



INSTITUTO FEDERAL
SANTA CATARINA



INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE SANTA CATARINA
DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE METAL-MECÂNICA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO *STRICTO SENSU* EM MECATRÔNICA

IMPLANTAÇÃO DE CONTROLE DE VELOCIDADE EM TÚNEL DE VENTO MOVIDO Á MOTOR DE COMBUSTÃO PARA TESTES DE TURBINAS EÓLICAS

DEIWIS LELLIS HOSS

CURSO:

MESTRADO PROFISSIONAL EM MECATRÔNICA

ÁREA DE CONCENTRAÇÃO:

Sistemas Mecatrônicos

LINHA DE PESQUISA:

Projeto de Sistemas de Supervisão e Controle

Orientador:

ANDRÉ ROBERTO SOUSA

Co orientador:

MARO JINBO

Florianópolis - SC

05/2018

CDD 629.8
H829i

Hoss, Deiwis Lellis
Implantação de controle de velocidade em túnel de vento movido a motor de combustão para testes de turbinas eólicas [DIS] / Deiwis Lellis Hoss ; orientação de André Roberto de Sousa ; coorientação de Maro Jinbo – Florianópolis, 2018.

1 v.: il.

Dissertação de Mestrado (Mecatrônica) – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Santa Catarina.

Inclui referências.

1. Túnel de vento . 2. Turbinas eólicas – Ensaios. 3. Controle e supervisão – Mecatrônica. I. Sousa, André Roberto de. II. Jinbo, Maro. III. Título.

Sistema de Bibliotecas Integradas do IFSC
Biblioteca Dr. Hercílio Luz – Campus Florianópolis
Catalogado por: Edinei Antonio Moreno CRB 14/1065

**IMPLANTAÇÃO DE CONTROLE DE VELOCIDADE EM TÚNEL DE VENTO MOVIDO
Á MOTOR DE COMBUSTÃO PARA TESTES DE TURBINAS EÓLICAS**

DEIWIS LELLIS HOSS

**Este trabalho foi julgado adequado para obtenção do título de Mestre em Mecatrônica e
aprovado na sua forma final pela comissão avaliadora abaixo indicada.**

Florianópolis, 29 de junho de 2018.



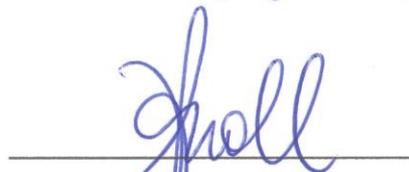
Prof. André Roberto de Sousa, Dr. Eng.



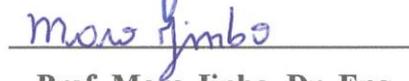
Prof. Cristiano Kulman, Dr. Eng.



Prof. Luiz Fernando Segalin Andrade, Dr. Eng



Prof. Valdir Noll, Dr. Eng



Prof. Maro Jinbo, Dr. Eng

Dedicatória

Aos meus pais, aos meus irmãos, especialmente à minha esposa Beronice, minha grande companheira, e aos meus filhos Davi, Daniel, Misael e a pequena Hadassa que está a caminho.

Agradecimentos

A Deus pela benção de cada dia, e pela possibilidade da vida eterna através de Jesus Cristo;

Ao meu Pai (em memória) e minha Mãe, pelos ensinamentos para a vida e pelo incentivo aos estudos.

Ao Instituto Federal de Santa Catarina pela oportunidade do ensino público;

Ao programa de Pós-Graduação em Mecatrônica pela oportunidade a mim concedida;

Ao Professor André Roberto Sousa, pela orientação dada, pela confiança depositada e pela contribuição à minha formação;

Ao Professor Maro Jinbo pela orientação, por todo o conhecimento compartilhado e pelo apoio dado na realização deste projeto;

Ao Professor Cristiano Kulman pelas dicas no desenvolvimento do trabalho escrito e dos testes desenvolvidos.

Ao Professor Renato Bergamo pelo auxílio no desenvolvimento dos desenhos técnicos.

Aos bolsistas Douglas, Júlio e Eduardo pela colaboração neste trabalho;

Ao técnico Eugenio Eduardo Fabris pelo apoio no desenvolvimento das placas eletrônicas e dicas no desenvolvimento do programa;

À minha esposa Beronice, pela dedicação, auxílio e incentivo durante estes anos e principalmente durante o mestrado;

A todos os outros que, de uma forma ou de outra, contribuíram para este trabalho.

Meu muito obrigado,

Resumo

O presente projeto consiste na instrumentação e no desenvolvimento de um sistema de supervisão e controle da velocidade do vento do túnel de vento para ensaios de turbinas eólicas que foi construído no IFSC (Instituto Federal de Santa Catarina) campus Chapecó. O túnel de vento possui uma hélice de 2700 mm de diâmetro (Multi-Wing), um motor veicular a combustão, um duto de 2780 mm de diâmetro e 4000 mm de comprimento. O túnel proporciona a geração de ventos com velocidade de aproximadamente 15 m/s a uma distância de mais de 4 m da hélice com a mesma girando a uma velocidade de 450 RPM. Antes da implantação deste projeto o túnel operava de forma manual e sem controle de velocidade.

Este trabalho consiste no desenvolvimento de um sistema de controle e supervisão que é capaz de realizar a medição e supervisão automatizada das variáveis medidas, e controlar a velocidade do vento gerado pelo túnel em valores especificados nos ensaios. Para isto foi necessário instrumentar o túnel com sensores e criar interfaces com o computador e desenvolver programas de supervisão e controle.

Palavras Chave: Túnel de vento; Ensaios Turbinas Eólicas; Controle e Supervisão; Mecatrônica.

Abstract

The present project consists in the instrumentation and development of a wind tunnel wind speed monitoring and control system for wind turbine testing that was built at the IFSC (Federal Institute of Santa Catarina) Chapecó campus. The wind tunnel has a propeller of 2700 mm in diameter (Multi-Wing), a motor vehicle combustion, a duct of 2780 mm in diameter and 4000 mm in length. The tunnel provides wind generation at speeds of approximately 15 m / s at a distance of more than 4 m from the propeller rotating at 450 RPM. Prior to the implementation of this project the tunnel was operated manually and without speed control.

This work consists in the development of a control and supervision system that is able to perform the automated measurement and supervision of the measured variables and to control the wind speed generated by the tunnel in the values specified in the tests. For this it was necessary to instrument the tunnel with sensors and to create interfaces with the computer and to develop programs of supervision and control.

Lista de Figuras

Figura 1. 1 Capacidade eólica instalada anualmente no mundo. (Fonte: Global Wind Energy Council, 2017).	20
Figura 2. 1 Componentes de um túnel de vento de circuito fechado. (Fonte: PEREIRA, 2010)	25
Figura 2. 2 Componentes de um túnel de vento de circuito aberto. (Fonte: Jinbo, 2016)	26
Figura 2. 3 Veículo de fórmula 1 em teste (Fonte: Google Imagens)	27
Figura 2. 4 Teste Ford GT em túnel de vento (Fonte: Google Imagens)	28
Figura 2. 5 Teste de caminhão em túnel de vento (Fonte: Google Imagens)	28
Figura 2. 6 Aeronave da Embraer em teste (Fonte: Google Imagens)	29
Figura 2. 7 Simulação de queda livre em túnel de vento. (Fonte: Google Imagens)	30
Figura 2. 8 Teste de turbina eólica em túnel de vento. (Fonte: Alé, 2010).	30
Figura 2. 9 Sistema de controle de velocidade por bloqueio através de aletas (Fonte: Custódio, 2010)	31
Figura 2. 10 Sistema automático de controle utilizando inversor de frequência. (Fonte: Custódio, 2010)	32
Figura 2. 11 Anemômetros de conchas e de hélice.	33
Figura 2. 12 Sistema genérico de controle em malha fechada.	34
Figura 2. 13 Sistema de controle em malha fechada do túnel de vento.	35
Figura 2. 14 Escoamento na região de entrada de um tubo.	36
Figura 3. 1 Ciclo de vida do produto. (Fonte: Rozenfeld 2006).	39
Figura 3. 2 Matriz QFD.	43
Figura 3. 3 Matriz QFD do projeto.	44
Figura 3. 4 Função global do sistema.	49
Figura 3. 5 Funções elementares do sistema	50
Figura 3. 6 Layout projetado para tela de supervisão.	55
Figura 3. 7 Sistema de controle em malha fechada do túnel de vento.	56
Figura 3. 8 pedal acelerador e potenciômetro. Fonte Informativo técnico DS.	57
Figura 3. 9 Montagem Base, servo, engrenagem e polias para fixação do servo ao acelerador.	58
Figura 3. 10 Encoder relativo de 100 pulsos.	59
Figura 3. 11 Anemômetro de conchas marca Thies.	59
Figura 4. 1 Base inicial do servo motor.	61
Figura 4. 2 Desenho da base de fixação do servo motor e do tencionador da correia.	62
Figura 4. 3 Nova base de fixação do servo motor.	62
Figura 4. 4 polia sincronizadora 32 dentes.	63
Figura 4. 5 Montagem do acoplamento do encoder ao eixo da hélice.	64
Figura 4. 6 Instalação para testes de comunicação entre sensores, servo e arduino.	64
Figura 4. 7 Placa eletrônica para comunicação sensores, servo e arduino.	65
Figura 4. 8 Circuito eletrônico da placa de comunicação sensores, servo e arduino lado A do Conector.	65
Figura 4. 9 Circuito eletrônico da placa de comunicação sensores, servo e arduino lado B do conector e placa circuito corta corrente.	66
Figura 4. 10 Tela de interface do supervisor.	68
Figura 4. 11 Diagrama de blocos do supervisor.	69
Figura 5. 1 Gráfico de leitura com servo a 0°	72
Figura 5. 2 Leitura do osciloscópio servo a 0°.	74
Figura 5. 3 Leituras dos sensores com valor de referência e variação.	75

Figura 5. 4 Teste de leitura com ar comprimido.....	76
Figura 5. 5 Montagem para o teste com ar comprimido.....	77
Figura 5. 6 Teste de levantamento da curva característica.	81
Figura 5. 9 Resultado do primeiro teste PID.	83
Figura 5. 10 Dados de leitura após implantação do PID.	84

Lista de Tabelas

Tabela 1. 1 Matriz energética do Brasil em 2018. Fonte: ANEEL – Banco de Informações de Geração, 2018.....	20
Tabela 1. 2 projeção energética do Brasil até 2024. Fonte: ANEEL – Banco de Informações de Geração, 2013.....	21
Tabela 3. 1 Necessidades dos clientes	40
Tabela 3. 2 Requisitos dos clientes	41
Tabela 3. 3 Requisitos de projeto	46
Tabela 3. 4 Lista de Especificações do Produto	47
Tabela 3. 5 Matriz morfológica.	51
Tabela 3. 6 Solução alternativa.....	52
Tabela 5. 1 Valores de desvio padrão e médias das leituras dos sensores.	72
Tabela 5. 2 valores para a sintonia PID.....	82

Lista de Abreviaturas e Siglas

ANEEL	Agencia Nacional de Energia Elétrica
AEGP	Aerogeradores de grande porte
AEPP	Aerogeradores de pequeno porte
IFSC	Instituto Federal de Santa Catarina
PIC	Interface controladora de periféricos
RPM	Rotações por minuto
GWEC	Global Wind Energy Council
MW	Mega Watt
UCE	Unidade de Controle Eletrônico
PID	Proporcional Integral e Derivativo

SUMÁRIO

CAPITULO 1 INTRODUÇÃO	19
1.1 Considerações iniciais e motivação	19
1.2 Objetivos	22
1.3 Estrutura do Trabalho escrito	23
CAPITULO 2 PESQUISA BIBLIOGRAFICA E DE ESTADO DA ARTE	25
2.1 Tipos de túnel de vento	25
2.2 Componentes de um túnel de vento	26
2.3 Aplicações de túnel de vento	27
2.4 Controle de velocidade e instrumentação em túneis de vento	31
2.5 Descrição do túnel de vento idealizado para este trabalho	33
CAPITULO 3 PROJETO DO TÚNEL DE VENTO AUTOMATIZADO	37
3.1 Projeto Informacional	37
3.1.1 Definição do ciclo de vida do produto	37
3.1.2 Levantamento das necessidades dos clientes.....	39
3.1.3 Avaliação dos requisitos de cliente x requisitos de projeto.....	45
3.1.4 Lista de especificações do projeto	47
3.2 Projeto Conceitual	48
3.2.1 Definição da estrutura funcional do produto	48
3.2.2 Princípios de solução e geração de concepções alternativas	50
3.2.3 Avaliação das concepções	53
3.3 Projeto preliminar e detalhado	54
3.3.1 Proposta de sistema de supervisão e controle	54
3.3.2 Mecanismo de aceleração do ventilador	57
3.3.3 Instrumentação para medição da rotação da hélice e velocidade do ar.	58
3.3.4 Peças mecânicas.	60
CAPITULO 4 - CONSTRUÇÃO E OPERACIONALIZAÇÃO DO PROTÓTIPO	61
4.1 Mecanismo de aceleração do ventilador	61
4.2 Instalação do encoder	63
4.3 Testes iniciais de leitura do encoder e do anemômetro de conchas	64
4.4 Programa de controle e supervisão proposto	66
CAPITULO 5 – VALIDAÇÃO EXPERIMENTAL E RESULTADOS	71
5.1 Introdução	71
5.2 Resultados experimentais	71
5.3 Incertezas de medição	77
5.3.1 Velocidade do Vento	77
5.3.2 Rotação da Hélice medida pelo Encoder.....	78
5.4 Resultados com o controle automático PID	80
CAPITULO 6 CONCLUSÕES	85
6.1 Introdução	85
6.2 Análise de objetivos e resultados	85
6.3 Recomendações para trabalhos futuros	86
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	89

CAPITULO 1 INTRODUÇÃO

1.1 Considerações iniciais e motivação

As fontes de energia renováveis têm contribuído crescentemente para atender a demanda de energia elétrica ao redor do mundo, e a energia eólica está inserida neste meio. As tecnologias para geração de energia oriunda da energia eólica vêm evoluindo, das primeiras turbinas 50 kW com 15 m de diâmetro da década de 1980 até as mais recentes com potência nominal de 3,5 MW com 138 m de diâmetro do rotor, sem caixa de engrenagens, velocidade variável e com ajuste do passo das pás (ENERCON, 2017). Com essa evolução o custo com a energia eólica vem caindo já que os sistemas também estão operando durante um período maior sem necessidades de manutenção.

A energia eólica na matriz energética mundial tem aumentado significativamente. No Brasil, em 2017, a energia eólica passou a contribuir com 6,80% de capacidade de geração, em 2012 era 1,56%. Mesmo com o crescimento da capacidade eólica instalada o potencial eólico disponível em nosso país é grande, isso tanto em usinas eólicas como em micro geração. Pesquisas têm sido desenvolvidas em várias frentes, como as desenvolvidas por (SINGH et al, 2013), (ADEGAS, 2003), (GIPE, 2000), (JINBO, 2016) entre outros, dentre estas em sistemas eólicos inovadores que possibilitem o aproveitamento dos potenciais eólicos em faixas de ventos que não tem sido bem aproveitado (menores que 4m/s e maiores que 25m/s).

Em nível mundial a capacidade global instalada anualmente de sistemas de geração eólica aumentou de 6.500 MW em 2001 para 54.642 MW no final de 2016 conforme dados da GWEC (Global Wind Energy Council) apresentados na Figura 1.1.

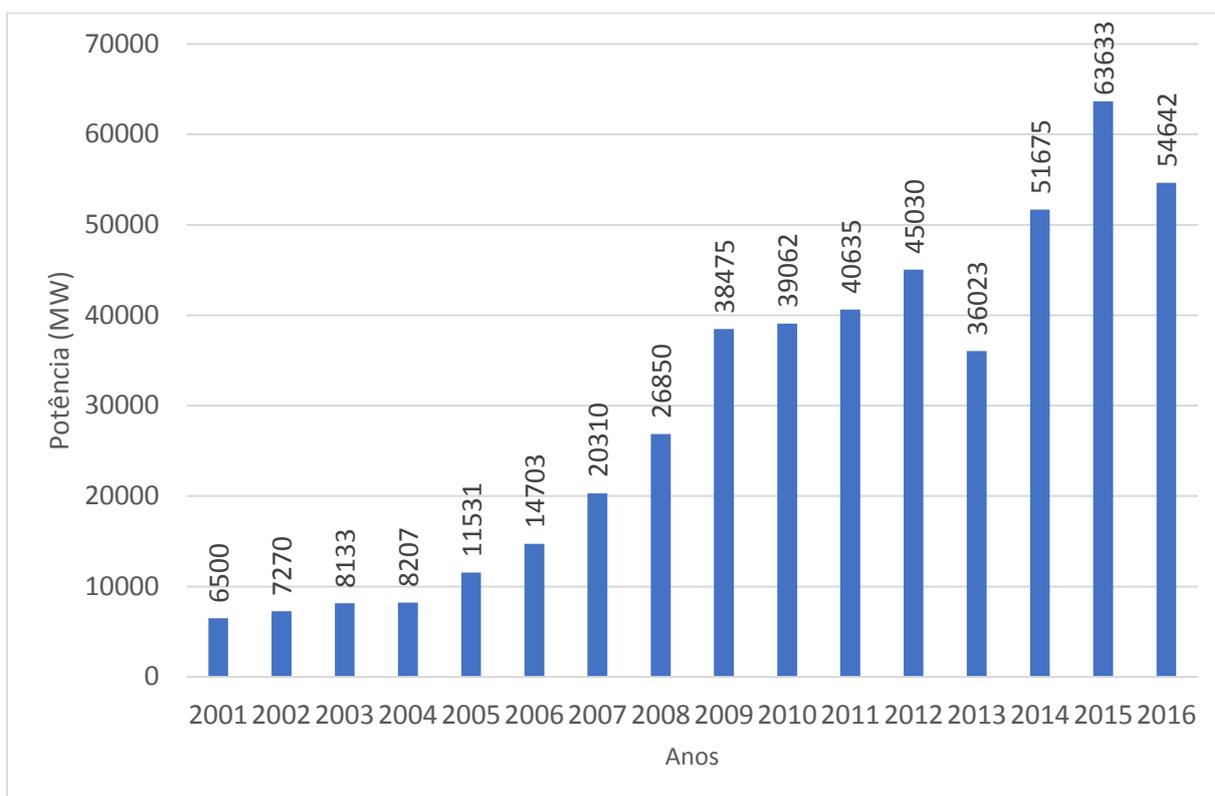


Figura 1. 1 Capacidade eólica instalada anualmente no mundo. (Fonte: Global Wind Energy Council, 2017).

A potência eólica global instalada e acumulada alcançou 486.790 MW no final de 2016 conforme dados da GWEC (Global Wind Energy Council).

O cenário da energia eólica no Brasil no período de 2001 a 2017 também foi de um aumento expressivo da potência instalada quando em 2001 era de 21 MW contribuindo com 0,03% na matriz energética, atingindo em 2017 a potência de 12.920 MW contribuindo com então 8,1% conforme Tabela 1.1 (ANEEL, 2017).

Tabela 1. 1 Matriz energética do Brasil em 2018. Fonte: ANEEL – Banco de Informações de Geração, 2018.

Tipo	Quantidade	% do total	Potência Instalada (kW)	% do total
Central Geradora Hidrelétrica - CGH	685	9,6	672.819,05	0,4
Pequena Central Hidrelétrica - PCH	427	6,0	5.077.852,57	3,2
Usina Hidrelétrica - UHE	220	3,1	96.405.578,88	60,3
Central Geradora Solar Fotovoltaica - UFV	2231	31,4	1.306.505,63	0,8
Central Geradora Eólica - EOL	529	7,4	12.920.942,86	8,1
Usina Termelétrica - UTE	3007	42,3	41.371.310,16	25,9
Usina Termonuclear - UTN	2	0,0	1.990.000,00	1,2
Total	7101	100,0	159.745.009,15	100,0

Na tabela 1.2 pode-se verificar a projeção estimada para os próximos anos no Brasil onde a energia eólica deve alcançar uma potência instalada de até 16.289 MW até 2025 (ANEEL, 2017).

Tabela 1. 2 projeção energética do Brasil até 2024. Fonte: ANEEL – Banco de Informações de Geração, 2013.

Aumento projetado de capacidade instalada (MW)	2018	2019	2020	2021	2022	2023-2025	Total
Usinas Eólicas - EOL	1195	1813	159	120	0	82	3369
Usinas Hidrelétricas - UHE	2136	5236	0	32	71	76	7551
Pequenas Centrais Hidrelétricas - PCH	141	149	402	503	147	69	1411
Usinas Termelétricas - UTE	199	878	2229	1464	70	201	5041
Usinas Solares Fotovoltaicas - UFV	835	476	48	200	0	0	1559
Total	6524	10571	4858	4340	2310	428	18931
Disto: sem restrição	4396	6374	1602	48	70	25	34493
com restrição (licença ambiental)	111	2177	1236	2272	219	403	61435
grave restrição (ambiental e judicial)	0	0	0	0	0	0	121459

O crescimento constante na instalação de sistemas eólicos, no mundo e no Brasil, acentuou-se nos últimos anos. Isso demonstra que para produção de energia por geradores eólicos concentrados assim como a micro geração de energia eólica para geração distribuída, devem ser exploradas através de pesquisas que potencializem esse crescimento.

A energia eólica é uma forma de geração que vem crescendo, como podemos ver pelos dados apresentados pela ANEEL e o GWEC. Porém conforme (ADEGAS, 2003) e (ALÉ, 2010) no desenvolvimento de novos modelos pode-se utilizar túneis de vento para analisar o desempenho dos protótipos desenvolvidos, como o túnel cuja automação é proposta neste trabalho. Túneis de vento são utilizados no ciclo de desenvolvimento de aerogeradores nas etapas de pesquisa e desenvolvimento para a criação de protótipos e busca por novas tecnologias em geração eólica. Túneis de vento também podem ser utilizados para testes de verificação de desempenho da curva de potência de aerogeradores de pequeno porte (AEPP) encontrados comercialmente, como testes desenvolvidos por (ALÉ, 2010).

A norma NBRIEC – 61400-12-1 de 2012 baseada na norma IEC - 61400-12-1 estabelece os critérios para levantar a curva de potência de aerogeradores de grande porte (AEGP), para os AEPP não existe norma específica. O anexo H da norma NBRIEC – 61400-12-1 apresenta orientações básicas a serem seguidas para este tipo de máquina. Trabalhos como o de (CORBUS et al, 1999). descrevem procedimentos para testes e certificação de AEPP. Já (GIPE, 2000) realiza testes de campo

para obter a curva de potência de máquinas comerciais que operam em sistemas eólicos autônomos, utilizando banco de baterias para armazenagem de energia.

Para atender essas normas faz-se necessária a implementação de sensores que são exigidos pelas normas para medir a velocidade do vento, temperatura, pressão e umidade relativa do ar. Porém no contexto deste trabalho o principal objetivo é tornar o túnel de vento automatizado e não verificar as demais grandezas relativas ao fluxo do vento. Optou-se então por instalar apenas o sensor de velocidade do vento o que já possibilita realimentar o motor a combustão para que a velocidade do vento seja controlada conforme for pretendido no ensaio.

Para o desenvolvimento destas pesquisas e testes em protótipos de turbinas eólicas se torna necessária a instalação de túneis de vento, como o proposto neste trabalho, possibilitando os devidos ensaios. Mesmo com crescimento nas possibilidades de pesquisas na área eólica são poucas instituições que disponibilizam de túneis de vento de porte maiores para testes em protótipos em escala próxima ao tamanho real.

A motivação principal para a realização deste trabalho foi este cenário de crescimento da energia eólica e da disponibilidade de um túnel de vento no laboratório de Conformação Mecânica do Campus Chapecó IFSC. Este túnel de vento foi desenvolvido mecanicamente no contexto de projetos de pesquisa, mas para o pleno aproveitamento de sua potencialidade era necessário à sua otimização mecânica, instrumentação e automatização.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivos Gerais

Este trabalho tem por objetivo geral a instrumentação e desenvolvimento do sistema de controle de velocidade do vento de um túnel de vento com propulsão por motor a combustão interna, existente no laboratório de Conformação do IFSC Campus Chapecó.

1.2.2 Objetivos Específicos

Para atingir o objetivo geral será necessário realizar os seguintes objetivos específicos.

- Pesquisar o estado da arte em termos de instrumentação e automação de túneis de vento
- Desenvolver e instalar sistemas de medição no túnel de vento
- Desenvolver o hardware e programa a ser empregado no sistema de controle da rotação da hélice do túnel de vento

- Integrar todos os subsistemas de hardware (Medição da velocidade angular, Anemômetro, atuador e microcontrolador) e programa (Supervisório) e operacionalizar o túnel de vento
- Testar, avaliar e documentar o comportamento fluidodinâmico do túnel de vento, mapeando os perfis de velocidade que este é capaz de realizar

1.3 Estrutura do Trabalho escrito

CAPITULO 2: neste capítulo é abordada a utilização de túneis de vento, equipamentos disponíveis e que são empregados e as tecnologias adotadas e necessárias na construção de túneis de vento. Esta fase pode ser classificada como Estado da Arte.

CAPITULO 3: serão relatadas as atividades desenvolvidas para obtenção das especificações de projeto, nesta fase do trabalho foram definidas as necessidades dos clientes que culminaram como base para a identificação dos requisitos de projeto e em seguida nas especificações de projeto. Esta etapa pode ser denominada como Projeto informacional.

Será apresentada a fase definida a partir das especificações de projeto, e são estabelecidos a estrutura funcional do produto; os princípios de solução para atender as funções da estrutura e as concepções alternativas resultantes. E por fim o conceito que foi aplicado. Nesta etapa é desenvolvido o projeto Conceitual do produto.

Após a conclusão do projeto conceitual dar-se-á o início do projeto preliminar do sistema do túnel de vento, definindo-se forma, selecionando materiais e processos de fabricação, dimensões e detalhamento de desenhos e componentes do sistema.

CAPITULO 4: Neste capítulo são apresentados os resultados da fase de construção e testes do túnel de vento. O mesmo foi construído nas dependências do Laboratório de Ajustagem e Conformação (Lab. 203) no campus Chapecó do IFSC.

CAPITULO 5: neste capítulo são apresentadas as conclusões, sugestões, impressões e comentários referente ao trabalho.

CAPITULO 2 PESQUISA BIBLIOGRAFICA E DE ESTADO DA ARTE

Neste capítulo é apresentado o conteúdo pesquisado para que se tenha uma base de conhecimentos a ser usado no processo de projeto de modo a atingir o cumprimento dos objetivos estabelecidos neste trabalho. São apresentadas as formas construtivas dos túneis de vento, as principais partes e suas funções e as aplicações dos túneis de vento.

2.1 Tipos de túnel de vento

Túneis de vento estão classificados de acordo com a velocidade do fluxo de ar em que eles operam (SINGH, 2013), sendo quatro tipos principais: Túneis de baixas velocidades, os usados na área de energia eólica e também os mais comuns, eles operam com velocidade até 100m/s, e são chamados de subsônicos. Os túneis trans-sônicos operam entre 100m/s e 413m/s e são utilizados na indústria aeronáutica. Os túneis utilizados para estudos de turbinas a jato e aeronaves militares são os túneis supersônicos, que operam de 413m/s a 1720m/s. E o último deles são os túneis hipersônicos utilizados em estudos de foguetes e naves espaciais, operam de 1720m/s a 5160m/s.

Os túneis de vento também podem ser construídos com circuito aberto ou circuito fechado. Os de circuito fechado fazem o ar recircular dentro dos dutos, aproveitando assim melhor a inércia do ar em movimento, este tipo é mais usado em testes de alta velocidade de vento, figura 2.1. Os principais elementos do túnel de vento de circuito fechado são: a seção de testes, a contração, a colmeia e as telas, a câmara estabilizadora, os difusores e ventilador (PEREIRA, 2010).

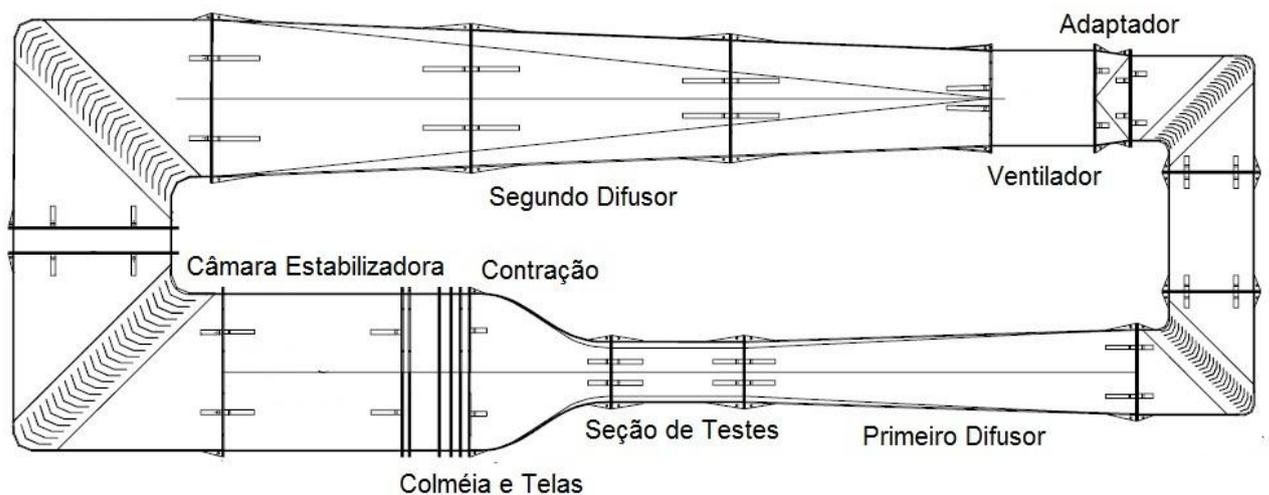


Figura 2. 1 Componentes de um túnel de vento de circuito fechado. (Fonte: PEREIRA, 2010)

Nos túneis de vento de circuito aberto existe uma entrada e uma saída (admissão e escape) de ar, Figura 2.2. Nesta configuração são eliminados curvas e difusores, porém, exigem maior potência

do motor de acionamento da hélice devido as perdas de energia no fluxo do ar, sua construção é simplificada e de menor custo de fabricação. Para este tipo de túnel existem duas configurações, uma chamada de exaustão onde a hélice está a jusante a seção de testes considerando o fluxo de ar e a outra é chamada de ventilação, onde a hélice está a montante em relação a seção de testes (JOGLEKAR, 2014). A figura 2.2 mostra um túnel de circuito aberto do tipo exaustão.

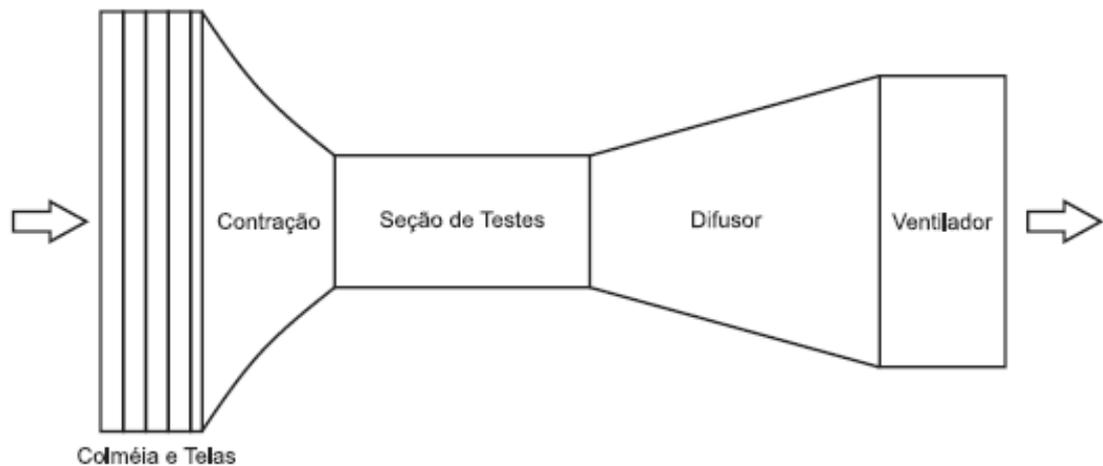


Figura 2. 2 Componentes de um túnel de vento de circuito aberto. (Fonte: Jinbo, 2016)

2.2 Componentes de um túnel de vento

Os principais componentes de um túnel de vento são:

- Telas retificadoras e Colmeias

As telas têm a função de reduzir o tamanho da camada limite, aumentar a uniformidade do fluxo de ar, mas causa uma queda de pressão. São instalados a jusante das colmeias e geralmente na entrada da seção de testes. As colmeias têm a função de reduzir as não uniformidades do fluxo de ar. A quantidade de células por diâmetro da seção da câmara deve ser aproximadamente de 150 e a profundidade da colmeia em relação ao diâmetro da célula de 6 a 8 vezes (SINGH, 2013).

A seção onde as telas retificadoras e as colmeias são instaladas também é chamada de câmara de acomodação e estão posicionadas antes da contração

- Câmara de contração

A câmara de contração é instalada na entrada da seção de testes proporcionando um aumento da velocidade do fluxo de ar, reduzindo não uniformidades do fluxo. Em pequenos túneis de vento aplica-se uma razão de contração de 4 a 9 vezes (SINGH, 2013), ou seja, comprimento reduzido e grande contração, proporcionando redução de perdas de energia nas telas e redução na camada limite.

- Seção de Testes

A seção de testes é onde são realizadas as medições e observações sobre o objetivo em teste. A seção deve ser longa o suficiente para que os distúrbios resultantes da contração e das telas sejam amortecidos, mas não muito longa que ocasione o crescimento da camada limite e perdas de energia

A seção de teste é a região do túnel de vento onde os corpos a serem testados são posicionados para os experimentos. Suas paredes devem seguir uma forma que facilitem a visualização e o manuseio do experimento, sem que haja interferência, ou seja, que não perturbe o escoamento

As principais equações de fundamentos da aerodinâmica que podem ser utilizados para explicar comportamentos de fluidos em condutos de fluidos, assim como o comportamento do ar no interior de túneis de vento podem ser vistos em (BRUNETTI, 2008).

2.3 Aplicações de túnel de vento

Túneis de vento são aplicados em diversas áreas da pesquisa. O principal motivo da utilização dos túneis de vento é o estudo do comportamento do ar em contato com o objeto em teste.

Como exemplo de aplicação pode-se ver a aplicação de túnel de vento na indústria automobilística como vemos nas figuras 2.3, 2.4 e 2.5



Figura 2. 3 Veiculo de formula1 em teste (Fonte: Google Imagens)



Figura 2. 4 Teste Ford GT em túnel de vento (Fonte Google Imagens)



Figura 2. 5 Teste de caminhão em túnel de vento (Fonte: Google Imagens)

Outra aplicação dos túneis de vento é a indústria de aeronaves onde são feitas simulações do comportamento aerodinâmico de aeronaves que estão em desenvolvimento, onde também podem ser validados com dados físicos no túnel de vento, as modelagens aerodinâmicas desenvolvidas em computador. A Figura 2.6 mostra uma aeronave em teste em túnel de vento.



Figura 2. 6 Aeronave da Embraer em teste (Fonte: Google Imagens)

Os testes feitos podem ser em protótipos de tamanho real ou dependendo das condições do teste pode-se usar protótipos em escala reduzida.

Túneis de vento também são utilizados para o treinamento de paraquedistas, onde são usados para simular as quedas de paraquedas. A figura 2.7 mostra a simulação de uma queda livre em um túnel de vento.



Figura 2. 7 Simulação de queda livre em túnel de vento. (Fonte: Google Imagens)

Com o crescimento na produção de energia oriunda da geração eólica os túneis de vento estão sendo aplicados para o levantamento da curva de potência dos geradores eólicos.

Os túneis de vento são aplicados na construção civil, no estudo de aeronaves espaciais e foguetes, calibrações de instrumentos de medições de velocidade do vento além de outras aplicações que necessitam de estudo do comportamento do objeto em teste em contato com o ar. Trabalhos desenvolvidos por (ALÉ, 2010) mostram a utilização de túneis de vento para testes em AEPP. A figura 2.8 mostra testes desenvolvidos por (ALÉ, 2010).



Figura 2. 8 Teste de turbina eólica em túnel de vento. (Fonte: Alé, 2010).

2.4 Controle de velocidade e instrumentação em túneis de vento

Para que os túneis de vento possam avaliar de modo eficiente o produto que está sendo testado, é fundamental que as condições de velocidade do fluxo gerado possam ser variadas de modo controlado, seja este controle por meios de restrição de fluxo do ar ou por atuação sobre a rotação da hélice do ventilador.

O controle por restrição de fluxo ocorre com o bloqueio da passagem do vento através de aletas que podem ser ajustadas. Conforme (CUSTÓDIO, 2010) este sistema é simples e robusto, porém pouco eficiente para padrões mais exigentes de controle. A figura 2.9 mostra a manivela de ajuste da velocidade e as aletas que são ajustadas para o controle da velocidade.



Figura 2. 9 Sistema de controle de velocidade por bloqueio através de aletas (Fonte: Custódio, 2010)

A outra forma de controle da velocidade é através da variação da rotação da hélice, sendo que esse tem sido o mais usual.

Na grande maioria dos túneis de vento são usados motores elétricos para acionar a hélice. Nestes casos o ajuste da velocidade é feito por inversores de frequência atuando no motor, fazendo com que a rotação seja ajustada conforme o programado no ensaio.

Nesses casos, pode-se utilizar algumas formas de controle, que vão desde soluções mais simples e com menor custo, até soluções mais complexas e com custo mais elevado. O hardware a ser utilizado vai depender das necessidades de cada túnel, mas pode-se utilizar CLP (Controlador Lógico Programável), placas desenvolvidas com microcontroladores do PIC, Arduíno entre outras.

A figura 2.10 mostra de forma esquemática um sistema de controle de velocidade onde é utilizado um controle PID e inversor de frequência para controlar a velocidade do ar no interior do túnel de vento.

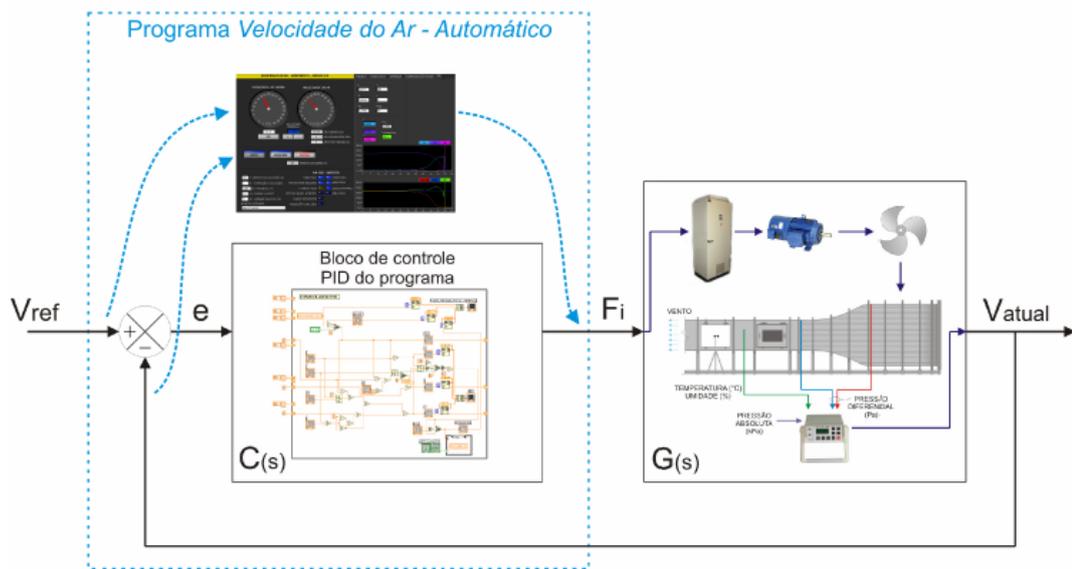


Figura 2. 10 Sistema automático de controle utilizando inversor de frequência. (Fonte: Custódio, 2010)

Em geral para a instrumentação em túneis de vento é utilizado sensores de medição direta como anemômetros que podem ser de alta ou baixa precisão. Outro tipo de sensor utilizado é de medição indireta, onde a velocidade do vento é calculada através da diferença de pressão entre as extremidades do convergente, para esta medição também são necessárias as medidas de temperatura e pressão atmosférica, para o cálculo da velocidade. A figura 2.11 mostra alguns anemômetros que podem ser encontrados comercialmente. Em (BRUNETTI, 2008) pode ser visto as equações a serem utilizadas para o cálculo da velocidade do vento por medição indireta (Efeito Venturi).



Figura 2. 11 Anemômetros de conchas e de hélice.

2.5 Descrição do túnel de vento idealizado para este trabalho

Para o desenvolvimento do túnel desejado será necessário empregar um controle onde é informado um sinal de referência que é a velocidade do vento desejada e o controle deverá ajustar os parâmetros do processo para que a saída esteja ajusta de acordo com o valor desejado. O sistema que opera dessa forma é chamado de sistema em malha fechada.

Um sistema que opera em malha fechada possui um sensor ($H(s)$) que irá medir o sinal de saída (Y) e vai compará-lo com o sinal de referência (R). A diferença entre esses sinais é o erro (E) que será enviado ao controle ($C(s)$) para que este calcule o sinal de controle (u) a ser enviado ao processo ($G(s)$) a cada instante de tempo. A figura 2.12 mostra um sistema genérico de controle em malha fechada.

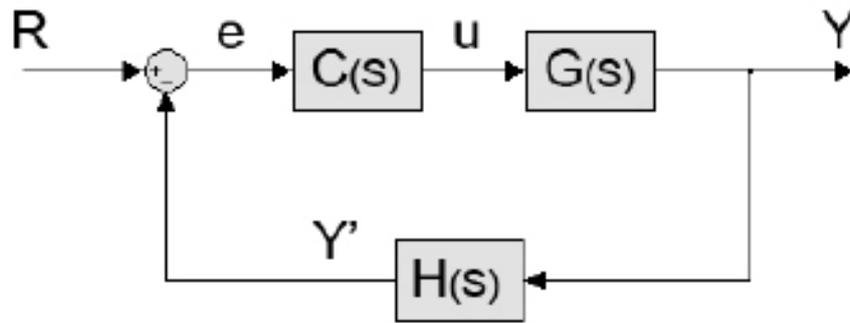


Figura 2. 12 Sistema genérico de controle em malha fechada.

O sistema proposto neste trabalho é composto por um sinal de referência da velocidade do vento ($V(\text{ref})$) escolhido pelo operador, onde o objetivo é que a velocidade atual ($V(\text{atual})$) na saída do túnel se iguale ao valor de referência. Na figura 2.13 se pode ver o diagrama de blocos com o sistema proposto, acrescido de figuras para melhor representar. O quadro azul tracejado representa a parte de controle e supervisor. O supervisor desenvolvido no Labview terá o papel de receber a velocidade do vento atual na saída do túnel e também enviar o valor de referência para o controle PID do microcontrolador do Arduino. Outra função do programa supervisor é enviar os dados coletados dos sensores de rotação e de velocidade do vento para uma planilha eletrônica para armazenar os dados do ensaio (geração dos gráficos e relatórios do ensaio).

O programa de controle foi desenvolvido na plataforma do Arduino. O envio do sinal de atuação ao processo e o controle da planta é feito pelo programa de controle instalado no microcontrolador, que é o responsável por receber o valor de ($V(\text{ref})$) e também enviar o valor de ($V(\text{atual})$) para o supervisor, este programa também recebe o sinal dos sensores para que possa desenvolver a ação de controle da correção da posição do pedal do acelerador, através de um controle do tipo PID. O controle PID será melhor explicado no capítulo 5 deste trabalho.

O servo motor recebe o sinal de posição para a correção da posição do pedal acelerador, e através dos potenciômetros que compõe o acelerador, é enviado um sinal a central de controle de injeção de ar e combustível do motor que fará o ajuste da mistura ar-combustível para que o motor gere a rotação necessária no eixo da hélice. Em (OBERT 1971) (WILDNER 2006) (MILHOR 2002) (TOMASI 2015) explicam o comportamento dos motores a combustão e seu módulo de controle.

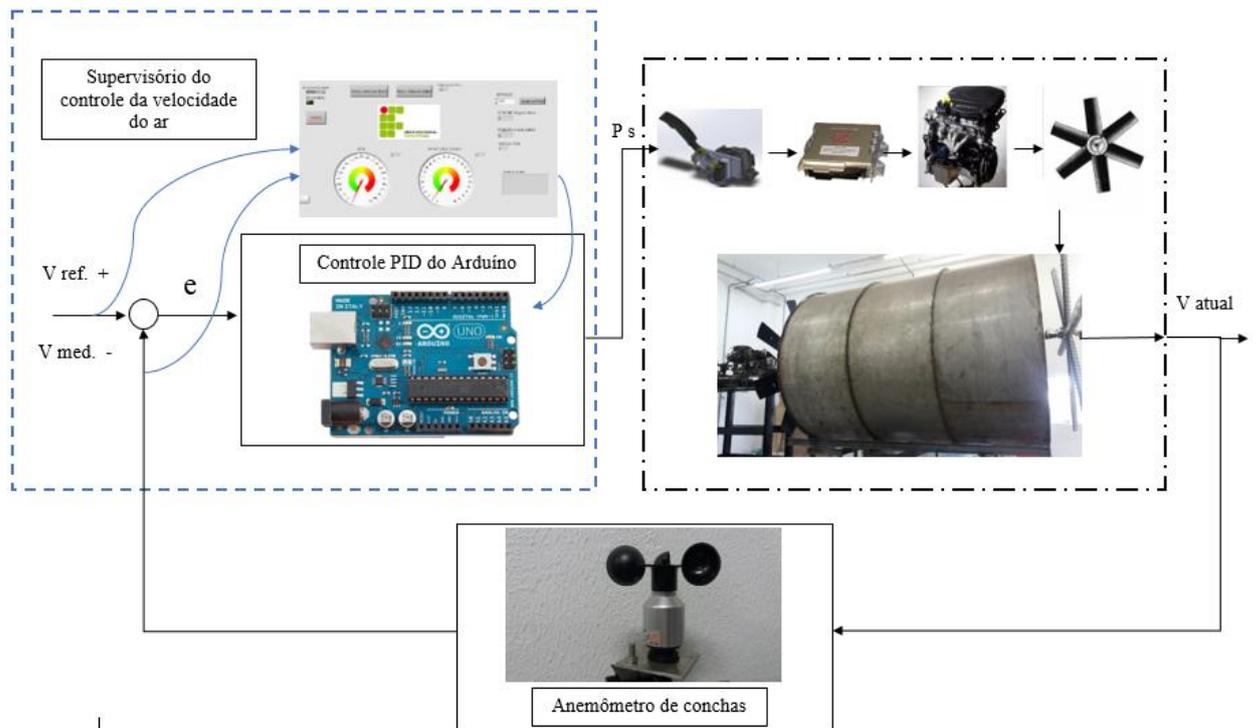


Figura 2. 13 Sistema de controle em malha fechada do túnel de vento.

Perfil Fluido dinâmico do túnel de Vento:

De acordo com (FOX etal 1934) um fluido em um tubo circular com escoamento laminar vai desenvolvendo uma camada limite nas paredes do duto na região de entrada. A superfície do tubo causa um efeito retardante sobre o escoamento devido as forças de cisalhamento tornando a velocidade do fluido reduzida nas proximidades da parede. Suficientemente longe da entrada do tubo a camada limite em desenvolvimento atinge a linha de centro do mesmo e o escoamento torna-se inteiramente viscoso. Quando isto acontece e a forma do perfil de velocidades não se altera com o avanço do escoamento diz-se que o mesmo encontra-se completamente desenvolvido. A distância ajustante, apartir da entrada, até o local em que o escoamento torna-se completamente desenvolvido é chamada de comprimento de entrada.

Para o escoamento laminar, o comprimento de entrada é uma função do número de Reynolds:

$$\frac{L}{D} \cong 0,06 \frac{\rho \bar{V} D}{\mu} \quad (2.1)$$

Onde

L = Comprimento de entrada

D = Diâmetro do tubo

ρ = Massa específica do fluido

μ = Viscosidade dinâmica do fluido

\bar{V} = Velocidade média

A figura 2.14 demonstra o escoamento na região de entrada de um tubo.

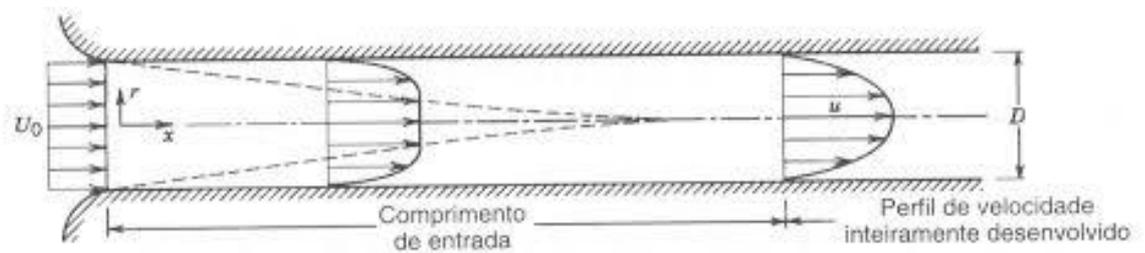


Figura 2. 14 Escoamento na região de entrada de um tubo.

No estudo do túnel desenvolvido devido a comprimento finito do tubo e o perfil não se encontrar completamente desenvolvido o estudo aprofundado do perfil fluidodinâmico não foi possível realizar devido a não aplicabilidade de todos os conceitos da mecânica dos fluidos. E ainda segundo a lei de Poiseuille quando a velocidade de um fluido em um determinado ponto qualquer for constante ao longo do tempo pode-se considerar que o escoamento é estacionário ou permanente. E para o túnel estudado também não houve essa constância na velocidade pois a velocidade nos pontos medidos teve variação.

CAPITULO 3 PROJETO DO TÚNEL DE VENTO AUTOMATIZADO

Neste capítulo são descritas as etapas de projeto para o seu desenvolvimento, sendo abordados os procedimentos seguidos para a definição das especificações do projeto de automação do túnel de vento do Instituto Federal de Santa Catarina (IFSC), campus Chapecó. Como metodologia para o desenvolvimento do projeto, adotou-se o método proposto pelo modelo PRODIP desenvolvido inicialmente por (ROMANO, 2003).

3.1 Projeto Informacional

As especificações de projeto correspondem ao produto final da fase de projeto informacional.

Nesta parte se inicia com a análise detalhada do problema, onde são levantadas as informações para a sua resolução e termina na definição das especificações técnicas do produto.

As especificações de projeto constituem, assim, uma lista de objetivos que o produto a ser projetado deve atender.

A sequência de etapas seguidas na geração das especificações do túnel de vento automatizado pode ser visualizada a seguir, e a descrição dos procedimentos adotados em cada etapa do projeto informacional ocorrerá ao longo deste capítulo.

- Definição do ciclo de vida do produto;
- Definição das necessidades do projeto;
- Conversão das necessidades em requisitos dos clientes;
- Conversão dos requisitos dos clientes em requisitos de projeto;
- Avaliação dos requisitos dos clientes x requisitos de projeto;
- Definição das especificações de projeto.

3.1.1 Definição do ciclo de vida do produto

No processo de desenvolvimento de produtos, o ciclo de vida aponta para a conversão de matéria prima em produtos econômicos com valor agregado (PAHL & BEITZ, 1996). Desde a criação até o descarte, o produto sofre diversos processos, tais como: fabricação, montagem, instalação, operação manutenção, uso, reutilização e descarte (ROOZEMBURG & EEKELS, 1995). Onde cada processo tem seus requisitos e necessidades para o novo produto, o que exige das equipes de projeto, considerar todos os seus inter-relacionamentos desde a concepção até o seu descarte.

(OGLIARI, 1999) aponta para a utilização da análise do ciclo de vida na obtenção das necessidades dos clientes para fins de projeto, propondo o estabelecimento das fases do ciclo de vida do produto como base de categorização das informações de projeto. A definição das fases do ciclo de vida de um produto depende de fatores como: o tipo de produto que vai ser projetado; o tipo de projeto a ser executado; a dimensão da demanda do produto; proximidade do mercado consumidor; suas características de funcionamento; características de uso e manuseio, entre outros (FONSECA, 2000).

Como este trabalho consiste no projeto e fabricação do produto para uma finalidade inicialmente específica e por não ser um produto amplamente comercializado, a definição das fases do ciclo de vida pode estar limitada, pois as fases e as informações relacionadas ficam condicionadas ao conhecimento da equipe do projeto.

O ciclo de vida do túnel de vento foi definido como sendo constituído das seguintes fases: projeto, fabricação, testes, utilização, manutenção e descarte. A figura 3.1 mostra o ciclo de vida idealizado para o túnel de vento. Depois de definido o ciclo de vida do produto, foi efetuada a identificação dos clientes do projeto, os quais foram agrupados em três categorias distintas: clientes internos, clientes intermediários e clientes externos. Os clientes internos foram definidos como sendo todos os relacionados ao processo de desenvolvimento do produto envolvendo as áreas funcionais de projeto, manufatura e manutenção. Os clientes intermediários são todos os envolvidos com a distribuição e comercialização do produto. Os clientes externos são os usuários do produto.

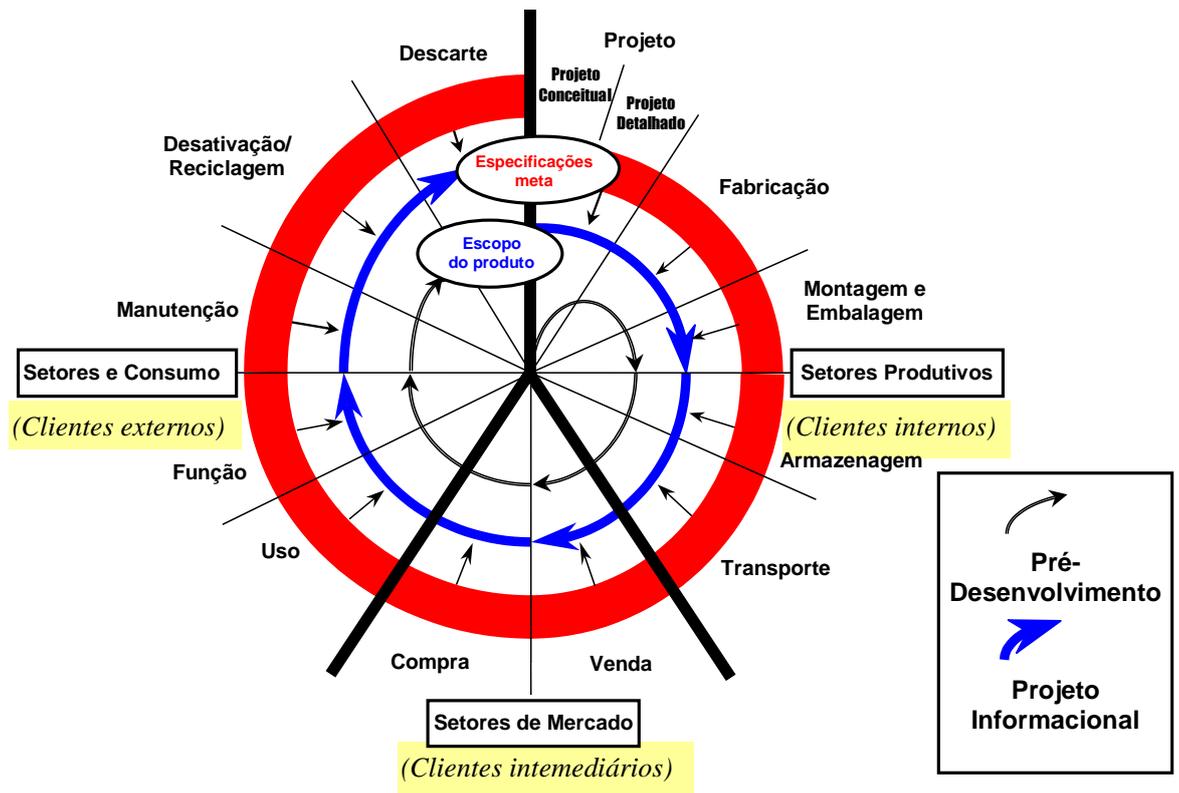


Figura 3. 1 Ciclo de vida do produto. (Fonte: Rozenfeld 2006).

Identificados os clientes do projeto, passou-se a identificação dos atributos do produto. Estes são características inerentes ao produto que são utilizadas como referência na tarefa de levantamento das necessidades dos clientes e na conversão dos requisitos dos clientes em requisitos de projeto. Os atributos utilizados no levantamento das necessidades dos clientes do projeto foram os atributos básicos, que compõe a lista de atributos mínimos proposta por (FONSECA 2000).

Os atributos utilizados foram: funcionamento, ergonomia, estética economia, segurança, confiabilidade, normalização e impacto ambiental. Para a conversão dos requisitos de clientes em requisitos de projeto foram utilizados alguns dos atributos específicos do produto, que também compõe a lista de atributos mínimos, os quais foram: geometria, controle, material, forças e energia.

3.1.2 Levantamento das necessidades dos clientes

Existem duas maneiras gerais de levantar as necessidades dos clientes do projeto para que estas informações possam ser utilizadas na definição de especificações de projeto (FONSECA, 2000): (a) a coleta das necessidades dos clientes do projeto com base nas fases do ciclo de vida do produto, utilizando para este fim questionários dirigidos; (b) a obtenção das necessidades sem consultar os

clientes do projeto. Neste caso, a equipe de projeto define as necessidades dos clientes baseando-se em pesquisas bibliográficas, em trabalhos iniciais de marketing, na experiência da equipe, no corpo de conhecimento da empresa, em listas de verificação, ou nos atributos do produto.

Neste projeto, a identificação das necessidades dos clientes se deu na obtenção das necessidades sem consultar os clientes do projeto. Onde as especificações foram levantadas com base na experiência da equipe e nos atributos do produto.

A tabela 3.1 apresenta as necessidades levantadas.

Tabela 3. 1 Necessidades dos clientes

Fases do Ciclo de Vida	Necessidades dos Clientes
Projeto	1.Utilizar fonte confiável de controle
	2.Utilizar o máximo de materiais e componentes padronizados
	3.Utilizar reduzido número de componentes
	4.Baixa complexidade geométrica
Fabricação	5.Utilizar o máximo de materiais e componentes disponíveis no mercado
	6.Utilizar processos convencionais de fabricação sempre que possível.
	7.Baixo custo de fabricação
	8.Reduzir desperdício de materiais
	9.Permitir fabricação de partes do sistema com equipamentos disponíveis
Utilização	11.Elevada durabilidade
	12.Proporcionar total segurança
	13.Apresentar alta robustez
	14.Baixo consumo de energia
	15.Baixo custo de operação
	16.Baixa frequência de manutenção
	17.Minimizar risco de falhas por má utilização
	18.Baixo nível de ruídos
	19.Baixo nível de vibrações
	20. Proporcionar controle da velocidade do vento
Manutenção	21.Fácil manutenção
	22.Baixo custo de manutenção
	23.Fácil acesso aos componentes
Descarte	24.Utilizar materiais recicláveis

Após terem sido identificadas, estas necessidades foram agrupadas conforme a fase do ciclo de vida a que estavam associadas. Este agrupamento teve por objetivo: (a) verificar os tipos de

necessidades similares; (b) eliminar as repetições; e (c) simplificar as necessidades menos relevantes para o projeto. Ao lado dos requisitos está entre parênteses o número das necessidades da tabela 3.1 que deram origem aos requisitos. Os requisitos dos clientes são mostrados na tabela 3.2:

Tabela 3. 2 Requisitos dos clientes

Fase do ciclo de vida	Requisitos dos clientes	Valor
Projeto	A. Ter controle confiável	26
	B. Ser construído com componentes e materiais padronizados	22
	C. Ter baixa complexidade geométrica (3,4)	19
Fabricação	D. Utilizar o máximo de componentes e materiais disponíveis no mercado	26
	E. Utilizar processos disponíveis de fabricação (6,9)	21
	F. Ter baixo custo de fabricação (7,8)	37
Utilização	G. Ter baixo custo de operação (16, 17)	22
	H. Ser seguro	25
	I. Ter baixa probabilidade de falhas (19, 20)	11
	J. Ter controle automático da velocidade do vento	18
Manutenção	K. Ser de fácil manutenção (23, 24, 25)	17
Descarte	L. Ser fabricado com materiais recicláveis	11

Logo após terem sido gerados os requisitos dos clientes, foi iniciado o processo de valoração dos mesmos. A valoração é um pré-requisito para a aplicação da primeira matriz do QFD. De acordo com (OGLIARI, 1999), usualmente a valoração dos requisitos dos clientes é conduzida pela equipe de projeto, através da análise sistemática e do debate sobre cada uma das necessidades e suas implicações no resultado do projeto.

Neste trabalho a valoração dos requisitos dos clientes se deu através da utilização do método da comparação aos pares, recomendada por (ULLMAN, 1992), utilizando como ferramenta o diagrama de Mudge. O uso do diagrama de Mudge para comparar requisitos dos clientes visando o uso da matriz casa da qualidade foi proposto primeiramente por (VEIGA, 1999).

O diagrama de Mudge nada mais é que uma matriz onde as colunas e as linhas são compostas pelos requisitos de clientes, formando uma matriz quadrada. Nesta matriz compara-se cada um dos requisitos das linhas com todos os requisitos das colunas, um a um, exceto os iguais (que formam a diagonal da matriz). Neste ínterim, decide-se qual requisito apresenta a maior importância, e qual o grau desta importância.

A tabela 3.3 apresenta o diagrama de Mudge do projeto.

Tabela 3. 3 Diagrama de Mudge do projeto

A. Ter controle confiável
B. Ser construído com componentes e materiais padronizados
C. Ter baixa complexidade geométrica
D. Utilizar o máximo de componentes e materiais disponíveis no mercado
E. Utilizar processos disponíveis de fabricação
F. Ter baixo custo de fabricação
G. Ter baixo custo de operação
H. Ser seguro
I. Ter baixa probabilidade de falhas
J. Ter controle automático da velocidade do vento
K. Ser de fácil manutenção
L. Ser fabricado com materiais recicláveis

Requisitos	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	Soma	Ordem
A	3A	3A	3A	1A	0	5A	0	0	0	1A	5A	21	3
B		1B	0	1E	3F	3B	3H	5I	3J	1B	1B	6	8
C			0	1E	1F	3C	5H	5I	3J	3C	3C	9	6
D				3D	5F	3D	5H	3I	5J	0	1D	7	7
E					1E	0	3H	3I	3J	1E	1E	5	9
F						0	5H	1I	3J	1F	1F	11	5
G							3H	1I	3J	1G	1L	1	12
H								0	0	3H	3H	30	1
I									3J	3K	1L	18	4
J										3J	1J	27	2
K											3L	3	11
L												4	10

Valores de importância
1 = um pouco mais importante
3 = mediamente mais importante
5 = muito mais importante
0 = igual importância

Em seguida iniciou-se a aplicação da primeira matriz do QFD. A figura 3.2 apresenta a matriz QFD a ser utilizada. E na figura 3.3 apresenta a matriz do projeto.

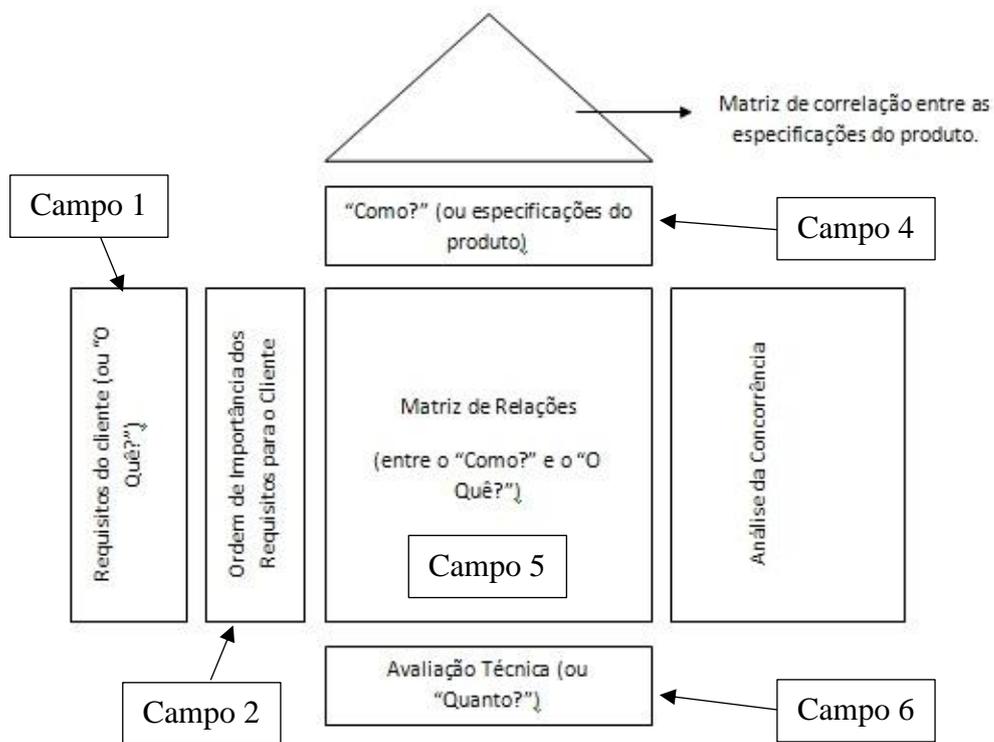


Figura 3. 2 Matriz QFD.

Na matriz deste trabalho utilizar-se-ão somente os campos a seguir para fazer o relacionamento:

Campo 1 – Requisitos dos clientes

Campo 2 – Importância

Campo 4 – Requisitos dos produtos

Campo 5 – Matriz de relacionamentos

Campo 6 – Quantificação dos requisitos dos produtos

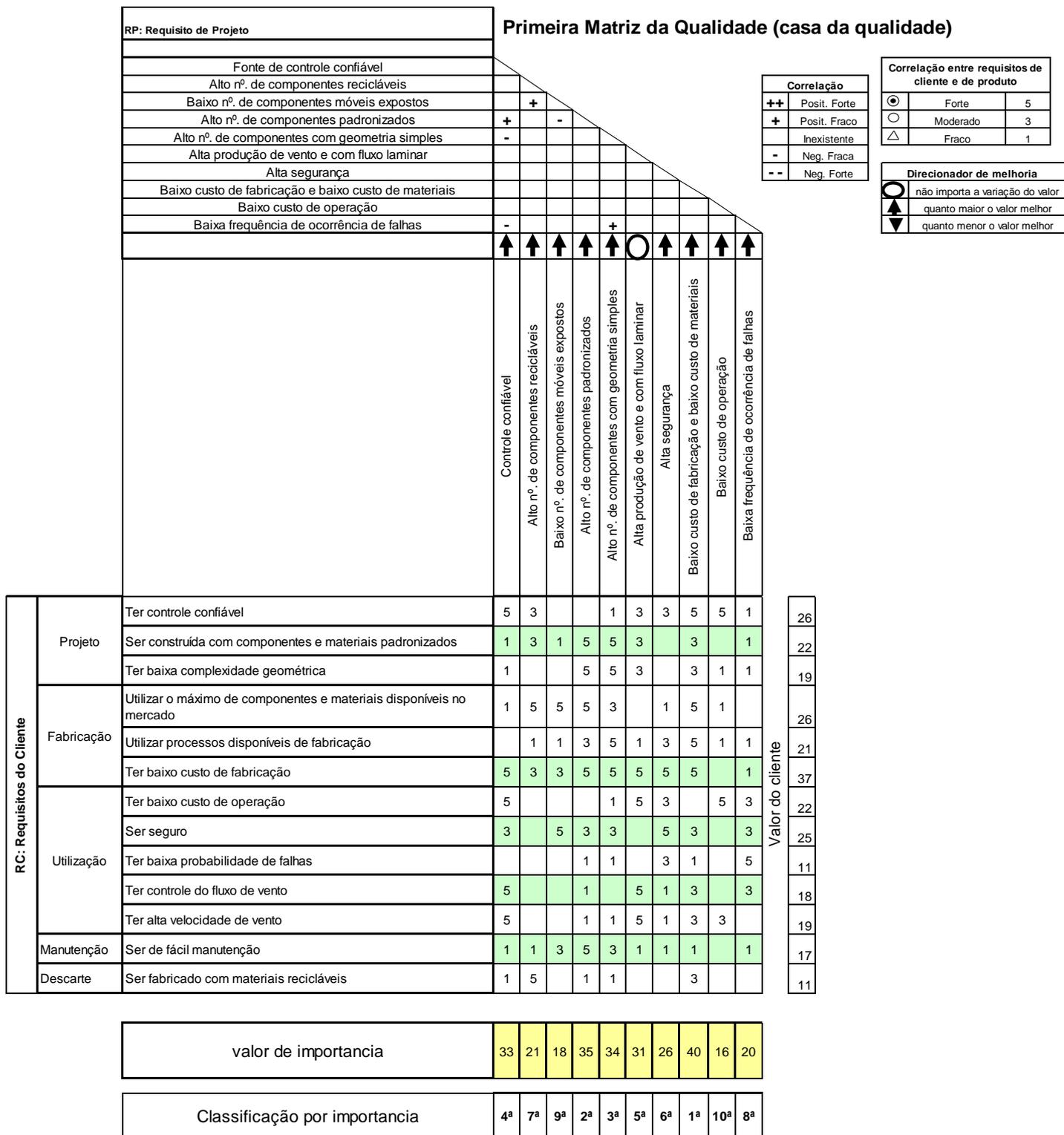


Figura 3. 3 Matriz QFD do projeto.

3.1.3 Avaliação dos requisitos de cliente x requisitos de projeto

Após terem sido identificados e valorados os requisitos dos clientes, partiu-se para a conversão destes em requisitos de projeto, que são características técnicas do produto, passíveis de serem mensuradas através de algum tipo de sensor, e que o produto necessita ter para que os requisitos dos clientes previamente identificados sejam atendidos.

A conversão dos requisitos dos clientes em requisitos de projeto, constitui-se na primeira decisão física sobre o produto que está sendo projetado. Esta ação define parâmetros mensuráveis, associados às características definitivas que o produto deverá apresentar, razão pela qual, esta etapa é um momento bastante importante para o processo de projeto.

Existem poucas referências propondo ferramentas ou métodos para efetivar a conversão dos requisitos dos clientes em requisitos de projeto. Neste trabalho utilizou-se como ferramenta a matriz de obtenção dos requisitos de projeto proposta por (FONSECA, 2000).

O procedimento para a utilização desta matriz é bastante semelhante àquele utilizado na matriz de apoio ao levantamento das necessidades dos clientes. A diferença entre estas matrizes diz respeito ao conteúdo das suas linhas e colunas.

Enquanto que na matriz de apoio ao levantamento das necessidades dos clientes as linhas correspondem às fases do ciclo de vida do produto e as colunas aos atributos básicos do produto, na matriz de apoio ao levantamento dos requisitos de projeto, as linhas correspondem aos requisitos dos clientes e as colunas aos atributos específicos do produto.

Do cruzamento entre linhas e colunas foram gerados os requisitos de projeto. A matriz utilizada neste trabalho é ilustrada na tabela 3.3.

Tabela 3. 3 Requisitos de projeto

Requisitos dos clientes	Atributos específicos do produto				
	Geométricos	Material	Controle	Forças	Energia
Ter alta potência de acionamento				Alta potência de acionamento	
Ser construída com componentes e materiais padronizados	Alto n°. de componentes padronizados				
Ter baixa complexidade geométrica	Alto n°. de componentes com geometria simples				
Utilizar o máximo de componentes e materiais disponíveis no mercado		Alto n°. de componentes padronizados			
Utilizar processos disponíveis de fabricação	Alto n°. de componentes com geometria simples				
Ter baixo custo de fabricação		Baixo custo de fabricação e baixo custo de materiais			
Ter baixo custo de operação					Baixo custo de operação
Ser seguro	Baixo n°. de componentes móveis expostos		Alta segurança		
Ter baixa probabilidade de falhas			Baixa frequência de ocorrência de falhas		
Ter controle do fluxo de vento			Alta produção de vento com fluxo laminar		
Ter alta velocidade de vento	Alta produção de vento				
Ser de fácil manutenção					Baixo custo de operação
Ser fabricado com materiais recicláveis		Alto n°. de componentes recicláveis			

Como resultado da aplicação desta matriz foram identificados 10 requisitos de projeto, os quais são relacionados a seguir:

- Alta confiabilidade;
- Alto n°. de componentes recicláveis (n°.);
- Baixo n°. de componentes móveis expostos (n°.);
- Alto n°. de componentes padronizados (n°.);
- Alto n°. de componentes com geometria simples (n°.);
- Alta produção de vento e com controle automático (m/s);
- Alta segurança;
- Baixo custo de fabricação e baixo custo de materiais (R\$);
- Baixo custo de operação (R\$).
- Baixa frequência de ocorrência de falhas (%);

3.1.4 Lista de especificações do projeto

A etapa final do projeto informacional é a definição das especificações de projeto, levando em conta os objetivos e restrições do projeto. Apenas os requisitos de projeto hierarquizados, por si só, não constituem ainda um conjunto de informações adequadas para representarem os objetivos a serem alcançados no projeto.

Por esta razão, a cada requisito de projeto deve ser associado um valor meta a ser atingido, um elemento sensor para avaliar se a meta estipulada foi atingida, saídas indesejáveis que podem ocorrer no projeto, restrições e comentários. Neste trabalho, a lista de especificações de projeto engloba a maior parte dos requisitos de projeto levantados no transcorrer do projeto informacional.

A lista de especificações serviu como uma baliza nas fases subsequentes deste projeto, embora existam especificações tais como o custo de manutenção, a vida útil, a frequência de manutenção e o tempo de manutenção, que não poderão ser utilizadas para a avaliação do produto na fase de testes do protótipo, pois dependem de uma utilização mais prolongada do sistema para a observação do seu comportamento ao longo do tempo.

A tabela 3.4 apresentada a lista de especificações para o produto em desenvolvimento.

Tabela 3. 4 Lista de Especificações do Produto

Requisitos	Unidade	Objetivos	Sensor	Saídas indesejáveis	Comentários
Custo de fabricação e material.	R\$	≤1.000	Custo de fabricação do protótipo.	Custo de fabricação exceder 1.000.	Procura-se com este valor otimizar o projeto reduzindo ao máximo os custos de fabricação e materiais
Fonte confiável de controle		Controle confiável que não apresente riscos de operação.	Verificação no Projeto preliminar.	Utilizar fontes não confiável de controle que consumam muita energia e que apresentem elevados custos de aquisição.	Busca-se utilizar fontes confiáveis que utilizem formas renováveis de energia e que apresentem baixo consumo.
Frequência de ocorrência de falhas	%	No máximo 5%.	Verificação nos testes.	O sistema apresentar mais que 5% de falhas durante a operação.	Entende-se falhas como sendo perfil de ventos indesejados.
Nº. de componentes recicláveis	Nº.	100% dos componentes.	Verificação do projeto preliminar dos componentes.	Utilizar algum componente que não possa ser reciclado.	A escolha de componentes elaborados a partir de materiais recicláveis é um aspecto importante

					atualmente no projeto de produtos.
Nº. de componentes móveis expostos	Nº	Objetiva-se o menor número possível de partes móveis expostas	Verificação no projeto preliminar.	Grande quantidade de partes móveis expostas oferecendo riscos ao operador.	Objetiva-se obter segurança na montagem operação e manutenção do sistema.
Nº. de componentes padronizados	Nº	Utilizar todos os componentes padronizados	Verificação no projeto preliminar.	Percentagem de componentes padronizados abaixo de 50%.	Entende-se como componentes padronizados chapas, parafusos, rolamentos, entre outros, disponíveis no comércio.
Nº. de componentes com geometria simples	%	100% dos componentes	Verificação no projeto preliminar	O sistema apresentar componentes com geometrias complexas.	Entende-se aqui como geometria simples aquelas que possam ser obtidas com facilidade e rapidez nos processos de fabricação
Velocidade do vento e com fluxo laminar	m/s	14 m/s	Verificação nos testes.	O sistema apresentar velocidade máxima inferior a 14m/s e com fluxo turbulento.	
Segurança		Apresentar a máxima segurança possível.	Mapear todos os possíveis riscos de acidente durante o projeto e tomar medidas para evitá-los.	O sistema oferecer riscos à segurança dos usuários.	Busca-se projetar um produto que não ofereça risco algum para a integridade física dos usuários.

3.2 Projeto Conceitual

O projeto conceitual é tido como a fase do projeto de um produto onde as decisões nela tomadas exercem influência sobre os resultados das fases subsequentes (FORCELLINI, 2002). No projeto conceitual são geradas soluções físicas para atender as necessidades dos clientes do projeto.

Veremos nesta etapa os procedimentos adotados na geração de concepções alternativas de produto a partir da análise das especificações de projeto levantadas no projeto informacional. A sequência de ações seguidas no processo de conversão de especificações técnicas em representações físicas de produto contempla as seguintes etapas:

- Definição da estrutura funcional do produto;
- Pesquisa por princípios de solução alternativos para cada função;
- Combinação dos princípios de solução de modo a compor concepções alternativas;
- Seleção das concepções mais viáveis.

3.2.1 Definição da estrutura funcional do produto

Na definição da estrutura funcional do produto foi adotado o método da função síntese, ilustrado em diversos trabalhos encontrados na literatura sobre projeto de produto, como nas obras de (ULLMAN, 1997), (PAHL E BEITZ, 1996), (HUBKA E EDER, 1988) e (BACK, 1983). A síntese funcional é um método de decompor o problema em termos de fluxo de energia, material e sinal (ou informação). Este desdobramento do problema em partes facilita a visualização de quais ações o sistema técnico, através do somatório dos efeitos dos seus elementos, deve realizar; quais as suas interfaces; e quais as suas variáveis de entrada e saída.

De acordo com (PAHL E BEITZ, 1996), a partir da análise e abstração dos requisitos de projeto do produto, pode-se identificar a sua função global. Baseando-se no fluxo de energia, material e sinal, e com o auxílio de um diagrama de blocos, expressa a relação existente entre as entradas e saídas do sistema, independentemente da solução a ser escolhida para o problema.

A função global do sistema projetado foi definida como “direcionar e controlar o fluxo de vento”. Esta expressão é a representação condensada do problema de projeto. As grandezas de entrada e saída, e as interfaces do sistema são apresentadas na figura 3.4

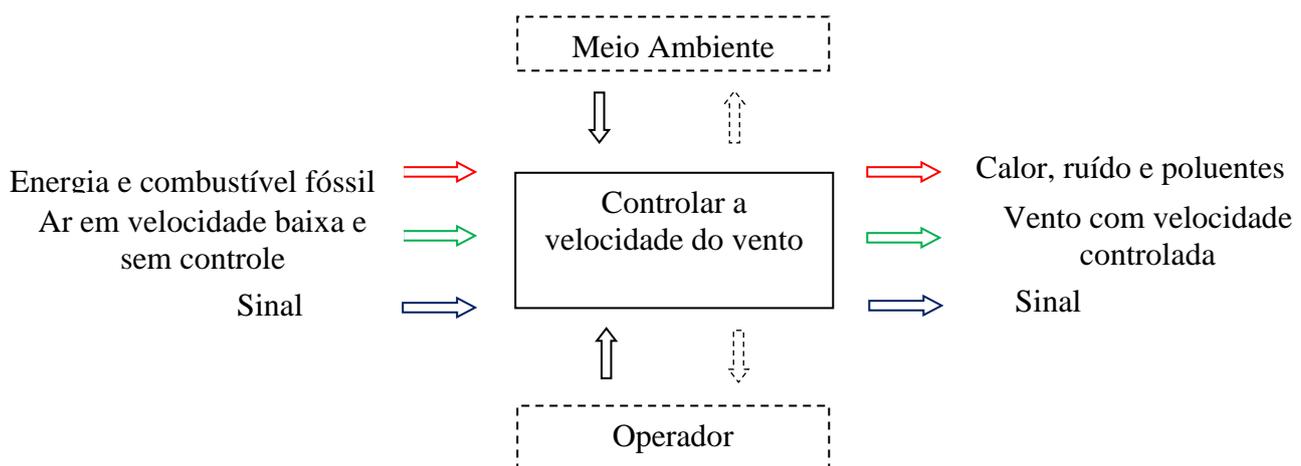


Figura 3. 4 Função global do sistema.

O fluxo do sistema consiste na entrada do ar turbulento e com baixa velocidade, em seguida será acelerado e direcionado para a saída onde deverá estar com velocidade maior e com fluxo laminar. O consumo de energia se dará pela entrada de energia elétrica para alimentação do sistema de controle e o combustível fóssil proporcionará energia para o motor a combustão gerar a energia mecânica para proporcionar a aceleração do vento.

Os sinais consistem em acionar, alimentar e realimentar as informações de condições de operação exigidas para os ensaios no túnel e como saídas as respostas do sistema que podem ser a visualização das necessidades de realimentar, interromper o processo por alguma razão (fim do

processo, manutenção, falhas etc.). As interfaces que tem interação com o sistema são o usuário e o meio ambiente.

No projeto foi definido que o sinal a ser controlado seria a velocidade do vento, que por consequência geraria um controle de rotação da hélice do túnel de vento.

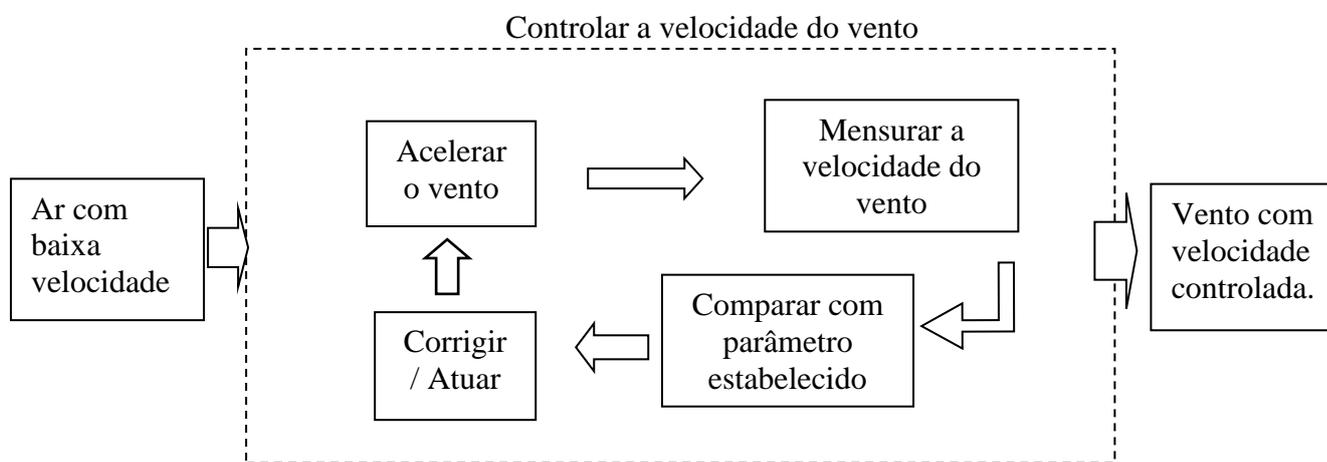


Figura 3. 5 Funções elementares do sistema

3.2.2 Princípios de solução e geração de concepções alternativas

Após definida a estrutura funcional do produto, foi iniciada a busca por métodos de solução que atendessem a cada uma das funções desta estrutura. Alguns métodos de geração de soluções são descritos, como por exemplo, nos trabalhos de (DIXON, 1966), (ROOSEMBURG E EEKELS, 1995), (RAMOS, 1993), (NACHTIGALL, 1987) entre outros.

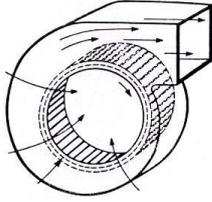
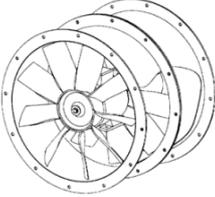
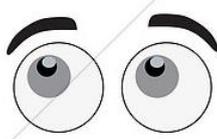
Para este projeto optou-se pela utilização do método sistemático da Matriz Morfológica (quadro 5) por apresentar bons resultados nestes trabalhos. O método morfológico consiste na pesquisa sistemática de diferentes combinações de elementos visando a geração de diferentes soluções para o problema, que neste caso consiste em funções a serem atendidas. Este método pode ser resumido nos seguintes passos:

- Especificação da sequência de funções do processo – Esta etapa foi realizada ao se definir a estrutura funcional, onde as funções foram organizadas de acordo com a sequência que elas deverão ser realizadas no controle do fluxo de vento;
- Na primeira coluna da matriz contém a sequência de funções determinada;
- Busca por princípios de solução alternativos para atender cada função que podem ser obtidos por analogias com outros sistemas e *brainstorming* – Nesta etapa, para cada função da primeira coluna

foram buscados princípios de solução para atendê-las individualmente. Para cada linha da matriz em cada coluna, foram registradas soluções representadas na forma de descrições literais e gráficas.

- Combinação dos princípios de solução de modo a compor concepções alternativas para o problema global formulado – Neste passo, os princípios de solução de uma linha da matriz foram combinados com os princípios de solução das demais linhas e foram geradas diferentes concepções de produto. A tabela 3.5 mostra essa matriz morfológica.

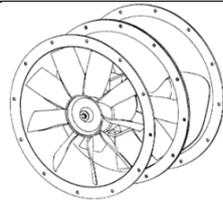
Tabela 3. 5 Matriz morfológica.

Função	Alternativa 01	Alternativa 02	Alternativa 03	Alternativa 04
Acelerar o vento	 <p>Ventilador centrífugo</p>	 <p>Ventilador axial</p>		
Mensurar a velocidade do vento	 <p>Anemômetro de conchas</p>	 <p>Anemômetro de hélice</p>	 <p>Anemômetro Ultrassônico</p>	 <p>Anemômetro Portátil</p>
Comparar com parâmetro estabelecido	 <p>Método utilizando arduíno</p>	 <p>Método visual</p>	 <p>Método utilizando micro controlador PIC</p>	 <p>Método utilizando CLP.</p>
Corrigir / Atuar		 <p>Método Manual</p>		

	  Ou Método utilizando arduíno + potenciômetro eletrônico ou servo motor atuando no eixo do acelerador		  ou Método utilizando micro controlador PIC + potenciômetro eletrônico ou servo motor atuando no eixo do acelerador	  ou Método utilizando CLP + potenciômetro eletrônico ou servo motor atuando no eixo do acelerador
--	---	--	--	--

Na geração de concepções optou-se apenas por uma concepção pois algumas alternativas não seriam viáveis por questões de disponibilidade de equipamentos ou de recursos para fabricação. A tabela 3.6 mostra as soluções escolhidas e a justificativa pela escolha da mesma:

Tabela 3. 6 Solução alternativa.

Função	Solução	
Acelerar o vento	 Ventilador axial	Por questões de facilidade na aquisição, montagem e pelo menor custo optou-se pelo ventilador axial. Como já estava em construção o túnel este já estava disponível e instalado.
Mensurar a velocidade do vento	 Anemômetro de conchas	Por atender as especificações de velocidade, resolução e preço optou-se pelo anemômetro de conchas.

<p>Comparar com parâmetro estabelecido</p>	 <p>Método utilizando Arduino</p>	<p>Por ser um requisito de cliente a automatização o método visual foi descartado e optou-se pelo Arduino por ter plataforma pronta e já consolidada e com custo baixo.</p>
<p>Corrigir / atuar</p>	 <p>+ Método utilizando Arduino + servo motor acoplado ao eixo do acelerador.</p>	<p>Por ser um requisito de cliente a automatização o método manual foi descartado e optou-se pelo Arduino por ter plataforma pronta e já consolidada e com custo baixo.</p> <p>O potenciômetro eletrônico foi descartado devido a falta de conhecimento da equipe na eletrônica de motores a combustão.</p> <p>Aqui não foi definido dispositivo de acoplamento do servo ao acelerador, foi definido apenas que seria utilizado o servo movimentando a alavanca do acelerador.</p>

3.2.3 Avaliação das concepções

A avaliação da concepção escolhida foi feita baseada na disponibilidade imediata de tecnologia onde pode ser discutido pela equipe se já existe tecnologia para concretizar a concepção, se é controlável em todo o ciclo de vida do produto e se atende as questões de custo.

Após as avaliações constatou-se que a concepção atendia aos requisitos de viabilidade técnica e viabilidade econômica para a fabricação.

Dentro da concepção escolhida observou-se que o parâmetro que deveria ser controlado é a velocidade do vento e indiretamente também seria controlada a rotação da hélice. Para este controle existem variáveis que influenciam no desempenho do controle como a umidade do ar, a temperatura ambiente, correntes de ar que possam circular pelas proximidades do túnel, a disposição do túnel dentro da estrutura do prédio e objetos que possam interferir no fluxo de ar na saída do túnel. Mas, devido à disponibilidade física do laboratório e também dos recursos financeiros optou-se em

controlar apenas a variável da velocidade do vento, e as demais variáveis de influência ficam para estudos detalhados em outros trabalhos.

Como forma de controle foi idealizado um controle do tipo PID (Proporcional-Integral-Derivativo). Usando para isso bibliotecas desse tipo de controle já disponíveis para a plataforma Arduíno.

Buscou-se transformar o projeto informacional do produto, que contém uma lista de especificações técnicas, em um nível maior de informações, nesta etapa o produto passou a ter formas físicas.

Com a conclusão do projeto conceitual, os esforços passam para a etapa de estabelecer dimensões, materiais e processos de fabricação a serem utilizados no sistema e isso pode implicar em alterações na configuração original da concepção, pois o nível de complexidade do projeto aumenta em virtude da necessidade de se considerar todas as inter-relações entre os componentes do sistema, onde serão levadas em conta as restrições de espaço, de uso de materiais e processos de fabricação, entre outras incutidas na lista de especificações de projeto.

3.3 Projeto preliminar e detalhado

Para esta etapa buscou-se por concepções que utilizam o mínimo possível de materiais e sempre que possível a utilização de componentes disponíveis no mercado, e em relação aos processos de fabricação optou-se por aqueles disponíveis no IFSC. Inicialmente foram feitos os desenhos com suas medidas e formas em 3D e depois os desenhos detalhados para os processos de fabricação. Estes aspectos são descritos neste item, que engloba assim os projetos preliminar e detalhado.

3.3.1 Proposta de sistema de supervisão e controle

No controle definiu-se como alternativa que seria usado o microcontrolador para tanto, se faz necessário um sistema supervisorio onde são coletados os dados e enviadas as referências desejadas para que o processador faça o controle das saídas. Optou-se pelo Arduíno por ser uma plataforma pronta, de fácil aquisição, seu custo não é elevado e atende aos requisitos do projeto.

Para o desenvolvimento do sistema supervisorio optou-se em usar a ferramenta Labview, por atender as necessidades do projeto e também ser uma ferramenta disponível nos laboratórios do IFSC.

A figura 3.6 mostra um layout planejado para a tela de supervisão.



Figura 3. 6 Layout projetado para tela de supervisão

Como o controle é composto basicamente por hardware e programa, nesta etapa de projeto será definido apenas como hardware o Arduíno e o programa define-se um fluxograma de operação. A figura 3.7 mostra o fluxograma idealizado para este controle.

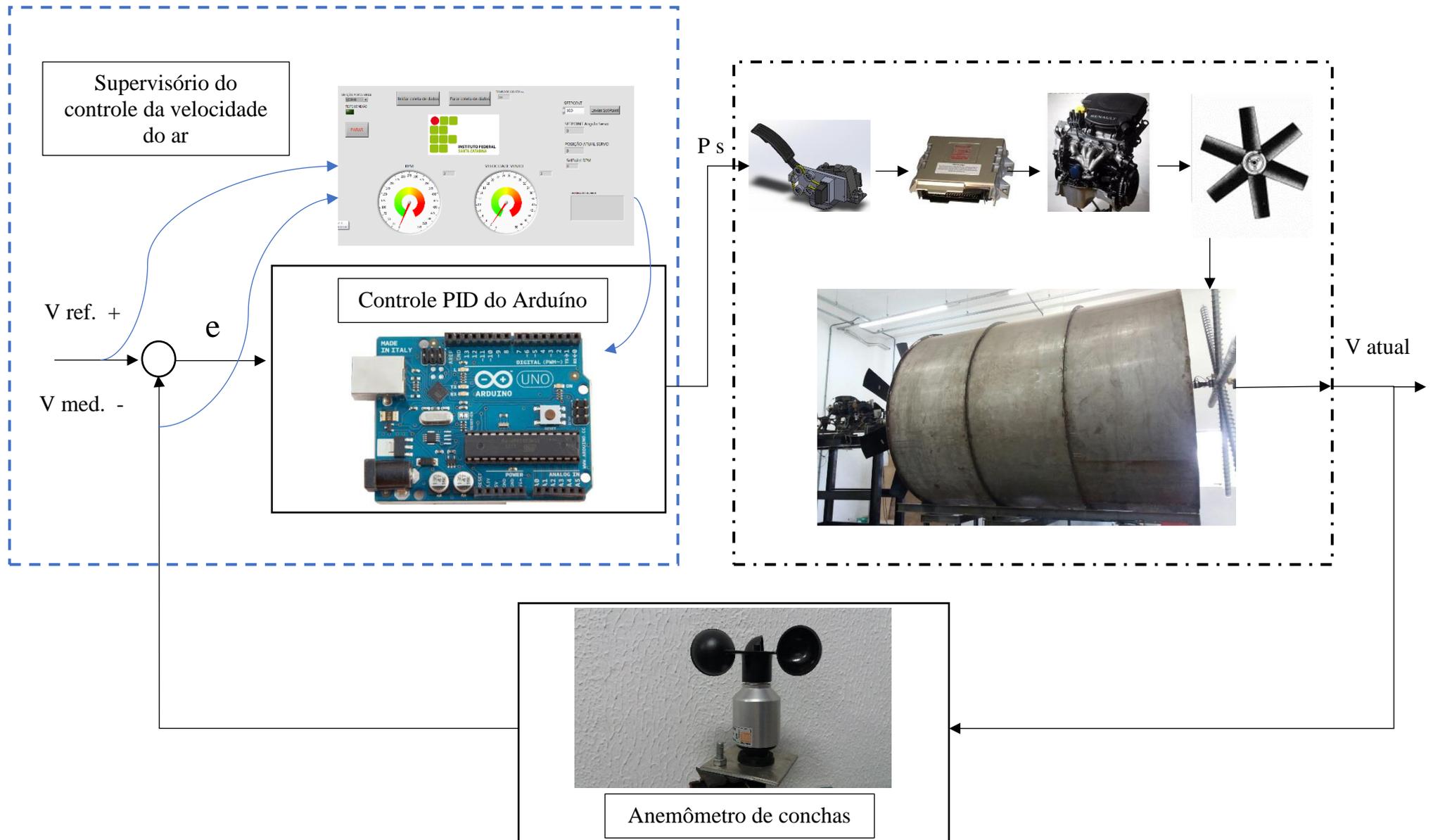


Figura 3. 7 Sistema de controle em malha fechada do túnel de vento.

3.3.2 Mecanismo de aceleração do ventilador

No desenvolvimento deste trabalho não se tinha por objetivo o desenvolvimento de uma UCE (Unidade de Controle Eletrônico) para o motor a combustão buscou-se então as alternativas para apenas atuar na unidade que controla o motor Renault 1.6 que foi adquirido juntamente com o motor e já estava em operação no túnel, onde a aceleração era feita de forma manual. Para fazer essa aceleração a UCE faz a leitura de um sensor (acelerador) este sensor é composto por dois potenciômetros (principal e retaguarda) de 800 Ω , cada potenciômetro possui 3 vias de fios que são ligados a UCE, a figura 3.8 mostra o pedal acelerador e no destaque os potenciômetros utilizados.



Figura 3. 8 pedal acelerador e potenciômetro. Fonte Informativo técnico DS.

Para atuar na aceleração do motor existiam duas possibilidades, desenvolver um novo sensor composto por dois potenciômetros que enviariam os sinais a UCE, estes potenciômetros poderiam ser do tipo digital, mas devido ao tempo e a complexidade em que esse sensor atua na UCE optou-se pela segunda alternativa que consistia em acoplar um servo motor ao acelerador já existente e que já tem as características aceitáveis pela UCE. Para acoplar esse servo motor foi então projetado uma base de fixação do servo motor e esta base acoplada a estrutura fixa do acelerador. A figura 3.9 mostra o conjunto base, Servo, Engrenagem e polias projetadas para fixação do servo ao acelerador.

Neste estudo não foram levantadas muitas possibilidades e também não foi feito o desdobramento mais minucioso deste atuador na matriz morfológica. Devido a construção mecânica do acelerador não seria possível acoplar o servo motor diretamente no centro de giro do pedal, partiu-se então para o acoplamento do mesmo com dispositivos de transmissão como visto na figura 3.9.

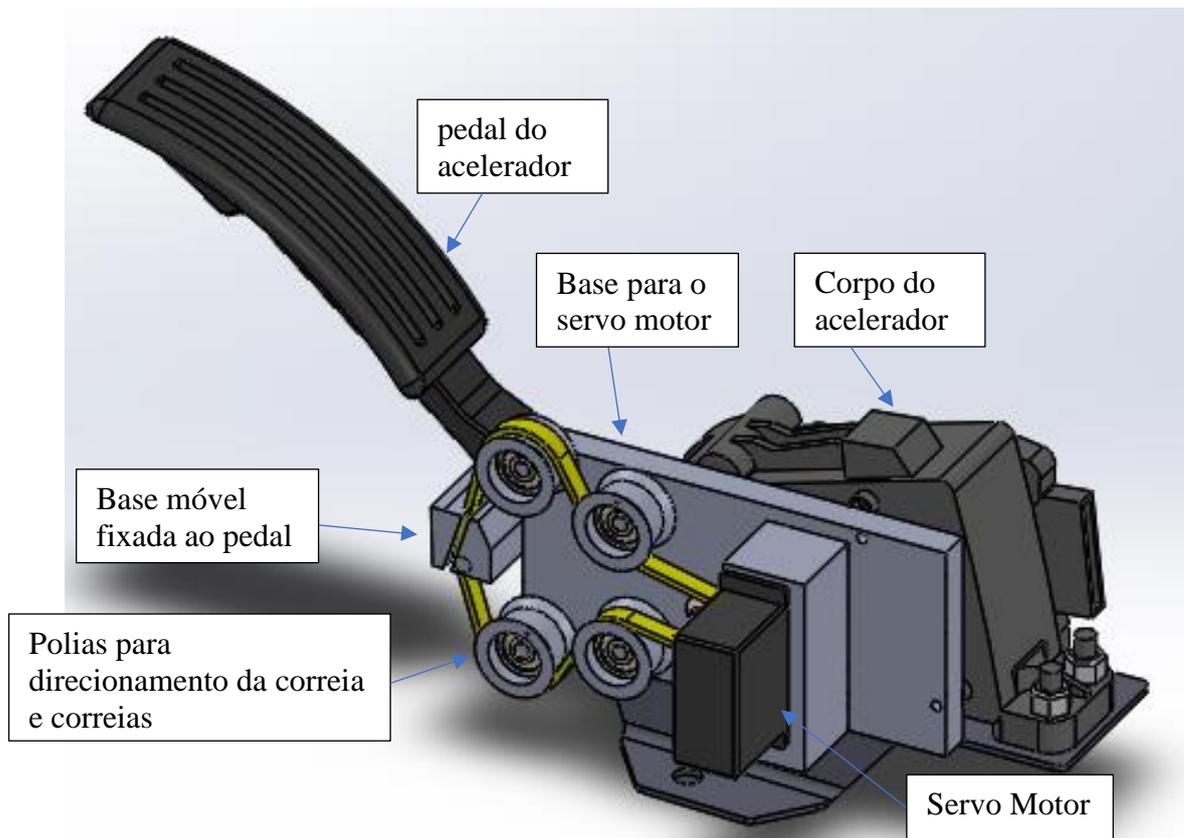


Figura 3. 9 Montagem Base, servo, engrenagem e polias para fixação do servo ao acelerador.

3.3.3 Instrumentação para medição da rotação da hélice e velocidade do ar.

Como instrumento para coleta da rotação da hélice foi adquirido um encoder relativo de 100 pulsos por volta, modelo NTP40AX06-100D27P2C2 (TNS). Com base na análise realizada da precisão que seria necessária para a leitura da rotação da hélice, observou-se que este encoder atenderia ao projeto. O mesmo foi acoplado ao eixo da hélice através de sistema de transmissão por correia sincronizadora. A figura 3.10 mostra o encoder utilizado.



Figura 3. 10 Encoder relativo de 100 pulsos.

Para a leitura da velocidade do vento, optou-se pelo uso do anemômetro de conchas, por atender as especificações de precisão e também por ser o tipo recomendado pela norma NBRIEC – 61400-12-1. A figura 3.11 mostra o anemômetro escolhido. As especificações completas do anemômetro estão no anexo A.



Figura 3. 11 Anemômetro de conchas marca Thies.

Para que os resultados das medições possam atender a norma NBRIEC – 61400 – 12 – 1 seria necessário a instalação de sensores de temperatura e também de umidade. Porém, devido aos custos e ao tempo, estes sensores não foram instalados neste trabalho.

A falta destes sensores não interfere na automação do túnel para controlar a velocidade do vento, mas são importantes para determinar as curvas de potência dos aerogeradores.

3.3.4 Peças mecânicas.

Nesta fase foram definidas as medidas definitivas das peças a serem construídas, assim como os materiais a serem utilizados. Para não ocupar muito espaço no corpo do texto os desenhos com as especificações foram colocados no Apêndice A.

CAPITULO 4 - CONSTRUÇÃO E OPERACIONALIZAÇÃO DO PROTÓTIPO

4.1 Mecanismo de aceleração do ventilador

Como mecanismo de aceleração foi desenvolvido um dispositivo que acoplou um servo motor modelo MG995, o qual trabalha com ângulo de 0 a 180 graus, para fazer o movimento do acelerador que tem ângulo de trabalho de aproximadamente 16 graus. Como o servo trabalha com resolução de 1°, foi usado uma redução de 1/11 para melhorar a resolução do sistema de atuação. Para isso foi usado no servo uma polia modelo GT2 20 dentes em alumínio. Inicialmente o projeto previa a base de sustentação do servo motor e polias direcionadoras da correia impressa em plástico na impressora 3D. Porém nessa configuração os eixos das polias ficaram frágeis e a posição das polias próximas ao ponto de conexão com a parte móvel do acelerador não ficou adequada tracionando o ponto de fixação para o centro de giro do acelerador. Para corrigir isso, um novo projeto da base de fixação do servo foi realizado e adicionado à mesma um sistema para tencionar a correia. Esta nova peça foi usinada em alumínio e não mais impressa em 3D, melhorando assim a rigidez. A figura 4.1 mostra a base inicial e as figuras 4.2 e 4.3 mostram o desenho e a montagem da nova peça respectivamente.

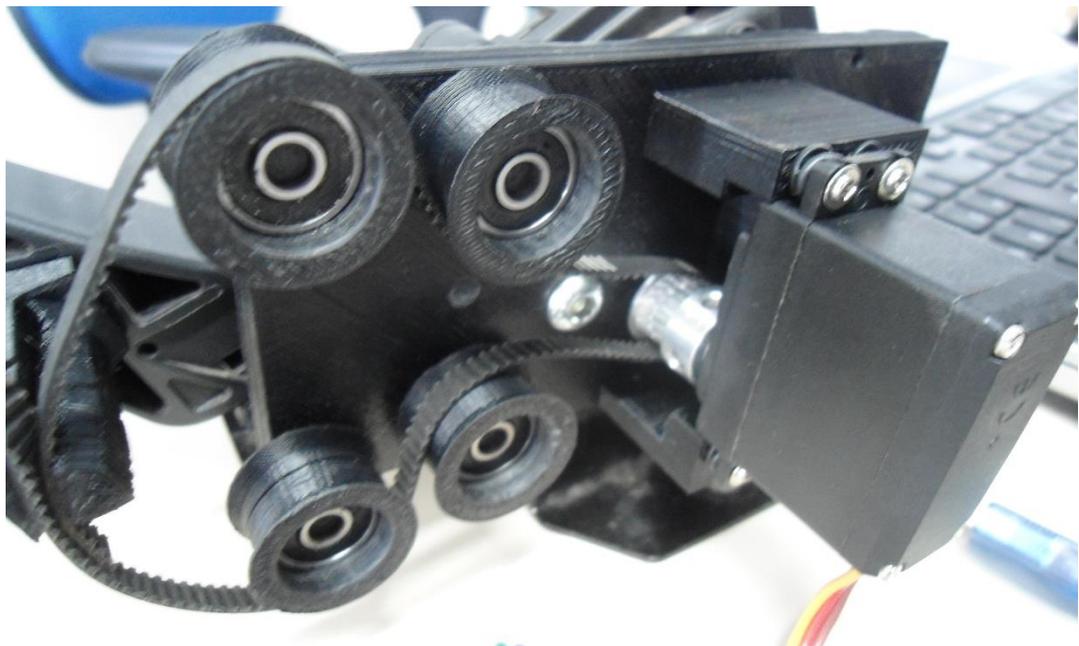


Figura 4. 1 Base inicial do servo motor.

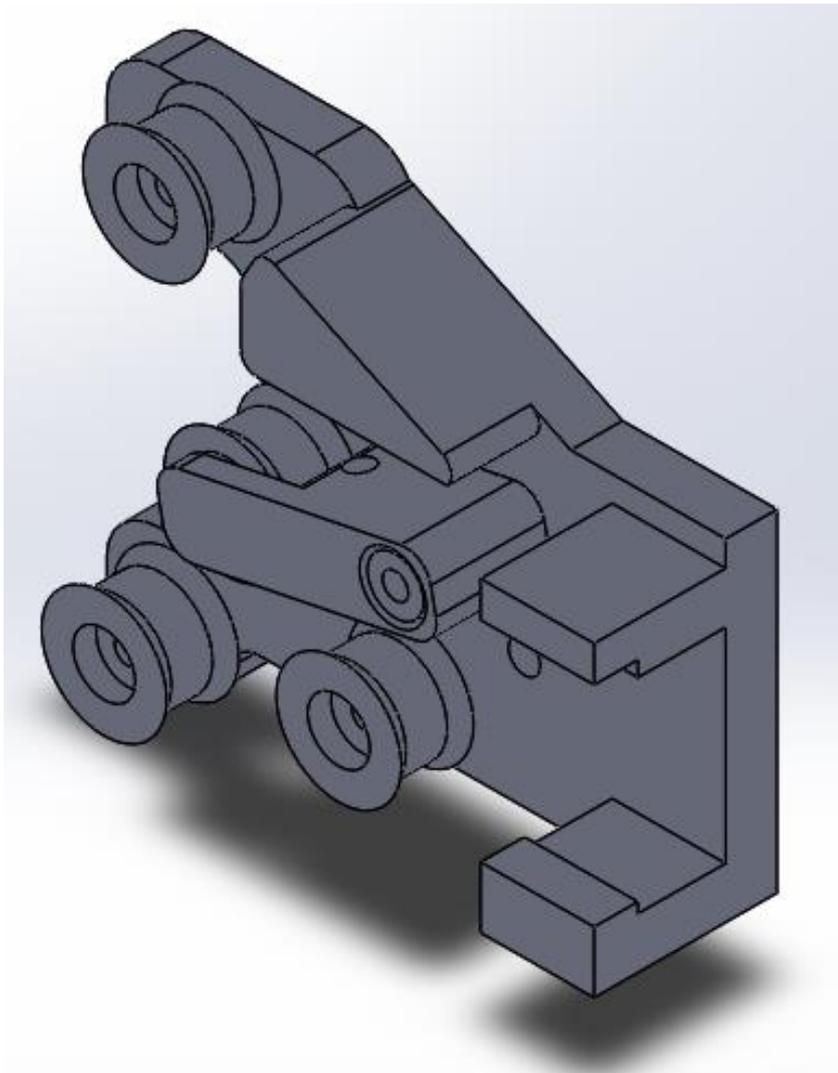


Figura 4. 2 Desenho da base de fixação do servo motor e do tencionador da correia.

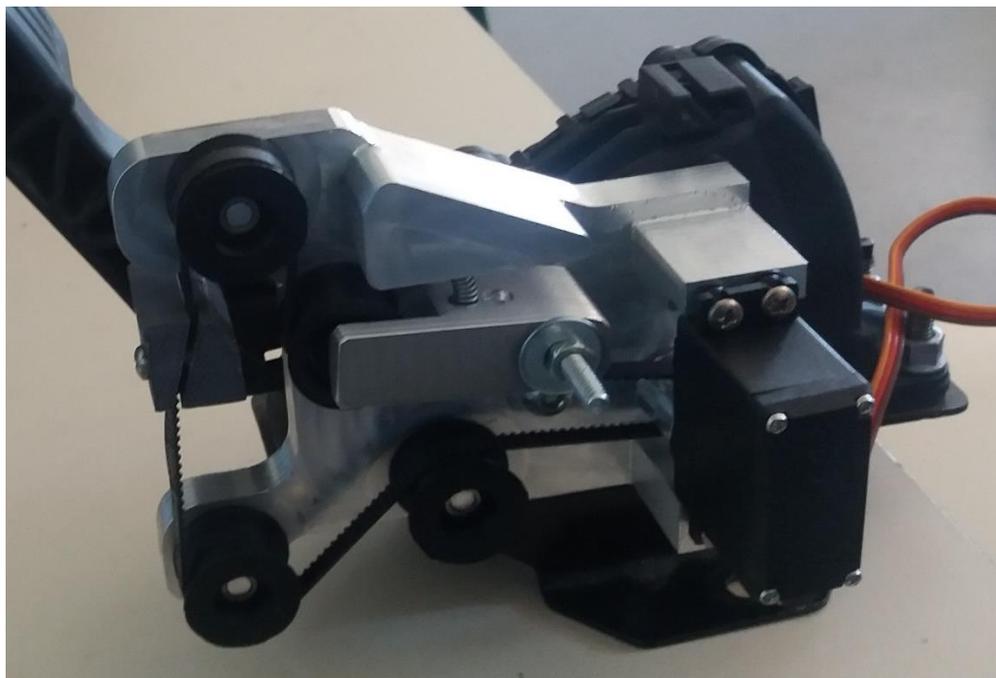


Figura 4. 3 Nova base de fixação do servo motor.

4.2 Instalação do encoder

Para a transmissão do movimento do eixo da hélice para o eixo do encoder optou-se por sistema de polia e correia sincronizadora com relação de 1:1. A figura 4.4 mostra o desenho da polia utilizada de 32 dentes.

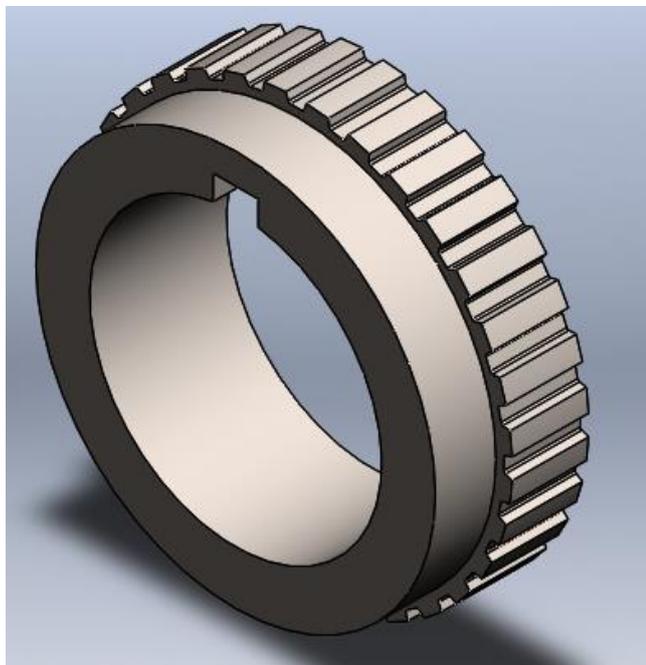


Figura 4. 4 polia sincronizadora 32 dentes.

Para a instalação do encoder foi desenvolvido um sistema através de chapas em alumínio dobradas em L e usinado mancais em poleacetil para instalação dos rolamentos do eixo da polia acoplada ao encoder. Para o eixo da hélice foi usinado em poleacetil e instalada a polia sincronizadora desta forma o movimento do eixo da hélice é transmitido pela correia sincronizadora acoplada a polia do encoder. A figura 4.5 mostra a montagem do conjunto.

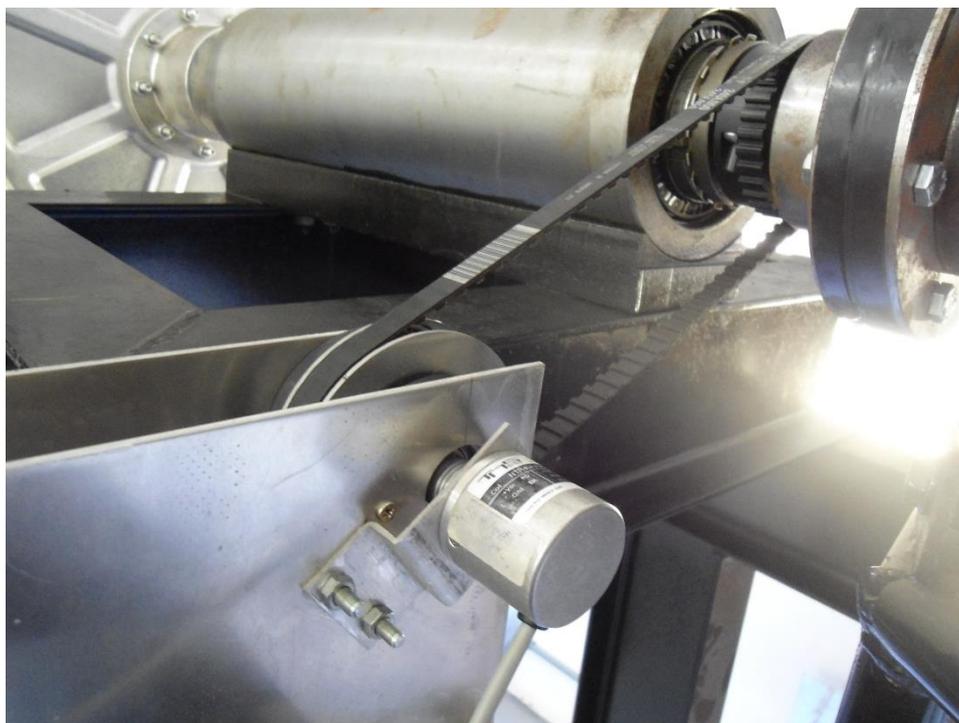


Figura 4. 5 Montagem do acoplamento do encoder ao eixo da hélice.

4.3 Testes iniciais de leitura do encoder e do anemômetro de conchas

Para os testes iniciais de funcionamento dos sensores e do servo motor acoplado ao acelerador foi feita a montagem das instalações elétricas em matriz de contatos. A figura 4.6 mostra a montagem dessa instalação.



Figura 4. 6 Instalação para testes de comunicação entre sensores, servo e arduino.

Após validado o circuito, foi desenvolvida a placa eletrônica definitiva com os cabos de oito vias para comunicação do servo, anemômetro e encoder com a placa do arduino.

A figura 4.7 mostra a montagem da placa desenvolvida e a figura 4.8 e 4.9 mostra o esquema elétrico do circuito.

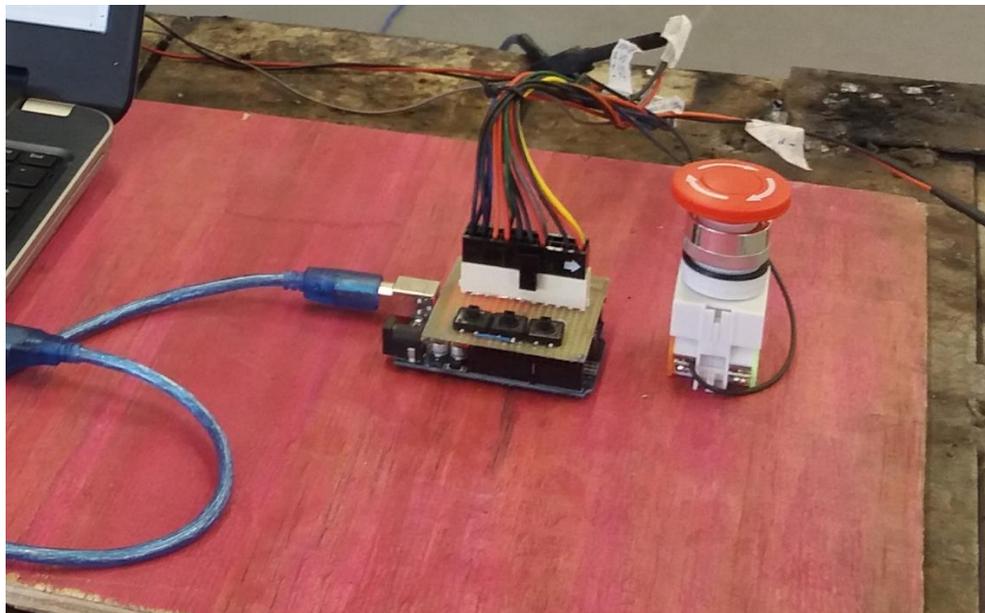


Figura 4. 7 Placa eletrônica para comunicação sensores, servo e arduino.

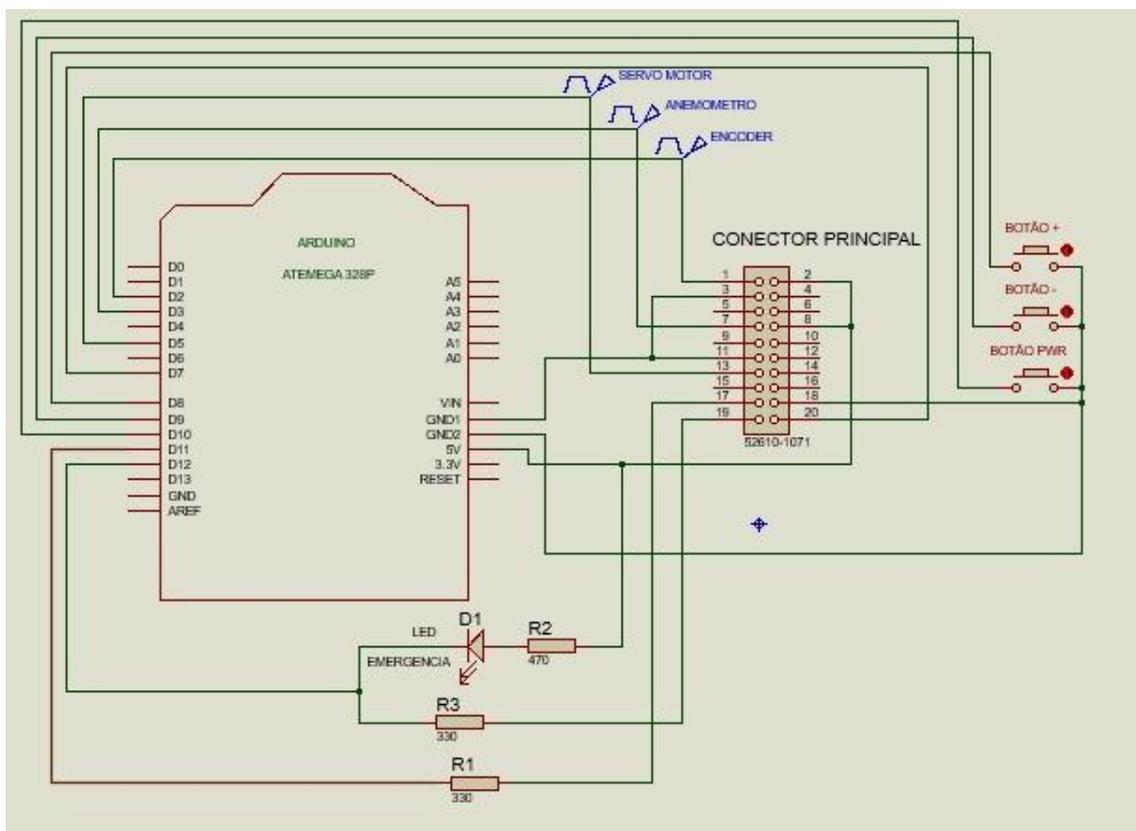


Figura 4. 8 Circuito eletrônico da placa de comunicação sensores, servo e arduino lado A do Conector.

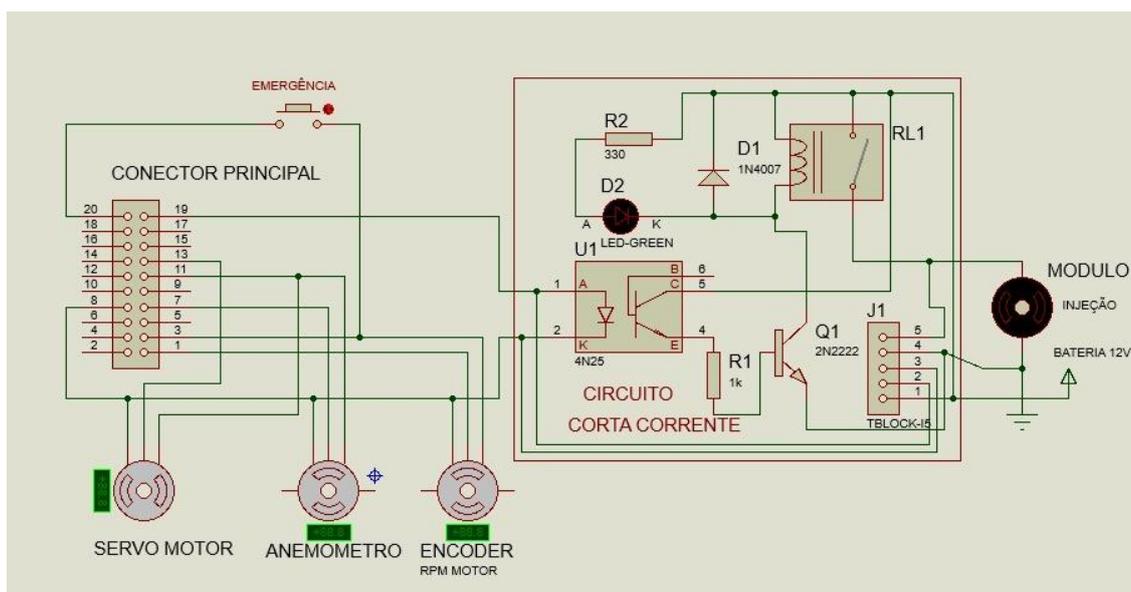


Figura 4. 9 Circuito eletrônico da placa de comunicação sensores, servo e arduino lado B do conector e placa circuito corta corrente.

4.4 Programa de controle e supervisão proposto

Inicialmente foi desenvolvido um programa para fazer a leitura do encoder e do anemômetro de conchas, e os valores desta leitura foram enviados para o programa de supervisão (o programa desenvolvido encontra-se no apêndice B). Após desenvolvido este programa, foram feitos testes práticos para verificar a correta leitura dos valores recebidos dos sensores. Para tanto, foram alteradas algumas variáveis do programa de controle para que a aceleração fosse feita aumentando o valor da posição do servo acoplado ao pedal acelerador em 10° a cada solicitação do usuário. Esse ângulo corresponde a aproximadamente $0,9^\circ$ no pedal do acelerador. Para cada posição do servo foram registradas as medições feitas em planilha eletrônica e para verificar que esses valores estavam corretos foi utilizado um osciloscópio para ler os pulsos gerados pelos sensores.

A descrição e os resultados desse teste estão no capítulo 5 desse trabalho.

Após esses testes o programa foi configurado para fazer o controle automático da velocidade do vento através de um controle PID. Para isso foi utilizada uma biblioteca PID já disponível para o arduino.

O funcionamento básico do programa consiste em receber do supervisor o valor da velocidade desejada e ajustar a saída para atingir essa velocidade, sempre comparando o valor das leituras do sensor de velocidade do vento ao valor recebido e fazendo a correção na saída para que a velocidade do vento fique o mais próximo possível do desejado.

Além de receber do supervisor o valor da velocidade do vento desejada, o arduino também envia ao supervisor os valores das leituras dos sensores de rotação e da velocidade do vento para que possam ser arquivados em planilhas quando solicitados pelo usuário. Este programa desenvolvido pode ser visto no apêndice B.

Já o supervisor foi desenvolvido no Labview. O programa do supervisor é responsável por enviar o valor desejado da velocidade do vento ao controle, e receber os valores das leituras dos sensores. Neste programa há três botões de comando, sendo um responsável por solicitar o envio do valor desejado da velocidade do vento, um para iniciar a gravação dos dados recebidos em planilha do Excel e o outro para parar o envio dos dados. Foi adicionado também um botão de comando responsável por desligar o sistema supervisor.

Na tela do supervisor o usuário também pode visualizar em tempo real os valores da rotação da hélice e da velocidade do vento. A figura 4.9 mostra a tela inicial do supervisor, e a figura 4.10 mostra o programa em Labview na forma de diagrama de blocos desenvolvido para este supervisor.

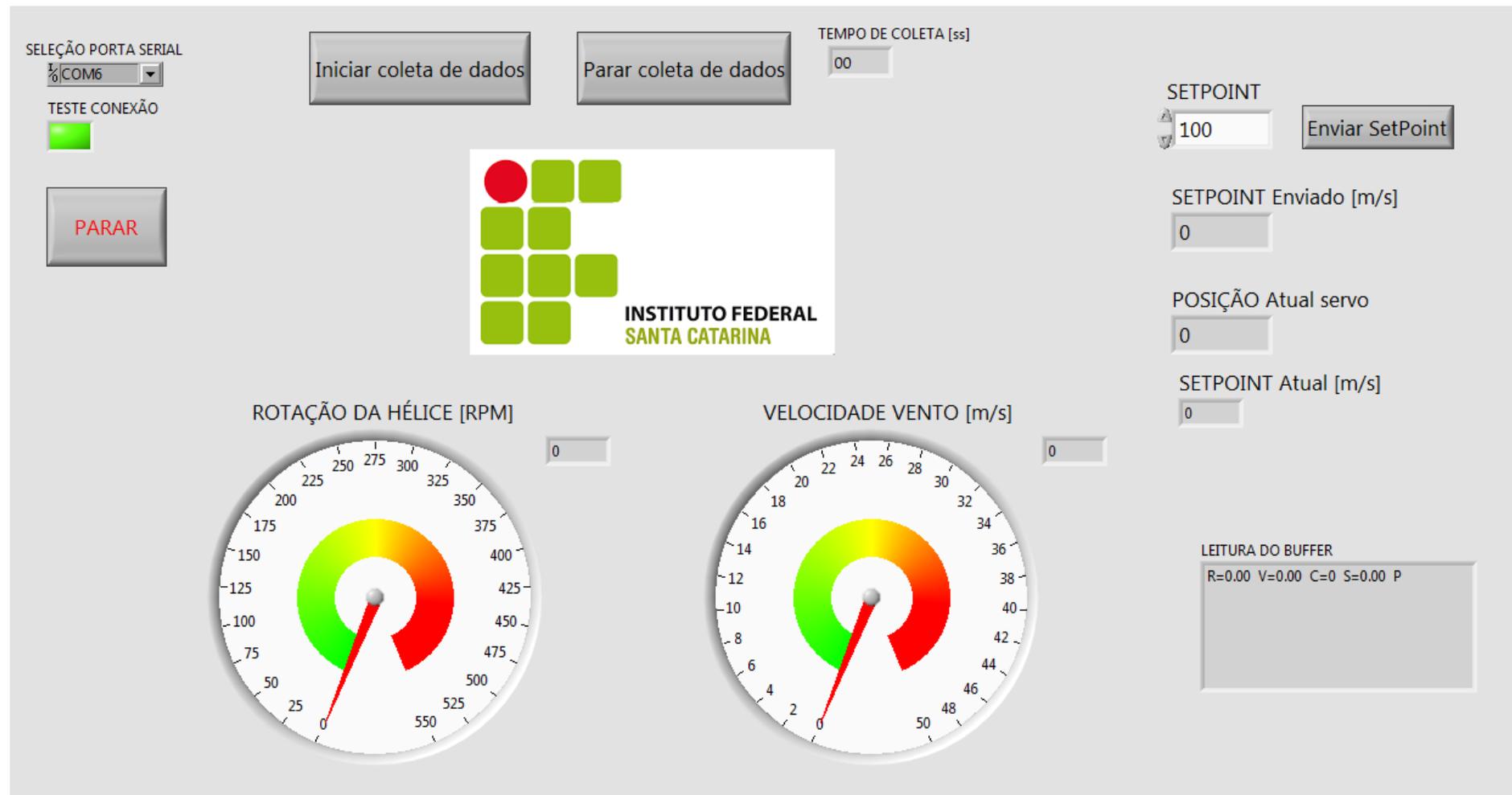


Figura 4. 10 Tela de interface do supervisão.

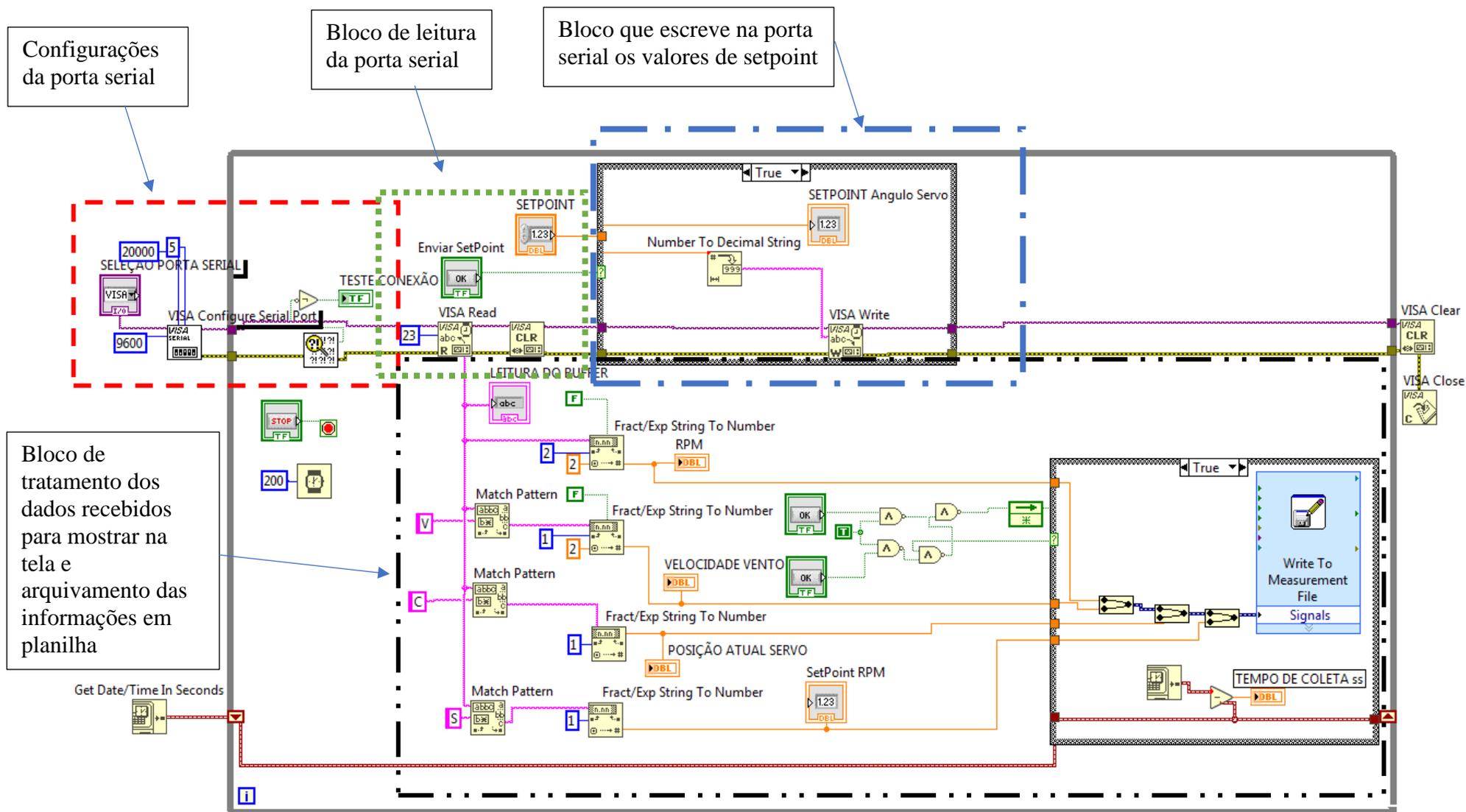


Figura 4. 11 Diagrama de blocos do supervisor.

Com todos os itens integrados e em operação, partiu-se para os testes de validação, como descritos no capítulo a seguir.

CAPITULO 5 – VALIDAÇÃO EXPERIMENTAL E RESULTADOS

5.1 Introdução

Nesta seção serão apresentados os testes experimentais e os resultados obtidos. Os testes desenvolvidos foram três diferentes, sendo que o primeiro teste desenvolvido foi para verificação de que o valor mostrado pelos programas de supervisão e controle estavam corretos com os valores de sinal enviados pelos sensores, esses valores eram comparados com os valores lidos por um osciloscópio. Durante esse teste constatou-se uma grande variação nos valores lidos tanto pelo osciloscópio como pelos programas de supervisão e controle. Por isso optou-se por fazer um segundo teste onde a instabilidade das medições fosse menor, nesse teste foram feitas leituras da velocidade do vento com um jato de ar comprimido direcionado para o anemômetro e as leituras foram armazenadas. E por ultimo foram feitos os testes usando o sistema automático com o controle do tipo PID.

5.2 Resultados experimentais

O primeiro teste prático feito no túnel foi para verificação de que se os valores lidos pelo supervisório estavam de acordo com os valores enviados pelos sensores, sendo estes o encoder de leitura da rotação da hélice e o anemômetro de conchas que faz a leitura da velocidade do vento no interior do túnel de vento. Os valores lidos foram comparados com a leitura dos pulsos através de um osciloscópio. As leituras foram feitas a cada 10° de movimento do servo motor o que corresponde a um ângulo de aproximadamente $0,9^\circ$ no pedal do acelerador, e neste procedimento foram excluídas as leituras do primeiro degrau pois os 10 graus iniciais não geram aceleração do motor, devido à pressão do tensionador da correia e devido a uma folga inicial própria do acelerador.

Para cada degrau de aceleração, foram feitas coletas dos dados lidos pelo supervisório por aproximadamente 20 segundos, sendo que a cada segundo aproximadamente 3 leituras eram coletadas, e durante esse tempo duas leituras eram coletadas do osciloscópio, pois o sistema do osciloscópio não permitia imprimir mais que uma leitura a cada 10 segundos.

Na figura 5.1 podemos ver o resultado em forma de gráficos dos valores adquirido com o servo na posição 0° . Sendo a linha superior os valores da rotação e a inferior os valores coletados da velocidade do vento.

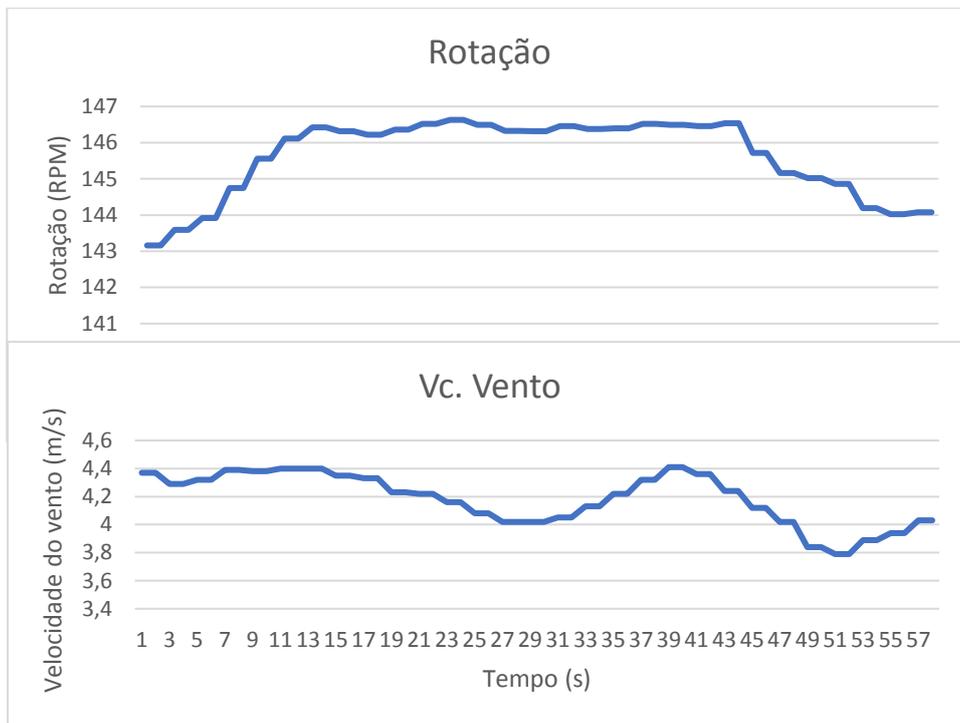


Figura 5. 1 Gráfico de leitura com servo a 0°.

A tabela 5.1 mostra a média dos valores coletados para a rotação e os valores calculados das leituras de frequência do osciloscópio na parte inferior da tabela estão os valores referente a velocidade do vento.

Tabela 5. 1 Valores de desvio padrão e médias das leituras dos sensores.

Média da leitura Rotação	Rotação Osciloscópio	Frequência Osciloscópio
145,62	145,56 RPM	242,6
Desvio Padrão	144,18 RPM	240,3
1,064		Rotação média osciloscópio
		144,87 RPM
Média da leitura m/s	Velocidade do Vento m/s osciloscópio	Frequência Osciloscópio
4,18	4,54	57,19
Desvio Padrão	4,56	57,43
0,18		Média osciloscópio
		4,55

Na figura 5.2 são colocados as imagens adquiridas no osciloscópio, sendo que esses valores são usados para calcular o valor de referência. Para a leitura pelo osciloscópio foi utilizado o canal 1

para a leitura da frequência gerado pelo encoder e o canal 2 para a leitura da frequência gerada pelo anemômetro. Para obter o valor da rotação da hélice é usado a equação 5.1:

$$RPM = F \times 60 \div 100 \quad (5.1)$$

Onde:

RPM = Rotação do eixo da hélice

F = Frequência medida pelo osciloscópio

100 = Numero de pulsos do encoder

Para obter o valor da velocidade do vento utilizou-se da equação 5.2 abaixo:

$$Vv = F \times 50 \div 630 \quad (5.2)$$

Onde:

Vv = Velocidade do vento

F = Frequência medida pelo osciloscópio

50 = Frequência mínima do anemômetro

630 = Frequência máxima do anemômetro

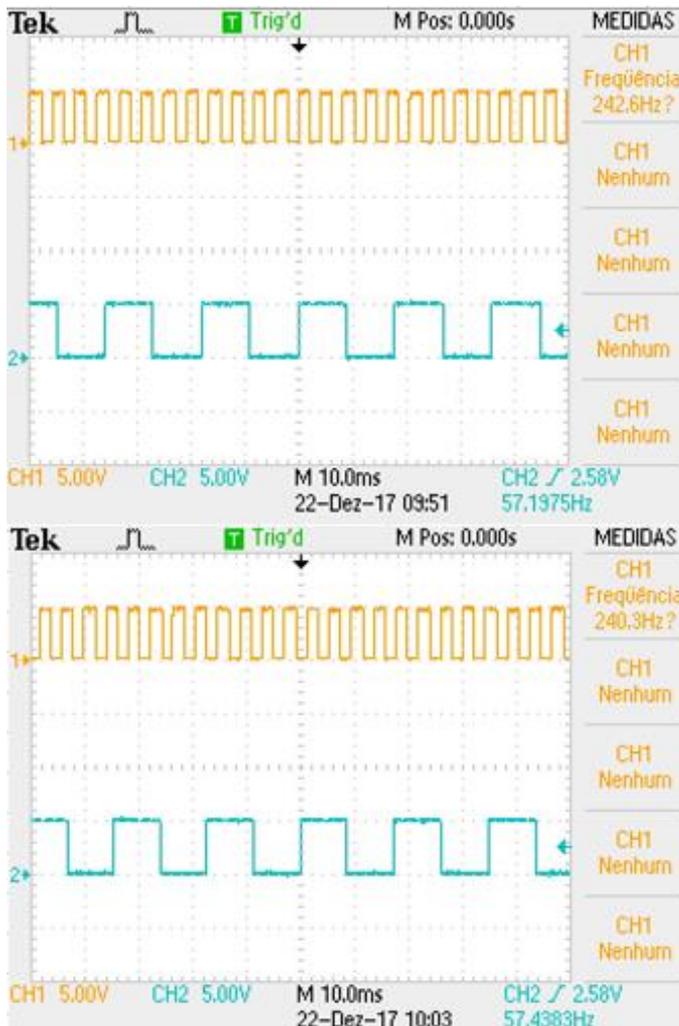


Figura 5. 2 Leitura do osciloscópio servo a 0°.

As demais leituras dos valores para cada posição estabelecida do servo estão no apêndice C.

Com os valores das leituras dos sensores observou-se que o sistema não tem um comportamento estável. Observou-se também que essa instabilidade não era devido a erro na leitura pelo programa, pois os valores lidos pelo osciloscópio também sofreram variação.

Na figura 5.3 são colocados os valores de leitura juntamente com o valor de referência coletado pelo osciloscópio (linha laranja tracejada no gráfico) e para uma melhor visualização da variação dos valores são colocadas uma linha superior e uma inferior para cada um dos sensores (linhas pontilhadas no gráfico).

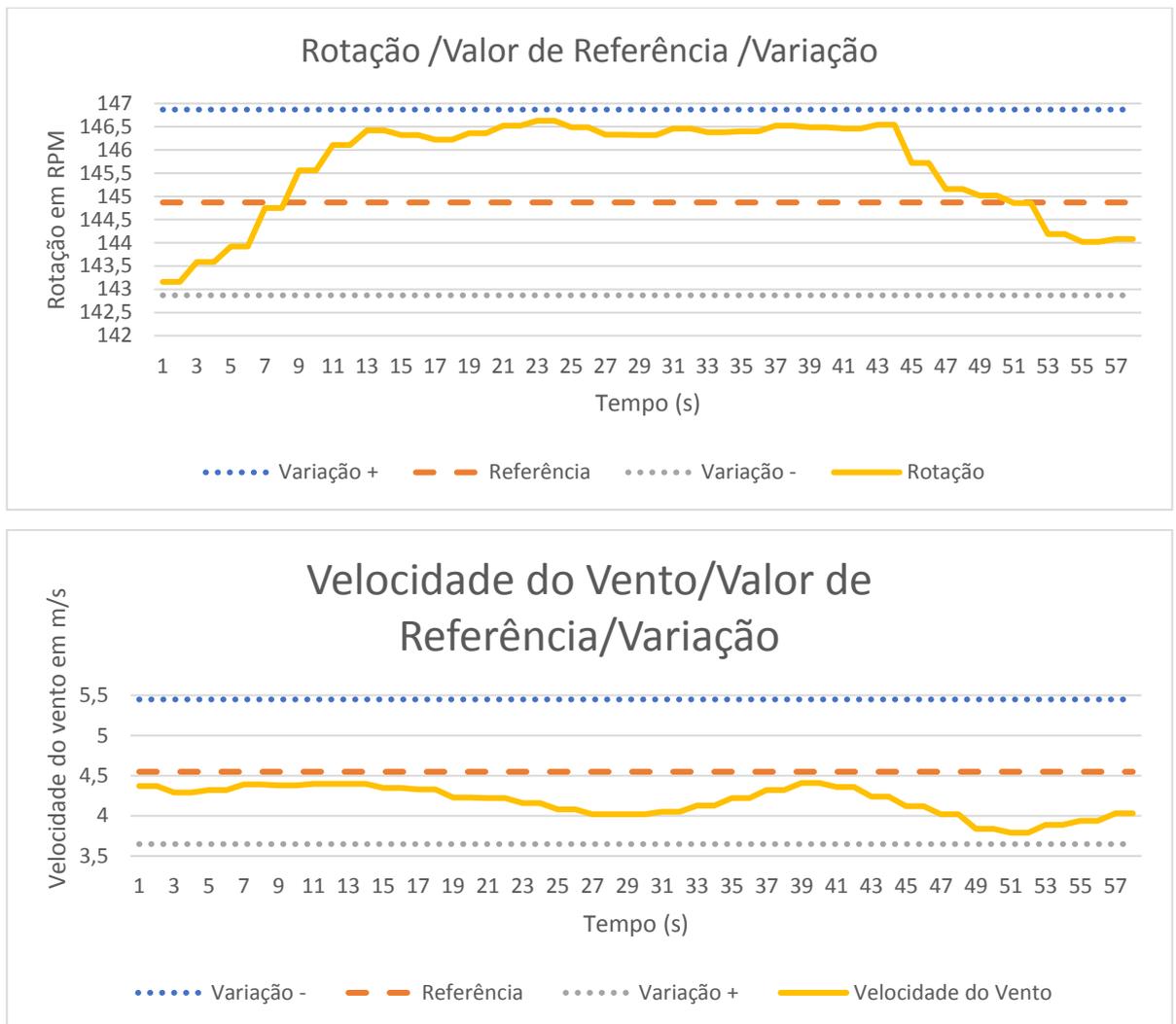


Figura 5. 3 Leituras dos sensores com valor de referência e variação.

A variação total da rotação da hélice é de 3 rpm e no gráfico foram colocados como limites os valores de +/- 2 rpm de variação. Para a variação da velocidade do vento foi determinado o valor de +/- 1m/s sobre o valor de referência coletado pelo osciloscópio e variação total é de 0,62m/s.

Quando a rotação da hélice é aumentada a variação também aumenta, na posição do servo a 66°, que gera a rotação máxima suportada pela hélice, a variação da rotação é de 8,7 rpm e da velocidade do vento de 1,56 m/s. Os gráficos com esses valores estão no apêndice C.

Devido a aceleração do motor durante esse ensaio ser mantida constante, a equipe de projeto esperava uma menor variação dos valores lidos pelo sistema de controle e supervisorio. Como nesse ensaio a pretensão era de calibrar os valores mostrados pelo supervisorio em relação ao sinal enviado pelos sensores comparando os valores mostrados no supervisorio com os valores coletados pelo osciloscópio com essa variação ficou complexo a verificação e comparação.

Para comprovar que a variação dos valores é próprio do túnel de vento devido a variações no fluxo de ar dentro do laboratório, e não do sistema de coleta de dados, optou-se por fazer um teste de

medição usando ar comprimido em um ambiente com menos interferência, e com um fluxo de ar mais contínuo.

Como pode ser visto na figura 5.3 foi estabelecido como variação para a velocidade do vento o valor de $\pm 0,9\text{m/s}$, e a variação total era de $0,62\text{m/s}$. Na figura 5.4 onde mostra o teste com o ar comprimido a variação foi diminuída para $\pm 0,05\text{ m/s}$ e variação total ficou em $0,06\text{m/s}$, para um mesmo valor de referência usado no túnel de vento. Estes dados foram, então, empregados nas análises de incerteza de medição descritas no item 5.2.1.

Desta forma constata-se que o sistema de leitura dos sensores apresenta boa estabilidade, e que a grande variação na leitura feita no túnel é devido a instabilidade do túnel que sofre perturbação por correntes de ar que circulam pelo laboratório e pela turbulência do fluxo de ar que incide sobre o sensor. Acrescenta-se a esta instabilidade a própria variação do motor a combustão.

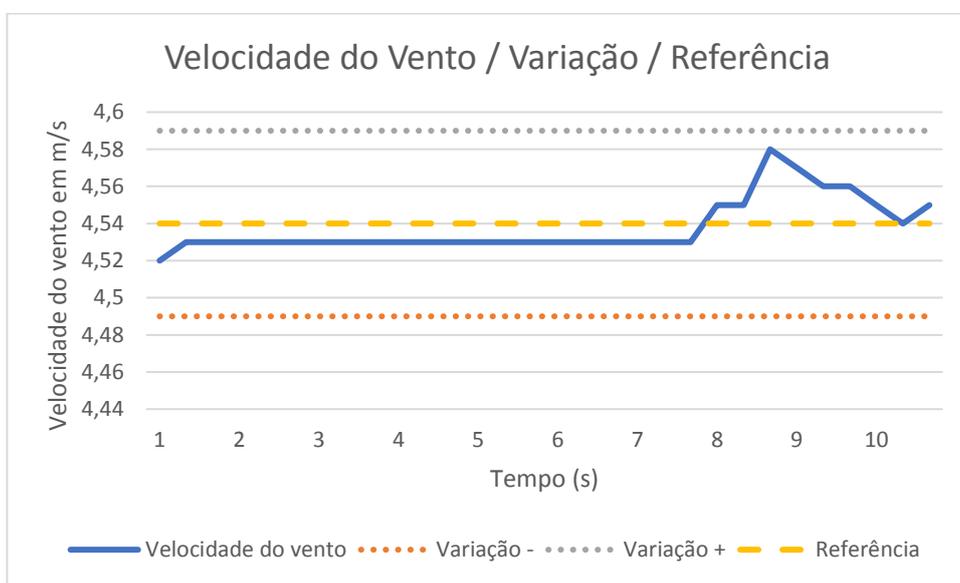


Figura 5. 4 Teste de leitura com ar comprimido.

Para o teste com ar comprimido o procedimento foi de direcionar um jato de ar comprimido sobre o anemômetro como mostrado na figura 5.5 e os dados coletados, para o valor de referência foi utilizado o sinal do anemômetro lido por um osciloscópio.

A figura 5.5 mostra a montagem feita para os testes com ar comprimido. Na imagem pode ser visto o anemômetro que faz a medição da velocidade do vento e a mangueira com a saída do ar que tem sua pressão regulada por um regulador de pressão e por consequência com velocidade do ar também ajustada.



Figura 5. 5 Montagem para o teste com ar comprimido.

5.3 Incertezas de medição

As incertezas calculadas para o sistema de medição foram estimadas com base na norma ISO GUM (Guide for Expression of Uncertainty in Measurements) aplicadas nas medições de rotação e de velocidade do vento. Nas tratativas a seguir ambos os mensurandos foram considerados variáveis e se considerou as fontes de incerteza como estatisticamente independentes ou não correlacionadas, e com distribuição de probabilidade normal.

5.3.1 Velocidade do Vento

Na estimativa da incerteza da velocidade do vento foram consideradas as seguintes fontes de incerteza e suas magnitudes:

- IS = Incerteza do sensor (ANEXO A): $\pm 0,5$ m/s
- ΔV = Variação da velocidade do vento durante os ensaios (Figura 5.4): $\pm 0,06$ m/s
- Td = Tendência (diferença em relação à referência): -0,02 m/s

Combinando as componentes aleatórias e sistemáticas, a incerteza de medição de velocidade foi calculada pela equação 5.3:

$$U = |Td| + \sqrt{IS^2 + V^2} \quad (5.3)$$

$$U = |-0,2| + \sqrt{0,5^2 + 0,06^2} = 0,7 \text{ m/s}$$

5.2.2 Rotação da Hélice medida pelo Encoder

A velocidade de rotação da hélice é uma medição indireta em que se combinam a medição de deslocamento angular pelo encoder com a medição de tempo entre pulsos gerados pelo encoder, segundo o modelo matemático mostrado pela equação 5.4.

$$Rot = \frac{\Delta\theta}{t} \quad (5.4)$$

Onde:

Rot = Velocidade angular

$\Delta\theta$ = Deslocamento angular

t = Tempo

Deste modo, para a estimativa da incerteza de medição se utilizou o método destinado a medições indiretas como disposto em (ALBERTAZZI E SOUZA 2018), no qual, a incerteza do mensurando é dada pela equação 5.5:

$$U = \sqrt{\left(\frac{\delta G}{\delta u_1} * u_1\right)^2 + \left(\frac{\delta G}{\delta u_2} * u_2\right)^2 + \dots + \left(\frac{\delta G}{\delta u_i} * u_i\right)^2} \quad (5.5)$$

Onde:

U = Incerteza de medição da grandeza de saída

u_i = Incerteza de Medição de cada grandeza de entrada

$\frac{\delta G}{\delta u_1}$ = Derivada parcial do modelo matemático em relação a cada grandeza de entrada

Na medição de velocidade angular foram consideradas as seguintes fontes de incerteza e suas magnitudes:

- u_E = Resolução angular do encoder
- u_t = Resolução da medição de tempo pelo sistema supervísório

De acordo com as informações disponíveis, o encoder possui 100 pulsos por volta, resultando em resolução angular de 0,01 volta ($3,6^\circ$). A resolução de medição de tempo praticada nos testes é de 1 ms. Aplicando estas fontes de incerteza na equação 5.6, tem-se:

$$U_{Rot} = \sqrt{\left(\frac{\delta Rot}{\delta \Delta\theta} * u_{\Delta\theta}\right)^2 + \left(\frac{\delta Rot}{\delta t} * u_t\right)^2} \quad (5.6)$$

Inserindo os valores de tempo (60 s) e número de rotações (145) referente à velocidade medida nos ensaios (145 rpm), tem-se

$$U_{Rot} = \sqrt{\left(\frac{1}{t} * u_{\Delta\theta}\right)^2 + \left(-\frac{\Delta\theta}{t^2} * u_t\right)^2} = \sqrt{\left(\frac{1}{60} * 0,1\right)^2 + \left(-\frac{145}{60^2} * 0,001\right)^2}$$

$$U_{Rot} = \pm 0,00167 \text{ rps} = \pm 0,1 \text{ rpm}$$

5.4 Resultados com o controle automático PID

Após feita a confirmação de que os valores lidos pelo sistema supervisório e de controle estavam corretos, passou-se aos testes com o controle automático utilizando o controle PID.

Para o funcionamento do controle Proporcional, Integral e Derivativo (PID) é necessário fazer o ajuste dos ganhos K_p , K_i e K_d , onde K_p é o ganho Proporcional, o K_i é o ganho Integral e o K_d é o ganho Derivativo. O ajuste desses parâmetros é chamado de sintonia do controlador PID

Para a determinação dos parâmetros iniciais a serem utilizados no PID, fez-se um teste em modo manual para levantar a curva característica de aceleração do túnel de vento. Nesse teste foi aplicado uma aceleração iniciando-se em 0 até a aceleração máxima possível e os dados coletados para a verificação da curva da aceleração, e posteriormente fazer os cálculos dos ganhos K_p , K_i e K_d que são os parâmetros usados no PID. A figura 5.6 mostra o gráfico com os valores da rotação da hélice linha azul(continua), posição do servo linha cinza (pontilhada) e a velocidade do vento linha laranja (tracejada).

Esse método de sintonia PID é proposto por Ziegler e Nichols, e é um método empírico para a determinação da sintonia PID.

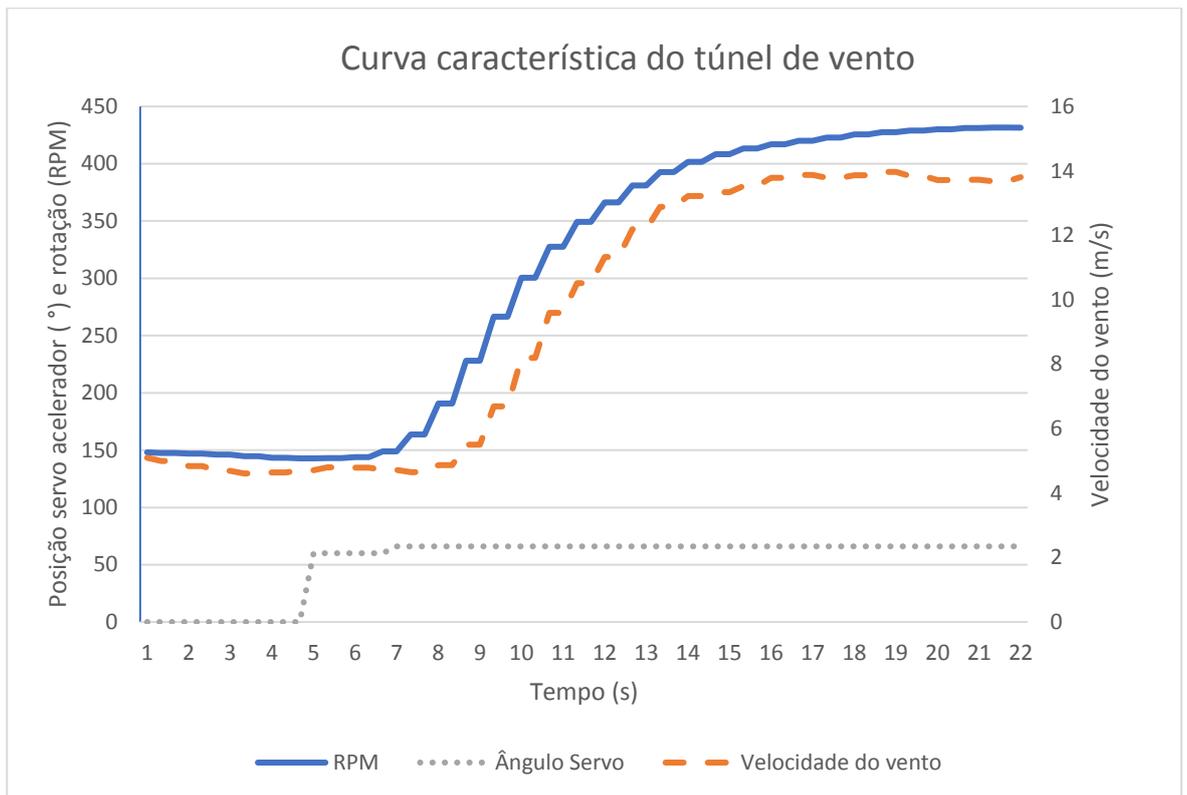


Figura 5. 6 Teste de levantamento da curva característica.

Com esses dados foi possível levantar os dados dos parâmetros L e T conforme a figura 5.7 da curva características em “S” que são apresentadas pela maioria dos sistemas em malha aberta. Sendo que L é o atraso de transporte e T e a constante de tempo da planta, sendo que esses valores são determinados desenhando-se uma linha tangente no ponto de inflexão da curva com formato em S conforme visto na figura 5.7.

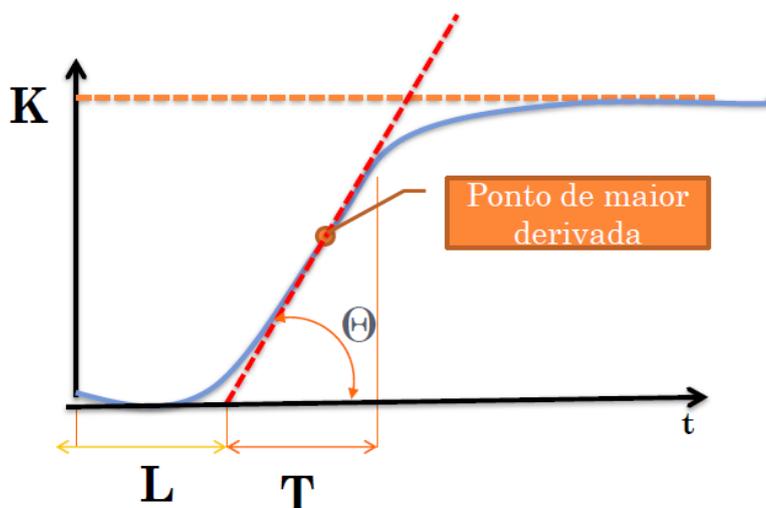


Figura 5. 7 Curva característica em S dos sistemas em malha aberta.

Para essa curva de reação podemos ter um ganho $G(s)$ que pode ser aproximado pela equação 5.7.

$$G(s) \approx \frac{He^{-Ls}}{Ts + 1} \quad (5.7)$$

Onde:

$G(s)$ = ganho

H = ganho da planta em regime estacionário

L = atraso de transporte

T = constante de tempo da planta

Com os dados L e T da curva do sistema é possível calcular os parâmetros de ganho do PID sendo que a tabela 5.2 mostra as formulas e constantes para o cálculo dos ganhos K_p , K_i e K_d para a curva de reação proposta pelo método de Ziegler e Nichols:

Tabela 5. 2 valores para a sintonia PID.

Tipo de Controlador	K_p	K_i	K_d
<i>P</i>	$\frac{T}{L}$	∞	0
<i>PI</i>	$0,9\frac{T}{L}$	$\frac{T}{0,3}$	0
<i>PID</i>	$1,2\frac{T}{L}$	2L	0,5L

Os valores obtidos através da tabela 5.2 são para um percentual de sobre sinal de 25%, podendo ser necessário refinar seus valores por se tratar de um método empírico de sintonia dos valores dos ganhos.

Podemos observar que para o controlador PID sintonizado por esse método fornece:

$$G_c(s) = Kp \left(1 + \frac{1}{K_i s} + K_d s \right)$$

$$= 1,2 \frac{T}{L} \left(1 + \frac{1}{2Ls} + 0,5Ls \right)$$

$$= 0,6T \frac{\left(s + \frac{1}{L} \right)^2}{s}$$

Os valores obtidos através da figura 5.6 foi de $L=3$ e o valor de $T=7$ sendo que para um controle do tipo PID conforme tabela 5.2 obtém-se:

$$Kp = 1,2 \frac{7}{3} = 2,8$$

$$Ki = 2 \times 3 = 6$$

$$Kd = 0,5 \times 3 = 1,5$$

Colocando esses valores para sintonia do PID no arduíno o sistema apresentou o resultado como mostra a figura 5.9, após foram feitos testes alterando os valores dos ganhos para verificação do melhor resultado a ser obtido.

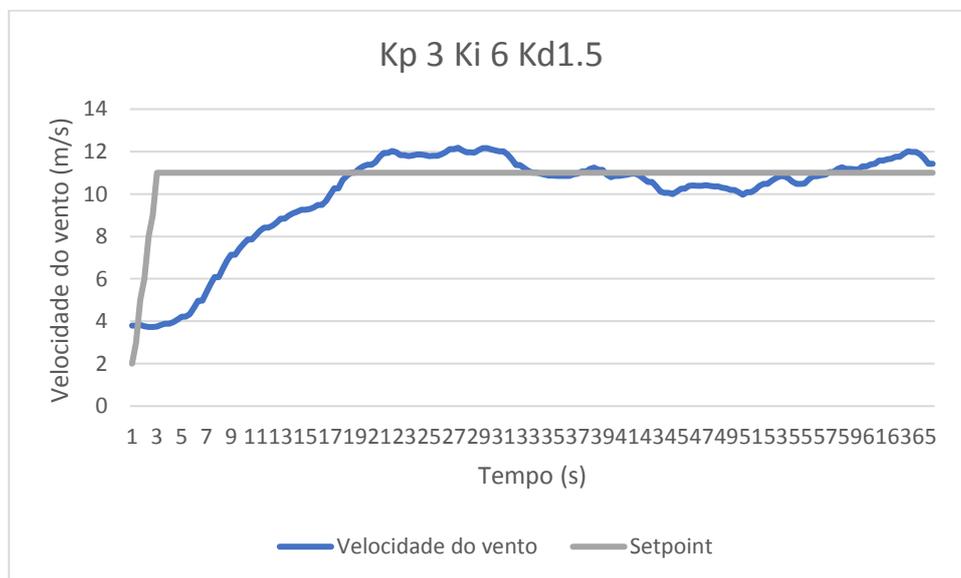


Figura 5. 7 Resultado do primeiro teste PID.

Os resultados dos demais testes estão no apêndice D. Os valores que apresentaram melhores resultados foram os ganhos de $Kp = 3$ $Ki = 5$ e $Kd = 1.5$.

Com o controle usando esses valores de ganho observou-se que houve redução da variação da velocidade do vento, essa diminuição ficou em aproximadamente 17%. A figura 5.10 mostra de forma gráfica os valores obtidos na leitura do sensor de velocidade do vento. Para uma velocidade de 11m/s onde a variação da velocidade do vento era de 0,97m/s com o uso do PID a variação passou a 0,8m/s.

No gráfico a linha cinza é o valor do setpoint definido para este ensaio e a linha azul as leituras da velocidade do vento coletados.

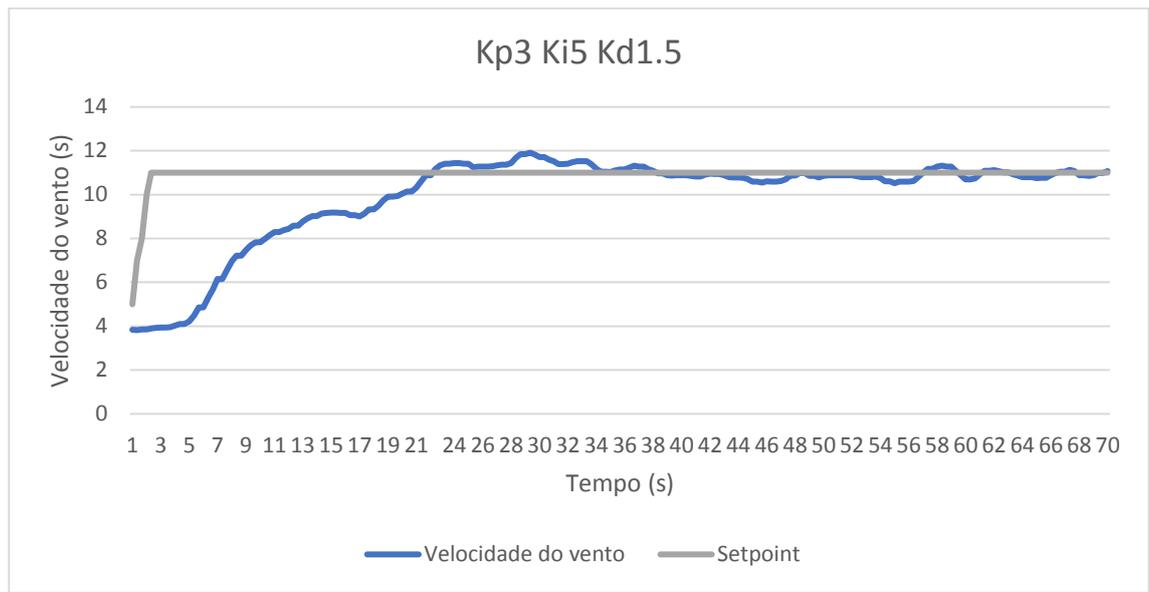


Figura 5. 8 Dados de leitura após implantação do PID.

Com esses dados de sintonia PID o túnel apresentou os seguintes dados de desempenho:

- Tempo de subida do controle = 15 s
- tempo de estabilização = 34 s
- erro de regime permanente = 0,8 m/s
- sobre sinal = 0,91 m/s
- sub sinal = 0,48 m/s
- Atraso da resposta = 5 s

Para o controle desenvolvido para o esse túnel não se tem preocupação com o tempo de subida e de estabilização, para o projeto o objetivo do controle da velocidade é que a mesma atue o mais próximo possível do valor especificado no ensaio.

CAPITULO 6 CONCLUSÕES

6.1 Introdução

No início do trabalho foi definido como objetivo principal: “instrumentação e desenvolvimento do sistema de controle de velocidade do vento de um túnel de vento com propulsão por motor a combustão interna, existente no laboratório de Conformação do IFSC Campus Chapecó”. Ao chegar no estado atual do desenvolvimento deste projeto, pode-se afirmar que este objetivo, com as devidas ressalvas, foi atingido satisfatoriamente.

Neste capítulo é feita uma avaliação final dos resultados do projeto desenvolvido, na qual se tenta expressar o grau de atendimento dos objetivos traçados no início do trabalho. Também são apontadas proposições de trabalhos a serem realizados futuramente, objetivando a medição e otimização do desempenho do protótipo desenvolvido.

6.2 Análise de objetivos e resultados

Assim que desenvolvido o projeto do sistema de automação do túnel de vento, executada a construção do protótipo, e realizados alguns testes, pode-se concluir que o objetivo principal do trabalho foi alcançado.

A instrumentação especificada e instalada no sistema permitiu medir as variáveis de modo confiável para os objetivos do teste. A medição de rotação foi realizada com uma incerteza de 0,1 RPM e a medição de velocidade do vento foi realizada com uma incerteza de 0,7 m/s. Estes valores mostram-se suficientes para o controle do túnel de vento dentro dos requisitos estabelecidos para o projeto, mesmo com o emprego de sensores de baixo custo e média precisão.

O emprego da plataforma arduíno também se mostrou eficiente por atender as especificações necessárias de controle e de comunicação com o supervisor, além da eficiência em atender aos requisitos de segurança.

O desempenho do sistema completo foi avaliado e os parâmetros de controle foram obtidos e ajustados, permitindo obter velocidades de vento controladas para ensaios de turbinas eólicas na faixa de 1m/s a 15m/s.

Mesmo que seja necessário avaliar mais e melhor o desempenho do sistema desenvolvido, é fato que uma tecnologia para análise geral de turbinas eólicas, pode ser feita, utilizando as instalações do túnel desenvolvido.

Uma análise econômica do sistema desenvolvido permite concluir que a instrumentação e automatização do túnel de vento teve o custo de material em R\$ 1200,00, sem considerar o tempo de dedicação do pesquisador. É um investimento bastante baixo diante de sistemas comerciais com esta mesma função.

Como principais dificuldades ao longo do desenvolvimento e limitações do sistema pronto podem ser destacadas:

- Dificuldade na aquisição de sensores de maior exatidão
- Limitações de rigidez mecânica na estrutura do túnel de vento
- Dificuldades na homogeneização do fluxo de ar pelo túnel de vento, ocasionando turbulências que tornaram análises de medição mais desafiadoras
- Dificuldades na comunicação entre o sistema supervisor e o hardware (Arduíno). Inicialmente a equipe de projeto pretendia desenvolver o controle PID no próprio supervisor, mas devido a limitações na velocidade de comunicação o controle precisou ser implementado no arduíno
- Dificuldade no sistema de arquivamento dos dados coletados pelo supervisor. O sistema escolhido para arquivamento não permite muitas configurações nos parâmetros de coleta de dados, não permite por exemplo configurar a frequência da coleta dos dados e não tem configuração para geração de gráficos automatizados.

6.3 Recomendações para trabalhos futuros

A partir da experiência no desenvolvimento de todo o projeto são passadas como recomendações para trabalhos futuros:

- Reengenharia mecânica do túnel de vento, tanto da parte estrutural para conferir melhor rigidez como da parte de mecânica dos fluidos, para tornar o fluxo de ar mais laminar e homogêneo ao longo da seção transversal do duto do que o verificado atualmente.
- Incluir mais variáveis de controle e/ou leitura, como a temperatura e a umidade do ar gerado no túnel de vento.
- Mapeamento mais detalhado do fluxo de ar gerado, com a instalação de mais sensores de vazão em diferentes posições do túnel de vento.
- Implementar um controle adaptativo no túnel de vento, que permita configurar ensaios com parâmetros diferentes. (Exemplo: que no mesmo ensaio possa ser configurados diferentes velocidades do vento para cada determinado tempo).

- Desenvolver um sistema que automatize o sistema de partida do motor a combustão, de forma que a partida possa ser realizada pelo programa de controle da velocidade do vento.
- Desenvolver e/ou modificar o sistema para geração de gráficos e coletas de dados para proporcionar uma maior automação.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Adegas, F. D.; Pena, G. de M.; Alé, J. A. V.; Simioni, G. S.; **Power curve of small wind turbine generators – laboratory and field testing**. In: RIO 3 - WORLD CLIMATE & ENERGY EVENT, Rio de Janeiro. 2003
- Akao, Y. **Quality Function Deployment Integrating Customer Requirements into Product Design**. Productivity Press, Cambridge, Massachusetts, Norwalk, Connecticut, 1990.
- Albertazzi G. Jr., Armando; Sousa, André R. de; **Fundamentos de Metrologia Científica e Industrial** 2. Ed. São Paulo: Monole, 2018.
- Alé, A. J. V.; Simioni, G. da S.; Filho, J. G. A. C.; **Performance Evaluation of the next Generation of Small Vertical Axis Wind Turbine** In: EWEC 2010 - European Wind Energy Conference e Exhibition.
- Alé, A. J. V.; Simioni, G. da S.; Filho, J. G. A. C.; **Procedures laboratory for small wind turbines testing** In: EWEC 2010 - European Wind Energy Conference e Exhibition.
- ANEEL – **Banco de Informações de Geração**. www.aneel.gov.br – Acessado em Set/2017.
- Fabrycky, W.J. and Blanchard, B.S. **Systems Engineering and Analysis**. New Jersey: Prentice Hall. 1990
- Back, Nelson; Ogliari, André; Dias, Acires; Silva, Jonny C. **Projeto Integrado de Produtos: planejamento, concepção e modelagem**. São Paulo: Manole, 2008.
- Brunetti, Franco. **Mecânica dos Fluidos**. 2. Ed. Ver. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2008.
- Corbus D.; Link. H.; Butterfield, S.; Stork, C.; Newcomb, C.; Sasseen T. **Certification Testing for Small Wind Turbines**. NREL/CP-500-27062. Burlington, Verm. October, 1999.
- Custódio, Miguel Chaves. **Automação do controle de velocidade do ar no túnel de vento da UFRGS**. Dissertação. UFRGS, 2010.
- ENERCON - Wind Energy. Disponível em: <<http://www.enercon.de/home/>>. Acesso em: 12 set. 2017.
- FONSECA, A.J.H. **Sistematização do processo de obtenção das especificações de projeto de produtos industriais e sua implementação computacional**. 2000. 180 f. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) CTC/EMC. Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis.
- Gipe, P. **Testing the Power Curves of Small Wind Turbines**. WindStats Newsletter, Vol.13, nº3, 2000.
- Giacosa, D. **Motores endotérmicos**. Madrid: Editorial dossat, 1986, 722 p.
- Google Imagens, **Aplicações de tuneis de vento**. Disponível em: https://www.google.com.br/search?client=firefox-b-ab&dcr=0&tbm=isch&q=aplica%C3%A7%C3%B5es+de+tuneis+de+vento&backchip=online_chips:wind+tunnel&chips=q:aplica%C3%A7%C3%B5es+de+tuneis+de+vento&sa=X&ve

d=0ahUKEwjAut-Nv6DZAhUGgZAKHYgbAE0Q3VYIJSgA&biw=1304&bih=694&dpr=1.
Acesso em 12/02/2018.

GWEC - Global Wind Energy Council, 2016. Disponível em: <<http://www.gwec.net/global-figures/graphs>>.
Acesso em: 12 set. 2017.

Hauser, J.R.; Claunsig, D. **The House of Quality**, Harvard Busines Review, may/jun, 1998.

JOGLEKAR, B.; MOURYA, R.M. **Design, Construction and Testing Open Circuit Low Speed Wind Tunnel**. *International Journal of Engineering Research and Reviews*, vol. 2, no. 4, pp. 1-9, October/December 2014.

Jinbo, Maro. **CONTRIBUIÇÕES AO PROJETO DE SISTEMAS EÓLICOS DE EFEITO MAGNUS COM RASTREAMENTO DA MÁXIMA POTÊNCIA**. 2016. 260p. Tese (Doutorado em engenharia Elétrica) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria.

Milhor, Carlos Eduardo. **SISTEMA DE DESENVOLVIMENTO PARA CONTROLE ELETRÔNICO DOS MOTORES DE COMBUSTÃO INTERNA CICLO OTTO**. 2002. 72p. Dissertação (Mestrado em Engenharia mecânica) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Paulo.

NBRIEC – 61400 – 12 – 1 **AEROGERADORES - PARTE 12-1: MEDIÇÕES DO DESEMPENHO DE POTÊNCIA DE AEROGERADORES**, 2012

OBERT, E. F. **Motores de combustão interna**. Porto Alegre: Editora Globo, 1971.

Ogliari (1999) OGLIARI, A. **Sistematização da concepção de produtos auxiliada por computador com aplicações no domínio de componentes de plástico injetados**. 1999. 349 f. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) - CTC/EMC, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis.

Pahl, G.; Beitz, W. **Engineering design: a systematic approach**. 2nd ed. London: Springer-Verlag, 1996. 544 p.

Pereira, J.D. **Wind Tunnels – Aerodynamics, Models and Experiments**. 1a ed. Nova Science Publishers, Inc, 2011. pp. 191-220.

Reis *et al.* REIS, A. V.; ANDRADE, L. F. S.; FORCELLINI, F. A. **Sistematização da tarefa de valoração dos requisitos dos clientes para uso no QFD**. In: CONGRESSO NACIONAL DE ENGENHARIA MECÂNICA, 2, João Pessoa, Anais... Associação Brasileira de Ciências Mecânicas. 2002. 10p. (CD-ROOM).

Romano, Leonardo Nabaes, **Modelo de Referência para o Processo de Desenvolvimento de Máquinas Agrícolas, SC**: PPGEM/UFSC, Tese de Doutorado, 2003.

Roozenburg, N. F. M.; Eekels, J. **Product design: fundamentals and methods**. Chichester: John Wiley & Sons, 1995. 408 p.

Rozenfeld, H.; Forcellini, F. A.; Amaral, D. C.; Toledo, J. C.; Silva, S. L. da; Alliprandini, D. H.; Scalice, R. K. **Gestão de desenvolvimento de produtos: uma referência para a melhoria do processo** São Paulo : Saraiva, 2006, 542p.

SINGH, M.; SINGH, N.; YADAV, S.K. **Review of Design and Construction of an Open Circuit Low Speed Wind Tunnel**. Global Journal of Researches in Engineering Mechanical and Mechanical and Mechanics Engineering. Vol. 13, Issue 5, Global Journals Inc. (USA), 2013.

Ullman, D.G. **The Mechanical Design Process**. Singapore: McGraw-Hill Inc.. 1992. **The Mechanical Design Process**. Singapore: McGraw-Hill Inc. 2nd ed..1997.

Tomasi, Rodrigo. **CONTROLE DE MOTOR A COMBUSTÃO INTERNA PARA USO EM POWERTRAIN DE VEICULOS HIBRIDO ELETRICO**. 2015. 145p. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Automação e Sistemas) – Universidade Federal de Santa Catarina, Santa Catarina.

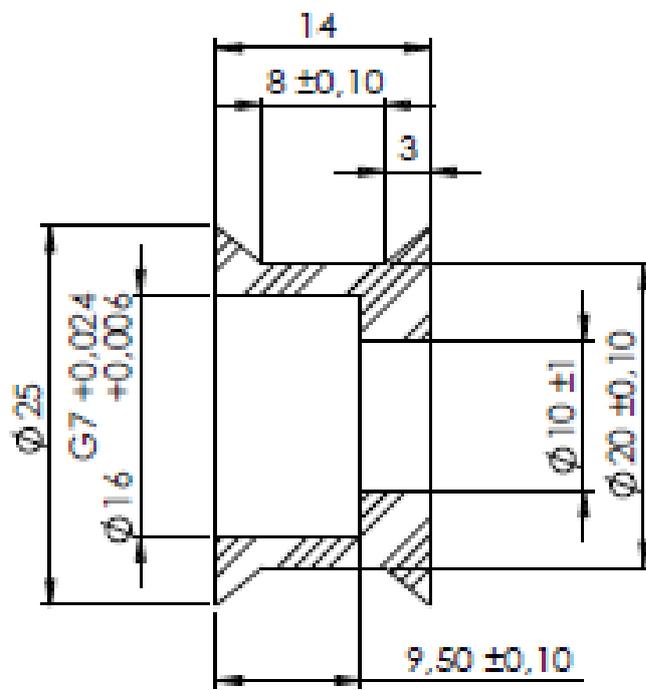
Veiga, S.N. **Desenvolvimento de um protótipo de um separador de sólidos de dejetos animais, destinado à pequena propriedade**. 1999. 167 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) CTC/EMC. Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis

Wildner, F. D. **Estudo experimental da variação de velocidade de combustão para diferentes combustíveis, relações de mistura e relações de compressão em um motor**. ASTM CFR. PPGEM – UFRS, 122p. 2006.

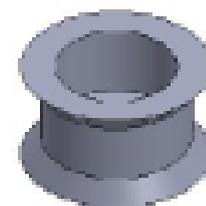
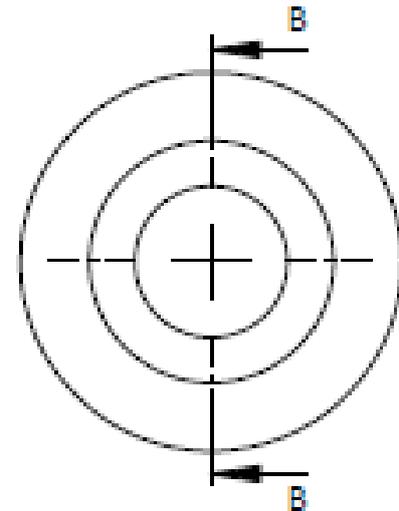
Ziegler, J. G.; Nichols, N. B. **Optimum settings for automatic controllers**, ASME Trans., 64, 1942, p.759-768.

APÊNDICES

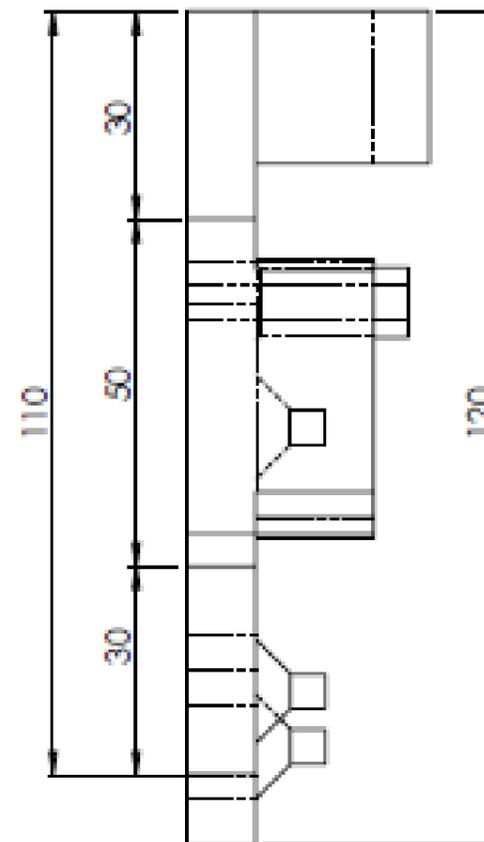
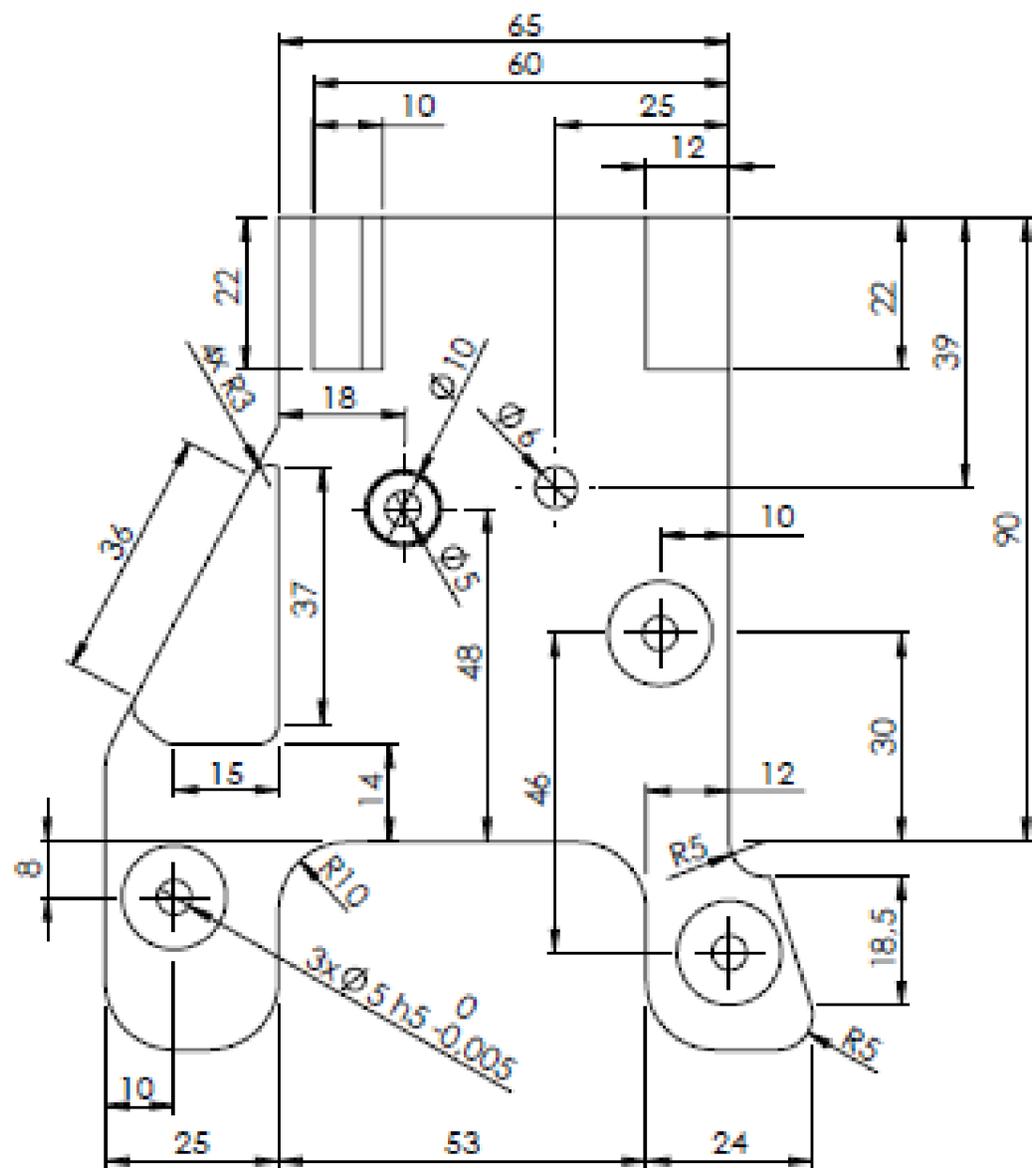
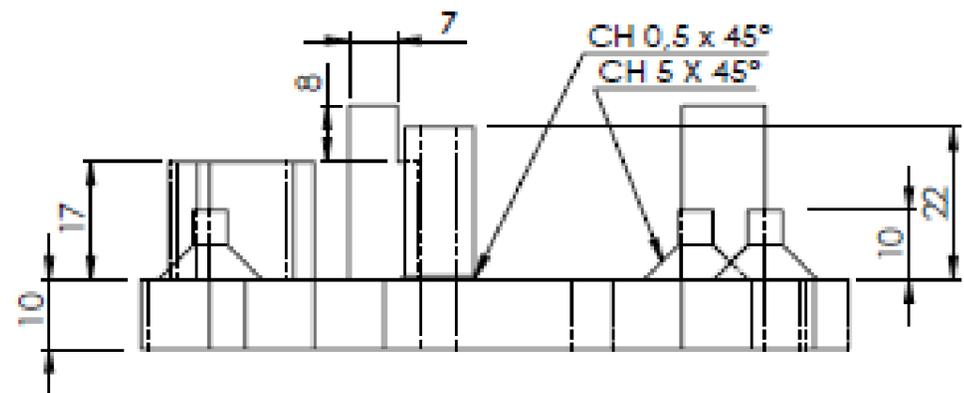
APÊNDICE A - Desenhos detalhados das peças utilizadas.



SEÇÃO B-B

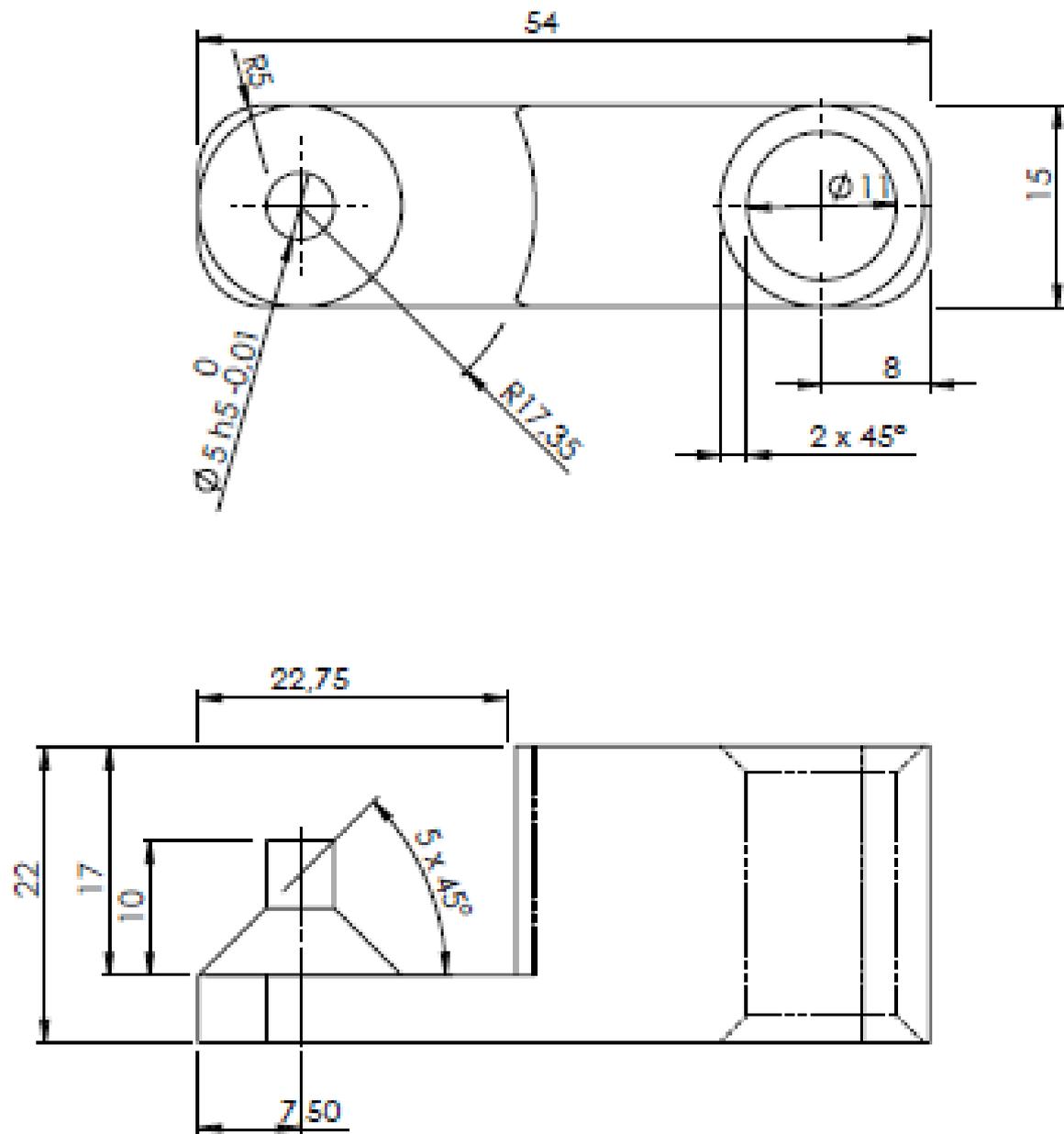


DOC. DE INFORMAÇÃO:			TOLERÂNCIAS NÃO ESPECIFICADAS		QUANTIDADE	
			TRATAMENTO SUPERFICIAL		QUANTIDADE	UNIDADE
			MATERIAL		2:1	A4
	DATA	NOME/CRIAR	<h1>RONDANA</h1>			código
PROJ.	15/10/2017	DEWIS				
DES.	15/10/2017	DOUGLAS				
PROD.						



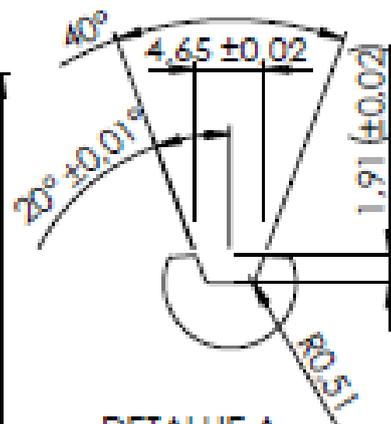
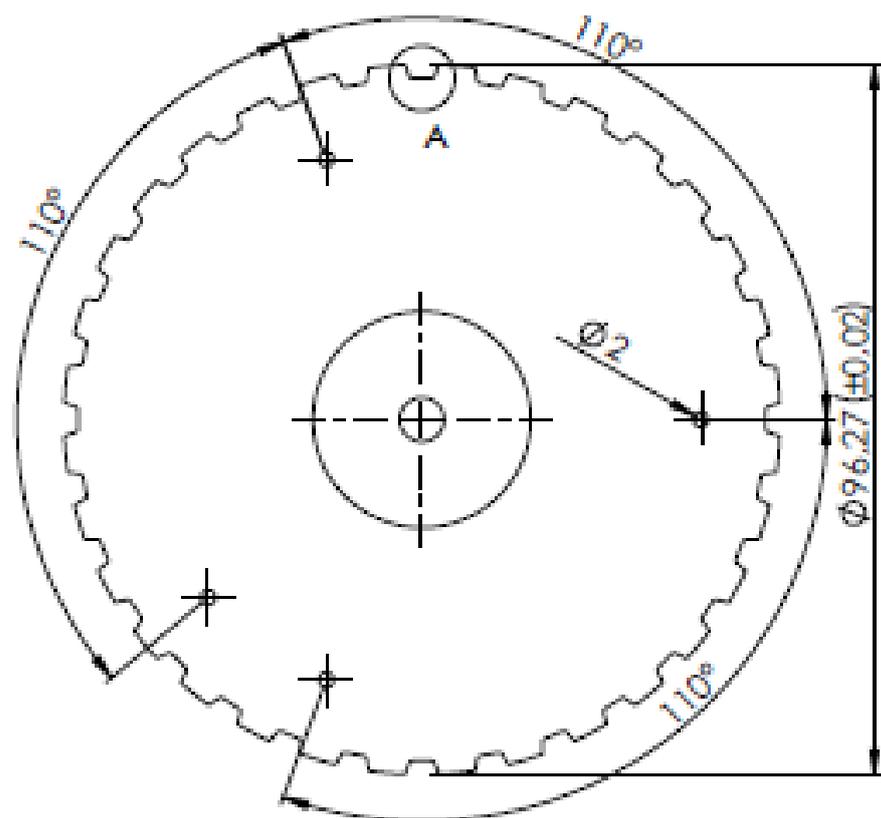
TOLERANCIAS NÃO ESPECIFICADAS = 0,1mm

DOC. DE INFORMAÇÃO:			-----	
			TOLERANCIAS NÃO ESPECIFICADAS	QUANTIDADE
			TRATAMENTO SUPERFICIAL	FEITO
			MATERIAL	INSCRIÇÃO
			Descrição	FEITO
PROJ.	DATA	NOME/CREA	BASE ACELERADOR NOVA	
DES.	15/12/2017	DOUGLAS		
PROC.				
			ESCALA	FORMATO
			1:1	A3
			CÓDIGO	

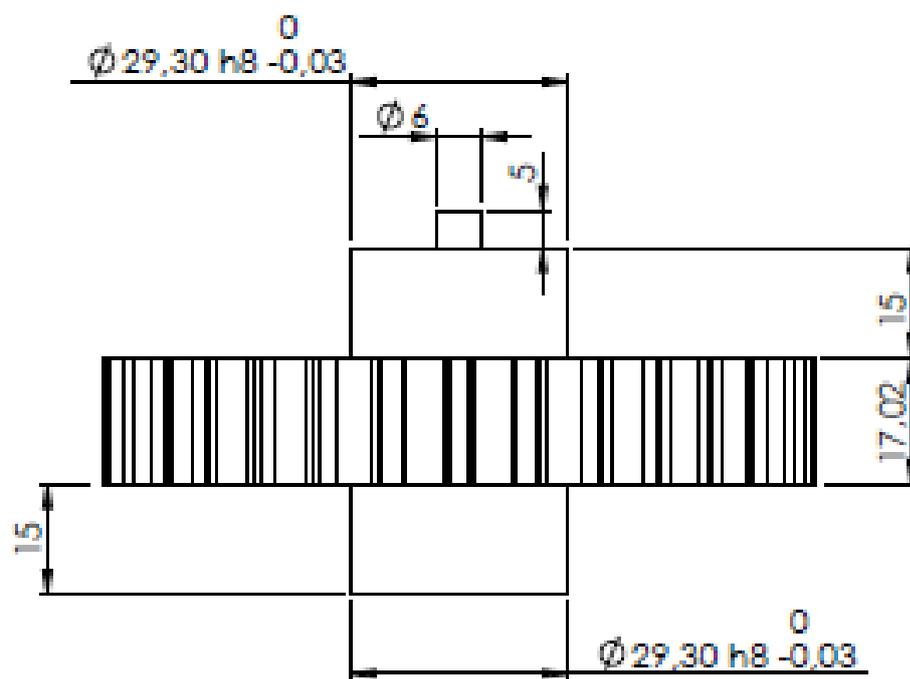


DOC. DE INFORMAÇÃO:

  Mecatrônica Departamento Acadêmico de Mecatrônica	TOLERÂNCIAS NÃO ESPECIFICADAS		QUANTIDADE	
	TRATAMENTO SUPERFICIAL		MATERIAL	MATERIAL
	MATERIAL		UNIDADE	PROJEÇÃO
	NOME DA PEÇA		ESCALA	FÓRMO
	DATA	NOME/CREA	CÓDIGO	
PROJ.	15/10/2017	DETWIS	<h1>Esticador</h1>	
DES.	15/10/2017	DOUGLAS		
PROD.				



DETALHE A
ESCALA 2 : 1



DOC. DE INFORMAÇÃO:



TOLERÂNCIAS NÃO ESPECIFICADAS

TRATAMENTO SUPERFICIAL

MATERIAL

QUANTIDADE

MARKA LIG

MARKA METAL

UNIDADE

REVISÃO

ESCALA

FORMATO

1:2

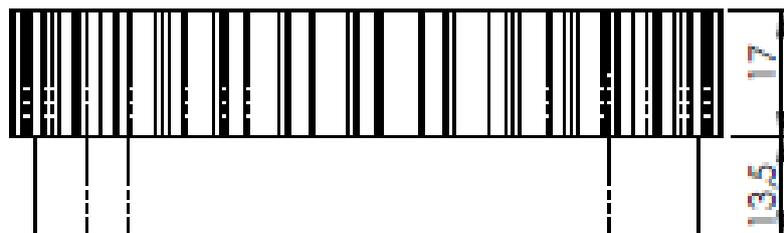
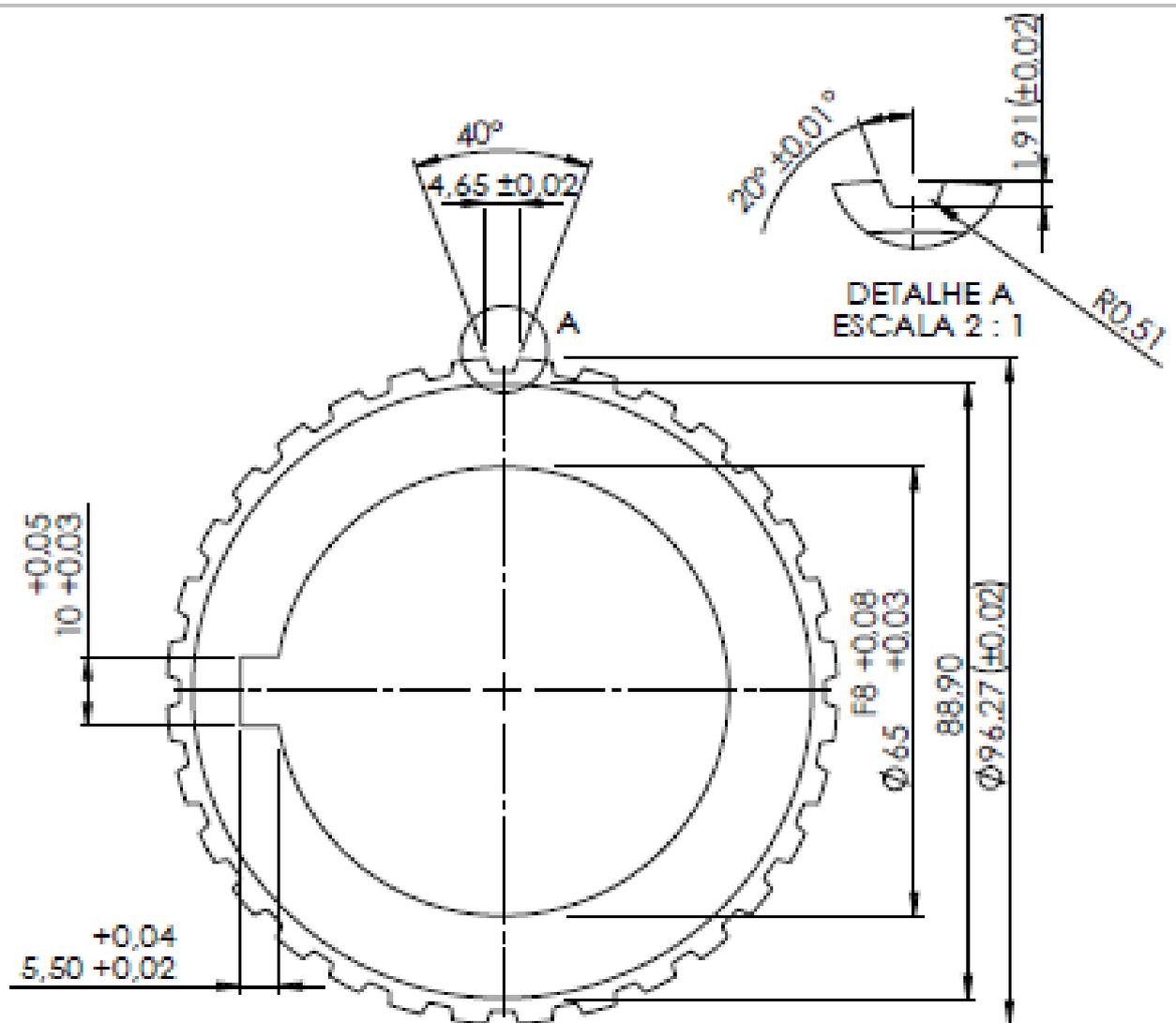
A4

CÓDIGO

	DATA	NOME/CREA
PROJ.	15/10/2017	EDSWIS
DES.	15/10/2017	DOUGLAS
PROD.		

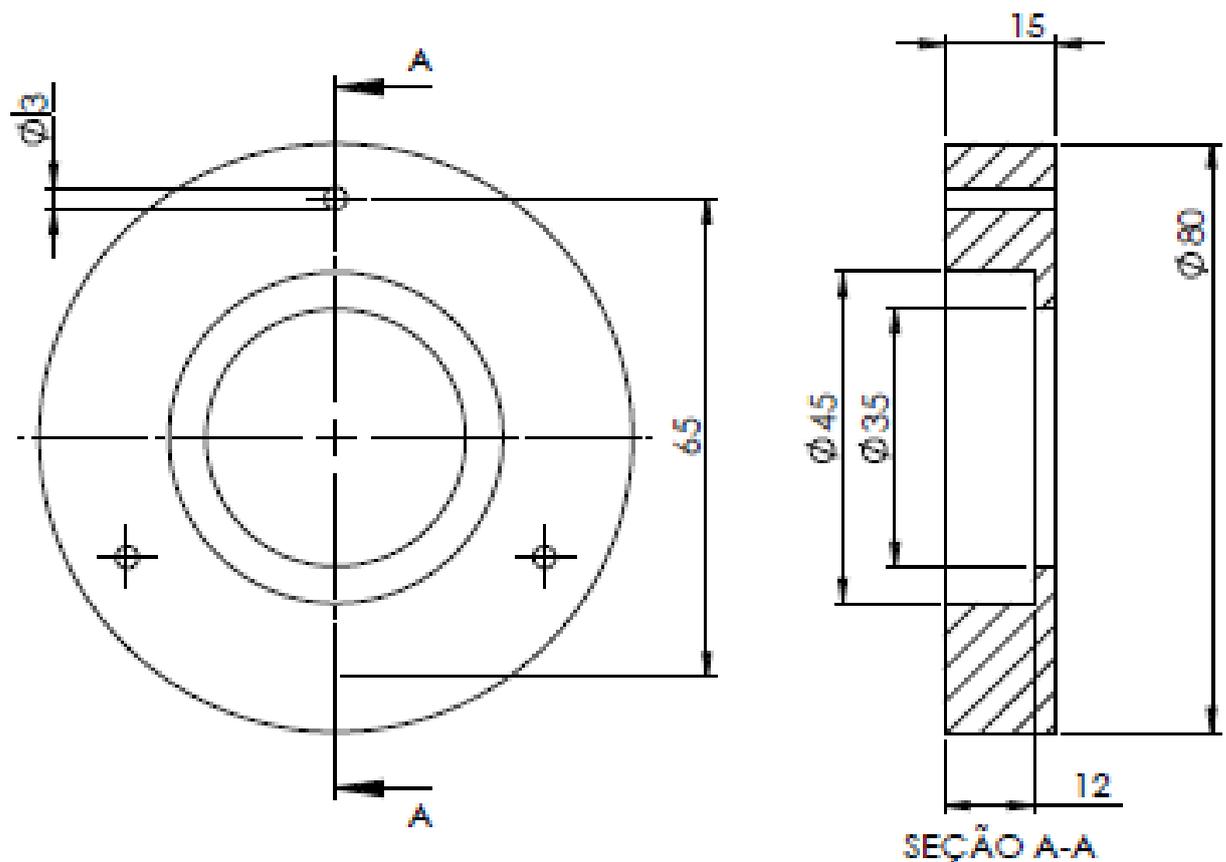
NOME DA PEÇA

POLIA LADO ENCODER



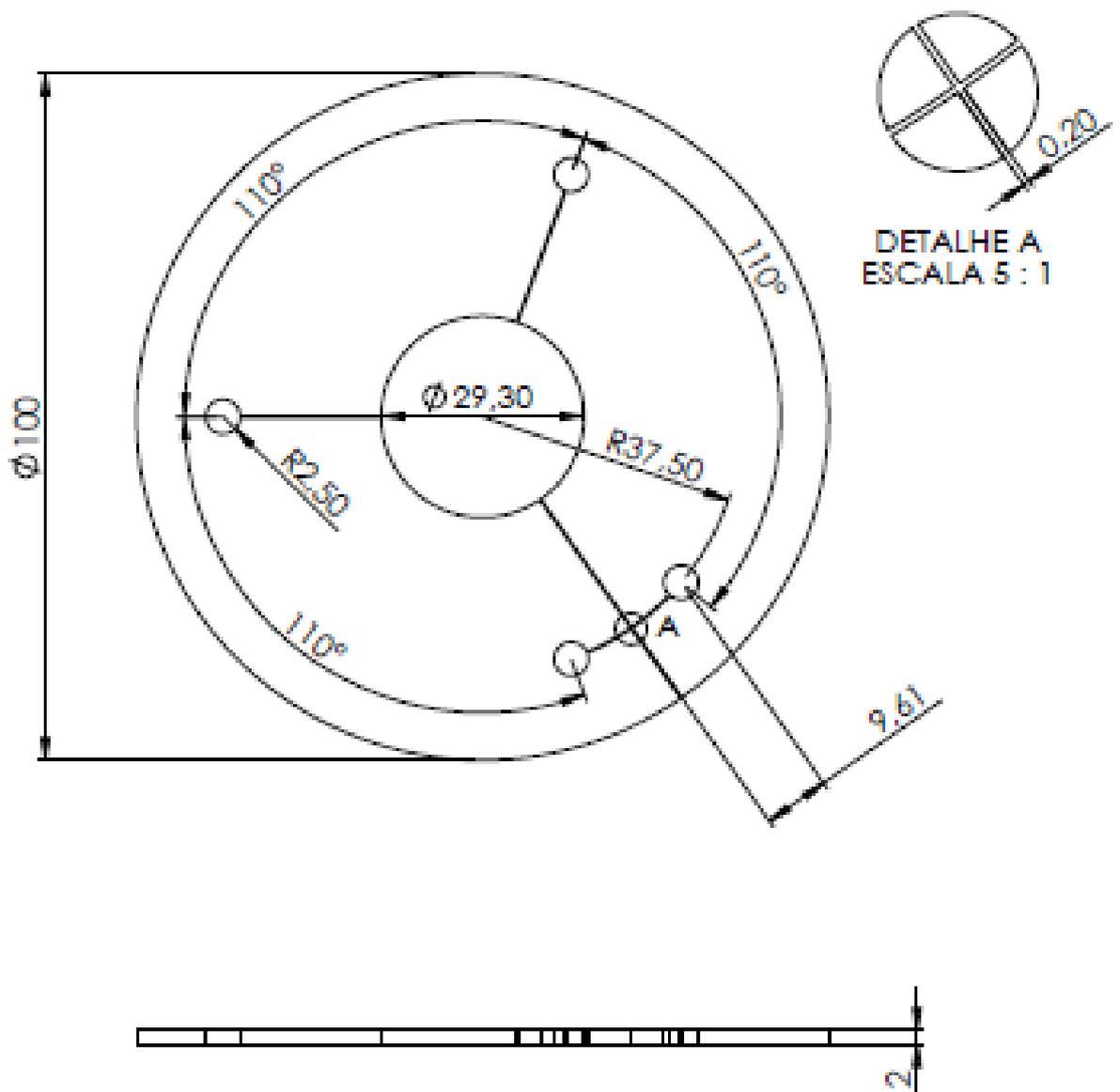
Z = 32
 MODELO CORREIA = 345L050

DOC. DE INFORMAÇÃO:			QUANTIDADE	
  Mecatrônica Departamento Acadêmico de Mecatrônica			TOLERÂNCIAS NÃO ESPECIFICADAS	
			TRATAMENTO SUPERFICIAL	
			MATERIAL	
			NOME DA PEÇA	
PROJ.	DATA	NOME/CREA	NUM. UNID.	NUM. META
DES.	15/10/2017	DEWES	UNIDADE	FIGURAS
PROD.	15/10/2017	DOUGLAS	ESCALA	FORMATO
			1:1	A4
			cópia	
			POLIA SINCRONIZADORA	



DOC. DE INFORMAÇÃO:

 			TOLERÂNCIAS NÃO ESPECIFICADAS		QUANTIDADE													
			TRATAMENTO SUPERFICIAL		MARCA LQ	MARCA META												
MATERIAL			UNIDADE		REVISÃO													
NOME DA PEÇA			ESCALA		FORMATO													
			1:1		A4													
<table border="1"> <thead> <tr> <th></th> <th>DATA</th> <th>NOME/CRIEA</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>PROJ.</td> <td>15/10/2017</td> <td>EDRWS</td> </tr> <tr> <td>DES.</td> <td>15/10/2017</td> <td>DOUGLAS</td> </tr> <tr> <td>PROD.</td> <td></td> <td></td> </tr> </tbody> </table>				DATA	NOME/CRIEA	PROJ.	15/10/2017	EDRWS	DES.	15/10/2017	DOUGLAS	PROD.			<p style="text-align: center; font-size: 24px; font-weight: bold;">MANCAL ENCODER</p>		cópia	
	DATA	NOME/CRIEA																
PROJ.	15/10/2017	EDRWS																
DES.	15/10/2017	DOUGLAS																
PROD.																		



DOC. DE INFORMAÇÃO:



TOLERÂNCIAS NÃO ESPECIFICADAS

TRATAMENTO SUPERFICIAL

MATERIAL

NOME DA PEÇA

QUANTIDADE
2

UNIDADE UNIDADE

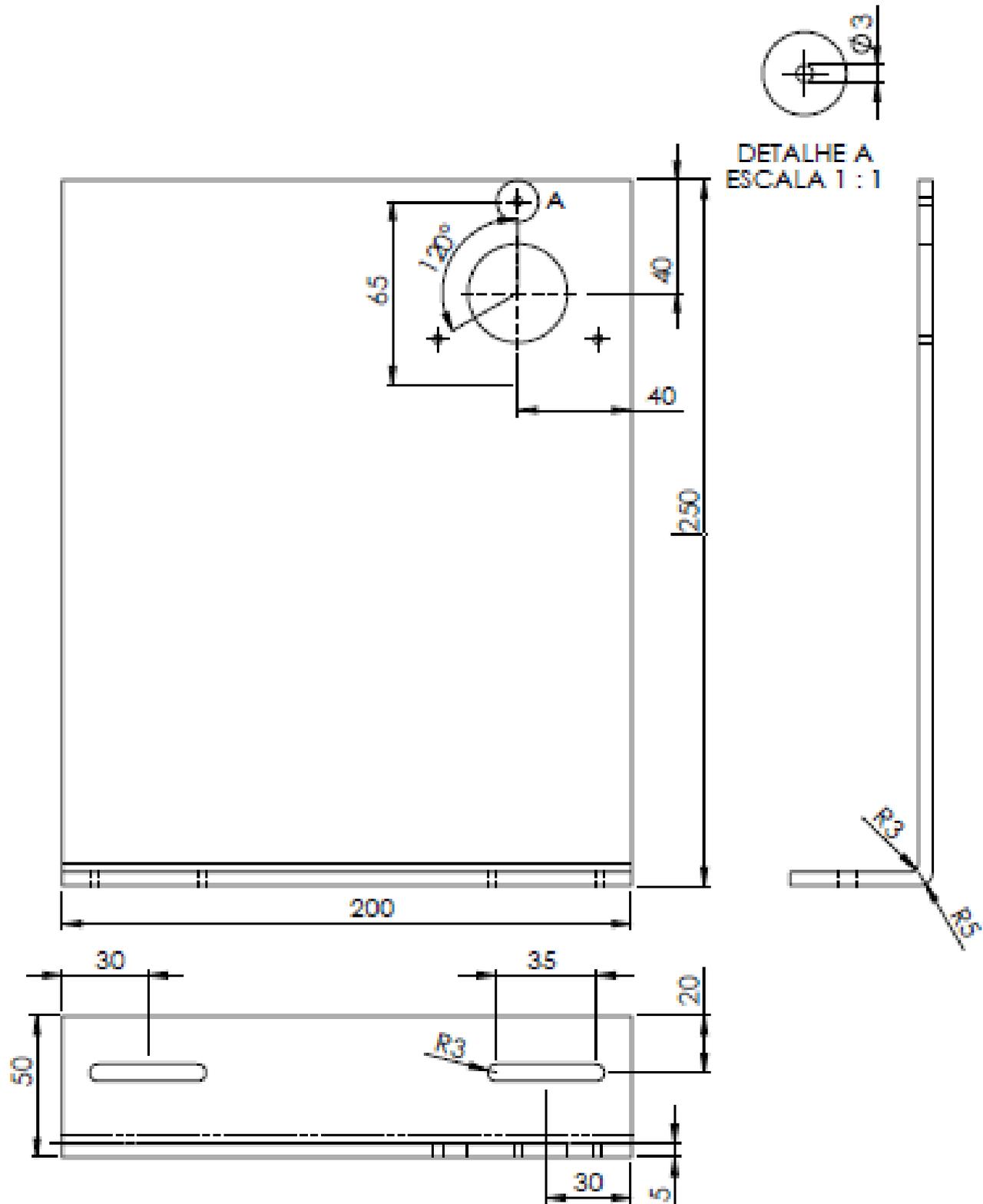
UNIDADE UNIDADE

ESCALA 1:1
FOLHETO A4

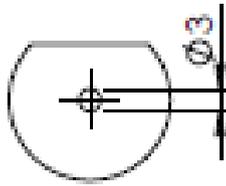
	DATA	NOME/CREA
PROJ.	15/10/2017	DEWIS
DES.	15/10/2017	DORGLAS
PROD.		

ABA POLIA SINCRONIZADORA

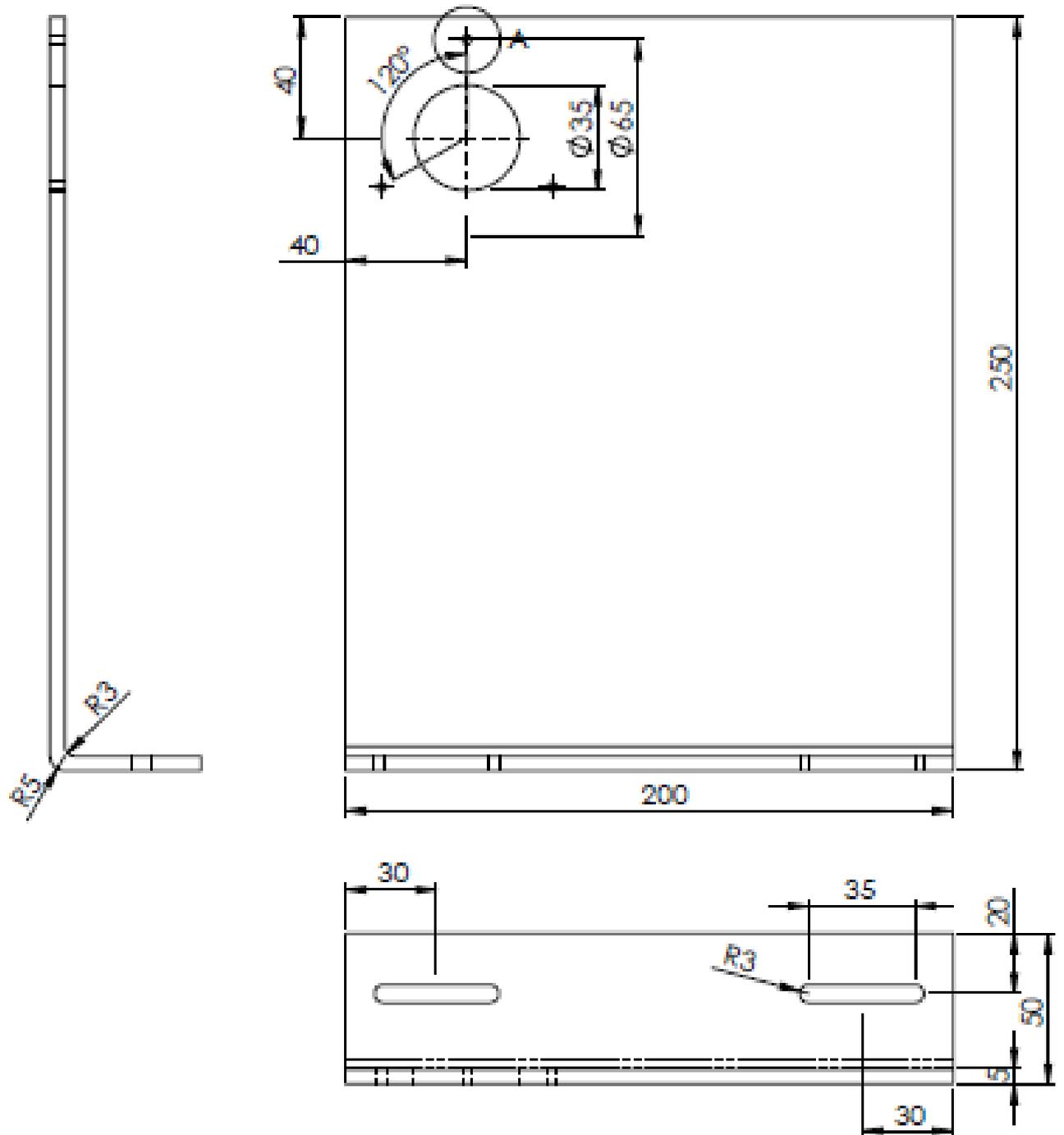
CÓDIGO



DOC. DE INFORMAÇÃO			TOLERÂNCIAS NÃO ESPECIFICADAS		QUANTIDADE	
  Mecatrônica <small>Departamento Acadêmico de Mecânica</small>			TRATAMENTO SUPERFICIAL		QUANT. LIG	QUANT. META
			MATERIAL		UNIDADE	FIGURAÇÃO
			NOME DA PEÇA		ESCALA	FORMATO
	DATA	NOME/CRIAR	<h1>SUPORE ENCODER 2</h1>		1:2	A4
PROJ.	15/10/2017	DEPWIS			cálculo	
DES.	15/10/2017	DICROGLAS				
PROD.						



DETALHE A
ESCALA 1 : 1



DOC. DE INFORMAÇÃO:



TOLERNCIAS NO ESPECIFICADAS

QUANTIDADE

TRATAMENTO SUPERFICIAL

QUANTIDADE

MATERIAL

UNIDADE

ESCALA

1-2

CÓDIGO

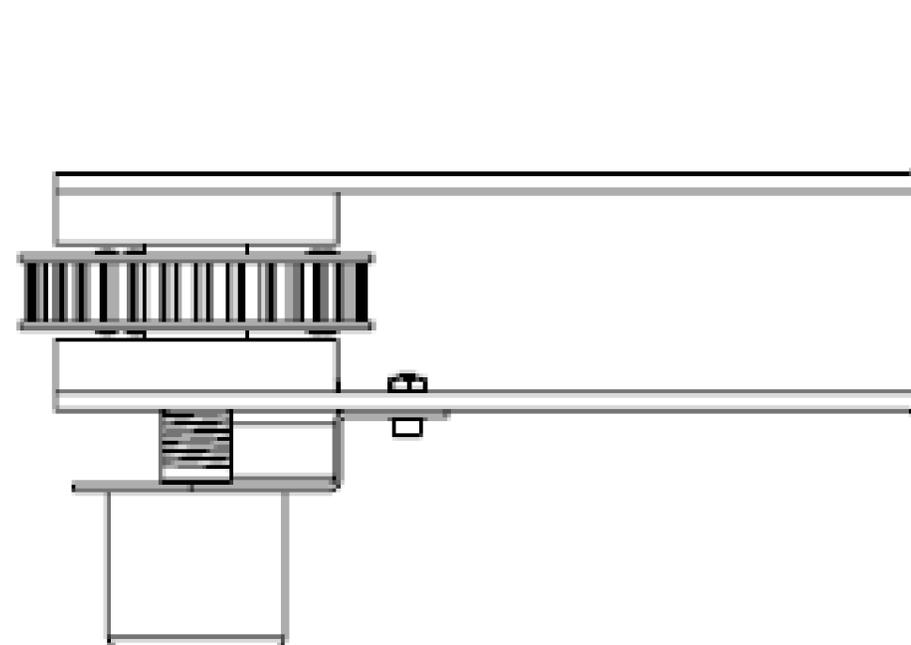
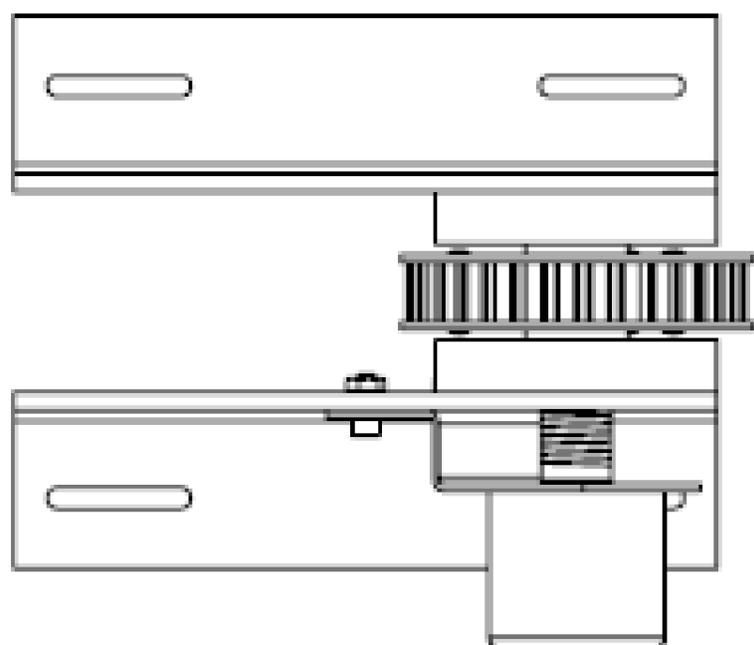
	DATA	NOME/CREA
PROJ.	15/10/2017	DEWIS
DES.	15/10/2017	DROUGLAS
PROJ.		

NOME DA PEÇA

SUPORTE ENCODER

CÓDIGO

QUANTIDADE	
UNIDADE	
ESCALA	1-2
CÓDIGO	A4



TOLERANCIAS NÃO ESPECIFICADAS = 0,1mm

DOC. DE INFORMAÇÃO:			QUANTIDADE	
			TOLERANCIAS NÃO ESPECIFICADAS	
			RELATAMENTO ESPECIAL	
			MATERIAL	
			DESCRIÇÃO	
	DATA	NOME/CRS	PROJ. QUANT.	PROJ. QUANT.
PROJ.	15/12/2017	DEIVEZ	01	01
DES.	15/12/2017	DOUGLAS	01	01
PROD.	-	-	01	01
			ESCALA: 1:1 FOLHA: A3	
			CÓDIGO	
			<h1>Montagem Encoder</h1>	

APÊNDICE B – Programa de leitura dos sensores e controle PID.

```
// (Tunel de vento movido a motor de combustão interna por centelhamento)
// Deiwis Lellis Hoss
// Mestrado
#include <PID_v1.h>
#include <Servo.h>

#define pSensorRPM    2    //Pino Encoder
#define pSensorVento  3    //Pino Anemômetro
#define pControle     5    //Pino ligação Servo
#define tamanho       4    //tamanho do vetor de medias
#define tecla_mais     8    //pino ligação botão+
#define tecla_menos   9    //pino ligação botão-
#define tecla_PWR     10   //pino botão liga-desliga
#define pServoEmbreagem 11  //pino ligação servo
#define pEmergencia   12  //pino atuador emergencia corta corrente (Saida)
#define botao_emergencia 7  //pino botão emergencia (entrada)
#define anguloMaximo  50   //angulo maximo servo
#define anguloMinimo  0    //angulo minimo servo
#define RPMmaximo     450  //RPM maximo
#define RPMminimo     140  //RPM minimo
#define VeloVenMaximo 11   //Velocidade do vento Maximo em m/s
#define VeloVenMinimo 0    //Velocidade do vento Minimo em m/s

Servo myservo;

//variaveis PID
double setPoint, entradaPID, saidaPID;
double Kp=3, Ki=6, Kd=2 ;
PID myPID(&entradaPID, &saidaPID, &setPoint, Kp, Ki, Kd, DIRECT);

//botao PWR

//int tecla_PWR = 0;
int var=0;
int var2=0;
int estado=0;
```

```

//variaveis Vetor de medias

int posicao = -1;
double mediaRpm [tamanho];
double mediaVento [tamanho];

//Variaveis de controle

volatile unsigned int rpm = 0; // Variavel inteira armazenada no microcontrolador
volatile unsigned int vento = 0; // ler velocidade do vento
double velocidadeVento = 0; // converter para m/s
double comando = anguloMinimo; // Controle angulo servo na inicialização
int angFinal = anguloMinimo; // Angulo a ser enviado ao servo

//variaveis de comunicação

String inputString = ""; // a string para armazenar dados recebidos
boolean stringCompleta = false;
double comandoCompleto;

void setup() {

    setPoint = comando ;
    myPID.SetMode(AUTOMATIC);
    inputString.reserve(200); // Reserva de bytes para a entrada
    myservo.attach(5);
    Serial.begin(9600);
    attachInterrupt(0,interrupcion0,RISING); // interrupção 0 (pin2)
    attachInterrupt(1,interrupcion1,RISING); // interrupção 1 (pin3)
    pinMode (pSensorRPM, INPUT_PULLUP);
    pinMode (pSensorVento, INPUT_PULLUP);
    pinMode (pControle, OUTPUT);
    pinMode (tecla_mais, INPUT_PULLUP);
    pinMode (tecla_menos, INPUT_PULLUP);
}

```

```

pinMode (botao_emergencia, INPUT_PULLUP);
pinMode (pEmergencia, OUTPUT);
pinMode (tecla_PWR, INPUT_PULLUP);
lerTeclado();
}

void loop() {
  lerTeclado(); //Testa emergencia
  delay(98);      // retardo de 100 milisegundos
  velocidadeVento = map ((double)vento*100,2,630,0.5,50);
  rpm*=60;

  fazerMedias(); //procedimento de medias

  enviarSerial(); //procedimento de enviar serial

  receberSerial();//procedimento para receber da serial

  // Saída do controle
  entradaPID = mediaVento[tamanho-1]/13.9;
  myPID.Compute();
  //angFinal = map (saidaPID, 0, 255, anguloMinimo, anguloMaximo);

  //angFinal=comando;
  setPoint = comando;
  myservo.write (angFinal);

  rpm = 0;    //zera contador RPM
  vento = 0;  //zera contador velocidade do vento

}

void interrupcion0() // função que se executa a cada interrupção

```

```

{
    rpm++;      // incremento do contador
}

void interrupcion1() // função que se executa a cada interrupção
{
    vento++;    // incremento do contador
}

//Lê setpoint
//evento que é invocado quando dados chegam pela serial
void serialEvent() {

    while (Serial.available()) {
        // obter o novo byte:
        char inChar = (char)Serial.read(); // pega byte do buffer
        // se o caracter é uma quebra de linha, indica a flag comandoCompleto
        //para que o comando seja processado
        inputString += inChar;
        // Se o caracter for uma quebra de linha entao define o estado da string
        if (inChar == '\n') {
            stringCompleta = true;
        }
    }
}

void fazerMedias(){
switch (posicao) {
    case 0:
        mediaRpm [posicao]=(mediaRpm [posicao]+rpm)/2;
        mediaVento [posicao]=(mediaVento [posicao]+velocidadeVento)/2;
        posicao++;
        break;
    case 1:

```

```

mediaRpm [posicao]=(mediaRpm [posicao]+mediaRpm [posicao-1])/2;
mediaRpm [posicao-1]=(mediaRpm [posicao-1]+rpm)/2;
mediaVento [posicao]=(mediaVento [posicao]+mediaVento [posicao-1])/2;
mediaVento [posicao]=(mediaVento [posicao]+velocidadeVento)/2;
posicao++;
break;
case 2:
mediaRpm [posicao]=(mediaRpm [posicao]+mediaRpm [posicao-1])/2;
mediaRpm [posicao-1]=(mediaRpm [posicao-1]+mediaRpm [posicao-2])/2;
mediaRpm [posicao-2]=(mediaRpm [posicao-2]+rpm)/2;
mediaVento [posicao]=(mediaVento [posicao]+mediaVento [posicao-1])/2;
mediaVento [posicao-1]=(mediaVento [posicao-1]+mediaVento [posicao-2])/2;
mediaVento [posicao-2]=(mediaVento [posicao-2]+velocidadeVento)/2;
posicao++;
break;
case 3:
mediaRpm [posicao]=(mediaRpm [posicao]+mediaRpm [posicao-1])/2;
mediaRpm [posicao-1]=(mediaRpm [posicao-1]+mediaRpm [posicao-2])/2;
mediaRpm [posicao-2]=(mediaRpm [posicao-2]+mediaRpm [posicao-3])/2;
mediaRpm [posicao-3]=(mediaRpm [posicao-3]+rpm)/2;
mediaVento [posicao]=(mediaVento [posicao]+mediaVento [posicao-1])/2;
mediaVento [posicao-1]=(mediaVento [posicao-1]+mediaVento [posicao-2])/2;
mediaVento [posicao-2]=(mediaVento [posicao-2]+mediaVento [posicao-3])/2;
mediaVento [posicao-3]=(mediaVento [posicao-3]+velocidadeVento)/2;
posicao=0;
break;
case tamanho:
posicao=0;
break;
default:
for (int x=0; x<tamanho; x++){
mediaVento[x] = velocidadeVento;
mediaRpm [x] = rpm;
posicao=0;

```

```

    }
    break;
    }
}

```

```

void enviarSerial(){
    Serial.print("R=");
    Serial.print(((double)mediaRpm[tamanho-1]/13.9);
    Serial.print(" V=");
    Serial.print(((double)mediaVento[tamanho-1]/13.9);
    Serial.print(" C=");
    Serial.print(angFinal);
    Serial.print(" S=");
    Serial.print(setPoint);
    Serial.print(" P=");
    Serial.print(estado);
    Serial.println(" ");
}

```

```

void receberSerial(){
    // Imprime uma nova string quando chegar uma nova linha:
    if (stringCompleta) {
        if(inputString.toInt()>0){
            comando=inputString.toInt();
        }
        else if (inputString.toInt()<0){
            comando = comando;
        }
        // apaga string:
        inputString = "";
        stringCompleta = false;
    }
}

```

```

void lerTeclado(){
    if (digitalRead(botao_emergencia) == LOW)

```

```

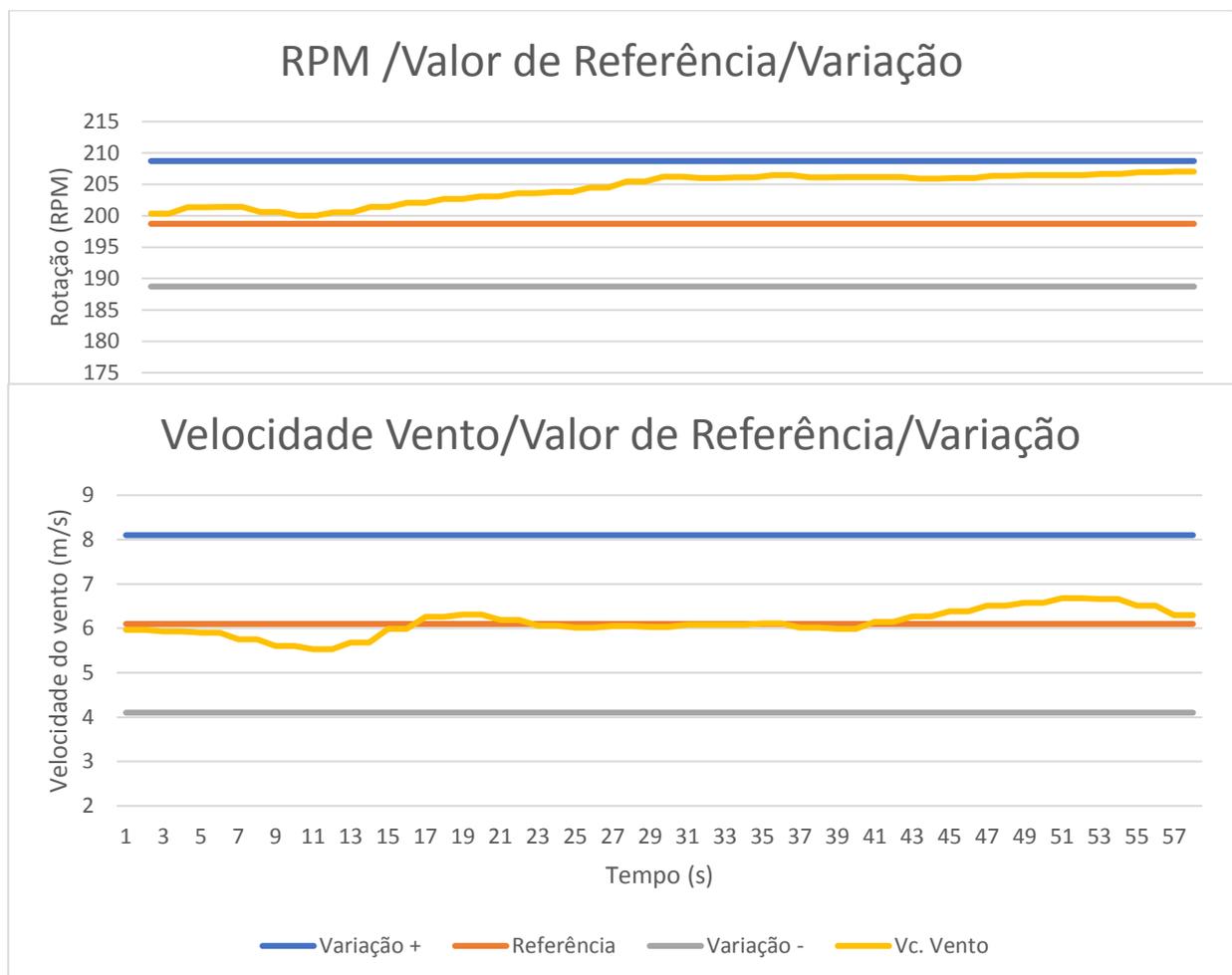
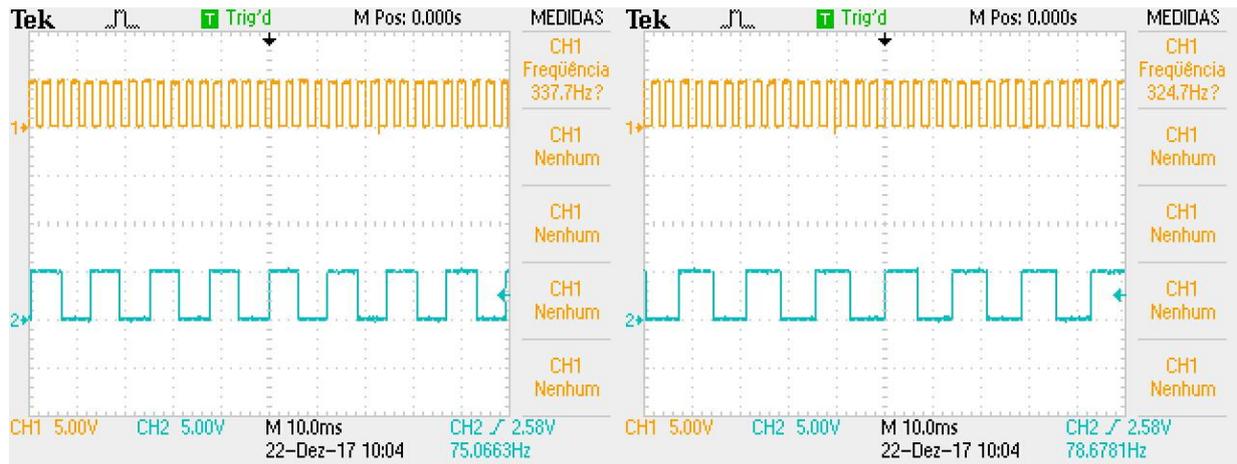
    digitalWrite (pEmergencia, HIGH);
else
    digitalWrite (pEmergencia, LOW);

var = digitalRead(tecla_PWR);
if((var==HIGH)&&(var2==LOW)){
estado=1-estado;
}
var2=var;
if(estados==1){
angFinal=0;
setPoint=0;
comando=0;
}
else{
    if (digitalRead(tecla_mais) == LOW) {
        comando+=.5;
    }
    if (digitalRead(tecla_menos) == LOW ) {
        comando-=.5;
    }
    if(comando>VeloVenMaximo){
comando=VeloVenMaximo;
}
else if(comando<VeloVenMinimo){
    comando=VeloVenMinimo;
}
angFinal = map (saidaPID, 0, 255, anguloMinimo, anguloMaximo);
}
}

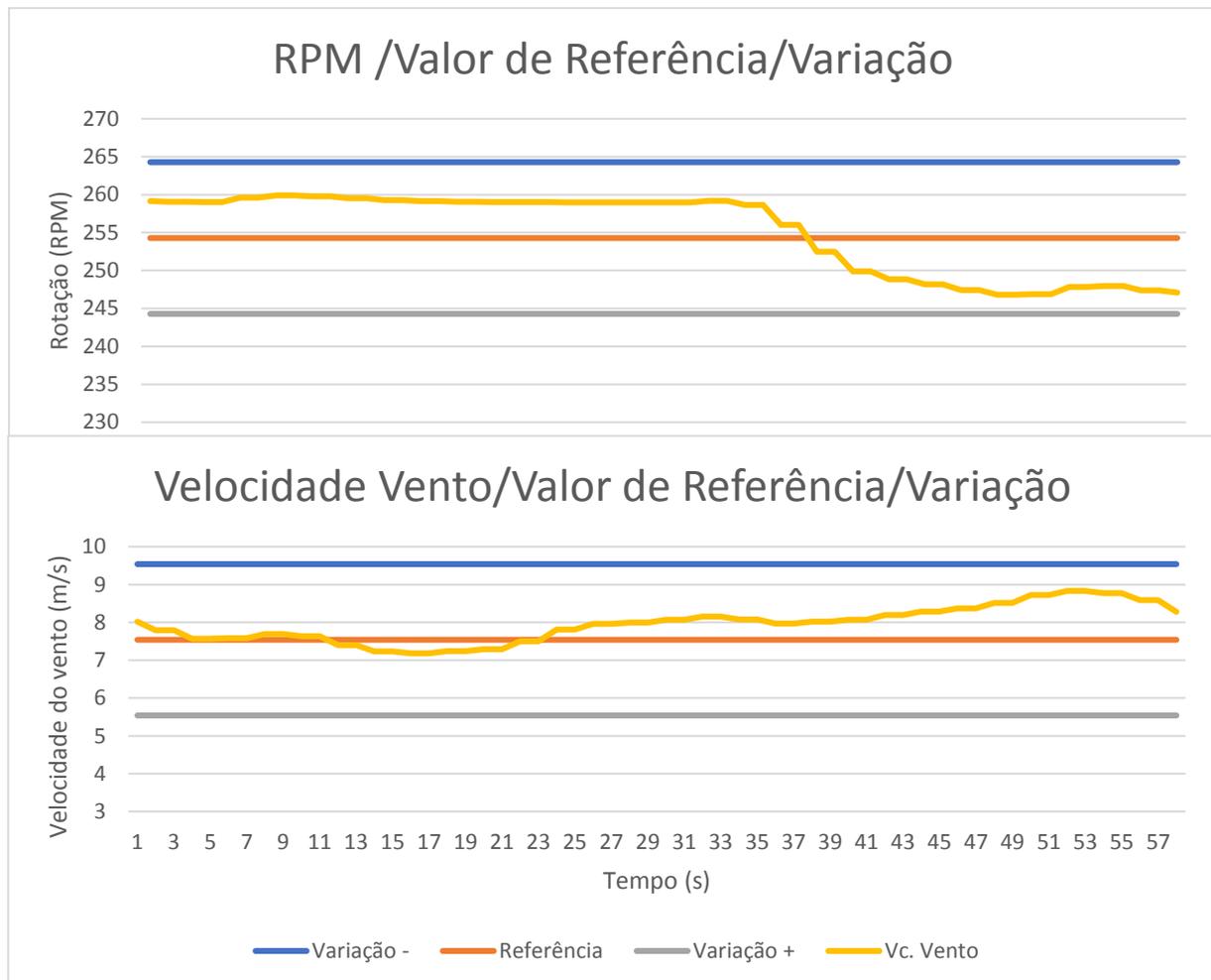
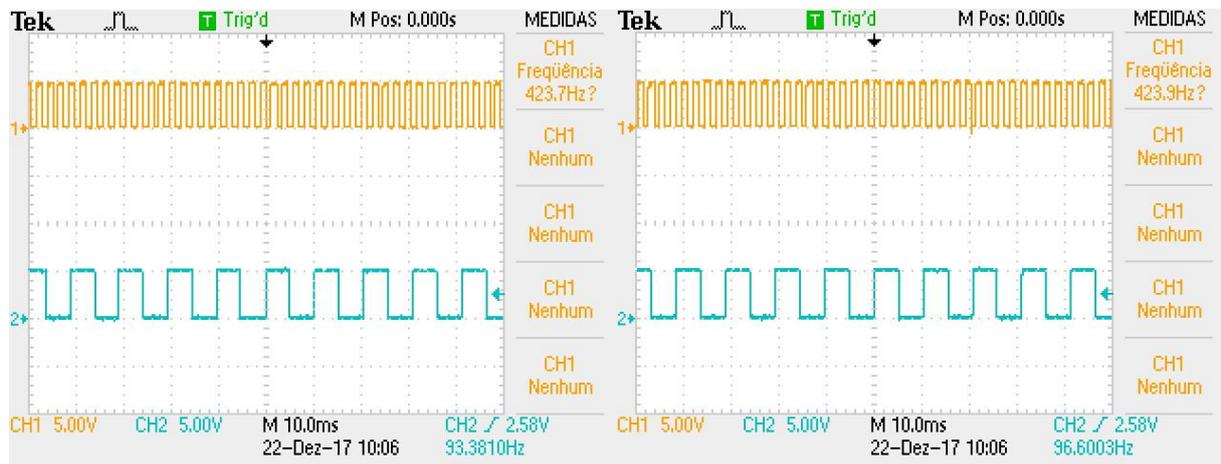
```

APÊNDICE C – Valores de leitura de cada 10° na posição do servo.

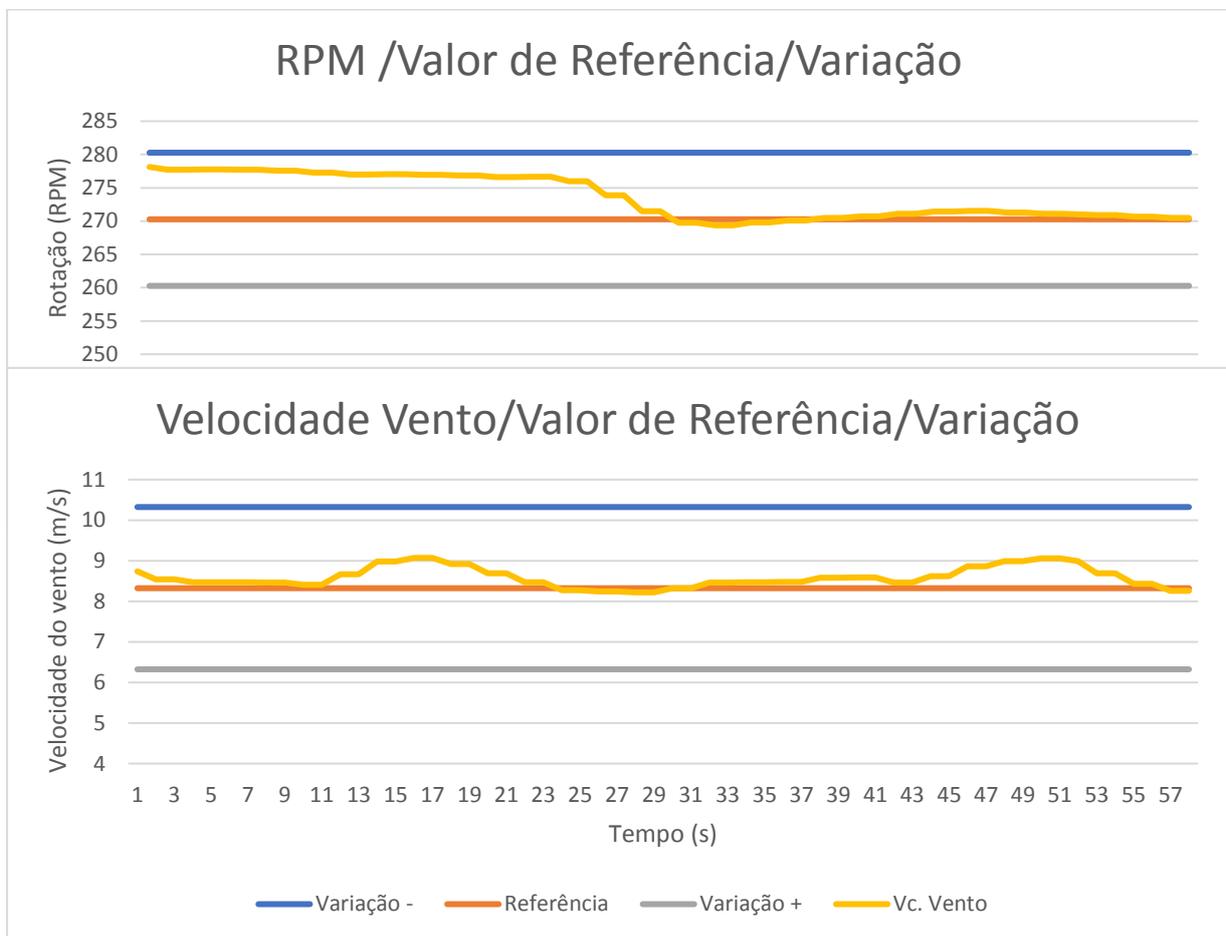
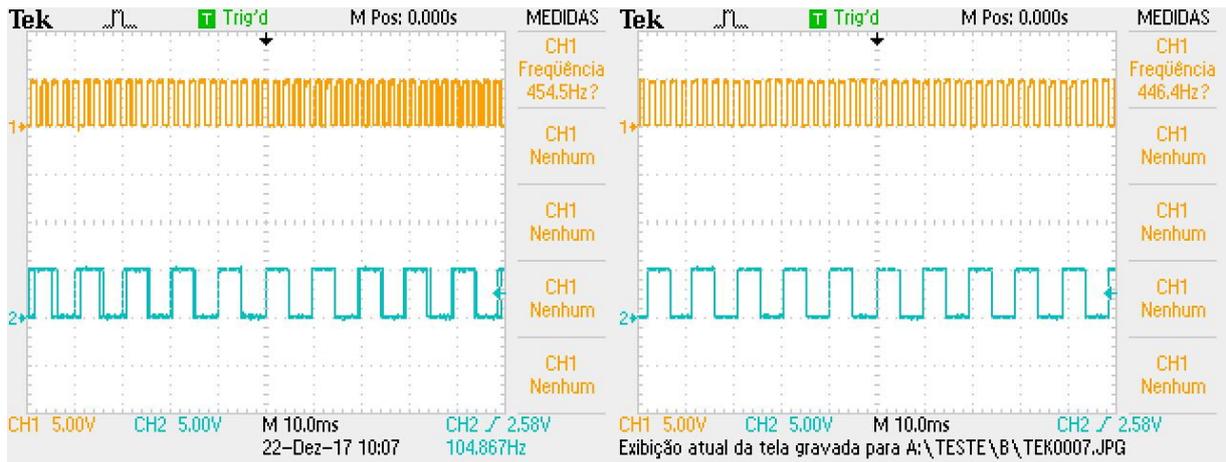
Valor a 20°



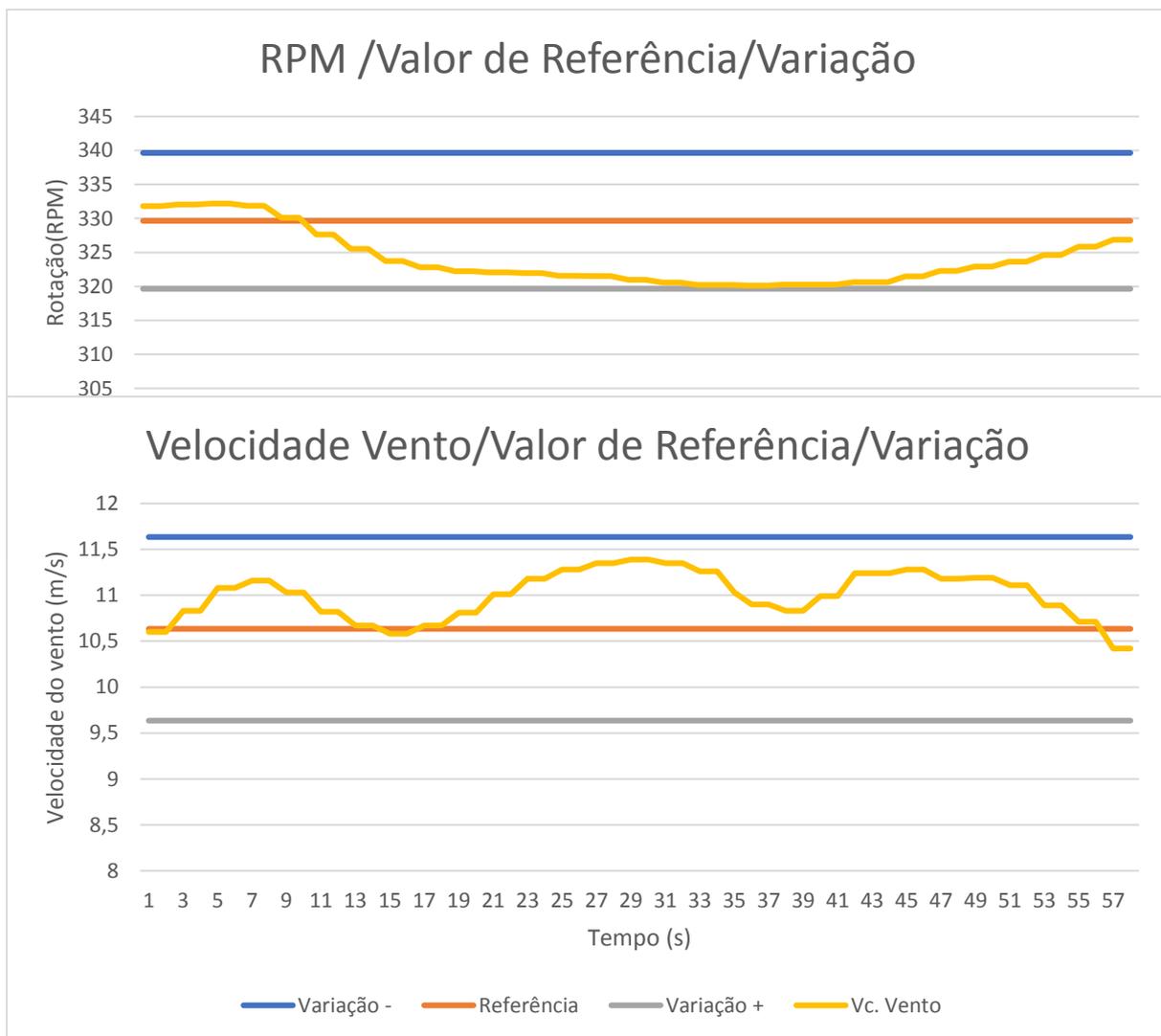
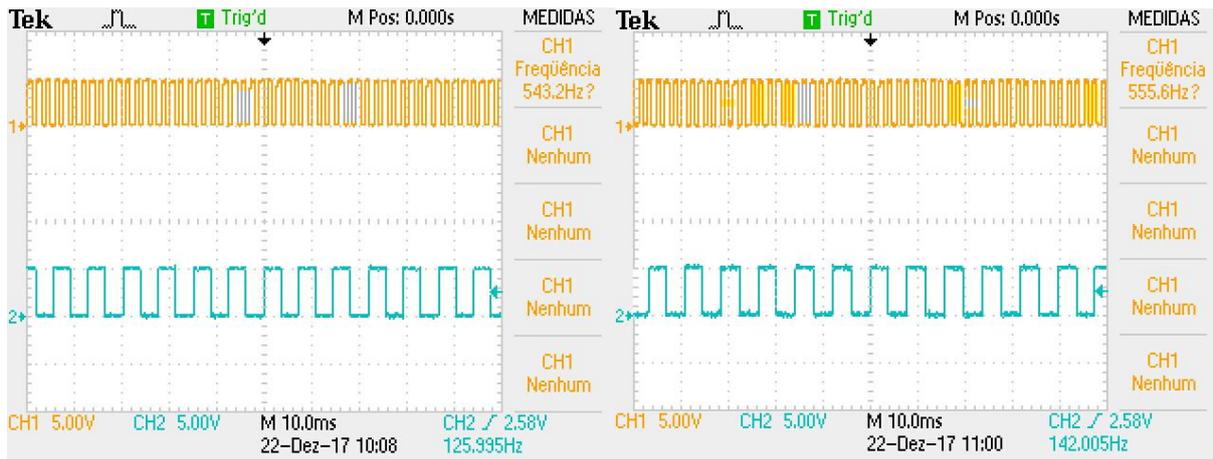
Servo a 30°



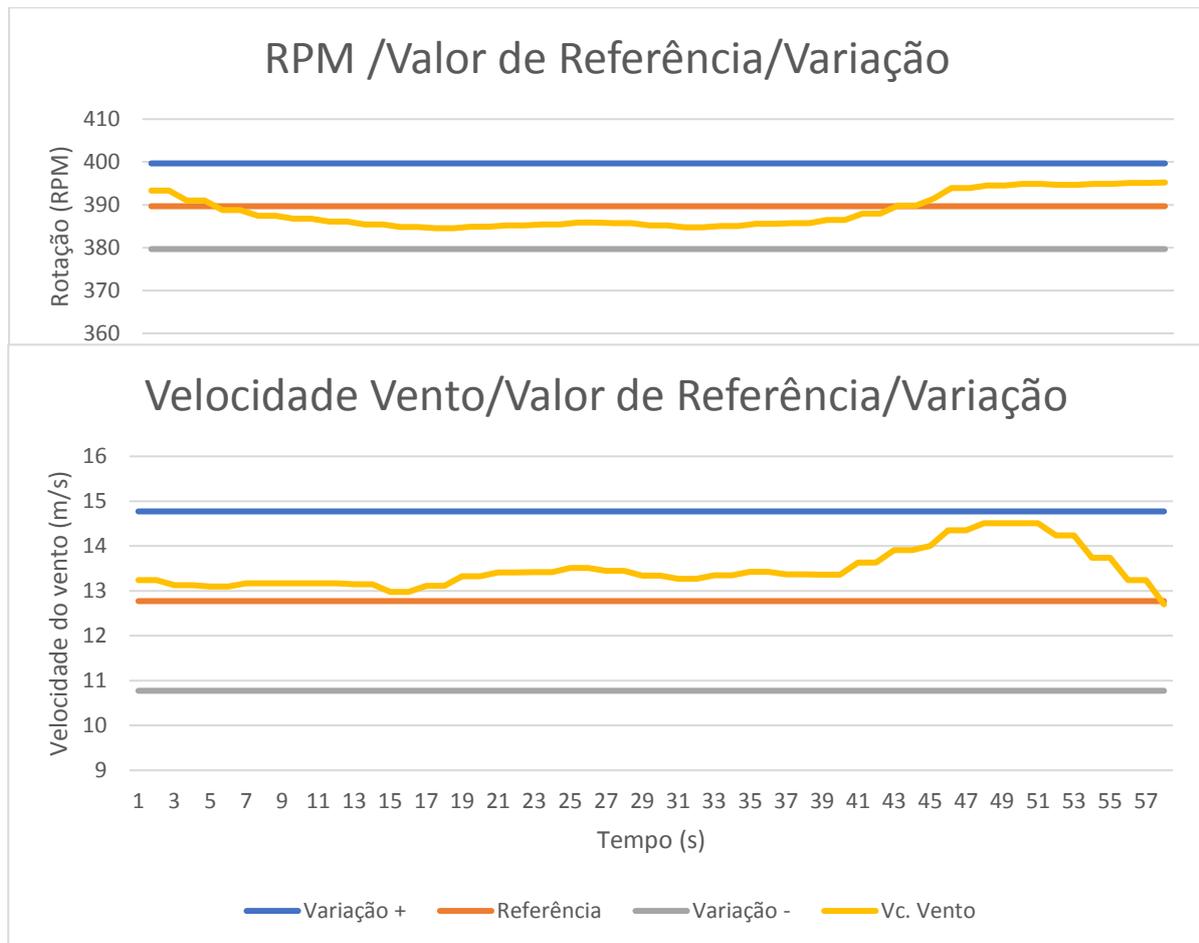
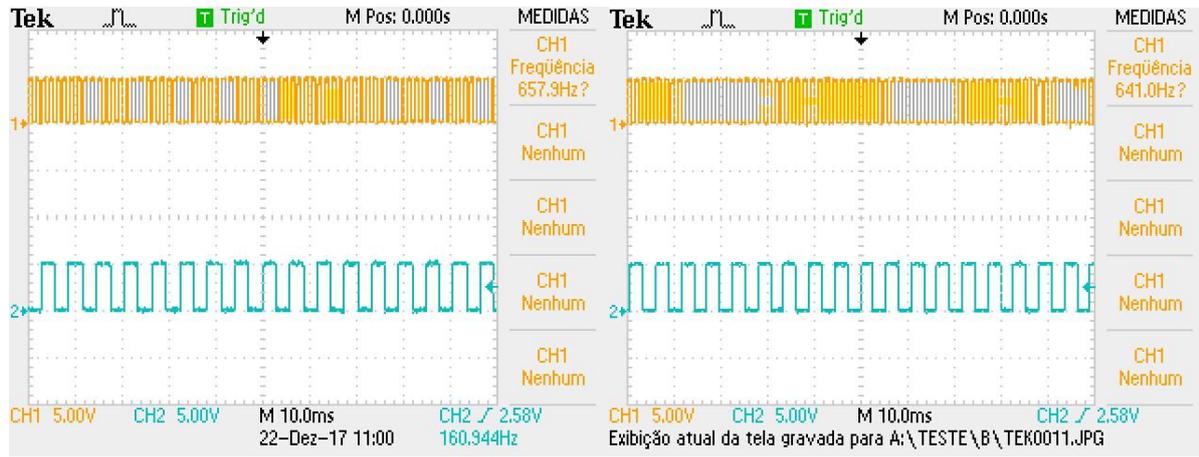
Servo a 40°

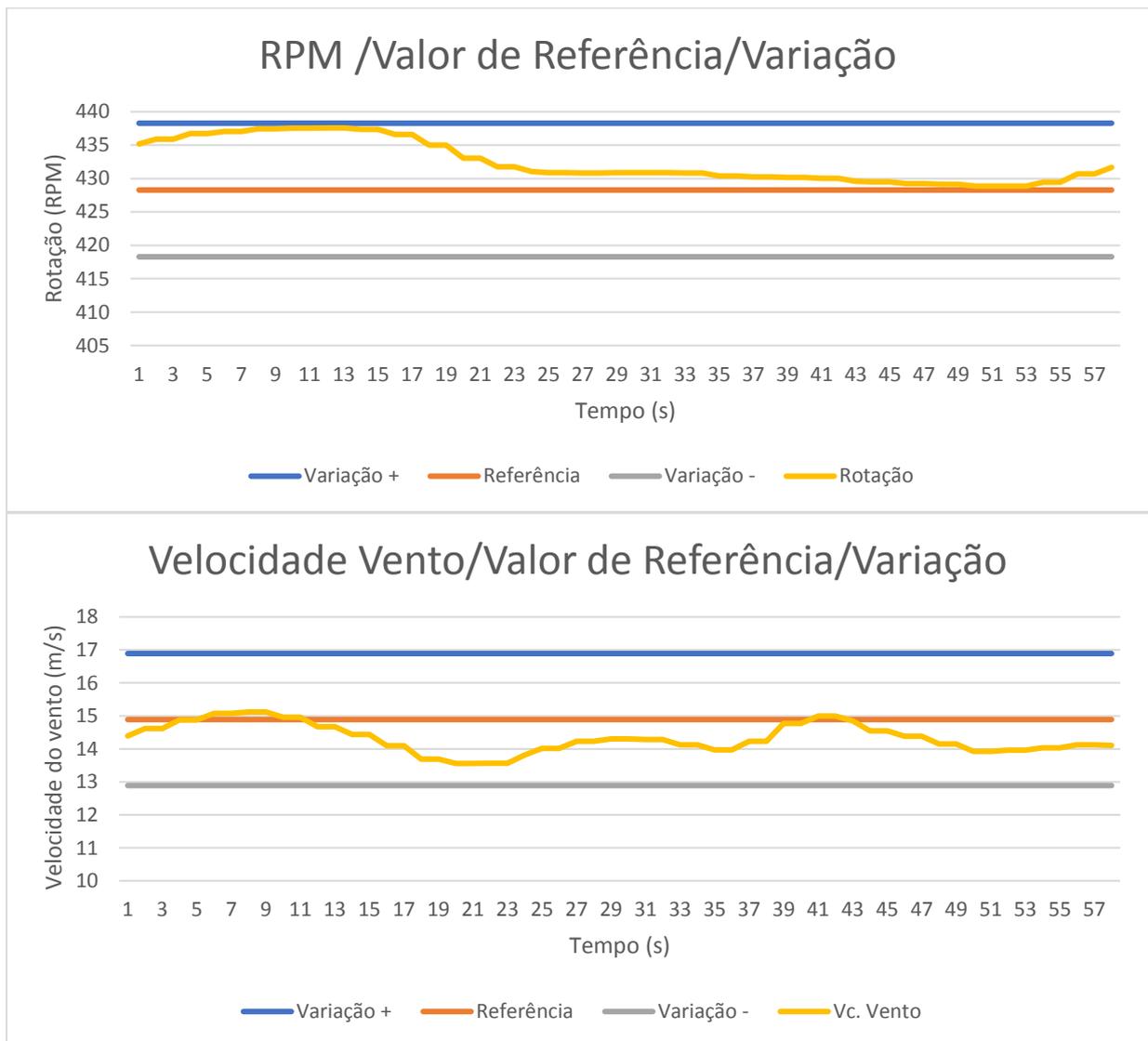
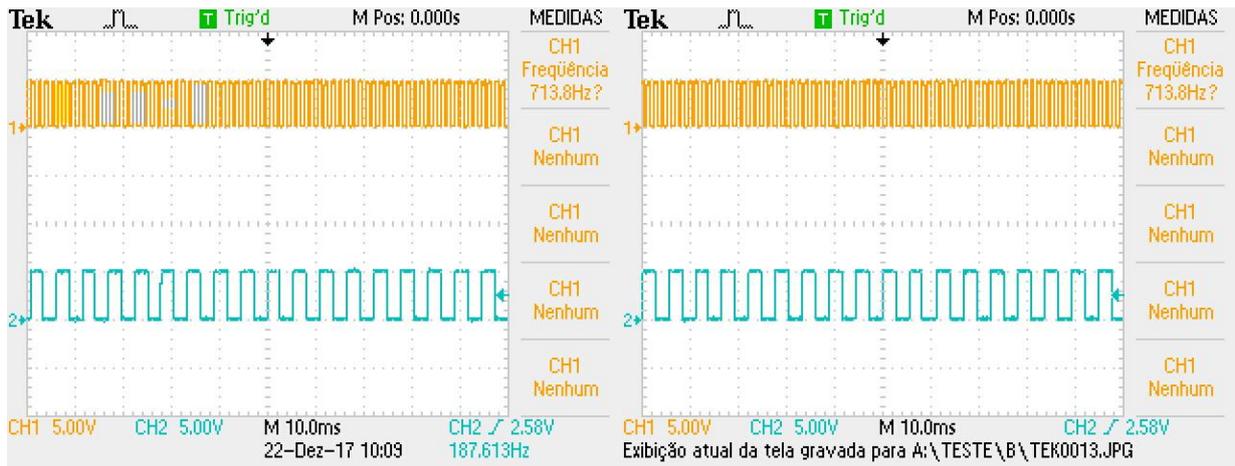


Servo a 50°

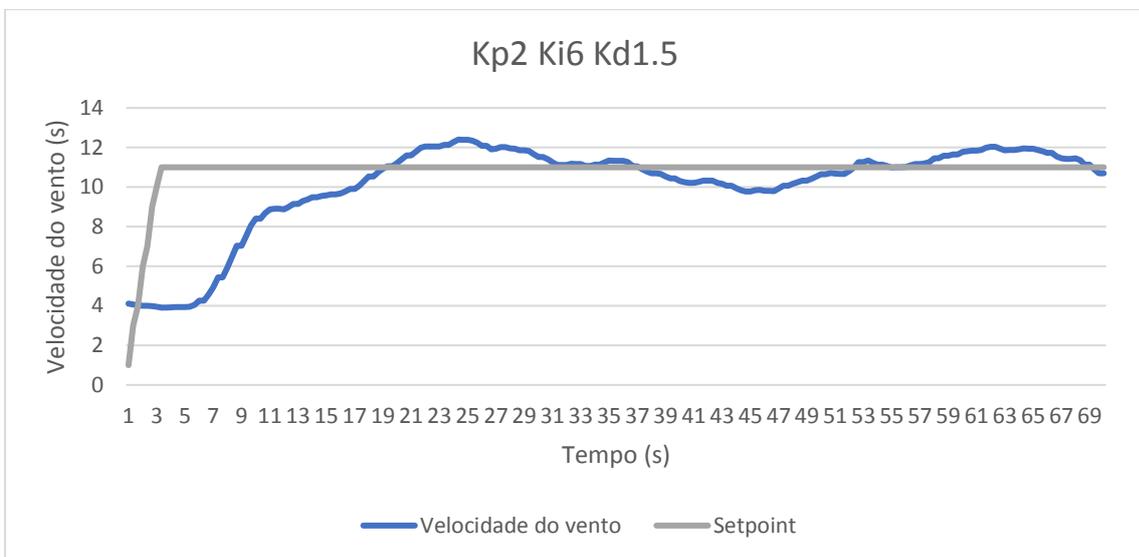
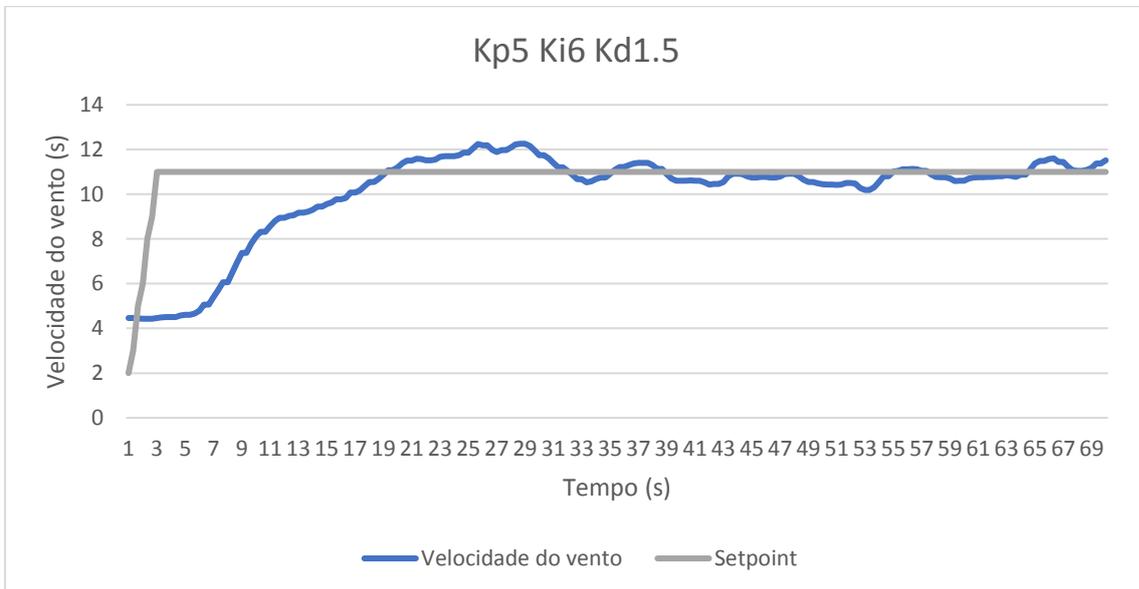
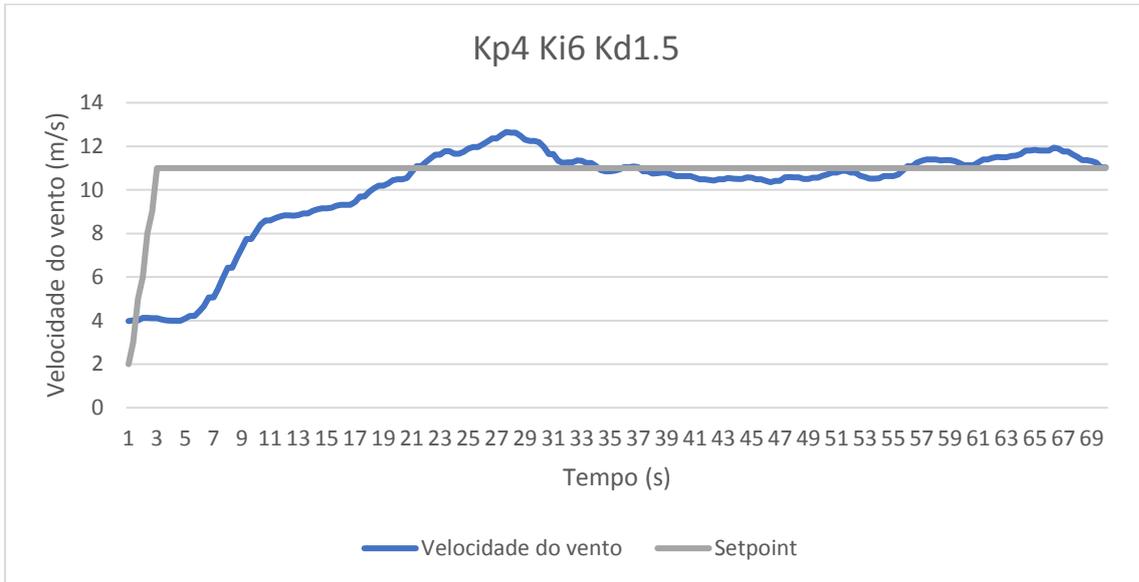


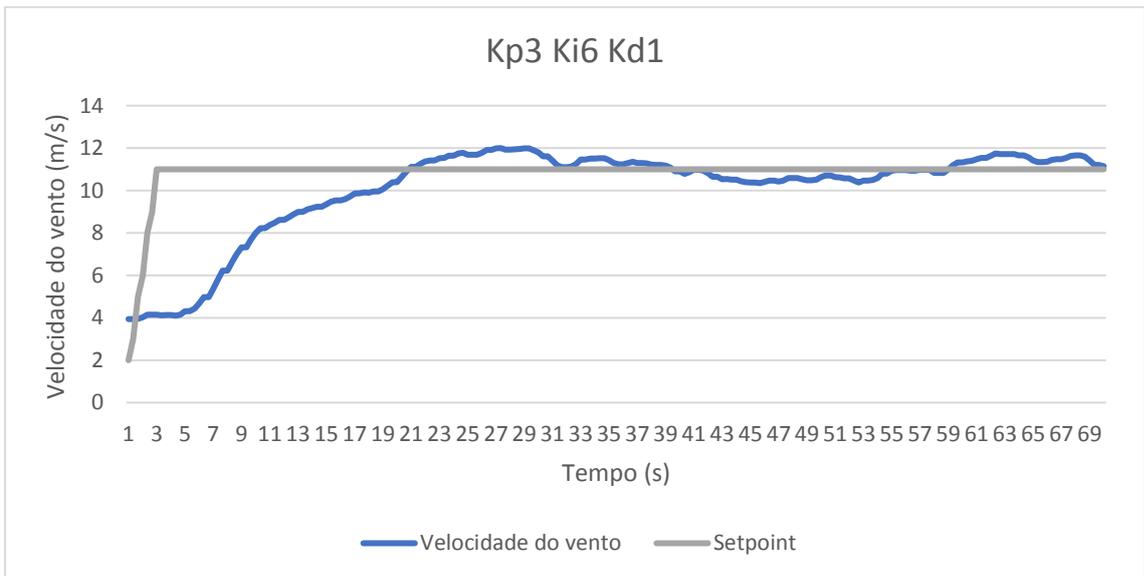
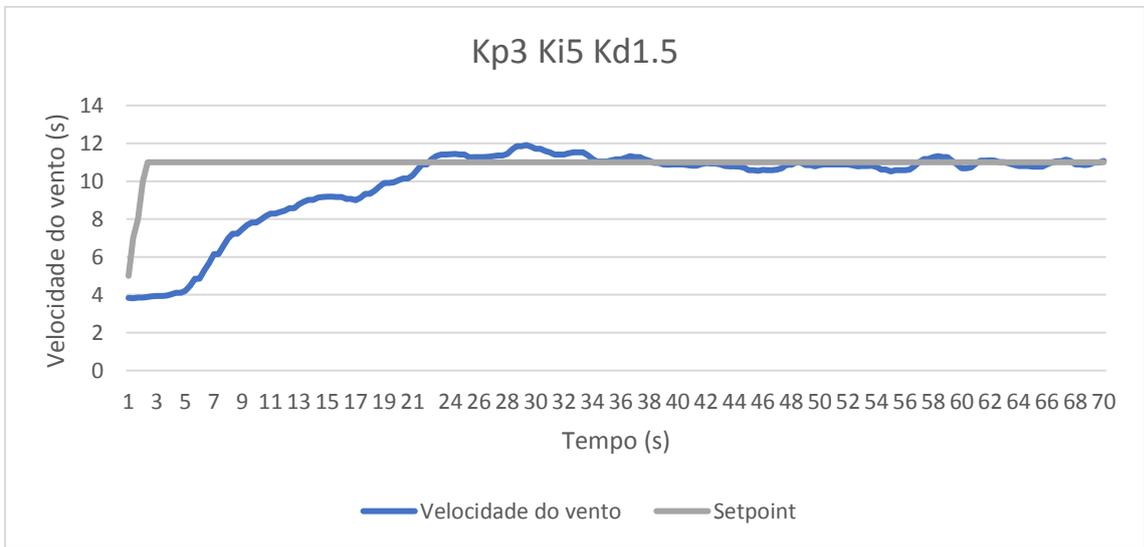
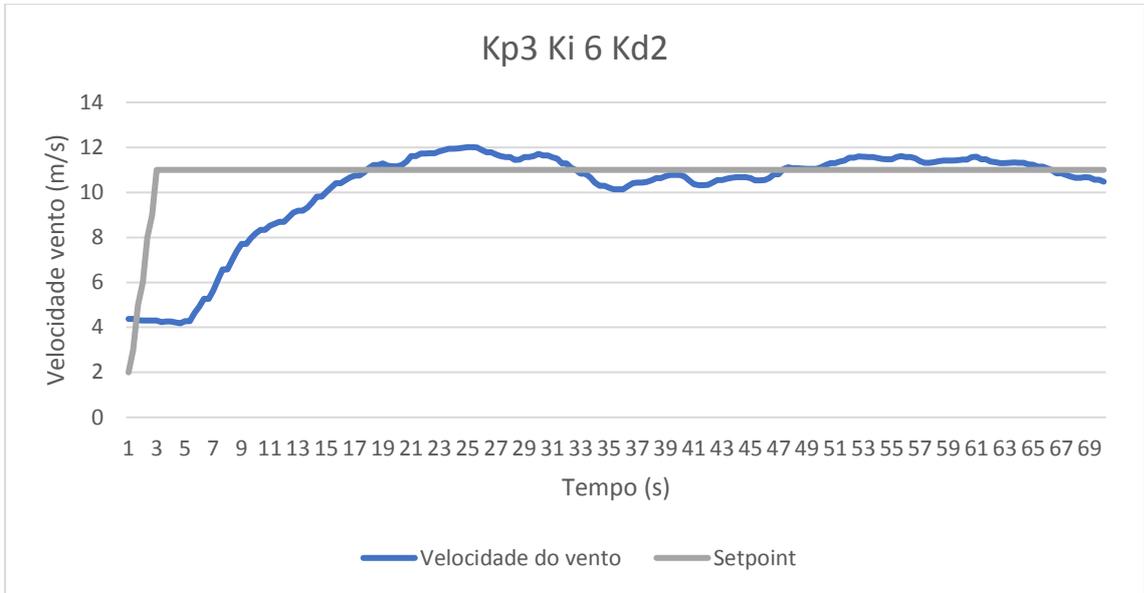
Servo a 60°

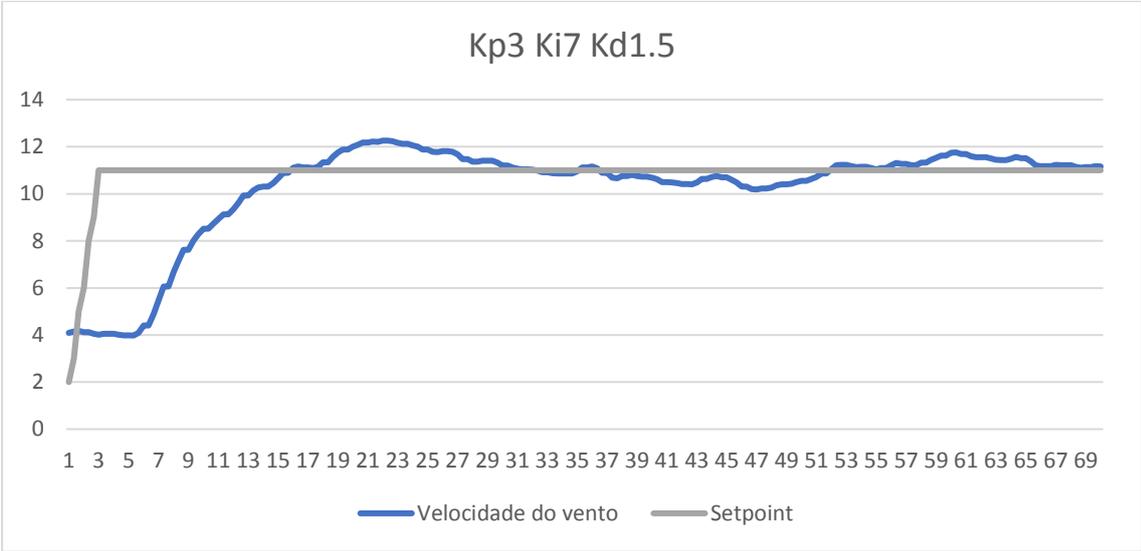




APÊNDICE D – Valores de leitura da velocidade do vento com diferentes sintonias do PID.







Versions

As per 4.3519.00.x00, but:



Product number 4.3519.00.000

General

Electr. connection	12 m cable, LiyCY 5 x 0.25 mm ²
Dimension	Ø 135 x 165 mm
Weight	0.75 kg

Product number 4.3519.00.700

General

Electr. connection	7- pole plug
Dimension	Ø 135 x 225 mm
Weight	0.4 kg

Specification

Part number: 4.3519.00.x00



Wind speed

Measuring range	0.5 ... 50 m/s
Resolution	< 0.1 m/s
Accuracy	± 3 % of meas. value or ± 0.5 m/s

Data output digital

Frequency	2 Hz ... 630 Hz
-----------	-----------------

Operating voltage

Electronic	3.3 V ... 42 V DC
Current consumption	< 1 mA
Heating	24 V AC/DC, max 20 W

General

Ambient temp.	-40 ... +70 °C
Protection	IP 55

