



CENTRO UNIVERSITÁRIO SALESIANO DE SÃO PAULO
UNISAL – *CAMPUS* DOM BOSCO

Andres Kuajara Ferraz de Camargo

Caíque Santos Lima

Marcelo Santos de Oliveira

DESENVOLVIMENTO DE UM PROTÓTIPO DE ANEMÔMETRO DE COPOS

Americana

2019

Andres Kuajara Ferraz de Camargo
Caíque Santos Lima
Marcelo Santos de Oliveira

DESENVOLVIMENTO DE UM PROTÓTIPO DE ANEMÔMETRO DE COPOS

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado como exigência parcial
para a obtenção do grau de Bacharel em
Engenharia Elétrica - Modalidade
Eletrônica no Centro Universitário
Salesiano de São Paulo.
Orientador: Prof. Me. Carlos Alberto
Medon Dias Ferraz.

ANDRES KUAJARA FERRAZ DE CAMARGO

CAIQUE SANTOS LIMA

MARCELO SANTOS DE OLIVEIRA

Desenvolvimento de um protótipo de anemômetro de copos

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado
como exigência parcial para obtenção do grau de
Engenheiro Eletricista Modalidade Eletrônica no
Centro Universitário Salesiano.

Orientador: Prof. CARLOS ALBERTO M. D.
FERRAZ

Trabalho de Conclusão de Curso defendido e aprovado em 10/12/2019 pela
comissão julgadora:



Prof. Mº. CARLOS ALBERTO M. D. FERRAZ /UNISAL (Orientador)



Prof. Dr. MARCELO MARTINS /UNISAL



Prof. Mº. EUGENIO BENITO JUNIOR /UNISAL

Camargo, Andres Kuajara Ferraz de
Desenvolvimento de um protótipo de anemômetro de copos / Andres
Kuajara Ferraz de Camargo; Caíque Santos Lima; Marcelo Santos de
Oliveira. -- Americana, 2019.
57 f.

TCC (Engenharia Elétrica) -- UNISAL - CAMPUS DOM BOSCO, Americana,
2019.
Inclui bibliografia

1. Velocidade do vento. 2. Anemômetro mecânico. 3. Anemômetro de
copos. 4. Sensor de efeito Hall. 5. Movimento Circular Uniformemente
Variado. I. Lima, Caíque Santos . II. Oliveira, Marcelo Santos de .
III. Ferraz, Carlos Alberto Medon Dias (orient). IV. Título.

*Dedicamos este trabalho às nossas famílias pelo estímulo e compreensão;
a todos os professores que acreditaram em nossos potenciais;
e a todos que, direta ou indiretamente, contribuíram para conclusão de mais
esta etapa em nossas vidas.*

AGRADECIMENTOS

Agradecemos ao Centro Universitário Salesiano de São Paulo, que nos possibilitou realizar este trabalho.

A todos os professores que contribuíram para o nosso enriquecimento intelectual e cultural ao longo desses cinco anos de graduação. Em especial ao nosso antigo orientador, Prof.^o Dr.^o Werner Martins Vieira, e ao nosso orientador Prof.^o Me. Carlos Alberto Medon Dias Ferraz, pelo apoio, pelas conversas e discussões durante o processo de elaboração desta monografia.

Aos colegas de sala e a todos que, direta ou indiretamente, colaboraram para a conclusão deste trabalho.

Não sabendo que era impossível, ele foi lá e fez.

(Jean Cocteau, 1889)

RESUMO

O ponto de partida deste trabalho foi o estudo teórico de um anemômetro de copos. Com o objetivo de desenvolver um protótipo, foram analisados os requisitos de projeto com base nos parâmetros estabelecidos pela Organização Meteorológica Mundial (OMM). O arcabouço teórico incluiu o desenvolvimento mecânico e eletrônico de um anemômetro de copos. O projeto mecânico consistiu nos desenhos técnicos do protótipo, através de desenho assistido por computador (DAC; em inglês: *computer aided design* – CAD), e confecção, em Impressão 3D, de parte das peças que compõe o anemômetro de copos. O projeto eletrônico objetivou os diagramas elétricos e desenvolvimento do código-fonte em linguagem C++. O elemento de aquisição da velocidade do vento é um sensor de efeito Hall, que envia a quantidade de pulsos detectada a cada revolução dos copos. Através de um microcontrolador, os pulsos são transformados em velocidade linear a partir das equações que regem o Movimento Circular Uniformemente Variado (MCUV). Para validação do protótipo, foi realizada uma comparação das leituras do protótipo com um anemômetro portátil calibrado. A partir dos testes, concluiu-se que o protótipo apresentou desvios em relação ao anemômetro calibrado, que podem ter sido provocados por problemas estruturais do equipamento ou possíveis erros de cálculos.

Palavras-chave: Velocidade do vento. Anemômetro mecânico. Anemômetro de copos. Sensor de efeito Hall. Movimento Circular Uniformemente Variado.

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

$\alpha_i^{padrão}$ - Velocidade do vento (em m/s) para cada amostra do anemômetro de referência

$\alpha_i^{protótipo}$ - Valor da velocidade do vento (em m/s) para cada amostra do protótipo

AASC - *American Association of State Climatologists* (Associação Americana de Climatologistas)

ABS – Acrilonitrila Butadieno Estireno

BIT-Sal - Iniciação Tecnológica

CAD – *computer aided design* (desenho assistido por computador)

cm - centímetro

DCL - diagrama de corpo livre

EAP- Estrutura Analítica do Projeto

EPA- *Environmental Protection Agency* (Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos)

f - frequência obtida em função da quantidade de pulsos registrada em um período de observação

FC - Fator de correção

Hz - hertz

I/O- *Input/output* (entrada/saída)

I²C - *Inter-Integrated Circuit* (Circuito Inter-integrado)

IDE- *Integrated Development Environment* (ambiente de desenvolvimento integrado)

IPT- Instituto de Pesquisas Tecnológicas

km/h- quilômetro por hora

LTDA- sociedade de responsabilidade limitada

m- metro

m/s- metro por segundo

mA- miliampere

MAX- máximo

MCUV- Movimento Circular Uniformemente Variado

mi/h- milha por hora

min- minuto

MIN- mínimo

mm - milímetro

MTB - Ministério do Trabalho

n - número de amostras tomadas

NR- Norma Regulamentadora

OMM- Organização Meteorológica Mundial

ONU- Organização das Nações Unidas

PC- *personal computer* (computador pessoal)

R - raio da trajetória no anemômetro

rad/s- radiano por segundo

rpm- rotações por minuto

s- segundo

T -período, intervalo de tempo que o sensor magnético leva para completar uma volta pela trajetória circular dos copos do anemômetro

USB- *Universal Serial Bus* (porta universal)

v - velocidade do vento

VDC- *Voltage Direct Current* (tensão em corrente contínua)

WMO- *World Meteorological Organization* (Organização Meteorológica Mundial)

ω - velocidade angular

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	12
1.1. CONTEXTUALIZAÇÃO	12
1.2. OBJETIVO	13
1.2.1. objetivos Específicos	13
1.3. JUSTIFICATIVA	13
1.4. IMPORTÂNCIA DO TRABALHO	14
2. REVISÃO DA LITERATURA	15
2.1. DEFINIÇÕES	15
2.2. UNIDADES E ESCALA	15
2.3. REQUISITOS METEOROLÓGICOS	17
2.4. CALIBRAÇÃO DOS ANEMÔMETROS	18
2.5. REQUISITOS DE INSTALAÇÃO	18
3. ANEMÔMETROS	21
3.1. ANEMÔMETROS MECÂNICOS	21
3.1.1. anemômetro de copos	21
3.2. ANEMÔMETROS DE FIO-QUENTE	22
3.3. ANEMÔMETROS ULTRASSÔNICOS	23
4. METODOLOGIA	24
5. DESENVOLVIMENTO DO PROTÓTIPO	25
5.1. REQUISITOS DO PROJETO	25
5.2. DINÂMICA DO ANEMÔMETRO DE COPOS	26
5.3. DESENVOLVIMENTO MECÂNICO	28
5.4. DESENVOLVIMENTO DE SOFTWARE	33
5.5. DESENVOLVIMENTO DE HARDWARE	34
5.6. DESENVOLVIMENTO DE COMUNICAÇÃO	37
6. TESTES	39
6.1. TESTES INICIAIS	39
6.2. TESTES FINAIS	40
6.3. COMPARAÇÃO DO PROTÓTIPO COM ANEMÔMETRO CALIBRADO	41
6.3.1. objetivo do teste	41
6.3.2. materiais utilizados no teste	
6.3.3. métodos de ensaio	42
6.3.4. análise dos resultados obtidos	43
7. CONCLUSÃO	46
7.1. RECOMENDAÇÕES FUTURAS	47

REFERÊNCIAS	48
APÊNDICE A – Vista explodida do protótipo do anemômetro de copo	51
APÊNDICE B – Código-fonte	52
APÊNDICE C – Protótipo do Anemômetro de copos	54
ANEXO A – Primeira página do catálogo do rolamento de poliamida com esferas de vidro	55
ANEXO B – Primeira página do <i>datasheet</i> do sensor de efeito Hall US1881	56
ANEXO C – Primeira página do <i>datasheet</i> do microcontrolador ATtiny85	57

1. INTRODUÇÃO

1.1. CONTEXTUALIZAÇÃO

Os ventos são causados por diferenças de pressão ao longo da superfície terrestre em função de três fatores: a radiação solar recebida na Terra (que é maior nas zonas equatoriais do que nas zonas polares), o movimento de rotação e as variações sazonais de energia solar incidentes na Terra (JERVELL, 2008).

A velocidade do vento é uma entre as diversas variáveis meteorológicas medidas e aplicadas aos estudos de previsão do tempo. Além de aplicações na Meteorologia, a observação desta variável é importante para estudos de turbulência, difusão, e poluição do ar (MAZZARELA, 1972).

Na geração de energia eólica, uma das mais promissoras fontes de energias renováveis, é imprescindível estimar as características do regime de ventos de um determinado local, por meio de estudos e pesquisas referentes ao potencial eólico da área, que tragam segurança no retorno de investimento antes da construção de um parque eólico. A concretização desse tipo de projeto depende, portanto, substancialmente da medição da velocidade e direção do vento, com sensores de medição sensíveis e robustos (JERVELL, 2008).

A velocidade do vento pode ser afetada pela rugosidade da superfície criada pelos obstáculos, como: vegetação, construções e relevo montanhoso. Outro fator que interfere na medição de ventos é a distância vertical acima da superfície em que ela é medida (ANGELOCCI, 2002).

O regime de ventos é dado por sua velocidade e direção, onde a velocidade é dada pela componente horizontal em metro por segundo (m/s) ou quilômetro por hora(km/h) e a direção é definida pelo seu ponto de origem, com oito direções fundamentais: N, NE, NO, S, SE, SO, E e O.

A determinação quantitativa do vento em termos de sua velocidade (módulo) e direção chama-se anemometria (originada da palavra grega *anemós*, que significa vento) (SILVA, 2006) e o anemômetro é um instrumento utilizado para registrar a velocidade do vento.

1.2. OBJETIVO

Este trabalho teve como objetivo o desenvolvimento de um protótipo de um anemômetro de copos para a medição da velocidade do vento, que transmita dados fazendo uso do protocolo de comunicação I²C e seu funcionamento seja baseado no princípio da indução magnética, através de um ímã e um sensor de efeito Hall.

1.2.1. objetivos específicos

- Elaboração de projeto mecânico para confecção das peças que compõem o anemômetro;
- Elaboração de projeto eletrônico utilizando um sensor de efeito Hall que realizará a contagem das rotações, possibilitando o cálculo da velocidade do vento;
- Desenvolvimento de *software* embarcado por meio de microcontrolador ATtiny85, com implementação de protocolo de comunicação I²C;
- Construção de um protótipo para realização de teste de conceito.

1.3. JUSTIFICATIVA

Durante o desenvolvimento de uma estação meteorológica automática para um projeto de Iniciação Tecnológica (BIT-Sal), alguns instrumentos adquiridos, entre eles um anemômetro de copos, aparentavam certa fragilidade com relação à qualidade dos materiais e simplicidade construtiva. Esses fatores motivaram o grupo a iniciar uma pesquisa sobre o princípio de funcionamento de um anemômetro e a arquitetura de projeto para a construção de um protótipo.

Este trabalho teve a intenção de contemplar as etapas do processo do desenvolvimento mecânico e eletrônico, finalizando com a construção de um protótipo de anemômetro de copos. Desta forma, foi possível realizar um teste de conceito, que poderá definir a continuidade do projeto para uma próxima etapa: um estudo de viabilidade econômica para o desenvolvimento de um produto que possa ser colocado no mercado.

1.4. IMPORTÂNCIA DO TRABALHO

Os anemômetros são instrumentos de medição comumente aplicados em estações meteorológicas, no entanto, também possuem outras aplicações, como na área da segurança do trabalho, onde os anemômetros são utilizados para monitoramento constante dos ventos.

Os ventos podem apresentar riscos às atividades em ambientes externos, portanto, existem normas regulamentadoras que exigem o monitoramento da velocidade para que a atividade seja realizada com segurança.

De acordo com a NR 18 (MINISTÉRIO DO TRABALHO, 2018), em operações de movimentação de carga é obrigatório o uso de anemômetros de modo a alertar quanto aos riscos de se realizar trabalho sob intempéries provocadas pelo vento ou outras condições desfavoráveis no uso de guias, guindastes e pórticos.

Outro caso é a realização de trabalhos em altura e elevação de pessoas, regulamentada pela NR 12 (MINISTÉRIO DO TRABALHO, 2018), que obriga o uso de anemômetro para detecção da incidência de ventos que coloquem a atividade em risco.

A medição da velocidade do vento é também de grande utilidade nos processos de concretagem, onde as oscilações climáticas extremas, aliadas à baixa umidade do ar e ação do vento podem ocasionar o aumento da temperatura do concreto, causando retração plástica com consequente fissuração nas peças.

Os anemômetros também estão presentes na agricultura, em silos de armazenagem de grãos, na área naval e em estudos de viabilidade de parques eólicos (S&E, 2018).

2. REVISÃO DA LITERATURA

2.1. DEFINIÇÕES

O **vento de superfície** é considerado como uma grandeza vetorial que representa a direção e velocidade do vento. A **rajada** é definida como a máxima velocidade do vento em um intervalo de tempo específico; nos relatórios meteorológicos gerados a cada hora do dia, a rajada se refere à máxima velocidade do vento registrada na última hora completa (Organização Meteorológica Mundial - OMM, 2008).

A **Escala de Beaufort** quantifica os ventos e indica suas conseqüências. A **curva de calibração** é representada por uma linha reta em um gráfico no qual o eixo horizontal apresenta os valores gerados pelo instrumento e o eixo vertical apresenta os valores gerados pelo instrumento padrão (OMM, 2008).

2.2. UNIDADES E ESCALA

De acordo com a Organização Meteorológica Mundial (OMM) – em inglês: World Meteorological Organization (WMO) –, a velocidade do vento deve ser apresentada com uma resolução de 0,5 m/s. Nos relatórios meteorológicos sinóticos (resumidos), a velocidade é apresentada após calcular-se a média dos valores medidos no intervalo de 10 minutos.

A direção do vento é definida como a direção na qual o vento sopra, e é medida no sentido horário a partir do norte geográfico (norte verdadeiro) e a sua direção deve ser reportada através de um código de 01 a 36; por exemplo, o código 02 indica que a direção do vento está entre 15 e 25°.

A velocidade do vento refere-se à intensidade com que esses ventos são formados, que pode ser medida em metros por segundos (m/s), milhas por hora (mi/h) ou como força na Escala de Beaufort, conforme indicada na tabela 1 (FORSDYKE, 1981).

Tabela 1 – Escala de Beaufort

Grau	Designação	Velocidade do vento		Efeitos em terra
		m/s	km/h	
0	Calmo	<0,3	<1	Fumaça sobe na vertical
1	Aragem	0,3 a 1,5	1 a 5	Fumaça indica direção do vento
2	Brisa leve	1,6 a 3,3	6 a 11	As folhas das árvores movem; os moinhos começam a trabalhar
3	Brisa fraca	3,4 a 5,4	12 a 19	As folhas agitam-se e as bandeiras desfraldam ao vento
4	Brisa moderada	5,5 a 7,9	20 a 28	Poeira e pequenos papéis levantados; movem-se os galhos das árvores
5	Brisa forte	8 a 10,7	29 a 38	Movimentação de grandes galhos e árvores pequenas
6	Vento fresco	10,8 a 13,8	39 a 49	Movem-se os ramos das árvores; dificuldade em manter um guarda chuva aberto; assobio em fios de postes
7	Vento forte	13,9 a 17,1	50 a 61	Movem-se as árvores grandes; dificuldade em andar contra o vento
8	Ventania	17,2 a 20,7	62 a 74	Quebram-se galhos de árvores; dificuldade em andar contra o vento; barcos permanecem nos portos
9	Ventania forte	20,8 a 24,4	75 a 88	Danos em árvores e pequenas construções; impossível andar contra o vento
10	Tempestade	24,5 a 28,4	89 a 102	Árvores arrancadas; danos estruturais em construções
11	Tempestade violenta	28,5 a 32,6	103 a 117	Estragos generalizados em construções
12	Furacão	>32,7	>118	Estragos graves e generalizados em construções

Fonte: Departamentode Defesa Civil (2019).

2.3. REQUISITOS METEOROLÓGICOS

De acordo com a OMM, além de seguir as recomendações fornecidas pelo fabricante de cada anemômetro é necessário observar certas condições de medição, de modo a não haver interferência no processo de medição da velocidade do vento.

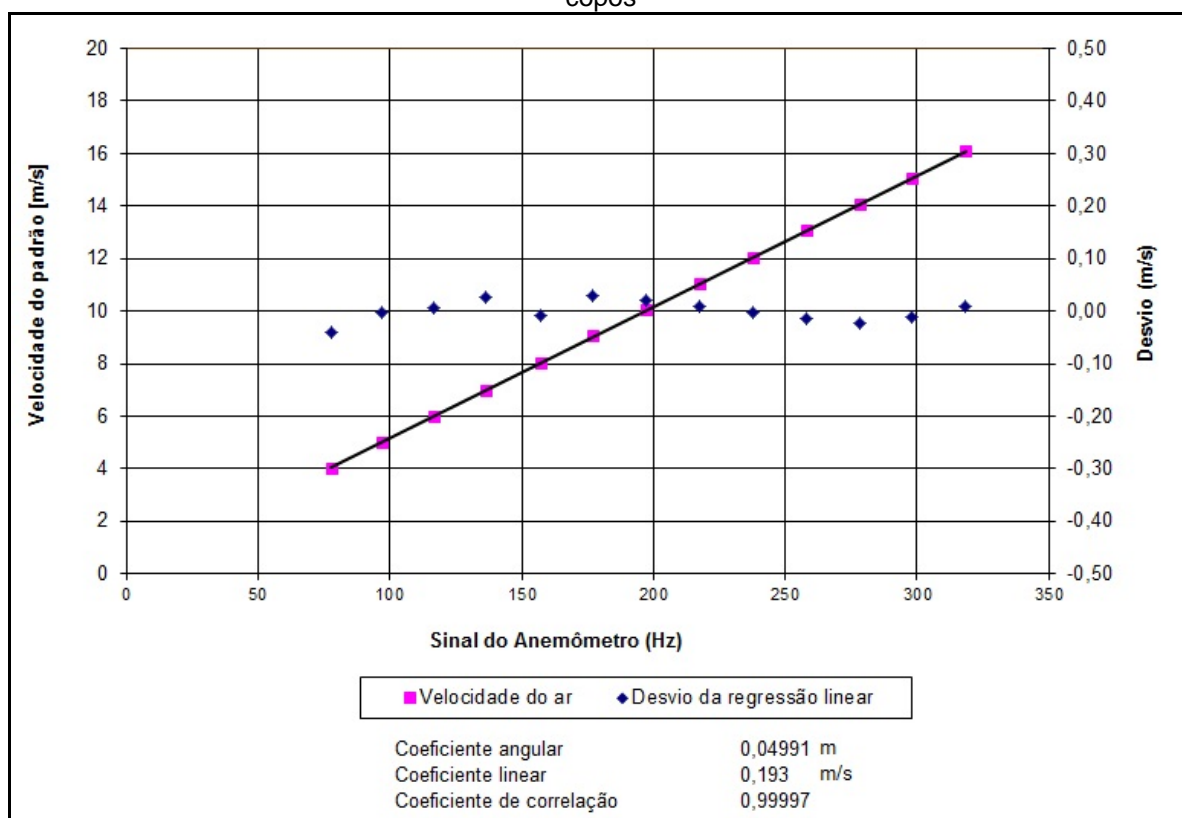
A medição deve ser realizada a partir de um ponto de grande exposição ao vento, distante de obstruções como: construções, árvores e montes. Caso isso não seja possível, o ponto de medição deve estar a uma boa distância de obstruções, ou seja, pelo menos dez vezes a altura da obstrução.

A OMM estabelece que em sistemas de medição de velocidade do vento bem projetados, a velocidade angular dos copos do anemômetro é diretamente proporcional a velocidade do vento.

Adicionalmente, nos anemômetros bem projetados, a curva de calibração independe da densidade do ar, eles possuem uma ampla faixa de operação além de serem facilmente reproduzíveis em nível industrial.

A curva de calibração apresentada na Ilustração 1 mostra que um anemômetro de copos bem projetado apresenta desvios da regressão linear próximo a 0 m/s.

Ilustração 1 – Curva de calibração de anemômetro de copos



Fonte: Instituto de Pesquisas Tecnológicas (2019).

2.4. CALIBRAÇÃO DOS ANEMÔMETROS

Próximo ao limiar de partida, isto é, quando a velocidade do vento é inferior a 4 m/s, a calibração dos anemômetros de copos pode desviar-se substancialmente da linearidade, se a haste que liga o copo ao eixo de rotação é muito mais longa que o diâmetro do copo (PATTERSON, 1926 *apud* OMM, 2008).

Os valores de performance e incertezas estabelecidos pela OMM agência especializada da Organização das Nações Unidas (ONU), para os instrumentos de medição de ventos estão descritos na Tabela 2:

Tabela 2 – Requisitos de incerteza de medição operacional e desempenho do instrumento¹

(1) Variável	(2) Faixa de operação comum	(3) Resolução	(4) Incerteza da medição	(5) Tempo de saída do sinal
velocidade	0 - 75 m/s	0,5 m/s	0,5 m/s para ≤ 5 m/s 10% para > 5 m/s	2 e/ou 10 min
direção	0 - 360°	1°	5°	2 e/ou 10 min
rajada	0,1 - 150 m/s	0,1 m/s	10%	3 s

Fonte: World Meteorological Organization (2008).

2.5. REQUISITOS DE INSTALAÇÃO

De acordo com a OMM, além de seguir as recomendações fornecidas pelo fabricante de cada anemômetro é necessário observar certas condições de medição, de modo a não haver interferência no processo de medição da velocidade do vento.

¹ A coluna 1 apresenta as variáveis básicas.

A coluna 2 fornece o intervalo comum para a maioria das variáveis; os limites dependem das condições climatológicas locais.

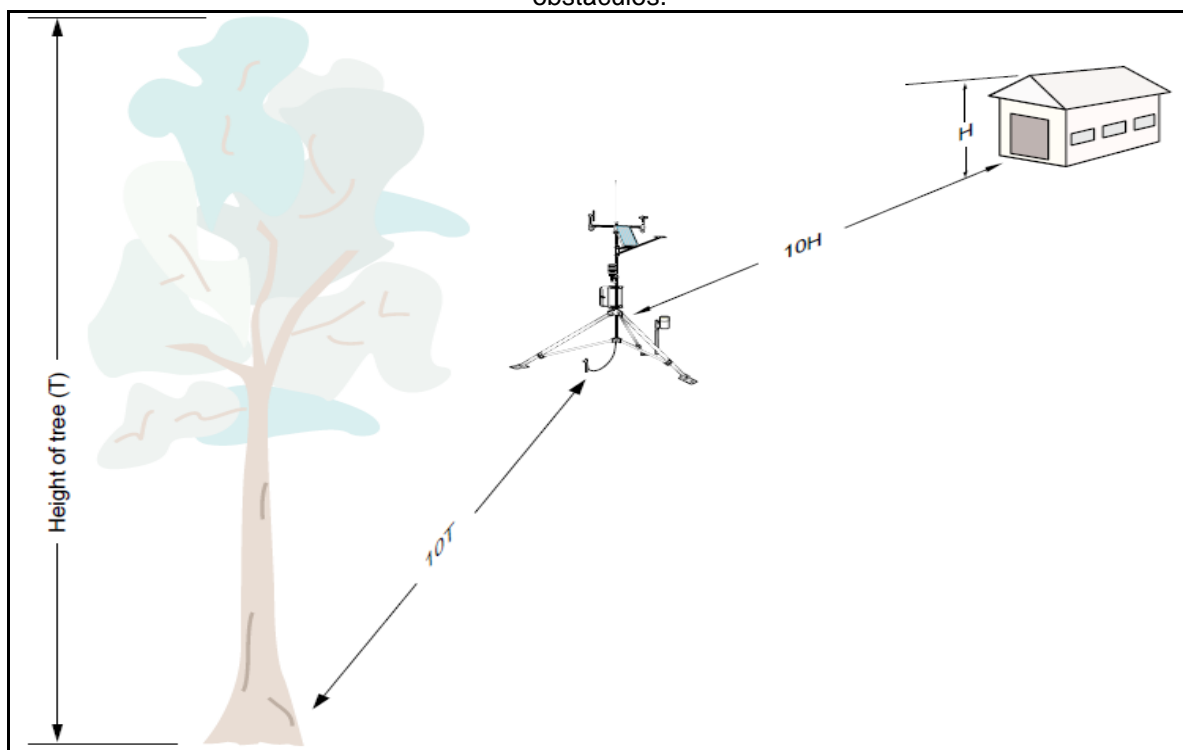
A coluna 3 fornece a resolução mais rigorosa determinada pelo Manual de Códigos (WMO-No. 306).

A coluna 4 fornece os requisitos de incerteza de medição recomendados para uso operacional geral.

A coluna 5 fornece o tempo em que deve-se resultar a medição de uma variável.

Os sensores de velocidade do vento (anemômetros) devem estar localizados em terrenos abertos, livres de bloqueios como edifícios ou árvores, respeitando uma distância horizontal de pelo menos 10 vezes a altura do obstáculo (WMO, 2008), como demonstrado na Ilustração 2:

Ilustração 2 – Distância horizontal entre sensor e obstáculos.



Fonte: Campbell (2019).

A velocidade do vento aumenta consideravelmente com a altura, particularmente em terrenos acidentados. Por esse motivo, segundo a OMM, define-se uma altura padrão de 10 metros acima do solo em terreno aberto para a instalação de anemômetros.

Classifica-se como terreno aberto uma área entre o anemômetro e o obstáculo de no mínimo 10 vezes a altura do obstáculo. Caso haja a necessidade de instalar o instrumento em um telhado, a altura de instalação deve ser no mínimo 1,5 vezes a altura da construção. A tabela 3 apresenta as alturas definidas por normas internacionais para a instalação de anemômetros.

Tabela 3 – Altura padrão para medição da velocidade do vento

3,0 m \pm 0,1 m (recomendado)	AASC
2,0 m \pm 0,1 m, 10,0 m \pm 0,5 m (opcional)	
10,0 m	WMO e EPA

Fonte: dos autores².

Se instalados na parte lateral de torres, recomenda-se manter uma determinada distância do instrumento com relação à torre, com a finalidade de evitar a turbulência causada pela torre.

Para torres cilíndricas deve se adotar uma haste com comprimento de 6 vezes o diâmetro da torre, sendo essa medida a partir do centro da torre. Para uma torre de treliça a turbulência é menor, dessa forma, se adota um comprimento de haste do suporte de 3,7 vezes o diâmetro da torre (OLIVEIRA, 2011).

²*The State Climatologist* (1985) Publication of the American Association of State Climatologists: Heights and Exposure Standards for Sensors on Automated Weather Stations, v. 9, No. 4 October, 1985.

EPA (1987). *On-Site Meteorological Program Guidance for Regulatory Modeling Applications*, EPA-450/4-87-013.

WMO (1983). *Guide to Meteorological Instruments and Methods of Observation*. World Meteorological Organization No. 8, 5th edition, Geneva Switzerland.

3. ANEMÔMETROS

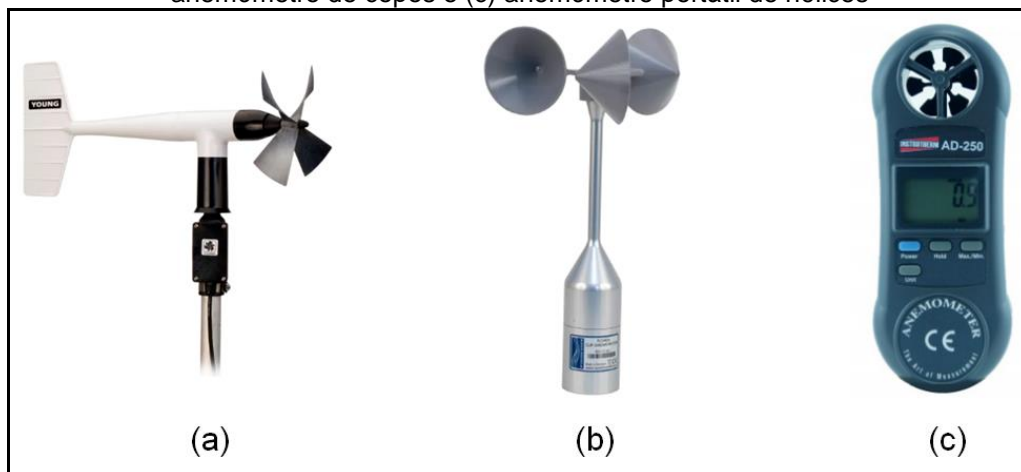
Dispositivos usados para medir a velocidade do vento e conforme a sua construção e seu princípio de funcionamento podem ser divididos em três categorias: anemômetros mecânicos, anemômetros de fio-quente e anemômetro ultrassônicos (BRAMER, 2018).

3.1. ANEMÔMETROS MECÂNICOS

São os mais baratos e amplamente utilizados em estudos ecológicos e em estações meteorológicas. A velocidade do vento é obtida em função das rotações dos copos ou das hélices do anemômetro. Os anemômetros desta categoria apresentam tempo de resposta lento quando comparados aos anemômetros de fio-quente e ultrassônicos (BRAMER, 2018).

A Ilustração 3 mostra os diversos tipos de anemômetros mecânicos.

Ilustração 3 – Anemômetros mecânicos. (a) Anemômetro de hélice com cata-vento de orientação, (b) anemômetro de copos e (c) anemômetro portátil de hélices



Fontes: Campbell Scientific Brasil (2019) e Instrutherm Instrumentos de Medição LTDA (2019).

3.1.1. anemômetro de copos

Segundo Lopez (2012), o anemômetro de copos totaliza o vento que passa em um determinado local num intervalo de tempo considerado. Este instrumento é de uso generalizado em função das suas características de construção. O anemômetro de copos fornece a velocidade do vento que é representada por uma equação linear, que será apresentada no capítulo 5 (equação 4 e 5).

O anemômetro de copos é formado por uma parte móvel e um mecanismo contador, onde a velocidade do vento é diretamente proporcional à velocidade de giro dos copos. A calibração deste instrumento pode ser realizada em um túnel de vento, que é possível se obter um fluxo uniforme e controlado do ar (LOPEZ, 2012).

Um sistema de medição do vento, não consiste apenas de um sensor, mas também de um sistema de processamento e registro dos dados. O processamento cuida do cálculo da média, dos desvios-padrão e valores extremos.

Simplicidade, robustez, facilidade de operação e manutenção são fatores importantes a serem considerados já que a maioria dos instrumentos meteorológicos está em uso contínuo ano após ano, expostos ao tempo e podem ser instalados longe de locais de reparação apropriados. A escolha de instrumentos meteorológicos que atendam aos fatores mencionados anteriormente pode aumentar o custo de instalação, que por sua vez pode ser atenuado no médio e longo prazo pelas despesas de comissionamento e manutenção.

3.2. ANEMÔMETROS DE FIO-QUENTE

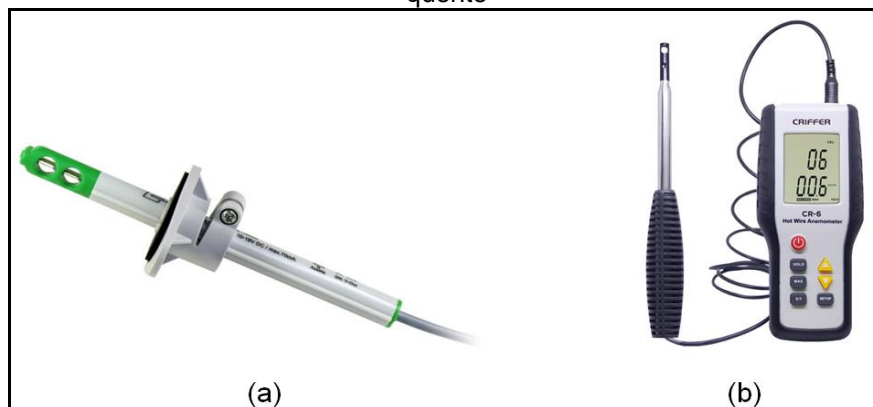
Ao contrário dos anemômetros mecânicos, esses dispositivos têm um rápido tempo de resposta e não possuem partes que se movimentam e geralmente são mais caros e, conseqüentemente, seu uso se restringe a aplicações mais específicas.

Os anemômetros de fio-quente são poucos intrusivos devido às pequenas dimensões do elemento sensível e podem ser instalados próximo ao chão ou dentro de vegetação, o que possibilita a medição do vento em pequena escala e os efeitos do microclima.

Seu princípio básico de funcionamento consiste em um fio que é eletricamente aquecido e resfriado pelo vento, onde a velocidade do vento é obtida através do cálculo da taxa de resfriamento (BRAMER, 2018).

A Ilustração 4 mostra alguns modelos de anemômetros de fio-quente.

Ilustração 4— Anemômetro de fio-quente. (a) Sensor de fio-quente e (b) anemômetro portátil de fio-quente



Fontes: Sigma Sensors(2019) e Hiseq Instrumentos de Medição LTDA (2019).

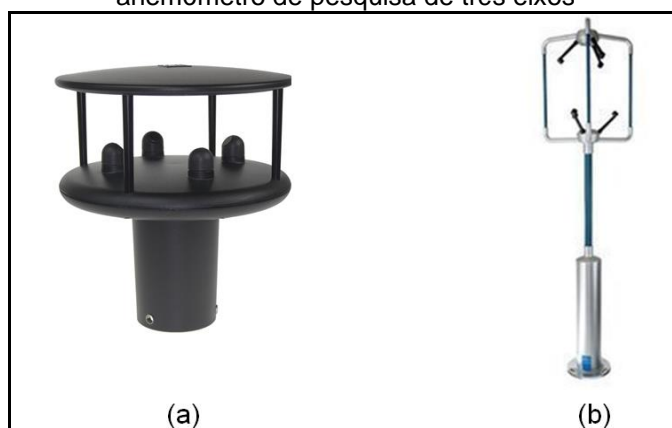
3.3. ANEMÔMETROS ULTRASSÔNICOS

Utilizam ondas ultrassônicas para determinar a velocidade instantânea do vento através da medição de quantas ondas passaram entre um par de transdutores e podem realizar medições com boas resoluções, 20 Hz ou até menos, o que os torna adequados para medições de turbulência.

O fato de não possuir partes móveis possibilita um longo período de exposição às intempéries, enquanto que a acurácia e confiança dos valores medidos pelos tradicionais anemômetros mecânicos são negativamente afetadas pelo ar salgado ou grande quantidade de poeira.

Esses dispositivos mostrados na Ilustração 5 são utilizados em estações meteorológicas, na navegação marítima, na aviação e em turbinas eólicas (BRAMER, 2018).

Ilustração 5 – Anemômetros ultrassônicos. (a) Anemômetro para análise em duas dimensões e (b) anemômetro de pesquisa de três eixos



Fontes: Tecnal (2019) e Sigma Sensors (2019).

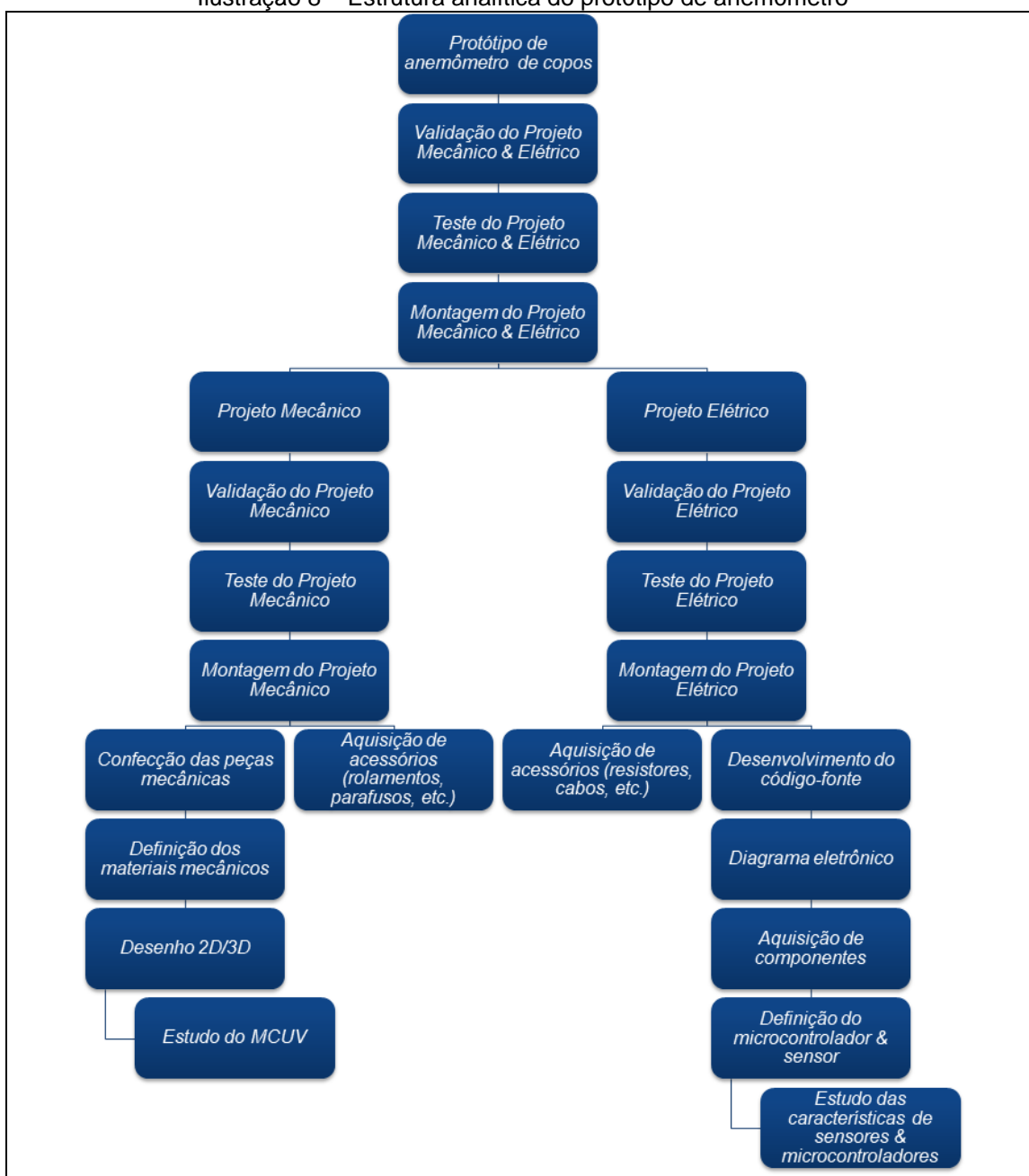
4. METODOLOGIA

Com o propósito de facilitar o gerenciamento das atividades necessárias para a conclusão do protótipo foi utilizada a Estrutura Analítica do Projeto (EAP).

A EAP é uma ferramenta utilizada para gerenciar um grande projeto dividindo-o em várias entregas menores, facilitando a gestão e a resolução dos desafios encontrados durante o desenvolvimento.

As fases do projeto foram distribuídas de forma ordenada e hierárquica a partir da EAP, conforme mostra a Ilustração 8.

Ilustração 8 – Estrutura analítica do protótipo de anemômetro



Fonte: dos autores.

5. DESENVOLVIMENTO DO PROTÓTIPO

O desenvolvimento do protótipo foi subdividido em cinco grandes grupos mostrados na Ilustração 9. A seguir, é tratado cada um destes grupos individualmente, abordando com mais detalhes suas respectivas características de projeto.

Ilustração 9 – Diagrama de desenvolvimento do protótipo



Fonte: dos autores.

5.1. REQUISITOS DO PROJETO

No intuito de orientar o desenvolvimento, o protótipo foi elaborado a partir dos seguintes requisitos básicos:

Buscando uma maior simplicidade de construção e a redução da quantidade de material, o protótipo contém 3 copos localizados ao redor de um eixo central que, ao coletar o vento, irão provocar a rotação do instrumento. O protótipo deve ser capaz de resistir à velocidades na faixa de 0 a 40 km/h.

No que se refere à medição, o protótipo deve ser capaz de medir velocidades do vento com precisão de 5% da velocidade do vento em regime estacionário e resolução de 0,5 m/s.

O protótipo deve transmitir os dados coletados utilizando o protocolo de comunicação I²C ou similar.

Como forma de validar o equipamento, deve ser conduzido um ensaio comparativo com um anemômetro calibrado e uma fonte de velocidade do vento.

5.2. DINÂMICA DO ANEMÔMETRO DE COPOS

Em um anemômetro de copos, mostrado na Ilustração 10, a velocidade é dada por um conjunto de três copos e o número de giros dos copos, que é diretamente proporcional à velocidade, é transformado em deslocamento por um sistema tipo odômetro.

Nos equipamentos digitais, cada rotação gera um pulso elétrico, que é captado por um sistema eletrônico de aquisição de dados. Cada pulso corresponde à distância de uma revolução, contando-se o número de pulsos em um determinado intervalo de tempo tem-se a distância percorrida pelo ar. Com a distância e o intervalo de tempo de medição calcula-se a velocidade média do vento. (ANGELOCCI, 2002).

Ilustração 10 – Anemômetro de copos utilizado em estações meteorológicas automáticas



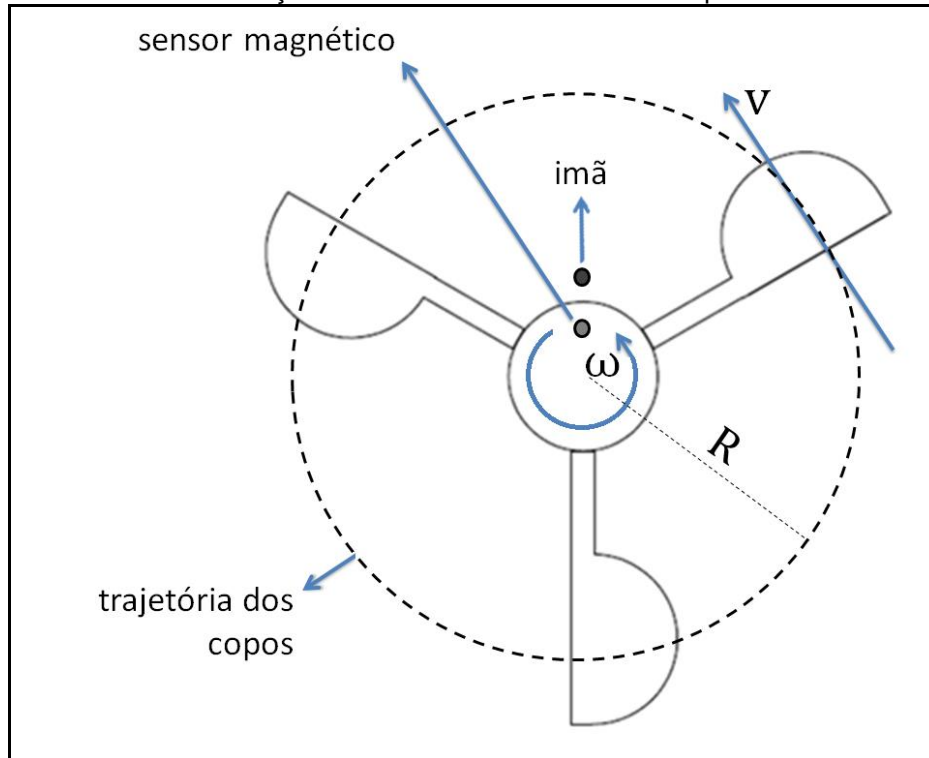
Fonte: Ciencia y Geofísica Grupo Igperu (2019).

Com o objetivo de facilitar a compreensão da dinâmica de funcionamento do anemômetro de copos, na Ilustração 11 é apresentado o diagrama de corpo livre (DCL).

O registro das revoluções é realizado por meio de um sensor magnético que envia pulsos para o microcontrolador a cada vez que o mesmo fica alinhado ao ímã.

O microcontrolador processa o sinal e calcula a velocidade do vento por meio de uma programação específica para este fim.

Ilustração 11 – DCL do anemômetro de copos



Fonte: dos autores.

Uma vez que a velocidade é constante e diferente de zero, a velocidade angular é dada pela expressão:

$$\omega = \frac{2\pi}{T} \text{ (rad/s)} \quad (1)$$

Na equação 1, T é o período, ou seja, o intervalo de tempo que o sensor magnético leva para completar uma volta pela trajetória circular dos copos e f é a frequência na unidade rpm (rotações por minuto) obtida em função da quantidade de pulsos registrada em um período de observação pré-estabelecido de 5 segundos, conforme a equação 2:

$$f = \frac{\text{Contagem de pulsos}}{\text{Período de observação}} \times 60 \text{ (rpm)} \quad (2)$$

Portanto, a velocidade angular ω pode ser obtida em função da frequência f em rpm, e do período de giro dos copos T , conforme a equação 3:

$$\omega = \frac{2\pi}{T} = 2\pi f = 2\pi \times \frac{rpm}{60} \text{ (rad/s)} \quad (3)$$

A velocidade linear dos copos é igual ao produto da velocidade angular pelo raio da trajetória no anemômetro R . A velocidade do vento v pode ser obtida em metro por segundo (m/s) ou em quilômetro por hora (km/h) conforme as equações a seguir:

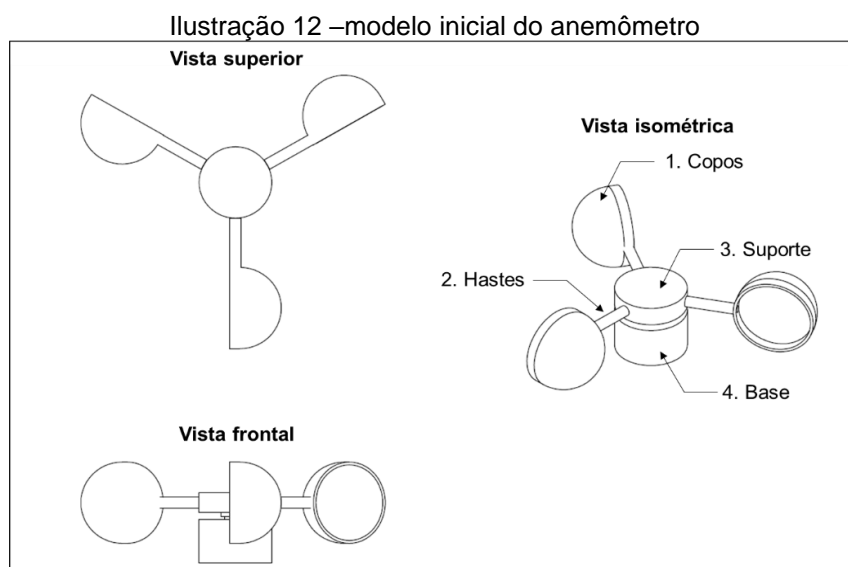
$$v = \omega \times R = 2\pi R \times \frac{rpm}{60} \text{ (m/s)} \quad (4)$$

$$v = 2\pi R \times \frac{rpm}{60} \times 3,6 \text{ (km/h)} \quad (5)$$

5.3. DESENVOLVIMENTO MECÂNICO

A Ilustração 12 mostra o projeto inicial da estrutura mecânica básica, contemplando a estrutura completa incluindo os elementos de fixação e componentes internos pode ser encontrada no Apêndice A.

Os desenhos técnicos das peças que compõem o protótipo foram criados a partir dos *softwares* AutoCAD e Autodesk Inventor. Optou-se por utilizar o desenho assistido por computador, uma vez que seria possível gerar arquivos para ser feita a impressão em 3D de parte dos componentes da estrutura mecânica.

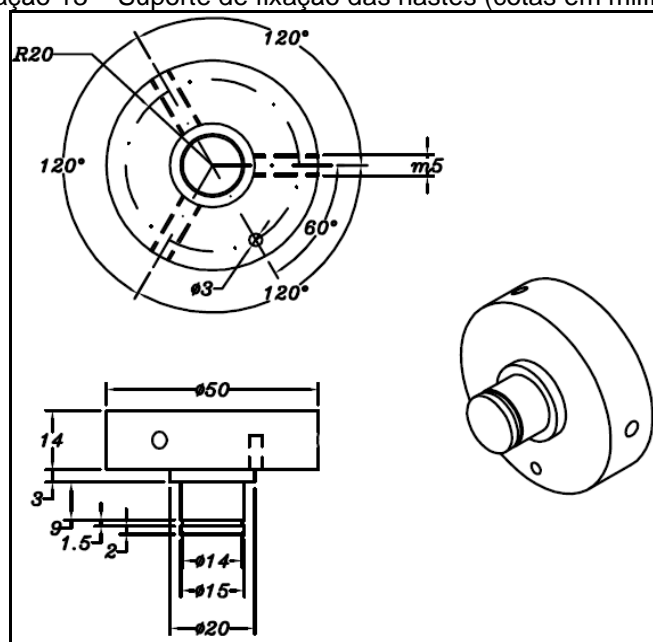


Fonte: dos autores.

Para construção do suporte de fixação das hastes (Ilustração 13) e da base de fixação do rolamento e sensor (Ilustração 14) foi utilizado o material polipropileno, devida à facilidade de usinagem e o custo-benefício quando comparado a outros materiais que também são resistentes a intempéries, como o: aço inox e o alumínio.

Além de fixar as hastes, o suporte também tem a função de alojar um ímã de dimensão de 3mm que aplica o campo magnético para operação do sensor de efeito Hall. O ímã especificado é de Neodímio devido à sua força elevada e o seu tamanho reduzido em comparação com os outros ímãs.

Ilustração 13 – Suporte de fixação das hastes (cotas em milímetros)

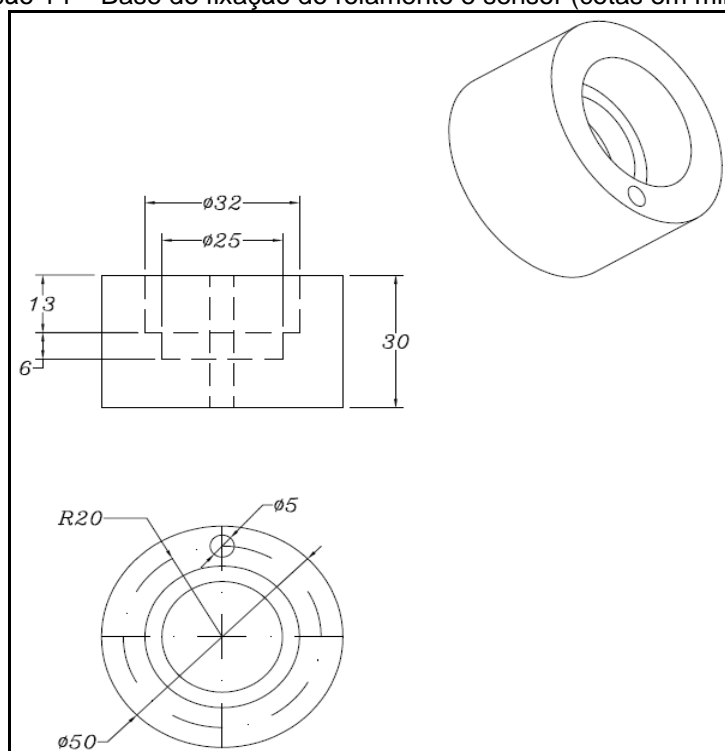


Fonte: dos autores.

O rolamento que irá compor o conjunto mecânico e que está montado na base de fixação (cuja primeira página do catálogo está no Anexo A) é de poliamida com esferas de vidro, pois possui vantagens em relação aos rolamentos de aço comuns, entre as quais: boa resistência à corrosão, baixo coeficiente de fricção, além de serem leves, não-magnéticos e auto lubrificantes.

Na elaboração do projeto da base, cujas dimensões estão indicadas na Ilustração 14 foi considerada uma abertura para permitir também a instalação do sensor de efeito Hall, com a finalidade de reconhecer o campo magnético aplicado pelo conjunto rotativo do suporte.

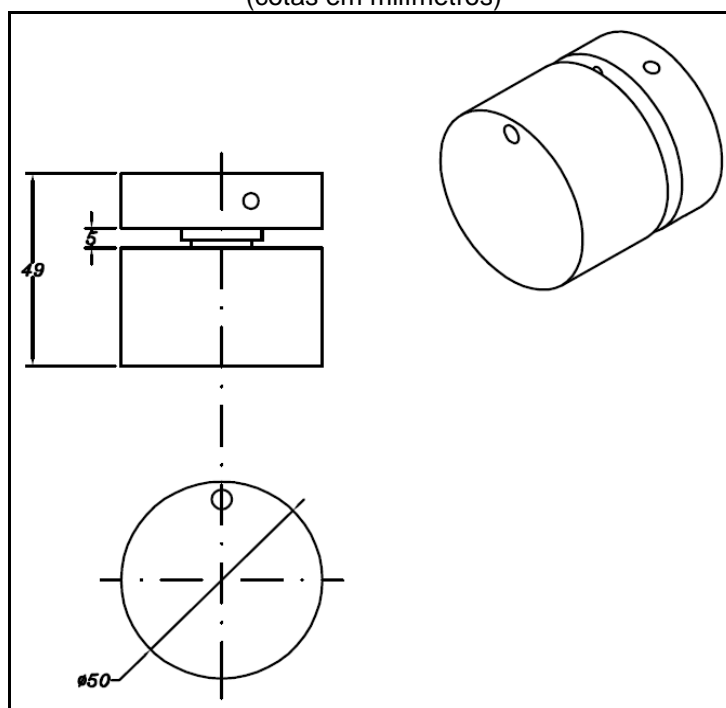
Ilustração 14 – Base de fixação do rolamento e sensor (cotas em milímetros)



Fonte: dos autores.

O conjunto montado do suporte de fixação das hastes com a base é apresentado na Ilustração 15.

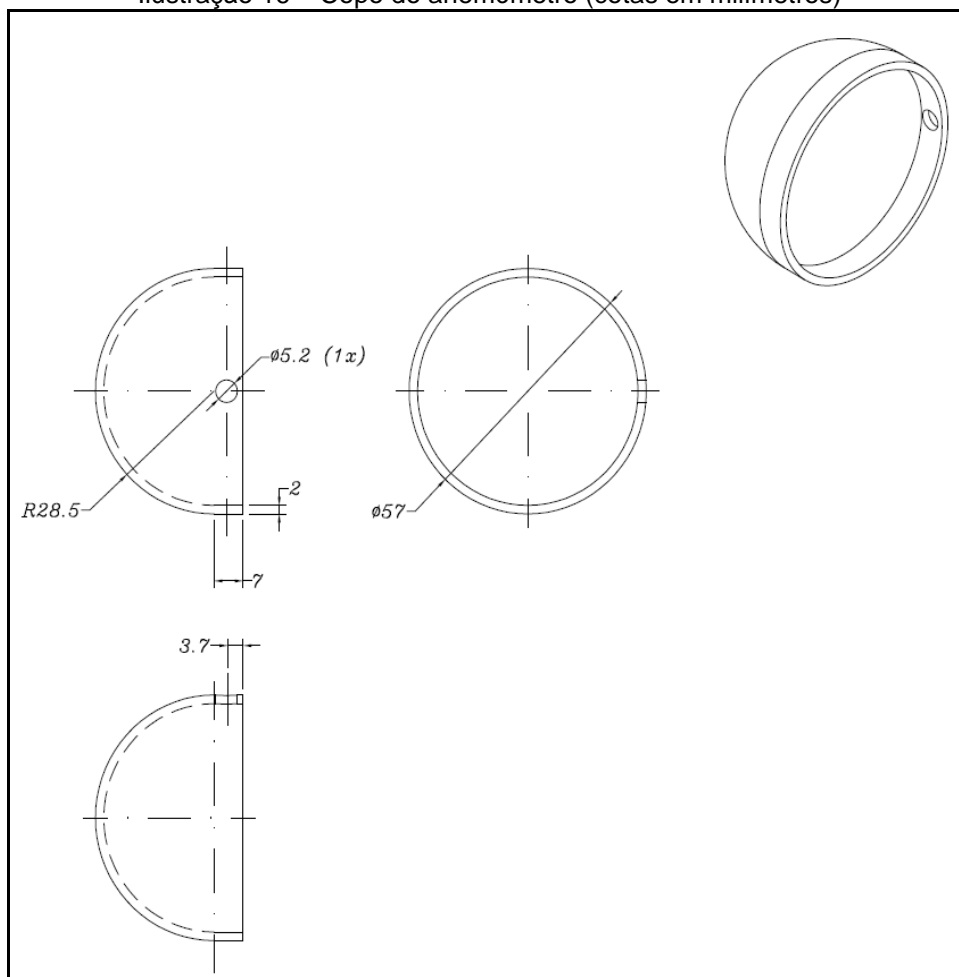
Ilustração 15 – Suporte de fixação das hastes e base de fixação do rolamento e sensor montados (cotas em milímetros)



Fonte: dos autores.

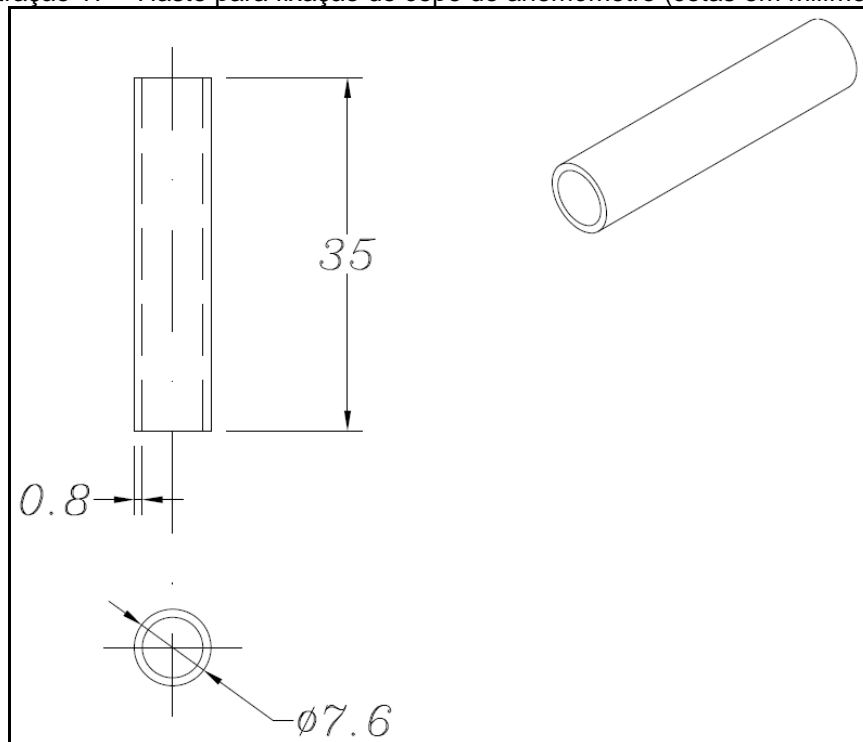
Os copos (Ilustração 16) e as hastes (ilustração 17) foram fabricados utilizando impressão 3D a partir do plástico Acrilonitrila Butadieno Estireno (ABS) por ser um material de extenso uso, apresentar boa resistência mecânica e térmica, além de ser leve e de baixo custo.

Ilustração 16 – Copo do anemômetro (cotas em milímetros)



Fonte: dos autores.

Ilustração 17 – Haste para fixação do copo do anemômetro (cotas em milímetros).



Fonte: dos autores.

O formato hemisférico oco e as dimensões dos copos, assim como das hastes, foram adotados com base em *benchmarking* (referências) realizado com anemômetros disponíveis no mercado.

A Tabela 4 apresenta a relação de todos os itens que compõe a estrutura mecânica do protótipo do anemômetro e seus materiais de fabricação.

Tabela 4 – Componentes mecânicos e seus materiais

Item	Descrição	Material
01	Base	Polipropileno
02	Suporte	Polipropileno
03	Rolamento	Gaiola em poliamida e esferas de vidro
04	Anel elástico	
05	Haste	ABS
06	Copo	ABS
07	Sensor magnético	Neodímio
08	Barra roscada 3/16"	Aço inox
09	Porca esférica	Aço inox
10	Ímã	Neodímio

Fonte: dos autores.

5.4. DESENVOLVIMENTO DE SOFTWARE

O *software* do anemômetro apresentado no Apêndice B foi desenvolvido utilizando a linguagem C++ do Arduino, conhecida como uma linguagem de programação de alto nível por estar mais próximo do programador e mais longe da máquina, sendo, portanto, mais intuitiva.

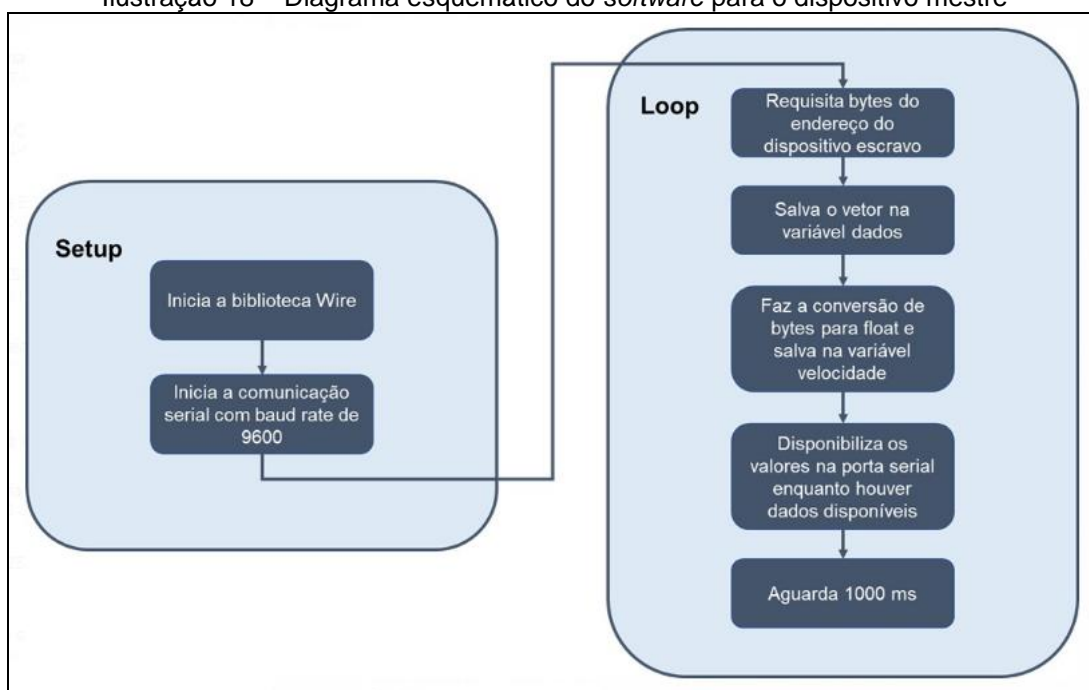
Para gravar o código-fonte do programa, a linguagem de alto nível deve ser modificada para a linguagem do dispositivo e isso exige o uso de um compilador. A compilação do programa foi realizada através de um ambiente de desenvolvimento, mais conhecido como IDE (do inglês *Integrated Development Environment*).

O IDE é uma aplicação para computadores que juntamente a um compilador integrado, permite escrever um programa e compilá-lo no microcontrolador. O IDE utilizado para compilar o programa em ambos ATtiny85 e Arduino Uno foi o próprio IDE do Arduino.

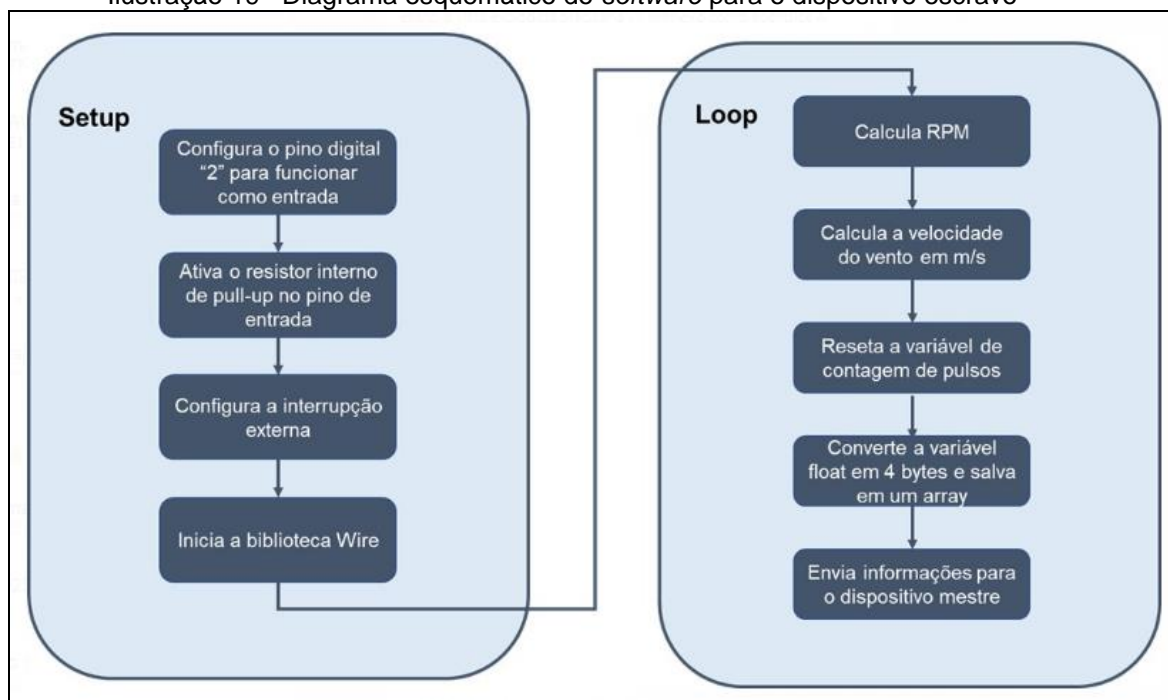
Devido ao uso da comunicação I²C, o protótipo do anemômetro demandou o desenvolvimento de dois *softwares* distintos, sendo um específico para o escravo (ATtiny85) e outro para o mestre (Arduino Uno).

Na sua versão final, o anemômetro será disponibilizado como um módulo para implementação em outros sistemas e, portanto, conterà apenas um *software* para atuar como escravo. O diagrama dos *softwares* para os dispositivos mestre e escravo estão apresentados nas Ilustrações 18 e 19, respectivamente:

Ilustração 18 – Diagrama esquemático do *software* para o dispositivo mestre



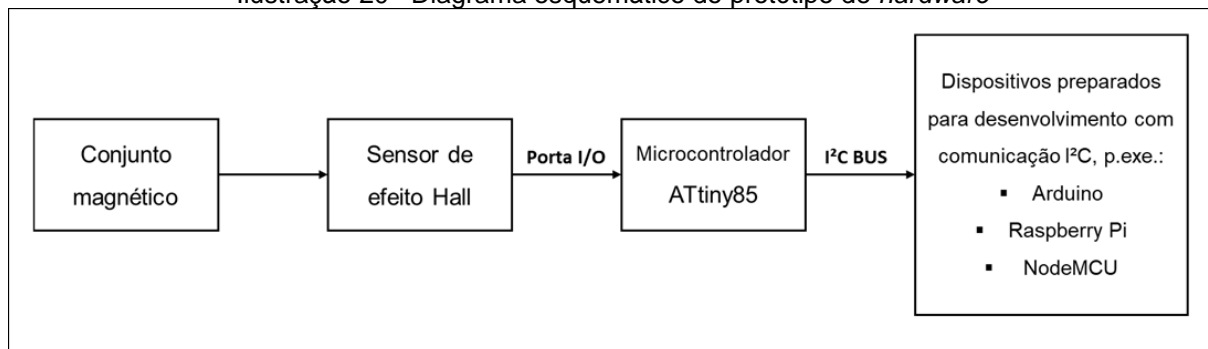
Fonte: dos autores.

Ilustração 19 –Diagrama esquemático do *software* para o dispositivo escravo

Fonte: dos autores.

5.5. DESENVOLVIMENTO DE HARDWARE

O *hardware* do protótipo do anemômetro é composto pelos componentes apresentados na Ilustração 20, onde os três primeiros blocos são responsáveis por: criar um campo magnético, gerar e tratar os pulsos elétricos respectivamente, e, junto ao *software* incorporado ao microcontrolador, disponibilizar a informação da velocidade do vento para outros dispositivos através da comunicação I²C, conforme representado no último bloco da ilustração.

Ilustração 20– Diagrama esquemático do protótipo de *hardware*

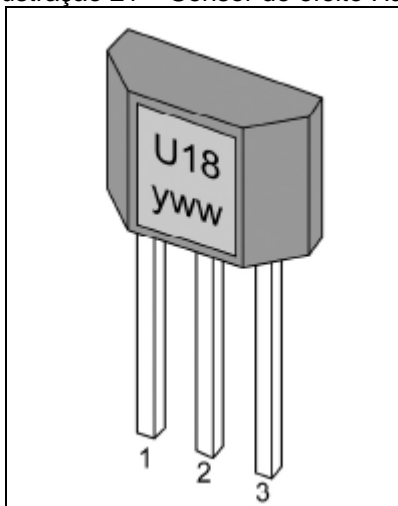
Fonte: dos autores.

Segundo Halliday, Resnick & Walker (2013), os elétrons que se movem dentro de um fio condutor podem ser desviados por um campo magnético. Esse desvio, conhecido como efeito Hall, permite verificar se os portadores de carga em um condutor têm carga positiva ou negativa.

O sensor de efeito Hall modelo US1881 (Ilustração 21), cuja primeira página do *datasheet* encontra-se no Anexo B, é um circuito integrado responsável pelo sensoramento magnético no sistema. Quando o fluxo magnético se aproxima, a sua saída se altera para nível lógico baixo e o estado da saída é mantido até que um fluxo magnético contrário seja aplicado ao sensor, variando então o estado da saída para nível lógico alto.

Este sensor foi escolhido devida à sua facilidade de programação com plataformas microcontroladas e possuir ampla faixa de tensão de operação, que varia de 3 a 24 VDC.

Ilustração 21 – Sensor de efeito Hall.



Fonte: MELEXIS (2018, p.3).

O microcontrolador escolhido para iniciar os testes no protótipo foi o ATtiny85 (Ilustração 22), cuja primeira página do *datasheet* encontra-se no Anexo C, devida a facilidade em programá-lo, por possuir comunicação I²C, reduzido tamanho e uma baixa corrente de consumo em regime na ordem de 1 mA.

Para a escolha do sensor considerou-se a precisão no momento de geração dos pulsos, cogitou-se a utilização de um sensor de menor custo do tipo *reed switch*, porém, como é conhecido de chaveamentos mecânicos, ao se manobrar a chave é gerado um ruído conhecido como *bounce*, que pode ser interpretado como sinal pelo

sistema, desse modo escolheu-se o sensor de efeito Hall que não tem a necessidade da utilização do filtro *debounce*.

Ilustração 22– Microcontrolador ATtiny85



Fonte: dos autores.

Neste projeto optou-se por usar o Arduino Uno para receber os dados através da comunicação I²C por ser um módulo de baixo custo, com conectividade USB (*Universal Serial Bus*) e de fácil programação, se mostrando ideal para esta prototipagem. A placa também fornece tensões de 5 e 3,3VDC para alimentação do sensor e da unidade microcontrolada (MCU - do inglês, *microcontroller unit*).

O Arduino Uno recebe alimentação através de um cabo USB A/B ligado a um PC (*personal computer*) ou um carregador de tomada, porém é possível também alimentá-lo com uma bateria de 9VDC ou um conjunto de pilhas AA.

Neste protótipo foi escolhido utilizar um PC como fonte de alimentação (Ilustração 23), pela maior praticidade na gravação da programação e transmissão dos dados do sensor em tempo real.

Na versão final, o dispositivo a exercer a condição de mestre fica a critério do usuário desenvolvedor de acordo com as necessidades do seu projeto. Alguns dispositivos compatíveis são os módulos microcontrolados ESP8266, Arduino e computadores como o RaspberryPi, entre outros.

Ilustração 23 – PC como fonte de alimentação



Fonte: dos autores.

5.6. DESENVOLVIMENTO DE COMUNICAÇÃO

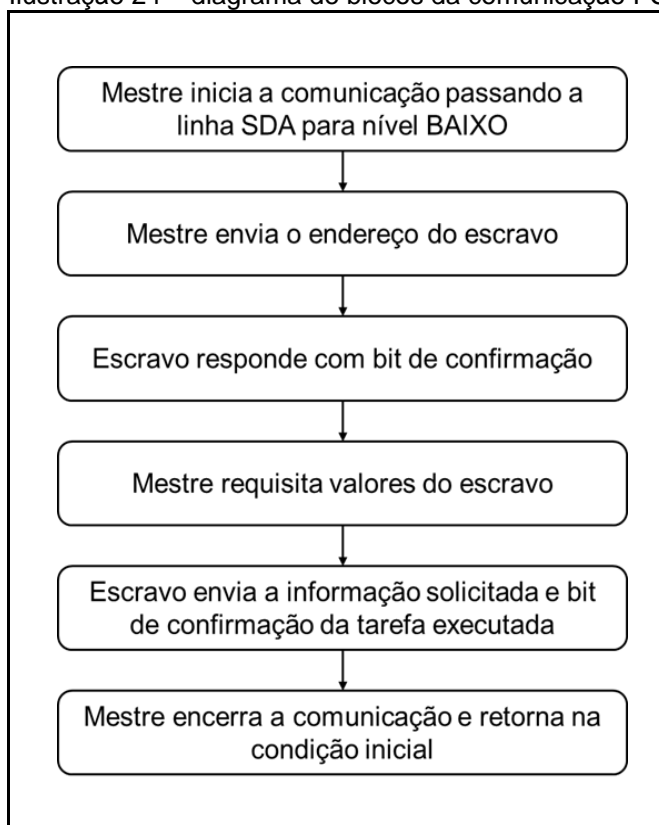
A escolha da comunicação I²C para esse projeto se deu pela facilidade de conexão de múltiplos dispositivos em um único barramento de dados sendo gerenciados por um dispositivo mestre.

Tendo em vista que o anemômetro a ser desenvolvido é um módulo que pode ser implementado em vários sistemas de desenvolvimentos (Raspberry PI, Arduino, etc), o protocolo de comunicação I²C apresenta uma boa relação custo benefício.

Considerando-se, como exemplos de aplicação, um sistema de uma estação meteorológica que possui diversos dispositivos periféricos a serem gerenciados, o protocolo I²C se torna ideal para o tipo de aplicação, pois com uma única linha de transmissão podemos integrar todos os dispositivos reduzindo a quantidade de portas necessárias no *hardware* e consequentemente reduzindo custos no projeto.

Este projeto requisita o uso de dois microcontroladores distintos acoplados no barramento de comunicação I²C utilizando-se da relação Mestre/Escravo, sendo o ATtiny85 o escravo a enviar as informações quando solicitadas pelo dispositivo mestre que fica a cargo do Arduino Uno.

A Ilustração 24 mostra o funcionamento da comunicação I²C para o anemômetro.

Ilustração 24 – diagrama de blocos da comunicação I²C

Fonte: dos autores.

Para iniciar a comunicação, o dispositivo mestre passa a linha SDA, linha de dados, para nível baixo. Depois envia no barramento, o endereço do qual dispositivo escravo deseja se comunicar. O dispositivo escravo com o endereçamento que foi enviado pelo mestre, responde com um bit de confirmação para identificar que está conectado ao barramento.

O mestre requisita que o escravo envie os valores que foram calculados. O escravo irá receber a requisição, enviar os valores solicitados pelo mestre e um bit de confirmação de que a tarefa pedida pelo mestre foi executada.

O mestre recebe os valores que solicitou a confirmação do escravo e encerra a comunicação, voltando a linha de SDA para nível alto, retornando à condição inicial do sistema.

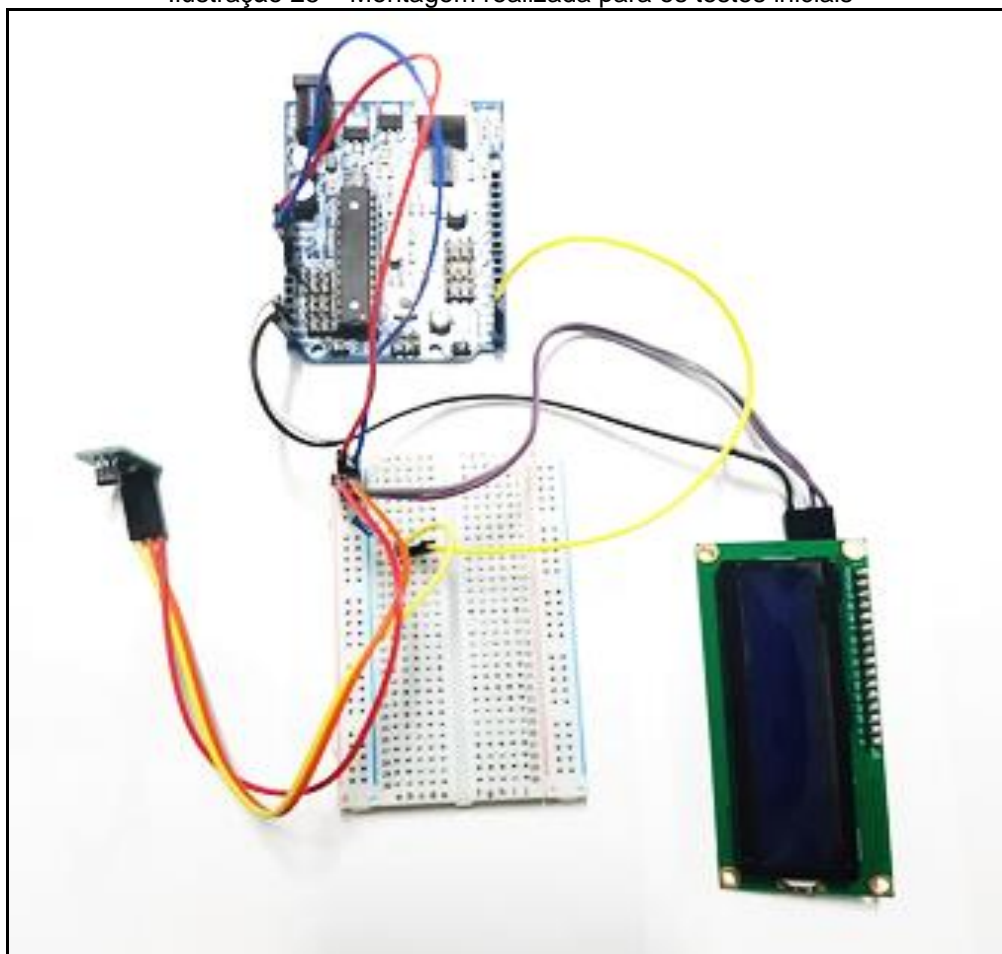
6. TESTES

Para executar os testes foi utilizado um circuito com montagem em *protoboard* com o intuito de validar o código-fonte, identificar e corrigir os erros na lógica de programação.

6.1. TESTES INICIAIS

Para a visualização da velocidade do vento medida, utilizou-se um *display* de cristal líquido de modo a facilitar o desenvolvimento do protótipo. Nesta configuração (Ilustração 25) o Arduino foi utilizado como dispositivo mestre e o *display* como escravo na comunicação I²C. Na versão final, o *display* não será incluído.

Ilustração 25 – Montagem realizada para os testes iniciais



Fonte: dos autores.

As leituras da velocidade do vento foram exibidas através do *display* de cristal líquido como mostrado na Ilustração 26.

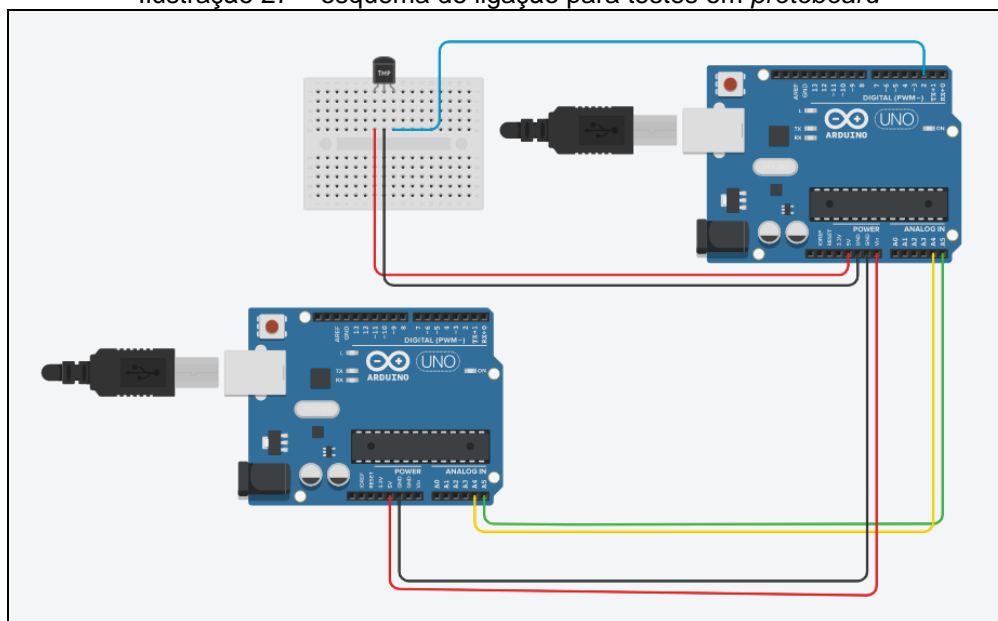
Ilustração 26 – Display exibindo a velocidade do vento



Fonte: dos autores.

6.2. TESTES FINAIS

Os testes passaram a ser reproduzidos com a utilização de duas placas Arduino simulando o funcionamento da relação Mestre/Escravo. Nesse tipo de montagem (Ilustração 27), o mestre faz a solicitação dos dados ao Escravo, e depois exibe esses dados recebidos na tela do computador via porta serial.

Ilustração 27 – esquema de ligação para testes em *protoboard*

Fonte: dos autores.

6.3. COMPARAÇÃO DO PROTÓTIPO COM ANEMÔMETRO CALIBRADO

De acordo com o Instituto de Pesquisas Tecnológicas (IPT), referência nacional na área metrológica, a calibração de anemômetros deve ser realizada em túnel de vento que permite verificar os níveis de erro e incerteza da faixa de tolerância das normas técnicas (IPT, 2011).

Entretanto, não foi possível realizar a calibração do protótipo em um túnel de vento e dessa forma, os testes foram realizados conjuntamente com um termo anemômetro digital CR-7 Criffer (Ilustração 28) utilizado como referência.

Ilustração 28 –Termo anemômetro digital CR-7 Criffer.³



Fonte: Criffer (2017, p.5).

6.3.1. objetivo do teste

O objetivo do ensaio consistiu em medir com o protótipo do anemômetro e com um anemômetro digital de referência calibrado, a velocidade gerada por uma fonte contínua de vento e realizar uma análise comparativa dos resultados obtidos.

³

1- Hélice;
2-Tecla HOLD;
3-Tecla Liga/Desliga;
4-Tecla MAX/MIN;
5-Tecla de Unidades;
6-Display;
7-Compartimento de bateria.

6.3.2. materiais utilizados no teste

Foram utilizados os seguintes materiais e equipamentos:

1. Fonte contínua de vento;
2. Termo anemômetro digital CR-7 Criffer;
3. Protótipo do anemômetro;
4. Escala metálica 500mm;
5. Suporte para fixação.

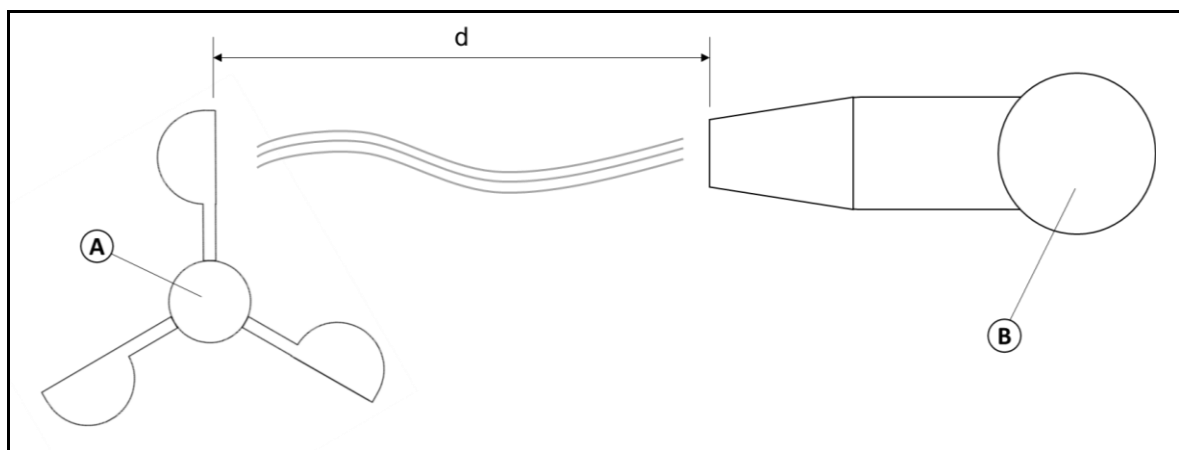
6.3.3. métodos de ensaio

Para a realização do ensaio foram adotados os seguintes procedimentos:

a) Procedimento de montagem

A Ilustração 29 mostra a configuração adotada dos equipamentos para a realização do ensaio comparativo.

Ilustração 29 – Configuração do ensaio comparativo⁴



Fonte: dos autores.

A fonte contínua de vento (B) é posicionada e alternativamente, a uma distância d da fonte é colocado o anemômetro calibrado ou o protótipo (A) para a medição da velocidade.

⁴ A- Anemômetro calibrado / protótipo;

B- Fonte contínua de vento.

b) Procedimentos para a medição da velocidade

Para cada distância **d** foi medida a velocidade do vento com a fonte operando em potência alta (HIGH) e em potência baixa (LOW). Foram realizadas 5 medidas de velocidade para cada potência pelos anemômetros com a variação da distância **d**.

6.3.4. análise dos resultados obtidos

As medidas da velocidade do vento nas condições mencionadas no item anterior estão indicadas na Tabela 5.

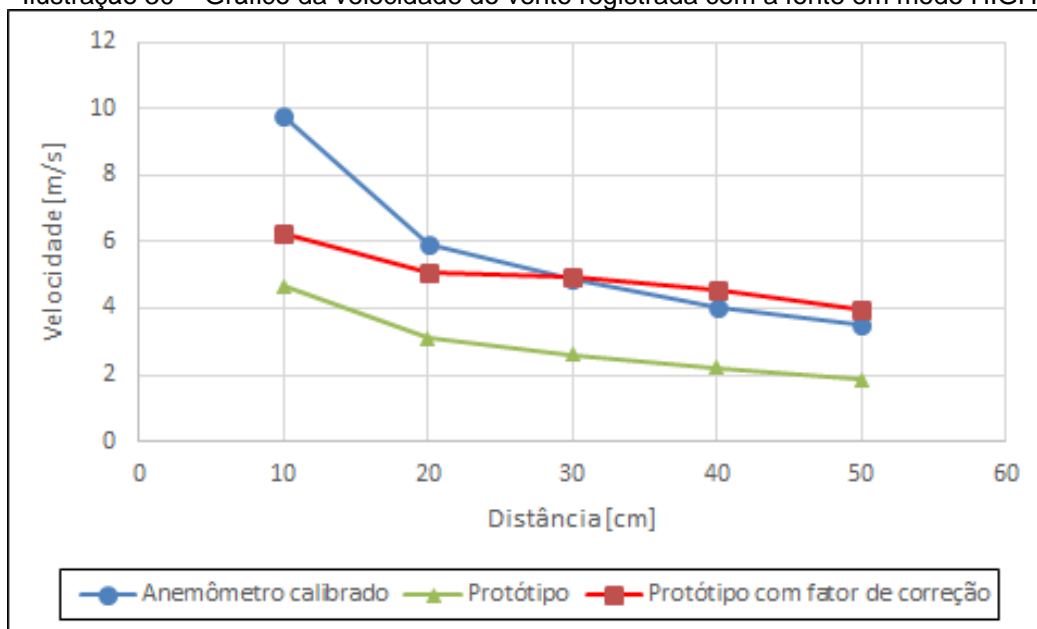
Tabela 5 – Comparação de leituras entre o anemômetro calibrado e o protótipo

Amostra	Distância d (cm)	Potência da fonte de vento	Velocidade do vento (m/s)		
			CR-7 Criffer (referência)	Protótipo	Protótipo com fator de correção
01	10	HIGH	9,75	4,68	6,28
02	20	HIGH	5,91	3,08	5,05
03	30	HIGH	4,86	2,59	4,93
04	40	HIGH	4,00	2,22	4,56
05	50	HIGH	3,49	1,85	3,94
06	10	LOW	6,61	3,57	5,17
07	20	LOW	4,47	2,34	4,31
08	30	LOW	3,68	1,85	4,19
09	40	LOW	3,19	1,60	3,82
10	50	LOW	2,60	1,35	3,45

Fonte: dos autores

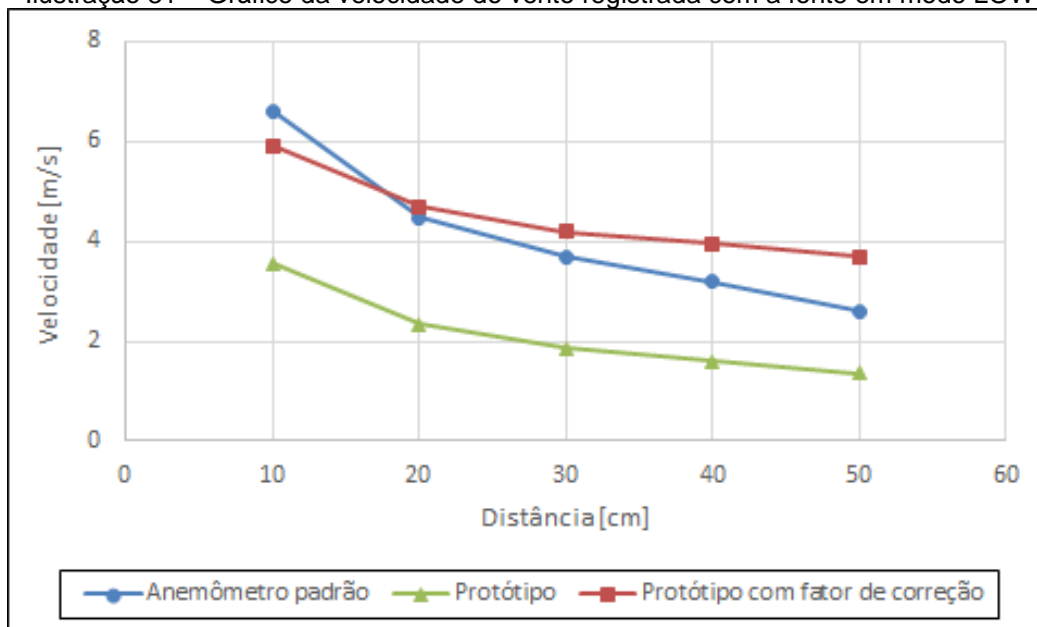
Com base nos resultados obtidos foram elaborados o gráfico da velocidade do vento com a fonte operando na potência alta (HIGH) e o gráfico da velocidade do vento com a fonte operando na potência baixa (LOW), apresentados nas Ilustrações 30 e 31 respectivamente.

Ilustração 30 – Gráfico da velocidade do vento registrada com a fonte em modo HIGH



Fonte: dos autores.

Ilustração 31 – Gráfico da velocidade do vento registrada com a fonte em modo LOW



Fonte: dos autores.

Observa-se nos gráficos, que as velocidades do vento registradas pelo protótipo apresentaram valores inferiores em comparação com as velocidades registradas pelo anemômetro calibrado, em ambos os modos, HIGH e LOW.

Constatou-se também que a maior diferença entre as leituras ocorreu nas amostras cuja distância entre a fonte de vento e o instrumento era mínima (10 cm).

Da mesma forma, a maior convergência de leituras dos instrumentos ocorreu quando a distância era máxima (50 cm).

Apesar de deslocadas verticalmente, as curvas geradas pelos dois sensores demonstraram um comportamento semelhante e nesse sentido foi aplicado um fator de correção no *software* para corrigir esse deslocamento.

O fator de correção FC foi calculado a partir da equação 6. Onde $a_i^{padrão}$ é o valor da velocidade do vento (em m/s) para cada amostra do anemômetro de referência, $a_i^{protótipo}$ é o valor da velocidade do vento (em m/s) para cada amostra do protótipo, e n é o número de amostras tomadas.

$$FC = \frac{\sum_{i=1}^n a_i^{padrão}}{n} - \frac{\sum_{i=1}^n a_i^{protótipo}}{n} \quad (6)$$

$$FC = \frac{\sum_{i=1}^{10} a_i^{padrão}}{10} - \frac{\sum_{i=1}^{10} a_i^{protótipo}}{10}$$

$$FC = \frac{9,75 + 5,91 + 4,86 + 4,00 + 3,49 + 6,61 + 4,47 + 3,68 + 3,19 + 2,60}{10} - \frac{4,68 + 3,08 + 2,59 + 2,22 + 1,85 + 3,57 + 2,34 + 1,85 + 1,60 + 1,35}{10}$$

$$FC = 4,856 - 2,513 = 2,34 \text{ (m/s)}$$

As medidas corrigidas estão indicadas na coluna “Protótipo com fator de correção” da Tabela 4 e nos respectivos gráficos.

Apesar dessa correção, os gráficos ainda mostram uma diferença entre os valores medidos e que o algoritmo deverá ser revisado para que os cálculos da velocidade sejam ajustados para as diferentes faixas de vento.

Cabe destacar que o método de aferição utilizado não é padronizado, pois o método por túnel de vento é o indicado para realizar uma aferição e calibração deste tipo de equipamento. Portanto, os dados obtidos podem ter sofrido a influência de erros provocados pelo sistema e procedimento de medição adotados.

7. CONCLUSÃO

Este trabalho compreendeu o desenvolvimento mecânico e eletrônico (*hardware* e *software*) de um protótipo de anemômetro de copos, com a implantação do protocolo de comunicação I²C para a transmissão dos dados (vide Apêndice C).

Como se pretendia com a utilização deste tipo de comunicação, o protótipo atua como dispositivo escravo, tornando-o vantajoso para aplicação em sistemas mais complexos que necessitem incorporar outros sensores, como por exemplo, estações meteorológicas.

A estrutura mecânica, apesar de construída com materiais de baixo custo, como plásticos e peças impressas em 3D, se mostrou resistente e robusta para altas velocidades. Os materiais escolhidos também tornaram o protótipo leve, permitindo respostas rápidas às baixas velocidades de vento.

Durante o desenvolvimento do *software*, a implementação da comunicação I²C se mostrou um desafio, devida a necessidade de se enviar uma variável do tipo *float*, que tem o tamanho de *4bytes*, dessa forma necessitou que fosse feita uma conversão de variáveis.

Feita a conversão, outro problema solucionado consistia em enviar os dados de forma ordenada para que o mestre pudesse fazer a conversão dos *4bytes* para um *float* novamente, sendo assim após os dados terem sido convertidos em *bytes* eles foram salvos em uma variável do tipo *array* que é um vetor, antes de serem enviados para o mestre.

A configuração de *hardware* adotada para a realização dos testes foi por meio de duas placas Arduino. Durante o desenvolvimento do *software* voltado para o uso do microcontrolador ATtiny85, encontrou-se uma alta dificuldade em implantar o protocolo I²C, visto que as bibliotecas disponíveis para este tipo de comunicação no ATtiny85 ainda são pouco exploradas, o que demandaria a construção exclusiva de uma biblioteca para este projeto.

A velocidade do vento obtida pelo protótipo se mostrou inferior em comparação ao anemômetro calibrado. Percebeu-se a necessidade de um algoritmo de programação mais aprimorado para aplicar correções nos cálculos em diferentes faixas de vento.

Contudo, não foi possível utilizar o método adequado (túnel de vento) para aferição e calibração do equipamento, o que pode ter causado incertezas nas medições.

7.1. RECOMENDAÇÕES FUTURAS

Para continuidade do projeto com a utilização do ATtiny85 será necessário desenvolver a comunicação I²C para o mesmo, assim como uma biblioteca exclusiva para o projeto a fim de facilitar a implementação por desenvolvedores que venham a utilizar este equipamento.

Outra medida a ser tomada para aprimorar o projeto é o desenho de placas eletrônicas para o sistema a fim de facilitar a utilização.

A escolha de mais um protocolo de comunicação para trabalhar em conjunto com o I²C, é uma medida a ser discutida, o que tornaria o equipamento mais versátil para outras aplicações que não utilizam o protocolo I²C.

REFERÊNCIAS

ANGELOCCI, Paulo Cesar Sentelhas; et al. **Agrometeorologia: Fundamentos e aplicações Práticas**. Guaíba: Editora Agropecuária, 2002, 477 p.

BRAMER, Isobel; et al. **Learn more about Anemometer**. ScienceDirect, 2018. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/topics/earth-and-planetary-sciences/anemometer/pdf>>. Acesso em: 04 out. 2019.

BRASIL. Ministério do trabalho. **NR 12: Segurança no trabalho em máquinas e equipamentos**. Brasília, DF: Ministério do Trabalho, 2018. 115 p.

BRASIL. Ministério do trabalho. **NR 18: Condições e meio ambiente de trabalho na indústria da construção**. Brasília, Brasília, DF: Ministério do Trabalho, 2018. 68 p.

CAMPBELL SCIENTIFIC BRASIL. **Wind Speed and Wind Direction Sensors: Wind vanes, anemometers, and lidar**. Disponível em: <<https://www.campbellsci.com.br/wind-speed-direction>>. Acesso em: 20 nov. 2019.

CIENCIA Y GEOFÍSICA GRUPO IGPERU. **Anemômetro**. Disponível em: <https://geofisica-guszav.blogspot.com/2015/03/anemometro_51.html>. Acesso em: 20 nov. 2019.

CRIFFER. **Manual de Instruções: CR-7 Termo anemômetro digital**. 2017.

DEPARTAMENTO DE PROTEÇÃO E DEFESA CIVIL (Santo André). **Escala de Beaufort**. Disponível em: <<http://www3.santoandre.sp.gov.br/defesacivil/escala-de-beaufort/>>. Acesso em: 20 nov. 2019.

FORSDYKE, A. G. **Previsão do tempo e clima**. São Paulo: Melhoramentos, 1981, 159 p.

HALLIDAY, David; RESNICK, Robert; WALKER, Jearl. **Fundamentos de física: eletromagnetismo**. Rio de Janeiro: LTC, 2013.

HISEG INSTRUMENTOS DE MEDIÇÃO LTDA. **Termo-Anemômetro de fio quente, modelo CR-6**. Disponível em: <<https://www.hiseg.com.br/p/396/termo-anemometro-de-fio-quente-modelo-cr-6/t/3>>. Acesso em: 20 nov. 2019.

IGUS. **Xiros® radial deep groove ball bearings: product range**. Disponível em: <https://www.igus.eu/contentData/Products/Downloads/catalogue_xiros_B180_P806_P811.pdf>. Acesso em: 20 nov. 2019.

INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS (IPT). **Calibração de anemômetros**: Expansão do serviço realizado no túnel de vento do IPT deve acompanhar crescimento dos parques eólicos no País. São Paulo: IPT, 2011. Disponível em: <http://www.ipt.br/noticias_interna.php?id_noticia=390>. Acesso em: 10 nov. 2019.

INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS (São Paulo). **Calibração de sensores de velocidade de fluidos**. Disponível em: <https://www.ipt.br/solucoes/365-calibracao_de_sensores_de_velocidade_de_fluidos.htm>. Acesso em: 20 nov. 2019.

INSTRUTHERM INSTRUMENTOS DE MEDIÇÃO LTDA. **Anemômetro mod.ad-250 digital portátil, faixa de medição de 0,4 a 30 m/s**. Disponível em: <<https://www.instrutherm.net.br/anemometro-digital-portatil-escala-0-4-a-30-0-m-s-mod-ad-250.html>>. Acesso em: 20 nov. 2019.

JERVELL, José Tor. **Estudo da influência das características do vento no desempenho de aerogeradores**. Porto: FEUP, 2008. 87 p.

KOTLER, Philip. **Administração de marketing**. 10. ed. São Paulo: Prentice Hall Brasil, 2004. 768 p.

LOPEZ, Ricardo Aldabó. **Energia Eólica**. 2. ed. São Paulo: Artliber, 2012. 366 p.

MAZZARELLA, Daniel A. **An inventory of specifications for wind measuring instruments**. Princeton: Science Associates Inc, 1978. 12 p.

MELEXIS. **US1881**: Hall Latch – High Sensitivity. Disponível em: <<https://www.melexis.com/-/media/files/documents/datasheets/us1881-datasheet-melexis.pdf>>. Acesso em: 20 nov. 2019.

MICROCHIP. **Atmel 8-bit AVR Microcontroller with 2/4/8K Bytes In-System Programmable Flash**. 2013. Disponível em: <http://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/Atmel-2586-AVR-8-bit-Microcontroller-ATtiny25-ATtiny45-ATtiny85_Datasheet.pdf>. Acesso em: 20 nov. 2019.

OLIVEIRA, Luciana de Sousa de. **Regras e boas práticas para instalação de torres anemométricas voltadas para estudo de potencial eólico**. 2011. 101 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Ciências em Planejamento Energético, Ufrj/coppe, Rio de Janeiro, 2011.

PATTERSON, J., 1926: The cup anemometer. Transactions of the Royal Society of Canada, 20, Series III, pp. 1–54.

S&E. **E-book Anemômetro**. São Paulo, 2018. 14 p.

SIGMA SENSORS. **Anemômetro de pesquisa R3-50**. Disponível em: <<https://sigmasensors.com.br/produtos/anemometro-de-pesquisa-r3-50>>. Acesso em: 20 nov. 2019.

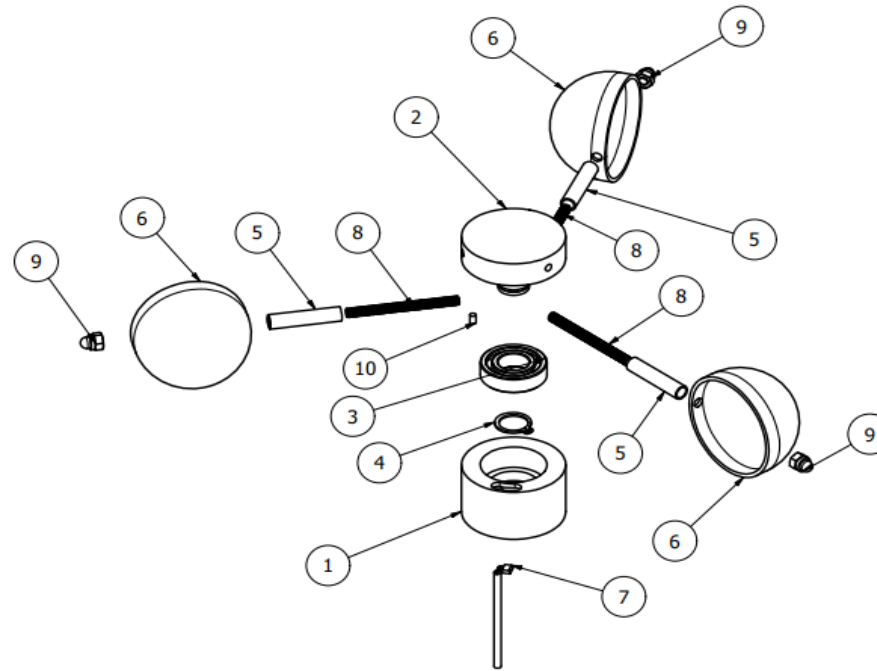
SIGMA SENSORS. **Sensor de Fluxo de Ar Compacta para Velocidade do Ar para medição de vazões mínimas EE576**. Disponível em: <<https://sigmasensors.com.br/produtos/sensor-de-fluxo-de-ar-compacta-para-velocidade-do-ar-para-medicao-de-vazoes-minimas-ee576>>. Acesso em: 20 nov. 2019.

SILVA, Mario Adelmo Varejão. **Meteorologia e Climatologia**. Recife: Versão Digital, 2006, 463 p.

TECNAL. **Anemômetro 2d ultrassônico - windsonic**. Disponível em: <https://tecnal.com.br/pt-BR/produtos/detalhes/8606_anemometro_2d_ultrassonico_windsonic>. Acesso em: 20 nov. 2019.

WORLD METEOROLOGICAL ORGANIZATION (WMO). **Guide to Meteorological Instruments and Methods of Observation**. 8. ed. Geneva: WMO, 2008.

APÊNDICE A– Vista explodida do protótipo do anemômetro de copo



Lista de componentes							
ITEM	QTD	NUMERO DO DESENHO	DESCRIÇÃO	3			
1	1	ANEMOMETRO - 01	BASE	2			
2	1	ANEMOMETRO - 01	SUPORTE DA HASTE	1			
3	1	ANEMOMETRO - 01	ROLAMENTO	Modificado por: Motivo da modificação: Data:			
4	1	ANEMOMETRO - 01	ANEL ELASTICO EXTERNO	M editas sem Tolerancia conf. NBR 2768 m Titulo: Vista Explodida Revisão: 0			
5	3	ANEMOMETRO - 01	HASTE DO COPO	Observação: --- Escala: 1:1			
6	3	ANEMOMETRO - 01	COPO	Material: ABS Medida Bruta: --- Qtde. 01 conjunto			
7	1	ANEMOMETRO - 01	SENSOR MAGNETICO				
8	3	ANEMOMETRO - 01	VARÃO ROSCADO	Nº Des. ANEMOMETRO-01 Desenhista: Marcelo Oliveira Criado em: 24/10/2019 Unid. Medida mm/pol			
9	3	ANEMOMETRO - 01	PORCA CALOTA				
10	1	ANEMOMETRO - 01	IMÃ				

APÊNDICE B – Código-fonte

```
#include <Wire.h>
#define  slaveAdress 8

// --- Constantes ---
const float pi = 3.14159265;    //Número de pi
int period = 5000;              //Tempo de medida(milisegundos)
int delaytime = 2000;          //Intervalo entre as amostras
(milisegundos)
int radius = 98;                //Raio do anemômetro(mm) mudar para
raio do anemometro

// --- Variáveis Globais ---
unsigned int Sample = 0;        //Armazena o número de amostras
unsigned int counter = 0;       //Contador para o sensor
unsigned int RPM = 0;           //Rotações por minuto
float speedwind = 0;           //Velocidade do vento (m/s)

void setup()
{
    pinMode(2, INPUT);          //configura o digital 2 como entrada
    digitalWrite(2, HIGH);      //com pull-up interno ativo
    Wire.begin(8);              //inicializa a comunicação I2C
    Wire.onRequest(requestEvent); //chama função quando recebe
    requisição de dados do mestre
}

void loop()
{
    Sample++;
    windvelocity();
    RPMcalc();

    SpeedWind();

    delay(delaytime); //taxa de atualização
}

//Função para medir velocidade do vento
void windvelocity()
{
    counter = 0;
    attachInterrupt(0, addcount, RISING);
    unsigned long millis();
    long startTime = millis();
    while (millis() < startTime + period) {}
}
```

```

}
//Função para calcular o RPM
voidRPMcalc()
{
    RPM = ((counter) * 60) / (period / 1000); // Calcula as revoluções
    por minuto (RPM)
}

//Velocidade do vento em m/s
voidSpeedWind()
{
    speedwind = 0;
    speedwind = (((2 * pi * radius * RPM) / 60) / 1000); //Calcula
    velocidade do vento em m/s
}

//Incrementa o contador
voidaddcount()
{
    counter++;
}

//dados requisitados pelo mestre
voidrequestEvent()
{
    //----Ajuste de variável----

    byte byte1, byte2, byte3, byte4;
    unsignedintaux;

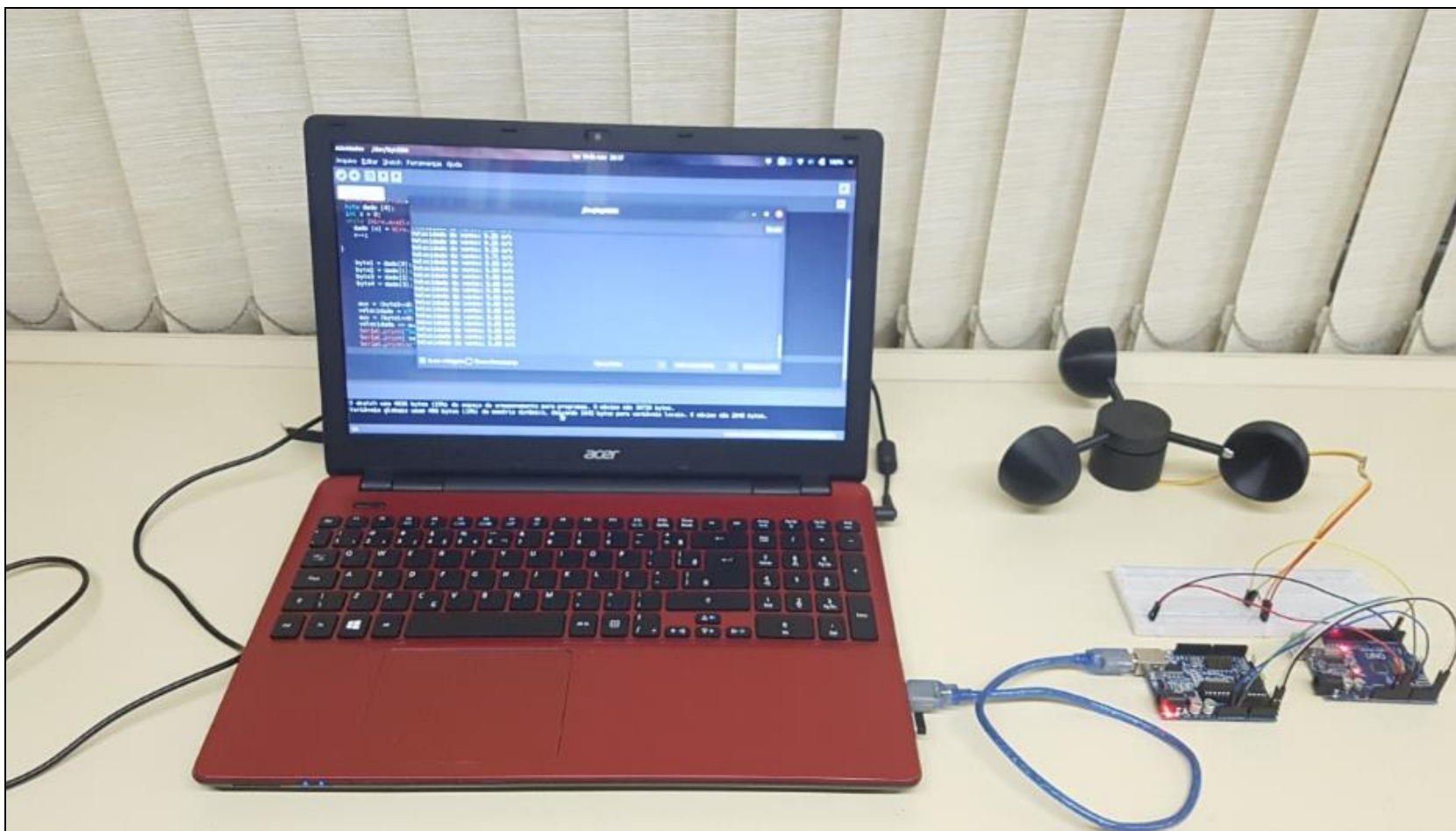
    //ajustando o número antes da vírgula
    floatwindspeed = speedwind;
    aux = ( unsigned int) windspeed;
    byte2 = aux;
    byte1 = (aux>> 8);

    //ajustando o número depois da vírgula
    windspeed -= aux;
    windspeed *= 10000;
    aux = (unsigned int) windspeed;
    byte4 = aux;
    byte3 = (aux>> 8);

    //envio dos dados
    byte out [] = {byte(byte1), byte(byte2), byte(byte3), byte(byte4)};
    Wire.write(out, 4);
}

```

APÊNDICE C – Protótipo do Anemômetro de copos




ANEXO A – Primeira página do catálogo do rolamento de poliamida com esferas de vidro

xiros®


xiros® radial deep groove ball bearings | Product range

Races made from xirodur® B180 – cost-effective standard




FDA


xirodur® B180 cage,
stainless steel balls




xirodur® B180 cage,
glass balls



PA cage,
stainless steel balls




PA cage,
glass balls



FDA


PE cage,
stainless steel balls




Special designs made from xirodur® B180
► From page 843

Technical data

Size	Radial load capacity		Max. speed [rpm]	Weight				
	stat. [N]	dyn. [N]		B180/ES [g]	B180/GL [g]	PA/ES [g]	PA/GL [g]	PE/ES [g]
623	25	34	4,500	0.4	0.4	0.4	0.3	–
633	33	45	4,000	–	–	–	–	–
684	10	11	4,600	–	–	–	–	–
694	12	14	4,000	–	–	–	–	–
604	30	32	3,600	–	–	–	–	–
624	33	45	4,000	–	–	1.0	0.9	–
634	40	40	3,700	–	–	–	–	–
685	12	14	4,000	–	–	–	–	–
695	29	30	3,500	–	–	–	–	–
605	32	33	3,500	–	–	–	–	–
625	40	40	3,700	–	–	1.6	1.0	–
635	41	43	3,200	–	–	–	–	–
686	29	30	3,500	–	–	–	–	–
696	29	30	3,500	–	–	–	–	–
606	50	53	3,300	–	–	–	–	–
626	60	62	3,200	2.3	1.8	2.2	1.7	–
636	80	94	2,200	–	–	–	–	–
687	32	34	3,200	–	–	–	–	–
697	39	41	3,000	–	–	–	–	–
607	41	43	3,200	–	–	–	–	–
627	80	94	2,400	–	–	–	–	–
688	39	41	3,000	–	–	3.1	2.1	–
698	60	62	3,200	–	–	–	–	–
608	80	94	2,400	4.0	2.7	3.9	2.6	–



Order example:
BB-623-B180-10-ES = Radial deep groove ball bearing with race material xirodur® B180, PA cage and stainless steel balls

806 Online tools and more information ► www.igus.eu/xiros


ANEXO B – Primeira página do *datasheet* do sensor de efeito Hall US1881

US1881

Hall Latch – High Sensitivity



Features and Benefits

- Wide operating voltage range from 3.5V to 24V
- High magnetic sensitivity – Multi-purpose
- CMOS technology
- Chopper-stabilized amplifier stage
- Low current consumption
- Open drain output
- Thin SOT23 3L and flat TO-92 3L both RoHS Compliant packages

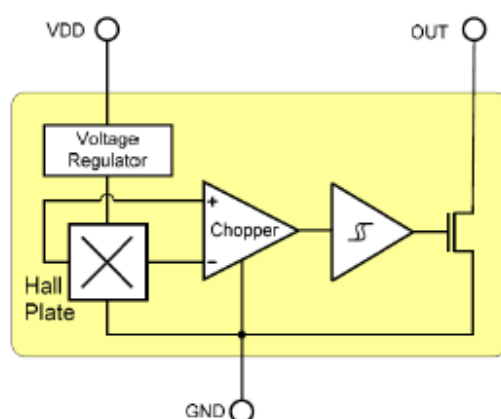
Applications

- Automotive, Consumer and Industrial
- Solid-state switch
- Brushless DC motor commutation
- Speed detection
- Linear position detection
- Angular position detection
- Proximity detection

Ordering information

Part No.	Temperature Code	Package Code
US1881ESE-AAA-000	E (-40°C to 85°C)	SE (TSOT-3L)
US1881EUA-AAA-000	E (-40°C to 85°C)	UA (TO-92)
US1881KSE-AAA-000	K (-40°C to 125°C)	SE (TSOT-3L)
US1881KUA-AAA-000	K (-40°C to 125°C)	UA (TO-92)
US1881LSE-AAA-000	L (-40°C to 150°C)	SE (TSOT-3L)
US1881LUA-AAA-000	L (-40°C to 150°C)	UA (TO-92)

1. Functional Diagram



2. General Description

The Melexis US1881 is a Hall-effect latch designed in mixed signal CMOS technology.

The device integrates a voltage regulator, Hall sensor with dynamic offset cancellation system, Schmitt trigger and an open-drain output driver, all in a single package.

Thanks to its wide operating voltage range and extended choice of temperature range, it is quite suitable for use in automotive, industrial and consumer applications.

The device is delivered in a Thin Small Outline Transistor (TSOT) for surface mount process and in a Plastic Single In Line (TO-92 flat) for through-hole mount.

Both 3-lead packages are RoHS compliant.

ANEXO C– Primeira página do *datasheet* do microcontrolador ATtiny85



Atmel 8-bit AVR Microcontroller with 2/4/8K Bytes In-System Programmable Flash

ATtiny25/V / ATtiny45/V / ATtiny85/V

Features

- High Performance, Low Power AVR® 8-Bit Microcontroller
- Advanced RISC Architecture
 - 120 Powerful Instructions – Most Single Clock Cycle Execution
 - 32 x 8 General Purpose Working Registers
 - Fully Static Operation
- Non-volatile Program and Data Memories
 - 2/4/8K Bytes of In-System Programmable Program Memory Flash
 - Endurance: 10,000 Write/Erase Cycles
 - 128/256/512 Bytes In-System Programmable EEPROM
 - Endurance: 100,000 Write/Erase Cycles
 - 128/256/512 Bytes Internal SRAM
 - Programming Lock for Self-Programming Flash Program and EEPROM Data Security
- Peripheral Features
 - 8-bit Timer/Counter with Prescaler and Two PWM Channels
 - 8-bit High Speed Timer/Counter with Separate Prescaler
 - 2 High Frequency PWM Outputs with Separate Output Compare Registers
 - Programmable Dead Time Generator
 - USI – Universal Serial Interface with Start Condition Detector
 - 10-bit ADC
 - 4 Single Ended Channels
 - 2 Differential ADC Channel Pairs with Programmable Gain (1x, 20x)
 - Temperature Measurement
 - Programmable Watchdog Timer with Separate On-chip Oscillator
 - On-chip Analog Comparator
- Special Microcontroller Features
 - debugWIRE On-chip Debug System
 - In-System Programmable via SPI Port
 - External and Internal Interrupt Sources
 - Low Power Idle, ADC Noise Reduction, and Power-down Modes
 - Enhanced Power-on Reset Circuit
 - Programmable Brown-out Detection Circuit
 - Internal Calibrated Oscillator
- I/O and Packages
 - Six Programmable I/O Lines
 - 8-pin PDIP, 8-pin SOIC, 20-pad QFN/MLF, and 8-pin TSSOP (only ATtiny45/V)
- Operating Voltage
 - 1.8 - 5.5V for ATtiny25V/45V/85V
 - 2.7 - 5.5V for ATtiny25/45/85
- Speed Grade
 - ATtiny25V/45V/85V: 0 – 4 MHz @ 1.8 - 5.5V, 0 - 10 MHz @ 2.7 - 5.5V
 - ATtiny25/45/85: 0 – 10 MHz @ 2.7 - 5.5V, 0 - 20 MHz @ 4.5 - 5.5V
- Industrial Temperature Range
- Low Power Consumption
 - Active Mode:
 - 1 MHz, 1.8V: 300 µA
 - Power-down Mode:
 - 0.1 µA at 1.8V

Rev. 2586Q-AVR-08/2013

2586Q-AVR-08/2013

Fonte: MICROCHIP (2013, p.1).