choose a reference zero-crossing for the calculation of the wind speed and, the shorter the distance between the transducers, the smaller the total amount of zero-crossings from which the correct one has to be selected (less ambiguity).

In the proposed arrangement with six transducers, it is necessary that several unidimensional wind speed measurements be taken to generate a three-dimensional measurement. This will give the wind speed in the coordinate system formed by the non-orthogonal axes of the anemometer. Thus, it is necessary to apply an orthogonalization process to take the measurement to the usual orthogonal coordinate system. This process is described below.

Suppose the proposed topology of Figure 3 to be inserted into an orthogonal coordinate system. In this case, the position of each of the transducers composing the anemometer can be represented by a position vector  $\mathbf{T}_i$ , where  $i = 1, \dots, 6$ . Thus, the three versors characterizing the non-orthogonal coordinate system formed by the axes of the proposed anemometer are

$$\begin{aligned} \mathbf{u}_x &= \frac{\mathbf{T}_2 - \mathbf{T}_1}{\|\mathbf{T}_2 - \mathbf{T}_1\|}, \\ \mathbf{u}_y &= \frac{\mathbf{T}_4 - \mathbf{T}_3}{\|\mathbf{T}_4 - \mathbf{T}_3\|}, \\ \mathbf{u}_z &= \frac{\mathbf{T}_6 - \mathbf{T}_5}{\|\mathbf{T}_6 - \mathbf{T}_5\|}. \end{aligned} \quad (2)$$

In turn, this non-orthogonal system, in relation to the orthogonal one, is rotated by an angle  $\theta = -15^\circ$ . Thus, in the orthogonalization process, the versors in (2) must be multiplied by  $\mathbf{R}$ , that is,

$$\mathbf{u}'_x = \mathbf{R}\mathbf{u}_x, \quad \mathbf{u}'_y = \mathbf{R}\mathbf{u}_y \quad \text{e} \quad \mathbf{u}'_z = \mathbf{R}\mathbf{u}_z,$$

where

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

Thus, let  $\mathbf{V}_{NO}$  be a vector which represents the wind speed in the non-orthogonal coordinate system formed by axes of the anemometer of Figure 3. Then, the same vector in the orthogonal coordinate system is given by

$$\mathbf{V}_O = \mathbf{V}_{NO} \mathbf{M}^{-1}, \quad (3)$$

where

$$\mathbf{M} = \begin{bmatrix} \mathbf{u}_x^T \\ \mathbf{u}_y^T \\ \mathbf{u}_z^T \end{bmatrix}.$$

Therefore, in order to obtain the orthogonal wind speed from a non-orthogonal topology, we must multiply a matrix containing the wind speeds obtained in the unusual system by an orthogonalization matrix. In this study, this operation was embedded in the developed firmware.

#### IV. CONDITIONING OF THE TRANSDUCERS

In the proposed methodology, the same ultrasonic transducer is used at different times as a transmitter and also as a receiver. Thus, each transducer has both an electronic circuit responsible for the emission and another one in charge of the reception, as illustrated in Figure 5. The transducer used in this study was the 400EP18A, from Prowave. It operates at a frequency of 40 kHz and is hermetic, which allows its use in external environments. The circuit designed for excitation of the transducer is shown at the top of Figure 5. In this circuit, the signal generated by a microcontroller (STM32F429, from STMicroelectronics) is applied to R1 and passes through a non-isolated driver, U1, which is used for protection of the microcontroller. Then, the signal is applied to a MOSFET, which excites a pulse transformer (Figure 5). This transformer (K4000004, from Prowave) amplifies the excitation signal. This is because, for being hermetic, the transducer used has a lesser ability to vibrate. Thus, we excited it with pulses of 100 V peak-to-peak. Also, before reaching the transformer, the excitation signal passes through an RC low-pass filter formed by R4 and C2. This filter has cutoff frequency of 7 Hz and has the function of filtering the noise present in the system power supply. In turn, the component D2 is a zener diode and causes the voltage induced by the primary of the transformer during its unloading to be 13 V. This is very important because it causes less distortion in the secondary of the transformer, which is the signal responsible for exciting the transmitting transducer. Empirically we observed that, without the zener diode, the RMS value of the wave applied to the transducer is smaller, resulting in a lower excitation amplitude and causing the reception signal to be more noisy and of lower intensity. Finally, R5 and C3 have the function of providing an impedance matching between the transformer and the transducer, so reducing the distortion and increasing the amplitude of the excitation signal. This signal is then applied to the transmitter transducer, so that an ultrasonic pulse is transmitted and reaches the corresponding receiver transducer.

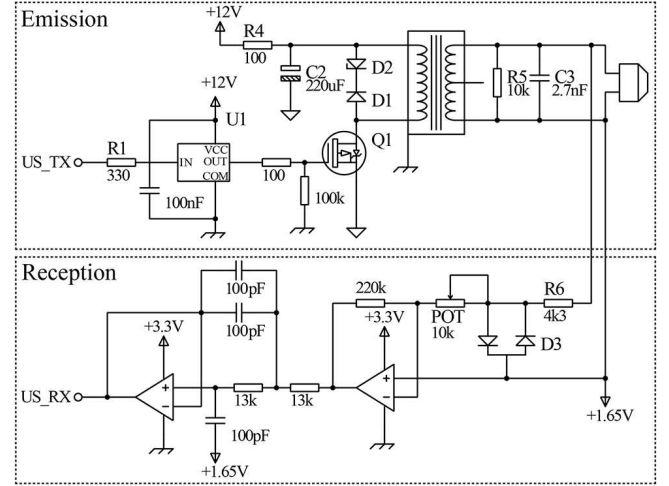


Fig. 5. Transducers conditioning circuit.

Then, this generates an electrical signal which is conditioned by the part of the circuit shown in the bottom of Figure 5.

In the bottom part of the circuit of Figure 5, the double diode D3 and the resistor R6 protect the circuit from high voltages<sup>1</sup>. They are used so that, when the transducer is working as a transmitter, then the signal of 100 V, used to excite it, does not reach the receiving circuit. On the other hand, when the transducer is used as a receptor, the signal arriving has a much small amplitude. Therefore, an inverting amplifier amplifies the reception signal 22 times or more (depending on the adjustment of the potentiometer POT<sup>2</sup>). Next, the noises are eliminated by a second-order low-pass filter, with Sallen-Key topology, unity gain, Butterworth response and cutoff frequency of 86 kHz.

Since there are six ultrasonic transducers in the proposed anemometer, then six circuits as the one of Figure 5 are required. In the design of the corresponding printed circuit board (PCB), an important measure to be taken is the separation of the grounds of the two circuits of Figure 5. It attenuates the noise arising from the power supply. Also, it is appropriate to design a double-sided PCB with, for example, six emitting circuits on the lower face, while the six receptors are placed on top of the same board.

#### V. MEASUREMENT PROCEDURE

Based on what has been presented, is possible to describe the procedure taken by the equipment to perform a wind speed measurement as follows..

- 1) The microcontroller generates twenty pulses (duty cycle 50 % and frequency 40 kHz) which are applied to  $US\_TX$  in the circuit of Figure 5.
- 2) These pulses pass through the transmission circuit (Figure 5) and are converted into an ultrasonic signal by the transmitter transducer.

<sup>1</sup>Note that the receiver circuit has an offset voltage of 1.65 V. This is necessary so that the signal generated by the receiver transducer is completely positive.

<sup>2</sup>The adjustment of POT is done so that the resulting signal at the output of the circuit has a maximum amplitude of 1.65 V peak-to-peak.





Fig. 6. Developed printed circuit board.

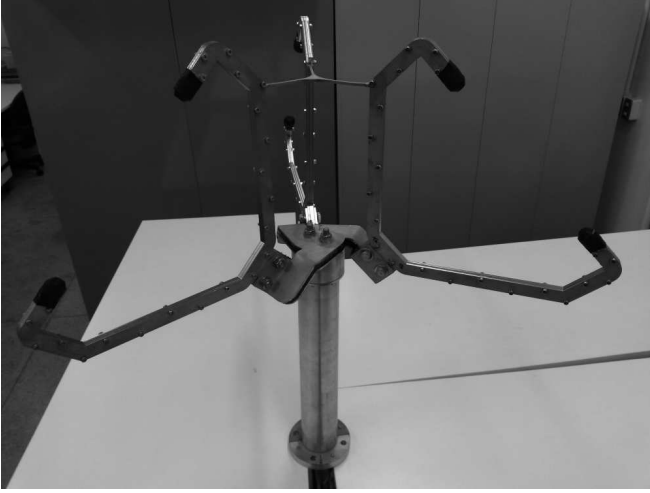


Fig. 7. Developed prototype of the 3D ultrasonic anemometer.

- 3) After propagating through the air being influenced by the wind, this signal reaches the receiver transducer and is converted back into an electrical signal. This in turn is conditioned by the circuit of Figure 5 and digitized by the microcontroller at the point  $US\_RX$ , which measures the transit time.
- 4) The previous steps are repeated in order to measure the transit time in the opposite sense, and then the wind speed is calculated by (1). (Up to this point, the actions are carried out simultaneously in the three non-orthogonal axes.)
- 5) The orthogonalization of the wind speed is done by (3).
- 6) The cycle is repeated 50 ms after the end of transmission of the ultrasonic signal.

## VI. RESULTS

Figure 6 shows the printed circuit board comprising six circuits identical to the one of Figure 5. In the assembling of the anemometer, this board is inserted into an aluminum tube, just below the mechanical arrangement which supports the six transducers (Figure 7). As already discussed, the anemometer is intended to be exposed outdoors. Thus, the mechanical pieces were made of stainless steel and aluminum.



Fig. 8. Experimental arrangement in the wind tunnel used in the tests.

### A. Calibration

Calibration was performed in the wind tunnel of the Construction Aerodynamics Laboratory at the Federal University of Rio Grande do Sul (UFRGS), in Porto Alegre, Brazil. Figure 8 shows the equipment during calibration. The tunnel has dimensions of  $1.30 \times 0.90 \times 9.32$  m and the maximum wind speed is 162 km/h. The reference speed is measured using a micromanometer, model ManoAir 500, by means of the difference of pressures between two piezometric rings installed in the tunnel, taking into account the environmental conditions. During calibration, the ambient temperature was 21.7 °C and developed equipment was inserted right in the center of the tunnel. Thus, the wind flow is greater and disturbances and oscillations are smaller. In the procedure, the wind speed increased from 13 to 160 km/h. The collected data are presented in Table VI-A and Figure 9. (The expanded uncertainties presented were obtained from the products of the combined uncertainty and a coverage factor  $k = 2$ , for a confidence level of approximately 95%.) In this case, the coefficient of determination obtained was  $R^2 = 0.999994$ . In Table VI-A, one can observe a relatively high error, reaching about 25 km/h, in the speed of 160 km/h. However,  $R^2$  can be considered unitary and it becomes clear that, after the proper calibration, the error between the reference method and the anemometer developed is almost null.

### B. Field tests

Also, comparative tests were carried out between the developed prototype and a commercial equipment, the WindMaster 3D, from Gill Instruments. The tests were done by varying the wind speed randomly, with both equipments positioned side by side. In these tests, we evaluated the turbulence in the wind flow incident on the anemometer and the possible influence of the structure on the wind speed measurements. As discussed in Section III, when there is an incident wind parallel to the measurement axis, it suffers interference of the anemometer structure. This causes the wind between the transducers to be turbulent and to have a reduced intensity.



TABLE I  
COMPARATIVE TEST CONDUCTED IN THE WIND TUNNEL.

Wind Speed (km/h)	Prototype (km/h)	Expanded uncertainty (km/h)
13.905	16.563	2.637
21.532	25.414	1.773
32.405	37.963	1.401
43.302	50.504	1.408
54.103	62.886	1.566
65.057	75.521	1.792
76.073	88.115	2.049
86.830	100.771	2.312
97.601	113.247	2.583
108.228	125.550	2.854
118.819	137.722	3.127
129.476	149.894	3.403
140.039	162.068	3.677
150.438	174.300	3.948
160.159	185.808	4.201

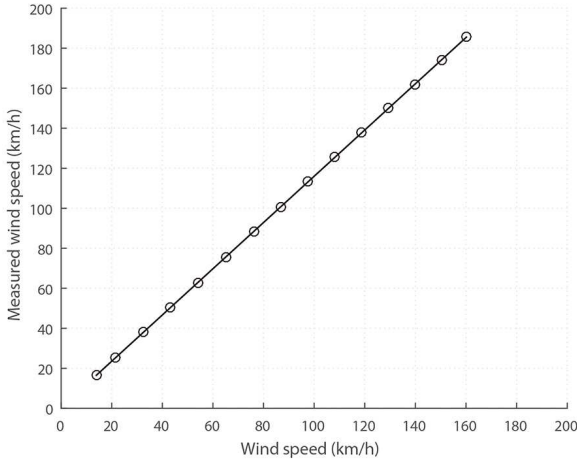


Fig. 9. Test conducted in the wind tunnel.

Thus, to corroborate what has been discussed in Section III, we also built a prototype similar to the proposed anemometer, but with three orthogonal axes. Figure 10 shows a comparative linear regression between the commercial equipment and the developed prototype, with orthogonal topology, in which the incident wind is parallel to one axis. The coefficient of determination obtained was  $R^2 = 0.9789$ . This  $R^2$  is low and demonstrates that, in fact, the anemometer structure influences the wind speed measurements. Furthermore, the same test was also performed with the anemometer with the non-orthogonal structure. The result of this test is shown in Figure 11. Now, the resultant coefficient of determination was  $R^2 = 0.9954$ . It shows that, in this case, the non-orthogonal structure led to a lower error. This is because, due to the topology of the developed anemometer, the wind incident on the prototype suffers less interference of the structure.

## VII. CONCLUSION

we present in this paper, a tridimensional ultrasonic anemometer designed to determine high intensity winds, which

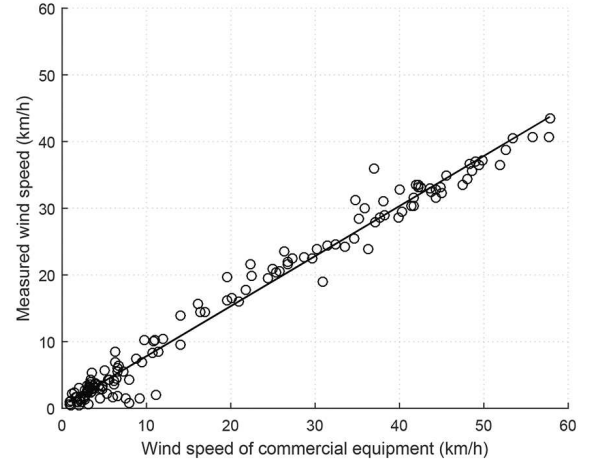


Fig. 10. Comparative test with the commercial equipment and incident wind parallel to one measurement axis.

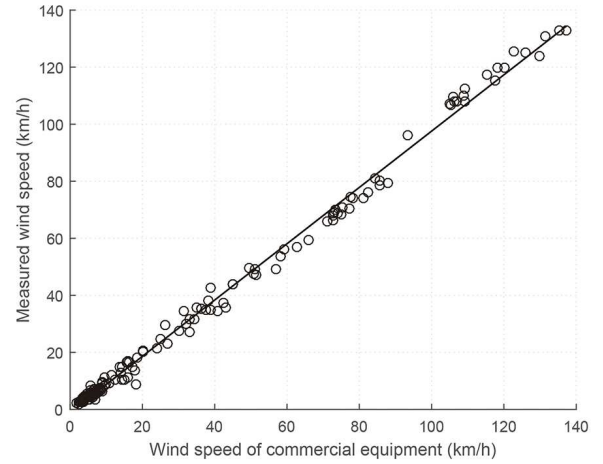


Fig. 11. Comparative test with the commercial equipment.

is able to perform measurements up to 160 km/h with excellent accuracy. A study of the structural influence of the equipment on the measurements was carried out, allowing the development of a prototype with a positional topology of the transducers that does not affect the wind flow to be measured, therefore increasing its reliability. The operating principle of the equipment, based on the calculation of the ultrasonic wave transit time, and the method of excitation of the ultrasonic transducers, were effective in the tests that were conducted. Also, from the design parameters that have been presented, one can say that the developed equipment has an excellent accuracy and may, in certain conditions, be considered more accurate than the commercial equipment used in the tests. This can be stated considering the results obtained in the wind tunnel.

## REFERENCES

- [1] H. Ishida, K. Yoshikawa, and T. Moriizumi, "Three-dimensional gas-plume tracking using gas sensors and ultrasonic anemome-

- ter,” in *Proceedings of IEEE Sensors, 2004*. IEEE, 2004, pp. 1175–1178.
- [2] T. Ushiku, N. Satoh, H. Ishida, and S. Toyama, “Estimation of Gas-Source Location Using Gas Sensors and Ultrasonic Anemometer,” in *2006 5th IEEE Conference on Sensors*. IEEE, oct 2006, pp. 420–423.
- [3] P. Olmos, “Ultrasonic velocity meter to evaluate the behaviour of a solar chimney,” *Measurement Science and Technology*, vol. 15, no. 7, pp. N49–N53, jul 2004.
- [4] G. A. L. Araujo, R. T. L. Junior, R. C. S. Freire, I. S. S. Silva, J. F. da Silva, Y. S. C. Catunda, and E. A. N. Carvalho, “Ultrasonic Anemometer for the Measurement of Respiratory Flow in the Forced Oscillation Technique,” in *2007 IEEE International Workshop on Medical Measurement and Applications*. IEEE, may 2007, pp. 1–4.
- [5] M. Comes, P. Drumea, M. Blejan, I. Dutu, and A. Vasile, “Ultrasonic Flowmeter,” in *2006 29th International Spring Seminar on Electronics Technology*. IEEE, may 2006, pp. 386–389.
- [6] W.-j. Zhu, K.-j. Xu, M. Fang, W. Wang, and Z.-W. Shen, “Mathematical Modeling of Ultrasonic Gas Flow Meter Based on Experimental Data in Three Steps,” *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, vol. 65, no. 8, pp. 1726–1738, aug 2016.
- [7] J. J. da Silva, M. G. Wanzeller, P. de Almeida Farias, and J. S. da Rocha Neto, “Development of Circuits for Excitation and Reception in Ultrasonic Transducers for Generation of Guided Waves in Hollow Cylinders for Fouling Detection,” *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, vol. 57, no. 6, pp. 1149–1153, jun 2008.
- [8] H. Cleugh, J. Miller, and M. Böhm, “Direct mechanical effects of wind on crops,” *Agroforestry Systems*, vol. 41, no. 1, pp. 85–112, 1998.
- [9] S. Åkesson and A. Hedenström, “Wind selectivity of migratory flight departures in birds,” *Behavioral Ecology and Sociobiology*, vol. 47, no. 3, pp. 140–144, 2000.
- [10] C. Scruton, “Wind effects on structures,” *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers*, vol. 185, no. 1, pp. 301–317, 1970.
- [11] R. Wagner, I. Antoniou, S. M. Pedersen, M. S. Courtney, and H. E. Jørgensen, “The influence of the wind speed profile on wind turbine performance measurements,” *Wind Energy*, vol. 12, no. 4, pp. 348–362, 2009.
- [12] D. Banfield and R. Dissly, “A Martian sonic anemometer,” in *2005 IEEE Aerospace Conference*, vol. 2005. IEEE, 2005, pp. 641–647.
- [13] T. S. El-Madany, F. Griessbaum, G. Fratini, J.-Y. Juang, S.-C. Chang, and O. Klemm, “Comparison of sonic anemometer performance under foggy conditions,” *Agricultural and Forest Meteorology*, vol. 173, pp. 63–73, may 2013.
- [14] G. Aprilesi, G. De Cicco, and A. Taroni, “A Microprocessor-Based, Three Axes, Ultrasonic Anemometer,” in *1983 Ultrasonics Symposium*, vol. 384. IEEE, 1983, pp. 295–298.
- [15] D. Han and S. Park, “Measurement range expansion of continuous wave ultrasonic anemometer,” *Measurement: Journal of the International Measurement Confederation*, vol. 44, no. 10, pp. 1909–1914, 2011.
- [16] K. Kudo, K. Mizutani, and K. Itoga, “A Simple Technique for Realizing an Ultrasonic Anemometer Using a Loudspeaker,” *Japanese Journal of Applied Physics*, vol. 44, no. 6B, pp. 4407–4410, jun 2005.
- [17] G. Bucci, F. Ciancetta, E. Fiorucci, D. Gallo, C. Landi, and M. Luiso, “A low-cost ultrasonic wind speed and direction measurement system,” in *2013 IEEE International Instrumentation and Measurement Technology Conference (I2MTC)*. IEEE, may 2013, pp. 505–510.
- [18] M. P. del Valle, J. A. U. Castelan, Y. Matsumoto, and R. C. Mateos, “Low Cost Ultrasonic Anemometer,” in *2007 4th International Conference on Electrical and Electronics Engineering*, no. Iceee. IEEE, sep 2007, pp. 213–216.
- [19] D. Han, S. Kim, and S. Park, “Two-dimensional ultrasonic anemometer using the directivity angle of an ultrasonic sensor,” *Microelectronics Journal*, vol. 39, no. 10, pp. 1195–1199, oct 2008.
- [20] Z. Chen and Z. Li, “Robust Precise Time Difference Estimation Based on Digital Zero-Crossing Detection Algorithm,” *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, vol. 65, no. 8, pp. 1739–1748, aug 2016.
- [21] V. Hans and H. Windorfer, “Comparison of pressure and ultrasound measurements in vortex flow meters,” *Measurement*, vol. 33, no. 2, pp. 121–133, mar 2003.
- [22] A. Wieser, F. Fiedler, and U. Corsmeier, “The Influence of the Sensor Design on Wind Measurements with Sonic Anemometer Systems,” *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, vol. 18, no. 10, pp. 1585–1608, oct 2001.
- [23] R. M. Schotland, “The Measurement of Wind Velocity by Sonic Means,” *Journal of Meteorology*, vol. 12, no. 4, pp. 386–390, aug 1955.
- [24] X. Cheng, Z. Peng, F. Hu, Q. Zeng, W. Luo, Y. Zhao, and Z. Hong, “Measurement errors and correction of the UAT-2 ultrasonic anemometer,” *Science China Technological Sciences*, vol. 58, no. 4, pp. 677–686, apr 2015.
- [25] T. Nakai, H. Iwata, Y. Harazono, and M. Ueyama, “An inter-comparison between Gill and Campbell sonic anemometers,” *Agricultural and Forest Meteorology*, vol. 195–196, pp. 123–131, sep 2014.



**Giancarlo Michelino Gaeta Lopes** received the B.S. degree in electrical engineering and the master's degree in electrical engineering from the Universidade Estadual de Londrina, Londrina, Brazil, in 2012 and 2016, respectively. His current research interests include electronic instrumentation, ultrasonic transducers, embedded systems, and signal processing.



**David Pereira da Silva Junior** received the degree in Electrical Engineering from State University of Londrina (UEL), Brasil, in 2014, where he is currently pursuing the M.E. degree. His research interests include ultrasonic anemometers, electronic instrumentation, embedded systems, signal processing and photovoltaic solar energy.



**José Alexandre de França** received the degree in Electrical Engineering from Federal University of Campina Grande (UFCG), Brasil, in 1995; Master degree in Electrical Engineering from UFCG in 1997; Doctor degree in Electrical Engineering from Federal University of Santa Catarina (UFSC), Brazil, in 2005. He is currently professor and leader of the Laboratory of Automation and Intelligent Instrumentation (LA2I), State University of Londrina, Brazil. His areas of interest involves ultrasonic anemometers, soil moisture sensors, near infrared spectroscopy, electronic instrumentation, precision agriculture, calibration of cameras and computer vision.



precision agriculture.

**Maria Bernadete de M. França** received the degree in Electrical Engineering from the Federal University of Campina Grande (UFCG), Brazil, in 1996, Master degree in Electrical Engineering from UFCG, in 1998 and Doctor degree in Electrical Engineering from the University of Campinas (UNICAMP), Brazil, in 2015. Currently, she is a professor and researcher of the Laboratory of Automation and Intelligent Instrumentation, State University of Londrina, Brazil. Her research interests involve sensors, electronic instrumentation, microelectronics and pre-



**Maurício Moreira** received the degree in Electrical Engineering from Universidade Estadual de Londrina (UEL), Londrina, Brazil, in 2010 and Master degree in Electrical Engineering from UEL in 2013. Currently, he studies doctorate degree in Electrical Engineering at the same institution.

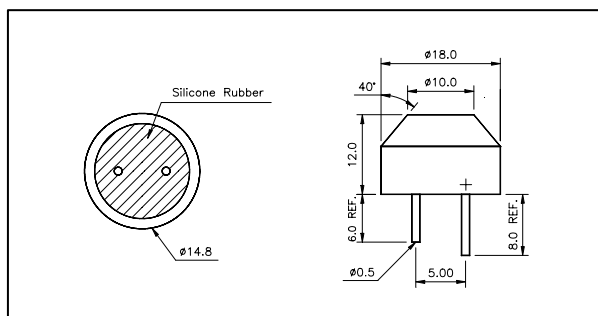


**Pitstone Elias** currently study Electrical Engineering at the University of North Paraná (UNOPAR), Brazil. Received the degree of Electronics Technician from State Center for Professional Education Professora Maria do Rosario Castaldi, Brazil. Currently, he is a collaborator of the Laboratory of Automation and Intelligent Instrumentation (LA2I), State University of Londrina, Brazil. His main areas of interest are electronic instrumentation and maintenance of electric and electronic machines and equipment.

## ANEXO A – *Datasheet* do transdutor ultrassônico 400EP18A



**Dimensions:** dimensions are in mm



## Specification

### 400EP18A

Transceiver

**Center Frequency**

40.0±1.0Khz

**Bandwidth (-6dB)** 400EP18A

2.0Khz

**Transmitting Sound Pressure Level**

108dB min.

at resonant frequency; 0dB re 0.0002μbar per 10Vrms at 30cm

**Receiving Sensitivity**

-75dB min.

at resonant frequency 0dB = 1 volt/μbar

**Nominal Impedance (Ohm)**

750

**Ringin (ms)**

1.2 max.

**Capacitance at 1Khz** ±20%

2000 pF

Temperature Compensated Type

4000 pF

**Max. Driving Voltage (Cont.)**

20Vrms

20 bursts, 25ms repetition rate

100Vpp

**Total Beam Angle** -6dB

85°

**Operation Temperature**

-30 to 80°C

**Storage Temperature**

-40 to 85°C

All specification taken typical at 25°C

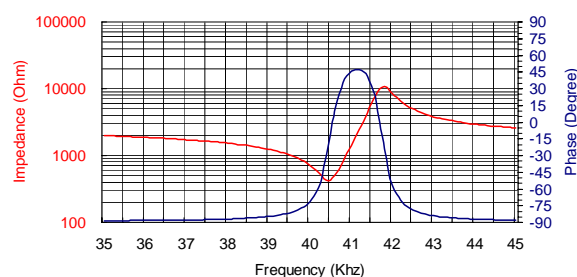
Both lead pins and lead wires output are available. Temperature compensated type is available upon request.

Models available:

1	400EP18A	Black Al. Housing
2	400EP18A0	Natural Al. Housing
3	400EP18AC	Temp. Compensated

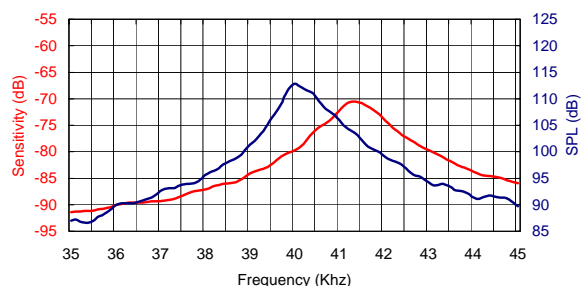
## Impedance/Phase Angle vs. Frequency

Tested under 1Vrms Oscillation Level

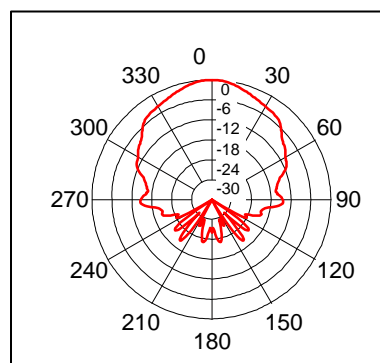


## Sensitivity/Sound Pressure Level

Tested under 10Vrms @30cm



**Beam Angle:** Tested at 40.0Khz frequency



## **ANEXO B – *Datasheet* do anemômetro ultrassônico WindMaster 3D**

## 3-Axis Ultrasonic Anemometer

### Key Features

- Precision 3-axis sonic anemometer
- 20Hz output rate
- 0-50m/s wind speed
- 0-359° wind direction
- U, V, W vector outputs
- Sonic temperature output
- Aluminium/Carbon fibre construction
- Optional custom calibration

The Gill WindMaster is a precision anemometer offering three-axis wind measurement data. This instrument will monitor wind speeds of 0-50m/s and provides sonic temperature, speed of sound and U, V & W vector outputs at 20Hz (32Hz optional). This anemometer is of aluminium/carbon fibre construction and is ideal for the understanding of turbulent flows, surface energy balance and scalar fluxes. Each WindMaster can be calibrated with an optional Gill wind tunnel test to provide optimum performance.

This 3D sonic anemometer is ideally suited to the measurement of air turbulence around bridges, buildings, wind turbine sites, building ventilation control systems, meteorological and flux measurement sites.



#### WIND SPEED

Range	0 - 50 m/s
Resolution	0.01 m/s
Accuracy*	<1.5% RMS @12 m/s
Accuracy*	<1% RMS @12 m/s (Custom)

#### DIRECTION

Range	0 - 359°
Resolution	0.1°
Accuracy	2° @12 m/s
Accuracy	0.5° @12 m/s (Custom)

#### SONIC TEMPERATURE

Range	-40°C to +70°C
Resolution	0.01°C
Accuracy	-20°C to +30°C within ±2°C of ambient temperature

#### SPEED OF SOUND

Range	300-370 m/s
Resolution	0.01 m/s
Accuracy	< ±0.5% @ 20°C

#### MEASUREMENT

Internal sample rate	20 Hz or 32 Hz
Output Parameters	1, 2, 4, 8, 10, 16, 20 & 32 (Option) Hz
Units of Measure	m/s, mph, kph, knots, ft/min
Formats	UVW, Polar or NMEA
Averaging	Flexible 0-3600 s

#### DIGITAL OUTPUT

Communication	RS232, 422, 485, Binary
Baud Rates	2400 - 57600
Format	ASCII

#### ANALOGUE OUTPUTS - OPTIONAL

Resolution 12 bits or 14 bits	4 channels available
Selectable Range	User selectable full scale wind speed
Output type	0-20mA, 4-20mA, 0-5V, ±2.5V, ±5V

#### ANALOGUE INPUTS - OPTIONAL

Resolution 12 bits or 14 bits	Up to 4 single ended or 2 differential
Input Type	±5V

#### POWER REQUIREMENT

Anemometer	9-30 VDC (55mA @ 12 VDC)
------------	--------------------------

#### MECHANICAL

Weight	1.0 kg
Size	750mm x 240mm

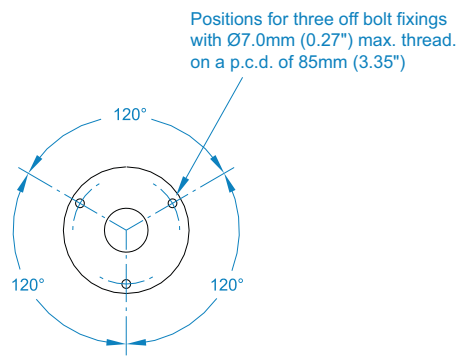
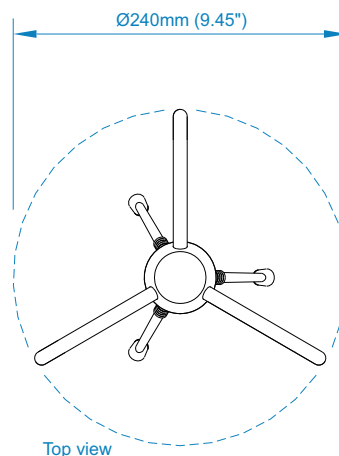
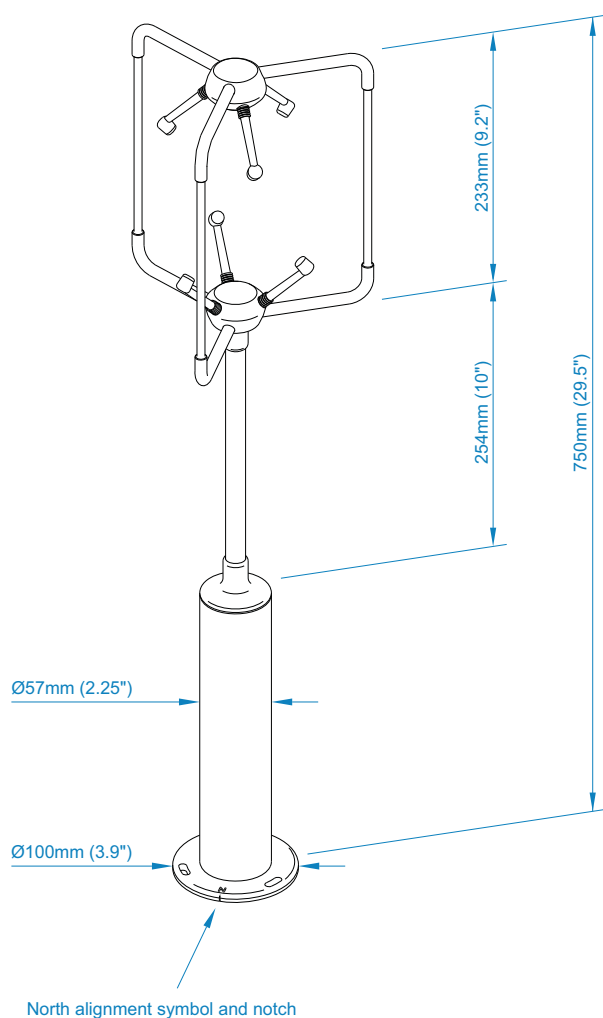
#### ENVIRONMENTAL

Protection Class	IP65
Operating Temp	-40°C to +70°C
Humidity	< 5% to 100% RH
Precipitation	300mm/hr
EMC	BS EN 61000 - 6 - 3 (Emissions) BS EN 61000 - 6 - 2 (Immunity)

\*Accuracy spec applies for wind speed, and for wind incidence up to ±30° from the horizontal

## Typical Applications

- Power Lines
- Bridges
- Viaducts
- Building ventilation control systems
- Measurement Masts
- Skyscrapers
- Wind Turbine Test Sites
- Meteorological & Flux measurement sites



This product is in continuous development and therefore specifications may be subject to change without prior notice.

# GILL

### Gill Instruments

Saltmarsh Park, 67 Gosport Street  
Lymington, Hampshire SO41 9EG  
United Kingdom

Tel: +44 (0) 1590 613 500  
Fax: +44 (0) 1590 613 501  
info@gillinstruments.com



[www.gillinstruments.com](http://www.gillinstruments.com)

1590-0001 Iss 3

Copyright © Gill Instruments 2015

Gill Instruments Ltd, Reg No. 2281574  
Registered Office: The George Business Centre, Christchurch Road, New Milton, BH25 6QJ