

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
ESCOLA DE ENGENHARIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA

MIGUEL CHAVES CUSTÓDIO

PROJETO DE DIPLOMAÇÃO

**AUTOMAÇÃO DO CONTROLE DE VELOCIDADE
DO AR NO TÚNEL DE VENTO DA UFRGS**

Porto Alegre

2010

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
ESCOLA DE ENGENHARIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA

**AUTOMAÇÃO DO CONTROLE DE VELOCIDADE
DO AR NO TÚNEL DE VENTO DA UFRGS**

Projeto de Diplomação apresentado ao Departamento de Engenharia Elétrica da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como parte dos requisitos para Graduação em Engenharia Elétrica.

ORIENTADOR: Prof. Dr. Renato Ventura Bayan Henriques

Porto Alegre

2010

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
ESCOLA DE ENGENHARIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA

MIGUEL CHAVES CUSTÓDIO

AUTOMAÇÃO DO CONTROLE DE VELOCIDADE DO AR NO TÚNEL DE VENTO DA UFRGS

Este projeto foi julgado adequado para fazer jus aos créditos da Disciplina de “Projeto de Diplomação”, do Departamento de Engenharia Elétrica e aprovado em sua forma final pelo Orientador e pela Banca Examinadora.

Orientador: _____

Prof. Dr. Renato Ventura Bayan Henriques, UFRGS

Doutor em Engenharia Mecânica pela UFMG – Belo Horizonte, Brasil

Banca Examinadora:

Prof. Acir Mércio Loredo-Souza, UFRGS

PhD pela University of Western Ontario, Canadá

Prof. Marcelo Götz, UFRGS

Doutor pela Universidade de Paderborn, Alemanha

Porto Alegre, julho de 2010.

DEDICATÓRIA

Ao vento, protagonista deste trabalho.

AGRADECIMENTOS

Sou muito grato a todos que me apoiaram e tornaram possível a execução deste trabalho exatamente como eu o havia imaginado.

Agradeço a “Deus”, tenha Ele a forma que tiver, por me permitir fazer escolhas.

RESUMO

Este trabalho descreve a atualização do sistema de controle de velocidade do ar do Túnel de Vento Prof. Joaquim Blessmann, da Escola de Engenharia da UFRGS, realizado como parte do projeto LAC-Petrobrás-MEASNET. Este projeto visa à certificação do laboratório para a calibração de anemômetros de conchas. Ele foi motivado pela crescente demanda por energia eólica, uma fonte abundante de energia limpa e renovável, e cujo aproveitamento adequado depende de medidas acuradas da velocidade do vento. São descritas: a atualização da instrumentação utilizada no laboratório, a troca do motor e de seu sistema de acionamento elétrico, a obtenção de um modelo matemático que representa o comportamento do túnel de vento e o desenvolvimento de programas de aquisição, registro e controle da velocidade do ar na plataforma LabVIEW.

Palavras-chaves: Túnel de Vento, Anemômetro, Automação, Controle e Instrumentação.

ABSTRACT

This work describes the update process of the wind speed control system of the Prof. Joaquim Blessmann Wind Tunnel, of the Engineering School of UFRGS, as part of the LAC-Petrobrás-MEASNET project. This project aims the certification of the laboratory on the calibration of cup anemometers. It was motivated by the increasing demand for wind power, an abundant source of clean and renewable energy, that depends on accurate wind speed measurements for its use. It describes the updates in instrumentation, the change of the motor and its electric driver, the process for obtaining a mathematical model that describes the wind tunnel behavior, and the development of acquisition, storage and control software using the LabVIEW platform.

Keywords: Wind Tunnel, Anemometer, Automation, Control and Instrumentation.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	11
2	CONTEXTO DO PROJETO	14
2.1	O Laboratório	14
2.2	A PETROBRÁS	15
2.3	Rede MEASNET	16
2.4	ISO 17025	17
2.5	Projeto LAC – Petrobrás – MEASNET	18
2.6	Objetivo deste Projeto de Diplomação.....	19
2.6.1	Objetivos específicos.....	19
3	ANÁLISE DE ALTERNATIVAS	20
3.1	Motor, Hélice e Acionamento Elétrico.....	20
3.2	Instrumentação	23
3.2.1	Medidas de Pressões Diferencial e Atmosférica, Temperatura e Umidade	24
3.2.2	Medida dos sinais gerados pelos anemômetros - Frequência	25
3.3	Plataforma para o desenvolvimento dos programas de aquisição	27
4	MÉTODOS, PROCESSOS E DISPOSITIVOS.....	29
4.1	Sistemas de controle – conceitos básicos	29
4.2	Programas de aquisição, registro e Controle	33
4.2.1	Descrição geral dos programas	33
4.2.2	Primeira solução: laço aberto	39
4.2.3	Inclusão da comunicação com o inversor	41
4.2.4	Programa com equação de controle.....	43
4.3	Modelo do Túnel de Vento.....	56
4.3.1	Considerações iniciais sobre a modelagem do Túnel de Vento	57
4.3.2	Modelo candidato	58
4.3.3	Identificação dos parâmetros do modelo.....	59
4.3.4	Validação do modelo	66
4.4	Projeto do Bloco de Controle.....	68
4.4.1	Ações básicas de controle	68
4.4.2	Ferramenta utilizada - <i>rltool</i>	71
4.4.3	Projeto do controlador	72
4.4.4	Simulação do desempenho no Simulink	77
4.4.5	Bloco de Controle implementado no LabVIEW.....	79
5	RESULTADOS ALCANÇADOS.....	82
6	CONCLUSÃO.....	84
	REFERÊNCIAS	86

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1: área de ensaios do LAC.	14
Figura 2: planta-baixa do túnel de vento.	15
Figura 3: dois dos aerogeradores da usina eólica de Macau, RN.	16
Figura 4: motor ARNO de 100Hp instalado no interior do túnel. Acionamento: chave Y - Δ	21
Figura 5: antigo controle de velocidade do ar: acionamento e aletas móveis.	21
Figura 6: motor instalado fora do túnel e aciona a hélice por meio de um eixo.	22
Figura 7: detalhes do eixo cardã do lado de fora (e) e de dentro (d) do TV.	22
Figura 8: hélice e elementos aerodinâmicos.	22
Figura 9: inversor de frequência e detalhe de sua IHM.	23
Figura 10: manômetros Betz, Barômetro e Termômetro utilizados anteriormente.	24
Figura 11: novo arranjo de instrumentação: 2 ManoAir-500 e 1 osciloscópio TPS-2014.	25
Figura 12: estrela de copos (e) e disco perfurado (d) de um anemômetro de conchas.	26
Figura 13: exemplo de programa em LabVIEW. Diagrama de blocos(e) e painel frontal(d).	28
Figura 14: sistema genérico em malha aberta.	30
Figura 15: sistema genérico em malha fechada.	30
Figura 16: representação do sistema de controle do Túnel de Vento.	31
Figura 17: componentes do novo sistema de controle de velocidade do ar.	32
Figura 18: primeira versão do programa Velocidade do Ar - tela principal e aba de medidas.	34
Figura 19: aba “Resultados”.	35
Figura 20: aba “Configuração MA-500”.	36
Figura 21: programa Calibração de Anemômetros - tela principal e aba de medidas.	37
Figura 22: aba “Configuração TPS-2014”.	38
Figura 23: programa Verificação do Escoamento - tela principal e aba de medidas.	39
Figura 24: algoritmo simplificado dos programas - versões iniciais.	41
Figura 25: interface do programa SuperDrive 5.8.	41
Figura 26: programa Velocidade do Ar - Inversor - tela principal e aba do inversor.	43
Figura 27: programa Velocidade do Ar - Automático - tela principal e aba PID.	45
Figura 28: algoritmo simplificado do programa Velocidade do Ar.	46
Figura 29: diagrama de blocos do Velocidade do Ar - Automático.	56
Figura 30: exemplos de objetos de diferentes dimensões instalados no TV.	58
Figura 31: resposta do TV a uma mudança na frequência do motor.	58
Figura 32: ensaios em Malha Aberta: Resposta ao salto de 0 a 16Hz.	60
Figura 33: parâmetros para a identificação do modelo – Túnel Livre.	61
Figura 34: gráfico utilizado para estimar η	65
Figura 35: comparação dos dados de ensaio com os do modelo.	66
Figura 36: diagrama utilizado na validação do modelo do TV - Livre.	67
Figura 37: validação do modelo do TV - Livre.	68
Figura 38: tela da ferramenta rltool.	72
Figura 39: rltool - G(s)	74
Figura 40: rltool - G(s) e C(s), sem o pólo em $s=-0,147$	75
Figura 41: rltool - G(s) e C(s), solução final.	76
Figura 42: rltool - G(s) e C(s), solução final em detalhe.	76
Figura 43: diagrama utilizado na simulação do sistema completo.	77
Figura 44: comparação do comportamento do sistema em malha aberta e fechada.	78
Figura 45: avaliação do efeito do pólo em $s=-5$	79
Figura 46: controlador PID no diagrama de blocos do <i>Velocidade do Ar – Automático</i>	81
Figura 47: teste final do sistema de controle.	83
Figura 48: ilustração do Túnel de Vento com um anemômetro de conchas.	85

LISTA DE ABREVIATURAS

ABNT: Associação Brasileira de Normas Técnicas

DELET: Departamento de Engenharia Elétrica

EPE: Empresa de Pesquisa Energética

ISO: International Standards Organization

LAC: Laboratório de Aerodinâmica das Construções

MEASNET: *Measuring Network of Wind Energy Institutes* (Rede Internacional de Institutos de Medição de Energia do Vento)

PPGEE: Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica

PROINFA :Programa de Incentivos às Fontes Alternativas de Energia Elétrica

RMRS: Rede Meteorológica do Rio Grande do Sul

RN: Rio Grande do Norte

TV: Túnel de Vento

UFRGS: Universidade Federal do Rio Grande do Sul

1 INTRODUÇÃO

Energia eólica é a denominação dada à energia cinética contida nas massas de ar em movimento (VENTOS DO SUL ENERGIA, 2010). É uma energia inesgotável, renovável e limpa, que permite gerar energia elétrica sem a emissão de dióxido de carbono, um dos gases formadores do efeito estufa e que contribui para o fenômeno do aquecimento global. Estes aspectos oferecem grande vantagem em relação às outras formas de geração de energia elétrica, principalmente em relação às baseadas na queima de combustíveis fósseis. O Brasil encontra-se em uma situação bastante favorável em relação ao uso da energia eólica, uma vez que possui grande potencial, especialmente ao longo de sua extensa costa. Desta forma, a energia eólica se apresenta como uma alternativa eficaz e sustentável para a geração de energia elétrica no Brasil.

A importância da energia eólica como meio de diversificar a matriz energética do Brasil reflete-se no esforço do Estado de incentivar a criação de novos parques eólicos¹. Exemplo deste esforço foi o mais recente Leilão da EPE (EPE, 2009), realizado em dezembro de 2009, onde foram comercializados 1805,7MWh de energia eólica a serem instalados nos próximos 2 anos. A garantia de venda da energia ao preço negociado no leilão viabilizará a instalação de 71 novos parques eólicos no país.

No Rio Grande do Sul podemos encontrar os Parques Eólicos de Osório², onde há aerogeradores dispostos de maneira a maximizar o aproveitamento do vento, com capacidade energética estimada de 150MW, energia suficiente para atender uma cidade de 700 mil habitantes (VENTOS DO SUL ENERGIA, 2010). Esta é considerada a maior usina eólica da América Latina.

¹ Parque eólico é o nome dado ao local onde são instalados os aerogeradores, popularmente chamados de “cata-ventos”.

² Parques Osório, Sangradouro e Índios. O projeto foi desenvolvido pela Ventos do Sul, cuja sócia majoritária é a Enerfim Eurovento, do grupo Elecnor.(VENTOS DO SUL ENERGIA, 2010)

A medida correta da velocidade do vento é indispensável quando se pretende gerar energia elétrica a partir da eólica e a solução mais amplamente utilizada são os anemômetros de conchas. Estes instrumentos representam uma solução prática e robusta para medir a velocidade do vento “ao ar livre”, ou seja, expostos aos efeitos do tempo. Anemômetros deste tipo são utilizados tanto na fase de mapeamento do potencial energético do território, quanto na operação dos parques eólicos. O Atlas do Potencial Eólico Brasileiro é um exemplo deste tipo de mapeamento: estimativas do potencial de cada região do país, feitas a partir de dados de satélites, foram confirmadas localmente por testes realizados utilizando-se dados de estações anemométricas, nas regiões mais promissoras. Estes dados devem satisfazer a diversos critérios de qualidade, como abrangência mínima de um ciclo climatológico, informes sobre o relevo e rugosidade do seu entorno e ausência de obstáculos próximos em relação aos ventos (CRESESB, 2010).

Para garantir a qualidade das medidas realizadas é necessário que sejam utilizados instrumentos calibrados a partir de padrões confiáveis, seguindo normas rígidas de controle de qualidade. A crescente utilização de anemômetros de conchas trouxe à tona o fato de que não havia no Brasil um laboratório capaz de realizar este tipo de calibração adequadamente, o que motivou a elaboração de um projeto de trabalho conjunto entre o LAC - Laboratório de Aerodinâmica das Construções e a Petrobrás, cujo objetivo global é a capacitação do laboratório para a calibração de anemômetros de conchas.

A precisão que se deseja obter é o valor proposto pela Rede MEASNET, uma organização internacional que dita regras para o estudo da energia eólica. O novo sistema de calibração deve ser capaz de garantir que a incerteza na medição da velocidade do vento seja inferior a $\pm 0,1$ m/s, quando a velocidade for de 10 m/s.

Inserida no contexto deste grande projeto está a melhoria do controle da velocidade do ar no TV - Túnel de Vento, que será o foco deste Projeto de Diplomação. Deseja-se que a

velocidade do ar possa ser controlada automaticamente e que o tempo de acomodação seja bastante reduzido.

2 CONTEXTO DO PROJETO

A acreditação do laboratório pela rede MEASNET é o objetivo global do projeto LAC-Petrobrás-MEASNET, mas está além do escopo deste trabalho. Ainda assim, é indispensável uma apresentação geral das etapas que o compõem, bem como do laboratório em si, para situar o contexto em que este trabalho foi desenvolvido e porque se tornou importante a automação do controle de velocidade do ar.

2.1 O LABORATÓRIO

O LAC é o laboratório de pesquisa do vento da UFRGS. A principal ferramenta de trabalho do laboratório é o Túnel de Vento Prof. Joaquim Blessmann (Figura 1 e Figura 2), que é um TV de retorno fechado, capaz de simular tanto o vento que incide sobre grandes construções como também o escoamento suave necessário à calibração de anemômetros. A velocidade média do escoamento na câmara principal de ensaios pode ultrapassar os 160km/h.



Figura 1: área de ensaios do LAC.

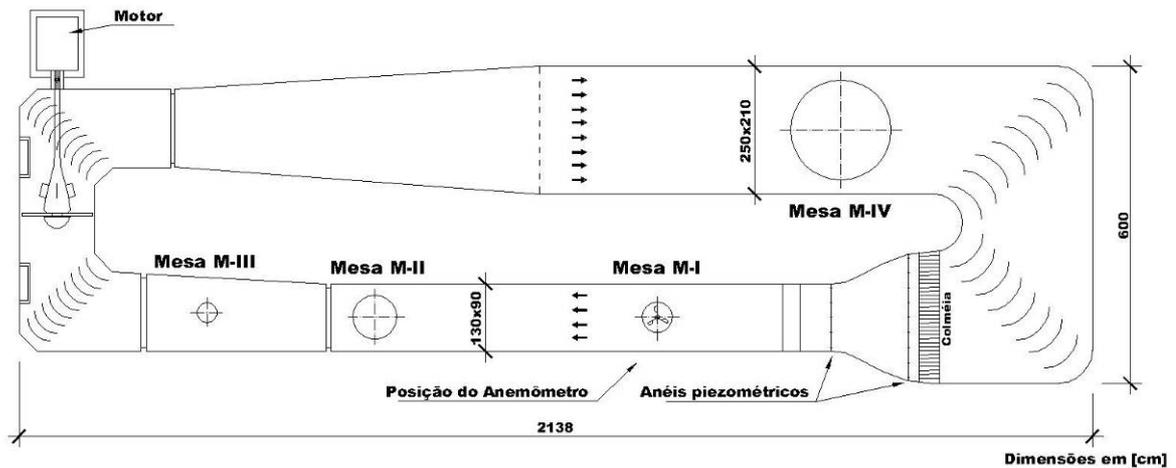


Figura 2: planta-baixa do túnel de vento.

2.2 A PETROBRÁS

Segundo o site da Petrobrás (2010), empresa brasileira que nasceu como exploradora de petróleo, ela investe atualmente em fontes alternativas de energia a fim de enfrentar o desafio de suprir a crescente demanda mundial por energia, enquanto as descobertas de novos poços de petróleo tendem a se tornar mais difíceis nas próximas décadas.

O primeiro projeto de Mecanismo de Desenvolvimento Limpo da Petrobrás data de 2007 e está enquadrado nas regras do Protocolo de Quioto³: a usina eólica localizada em Macau, Rio grande do Norte, é composta por 3 aerogeradores que totalizam 1.8MW. A usina, mostrada na Figura 3, representa cerca de 1.300 toneladas de CO₂ evitados por ano, segundo a Petrobrás, pois os três aerogeradores substituíram dois antigos geradores elétricos e uma bomba mecânica de petróleo, movidos a diesel. O registro do projeto como Mecanismo de Desenvolvimento Limpo só pode ser realizado mediante o cumprimento de uma extensa lista de exigências, com diversas etapas de certificação e aprovação, além do monitoramento que será contínuo para manter o registro.

³ Constitui-se o protocolo de um tratado internacional com compromissos mais rígidos para a redução da emissão dos gases que agravam o efeito estufa, considerados, de acordo com a maioria das investigações científicas, contribuição do ser humano e seu modo de vida para o aquecimento global. (PROTOCOLO DE QUIOTO, 2010).

O processo resultou em sucesso, e por isso a companhia já realiza estudos para instalação de outras unidades e parcerias nos projetos do PROINFA, que tem como objetivo a diversificação da matriz energética brasileira e a busca por soluções de cunho regional com a utilização de fontes renováveis de energia.



Figura 3: dois dos aerogeradores da usina eólica de Macau, RN.

2.3 REDE MEASNET

A MEASNET - *Measuring Network of Wind Energy Institutes* (Rede Internacional de Institutos de Medição de Energia do Vento) é uma rede de cooperação de instituições engajadas no campo da energia eólica que querem garantir medidas de alta qualidade, interpretação uniforme de padrões e recomendações, assim como equivalência dos resultados (MEASNET, 2010). Os membros desta rede desenvolveram uma estrutura organizacional e realizam controle de qualidade periódico de suas medidas e avaliações, tais como rodadas de ensaios interlaboratoriais. Todos os membros devem necessariamente possuir certificação ISO 17025 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2005) nos mesmos ensaios e calibrações aprovadas pela MEASNET. A equipe da instituição divide-se em grupos de especialistas em cada tipo de ensaio ou calibração abordado por suas regras, além de uma

equipe de avaliação que é quem conduz o processo de avaliação da capacidade técnica dos candidatos a novos membros.

A Rede MEASNET em si não realiza medições. Os clientes interessados devem escolher um dos institutos-membro que esteja habilitado a realizar a calibração desejada de acordo com as regras e padrões de qualidade propostas pela MEASNET. Os seguintes procedimentos são propostos pela Rede:

Procedimento de Calibração de Anemômetros de Conchas

Procedimento de Medida de Desempenho Energético

Procedimento de Medida de Ruído Acústico

Procedimento de Medida da Qualidade da Energia

2.4 ISO 17025

A norma ISO 17025 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2005) - *General requirements for the competence of testing and calibration laboratories* (em Português: requisitos gerais para a competência de laboratórios de ensaio e calibração) estabelece requisitos gerenciais e técnicos para a implementação de um sistema de gestão da qualidade em laboratórios de ensaio e calibração. Além de incluir exatamente os mesmos requisitos gerenciais da ISO 9001⁴ (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2008), que é mais conhecida popularmente, também permite que o laboratório demonstre a sua competência para produzir resultados tecnicamente válidos. Um laboratório acreditado pela ISO 17025 irá automaticamente atender também à 9001, mas o contrário não é verdadeiro. Um dos objetivos desta parte técnica da norma é assegurar que os materiais de

⁴A ISO 9001 é um conjunto de normas que formam um modelo de gestão da qualidade.

referência, padrões e instrumentos de medição utilizados sejam rastreáveis ao SI, assim como serão os certificados de calibração emitidos.

O sistema de gestão da qualidade proposto pela norma ISO 17025 exige que toda a operação do laboratório seja documentada para que se tenha controle das atribuições de cada membro da equipe, da privacidade e satisfação dos clientes, mas principalmente para garantir a qualidade das medidas realizadas. É necessário que seja realizado o treinamento da equipe do laboratório para que se familiarize com a norma e seja capaz de desenvolver e aplicar este sistema de gestão. No caso do LAC todos os cursos necessários já foram concluídos, bem como a documentação gerencial, enquanto a documentação técnica passará ainda por alguns ajustes. A acreditação do laboratório segundo a ISO 17025 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2005) será obtida junto à Rede Metrológica do RS⁵.

2.5 PROJETO LAC – PETROBRÁS – MEASNET

O processo de certificação descrito neste trabalho é especificamente para atender ao Procedimento de Calibração de Anemômetros de Conchas da Rede MEASNET e é nele que está determinada a qualidade das medidas que o laboratório deve alcançar: $\pm 0,1$ m/s, quando a velocidade for de 10 m/s.

O projeto de capacitação do laboratório é composto pelas seguintes etapas:

- Substituição do sistema de controle de velocidade do ar por outro mais eficiente e estável;
- Atualização do sistema de instrumentação do laboratório;
- Desenvolvimento de um novo sistema de aquisição e registro de dados;
- Desenvolvimento da documentação do Sistema de Gestão da Qualidade;
- Treinamento da equipe do laboratório;

⁵Site www.redemetrologica.com.br/

- Acreditação segundo a norma ISO 17025 – específica para laboratórios de calibração;
- Acreditação pela Rede MEASNET para calibração de Anemômetros de Concha.

2.6 OBJETIVO DESTE PROJETO DE DIPLOMAÇÃO

Desenvolver um sistema automático para medir e controlar a velocidade do ar para o Túnel de Vento Prof. Joaquim Blessmann.

2.6.1 Objetivos específicos

- Adequar o sistema de medida da velocidade do ar às normas da Rede MEASNET.
- Criar um sistema capaz de ajustar-se à velocidade escolhida pelo operador de forma automática.
- Diminuir o tempo de acomodação da velocidade para 20 segundos.
- Limitar o sobrepasso da velocidade a 10%.

3 ANÁLISE DE ALTERNATIVAS

Para alcançar a acreditação do LAC pela Rede MEASNET foram realizadas diversas mudanças nos equipamentos e programas utilizados pelo laboratório. Estão incluídas entre essas mudanças:

- Troca do motor e de seu sistema de acionamento elétrico;
- Aquisição de novos instrumentos de medida;
- Aquisição de uma plataforma de programação para o desenvolvimento de programas de aquisição, registro de medidas e controle da velocidade do ar.

3.1 MOTOR, HÉLICE E ACIONAMENTO ELÉTRICO

O sistema de controle de velocidade do ar no TV, atualizado em 2007, era utilizado desde a inauguração do laboratório, no ano de 1972. Constituindo-se de uma solução essencialmente mecânica. Um grande ventilador movido por um motor trifásico de 100Hp (Figura 4) era acionado por uma chave estrela-triângulo, o que não permitia que se realizasse qualquer tipo de controle da sua rotação. Para controlar a velocidade do escoamento, a passagem do ar era bloqueada parcialmente por um conjunto de aletas (Figura 5) instaladas próximas à hélice do ventilador. Através de uma manivela instalada no interior do prédio, a posição destas aletas era ajustada até que se obtivesse a velocidade desejada. Este é um sistema simples e robusto, porém pouco eficiente para os padrões atuais.

Para o projeto LAC-Petrobrás-MEASNET foram previstas mudanças e a modernização das instalações do TV. O texto original do projeto previa apenas a atualização do seu sistema de acionamento, para que o motor passasse a ser acionado a partir de um inversor de frequência e possuísse um transformador exclusivo. Todos estes equipamentos já pertenciam ao laboratório, devendo-se apenas instalá-los para que operassem em conjunto. Ao longo do projeto, identificaram-se alternativas que atenderiam melhor às necessidades do

laboratório e às exigências da rede MEASNET quanto à estabilidade térmica e uniformidade do escoamento.



Figura 4: motor ARNO de 100Hp instalado no interior do túnel. Acionamento: chave Y - Δ.



Figura 5: antigo controle de velocidade do ar: acionamento e aletas móveis.

A necessidade de operar a baixas velocidades levaria o motor existente ao superaquecimento, o que levou se buscar no mercado uma alternativa viável. Optou-se pela aquisição de um novo motor, também de 100Hp, específico para o acionamento por inversores de frequência e dotado de ventilação forçada independente, que seria instalado na mesma posição do anterior. Por fim, foi projetado e construído um novo sistema de propulsão em que o motor é instalado do lado de fora do túnel (Figura 6) e seu movimento é transmitido à hélice por meio de um eixo cardã (Figura 7). O novo sistema conta também com elementos aerodinâmicos (Figura 8) que facilitam a passagem do ar por onde estava instalado o antigo

motor. Esta mudança representou uma significativa redução nas perdas de carga por atrito e também em expressiva melhora na estabilidade térmica do ar no túnel.



Figura 6: motor instalado fora do túnel e aciona a hélice por meio de um eixo.

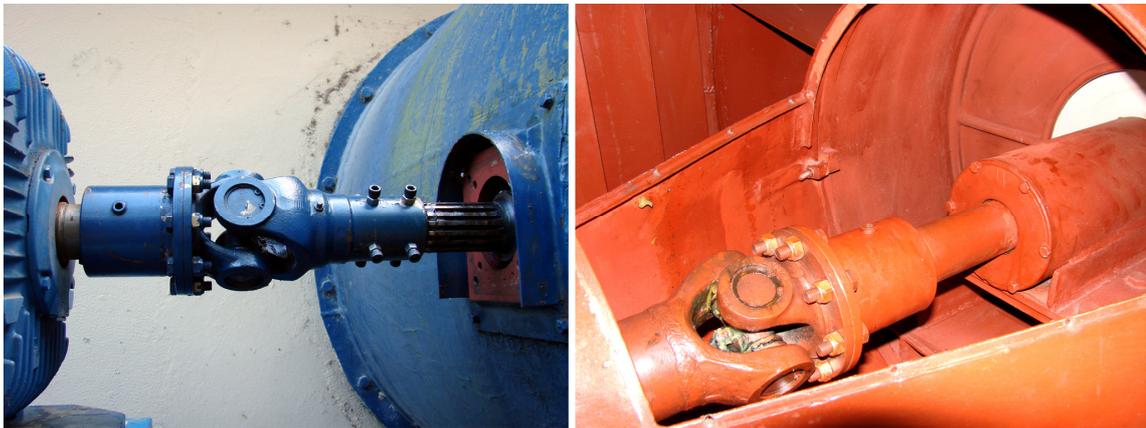


Figura 7: detalhes do eixo cardã do lado de fora (e) e de dentro (d) do TV.



Figura 8: hélice e elementos aerodinâmicos.

A partir da instalação do inversor de frequência, o túnel pôde passar a ser operado por apenas uma pessoa. A velocidade do ar era ajustada manualmente, através do ajuste da

frequência imposta ao motor, realizado diretamente no painel do inversor (Figura 9). A troca do motor e a instalação do inversor de frequência representaram um grande avanço, mas ainda não consistiam em um sistema automatizado.

O passo seguinte foi a utilização de um computador como interface homem-máquina. O operador passou a utilizar dois programas para ajustar a velocidade: um fornecido pelo fabricante do inversor, que permite ajustar a frequência do motor à distância, e outro desenvolvido no LAC, que recebe os dados dos instrumentos e calcula a velocidade do ar. O sistema de controle final tem apenas um programa, que pode se comunicar tanto com os instrumentos quanto com o inversor, ou seja, opera em “laço fechado”. A automação do controle de velocidade será descrita detalhadamente no item 4.



Figura 9: inversor de frequência e detalhe de sua IHM.

3.2 INSTRUMENTAÇÃO

A velocidade do vento no túnel não é medida diretamente, mas sim calculada a partir da diferença de pressões entre as extremidades do convergente (efeito Venturi)⁶. Para o cálculo da velocidade do ar também são necessárias as medidas de Temperatura e Pressão Atmosférica. Estas grandezas eram medidas com instrumentos analógicos e precisavam ser registradas e calculadas manualmente (Figura 10).



Figura 10: manômetros Betz, Barômetro e Termômetro utilizados anteriormente.

3.2.1 Medidas de Pressões Diferencial e Atmosférica, Temperatura e Umidade

Foi necessário buscar um novo arranjo de instrumentação que atendesse à máxima incerteza combinada admissível para a calibração de anemômetros, que segundo a Rede MEASNET, é de 0,1 m/s, com período de aquisição máximo de 1 segundo. Esta incerteza é calculada a partir de uma ponderação das contribuições individuais das incertezas de cada uma das medidas envolvidas no cálculo da velocidade do ar. A medida que exerce maior influência sobre a velocidade calculada é a da pressão diferencial sendo, por tanto, a que exige o sensor mais acurado.

Foram pesquisadas diversas soluções baseadas em sensores individuais para cada grandeza, sendo a incerteza de cada arranjo comparada à estabelecida pela Rede MEASNET.

⁶ Segundo o italiano Giovanni Battista Venturi (1746-1822), um estreitamento em um duto fechado faz com que a velocidade do fluido aumente e sua pressão diminua.

Tais soluções seriam viáveis, porém bastante inconvenientes, pois cada fabricante adota soluções distintas em seus instrumentos, como o protocolo de comunicação e o período de aquisição. Além disto, seriam necessários diversos processos de importação, algo bastante complexo e dispendioso.

A melhor solução encontrada para realizar as leituras das grandezas necessárias para o cálculo da velocidade do ar foi o equipamento ManoAir-500, produzido na Suíça pela Schiltknecht. Esta empresa tem grande experiência no desenvolvimento de instrumentos para túneis de vento como, por exemplo, os manômetros de coluna d'água (tipo *Betz*) utilizados há aproximadamente três décadas no LAC. O ManoAir-500 (Figura 11) é um equipamento capaz de medir simultaneamente a pressão diferencial, a pressão atmosférica, a temperatura e a umidade relativa do ar no interior do túnel. Estas medidas são digitalizadas e enviadas ao sistema de aquisição através de uma interface serial do tipo RS-232, que permite que se garanta a integridade dos dados. O uso de um único tipo de equipamento garante a sincronia entre as medidas necessárias, facilita o desenvolvimento dos programas de aquisição, uma vez que a comunicação utiliza um único protocolo, e ainda agiliza o processo de compra, por se tratar de um único fornecedor.



Figura 11: novo arranjo de instrumentação: 2 ManoAir-500 e 1 osciloscópio TPS-2014.

3.2.2 Medida dos sinais gerados pelos anemômetros - Frequência

Um anemômetro de conchas funciona de maneira semelhante a um “taco-gerador”. A estrela de copos (Figura 12, esquerda) é ligada por um eixo rígido a um disco perfurado que fica na parte interna do anemômetro (Figura 12, direita). Em um dos lados deste disco há um diodo emissor de luz e, no outro, alinhado, um fotosensor. Quando a estrela e o disco giram, os orifícios deste permitem ou bloqueiam a chegada da luz ao sensor. O sinal elétrico gerado por este sensor é uma onda quadrada em que o nível alto corresponde à situação em que ele recebe a luz do diodo, ou seja, quando passa um orifício entre eles. Conforme a velocidade do ar aumenta, também aumenta a rotação da estrela e do disco, e com isto o número de vezes que o sensor é iluminado a cada segundo. O sinal gerado pelo anemômetro apresenta, então, uma frequência proporcional à velocidade do vento, e por tanto foi necessário adquirir um instrumento capaz de medir esta frequência.



Figura 12: estrela de copos (e) e disco perfurado (d) de um anemômetro de conchas.

Para medir o sinal dos anemômetros calibrados no TV foi adquirido um osciloscópio digital, de 4 canais, modelo TPS-2014, da marca Tektronix. Considerando-se apenas a calibração de anemômetros, não seria necessária a aquisição de um instrumento tão completo.

Esta opção levou em consideração a sua utilização em diversos outros tipos de estudos realizados no LAC⁷.

3.3 PLATAFORMA PARA O DESENVOLVIMENTO DOS PROGRAMAS DE AQUISIÇÃO

No início do projeto LAC-Petrobrás-MEASNET foi necessária a seleção e aquisição de uma plataforma de desenvolvimento que permitisse a criação de programas personalizados para a comunicação com os instrumentos, aquisição e registro de dados, e controle de velocidade do ar. A plataforma deveria ser bastante versátil e de interface amigável.

No momento da escolha desta plataforma, a nova instrumentação ainda não havia sido adquirida e o texto original do projeto previa que se utilizassem sensores analógicos, que enviariam seus sinais ao sistema de aquisição através de conversores “*analógico-digital*”, também conhecidos como *placas A/D*. Optou-se então pelas soluções de hardware e software da National Instruments, empresa norte americana que oferece uma plataforma de desenvolvimento em linguagem gráfica, o LabVIEW, e uma família de placas A/D bastante diversificada. Em um segundo momento, optou-se por utilizar instrumentos com capacidade de comunicação digital na calibração de anemômetros, o que tornou desnecessário o uso das placas A/D nesta aplicação. A plataforma LabVIEW foi de fato utilizada para o desenvolvimento dos programas de aquisição, registro e controle, conforme apresentado no item 4.2.

Como mencionado acima, o LabVIEW utiliza uma linguagem de programação gráfica, proprietária. Seus programas são divididos em duas partes: O painel frontal (“front panel”) e o diagrama de blocos (“block diagram”). O painel frontal é onde se constrói a interface do programa com o usuário, onde ficam os indicadores, gráficos e botões, como uma versão virtual do painel de um instrumento. O diagrama de blocos é onde são programadas as

⁷ A aquisição do osciloscópio é apresentada para a melhor compreensão do contexto onde se insere este trabalho, uma vez que ela ocorreu antes que o autor se envolvesse no projeto.

funções executadas pelo programa, a partir de blocos que realizam cálculos matemáticos, testes lógicos, processamento de sinais, etc. A Figura 13 apresenta um exemplo deste diagrama de blocos e seu painel frontal correspondente.

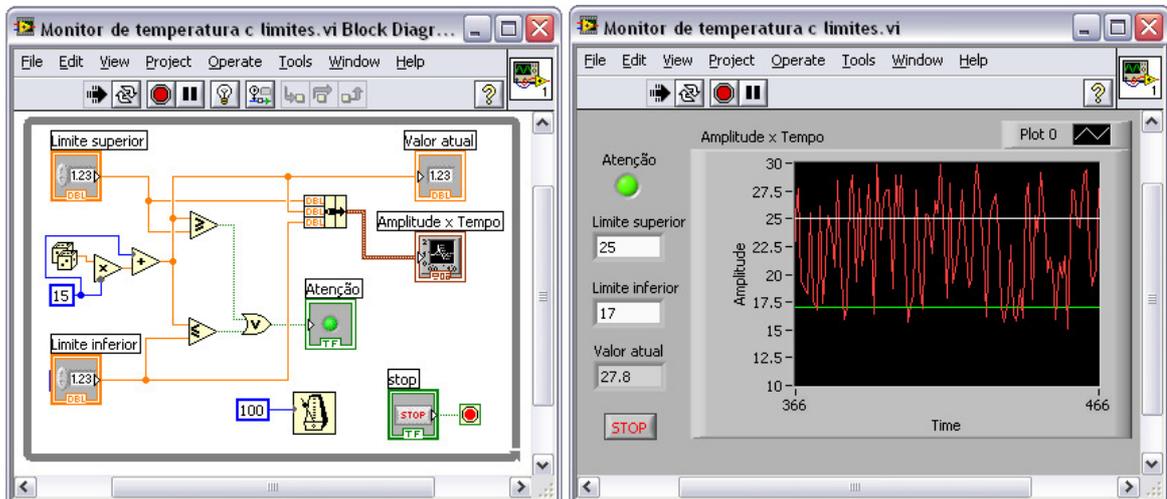


Figura 13: exemplo de programa em LabVIEW. Diagrama de blocos(e) e painel frontal(d).

Foi necessário estudar esta linguagem de programação para desenvolver os programas de aquisição, registro e controle, uma vez que ela nunca havia sido utilizada pelos membros da equipe do LAC. No item 4.2 será apresentado o desenvolvimento dos programas criados durante a execução deste projeto⁸.

⁸ A aquisição da plataforma de desenvolvimento é apresentada para a melhor compreensão do contexto onde se insere este trabalho, uma vez que ela ocorreu antes que o autor se envolvesse no projeto. O desenvolvimento dos programas, no entanto, foi realizado pelo autor desde o seu início.

4 MÉTODOS, PROCESSOS E DISPOSITIVOS

Neste capítulo serão apresentadas as etapas do processo de automatização do sistema de controle de velocidade do ar do Túnel de Vento Prof. Joaquim Blessmann. Inicialmente serão abordados alguns conceitos básicos da teoria de sistemas de controle, que embasam este trabalho. Em seguida, será apresentada uma visão geral deste sistema e como estão interligados os seus componentes. Os itens 4.2, 4.3 e 4.4 irão apresentar detalhadamente o desenvolvimento dos programas de aquisição, registro e controle, da modelagem do TV e do projeto do bloco de controle.

4.1 SISTEMAS DE CONTROLE – CONCEITOS BÁSICOS

Segundo Bazanella e Silva Jr (2005, p.13) um sistema a ser controlado é chamado de *processo*, ou *planta* e apresenta um sinal de entrada, a *variável manipulada*, e um sinal de saída, a *variável controlada*, cujo comportamento se deseja controlar. Este processo é representado matematicamente por uma função de transferência. O objetivo geral de um sistema de controle é aplicar sinais adequados na *variável manipulada* para que a *variável controlada* apresente o comportamento desejado. Um sistema de controle também deve garantir a estabilidade do processo, ou seja, que o valor da variável controlada não possa oscilar excessivamente ou aumentar de valor indefinidamente.

Ainda segundo Bazanella e Silva Jr (2005, p.15), um sistema pode operar a partir de duas estratégias de controle: em *malha aberta* ou em *malha fechada*. Um sistema que opera em malha aberta, como o representado na Figura 14, irá receber sinais preestabelecidos em sua variável manipulada e após certo tempo, a variável controlada irá apresentar um determinado comportamento. Os sinais aplicados à entrada não contém qualquer tipo de informação a respeito da saída. Um exemplo deste tipo de sistema é um processador de alimentos, que possui dois ou três ajustes de “velocidade”. Cada posição deste ajuste irá aplicar ao motor

uma tensão preestabelecida, e a velocidade resultante irá depender da carga: a quantidade e densidade dos alimentos. O processador vazio, ou com alimentos leves, irá girar mais rapidamente.



Figura 14: sistema genérico em malha aberta.

Um sistema que opera em malha fechada, como o da Figura 15, possui algum tipo de *sensor* ($H(s)$) irá medir o *signal de saída* (Y) e compara-lo com o *signal de referência* (R). A diferença entre estes dois sinais é o *signal de erro* (e), fornecido ao *bloco de controle* ($C(s)$) para que este calcule o *signal de controle* (u) que deve ser aplicado ao *processo* ($G(s)$) a cada instante de tempo. A relação entre a sua saída e a sua referência é chamada de *função de transferência do sistema* ($T(s)$).

$$T(s) = \frac{Y(s)}{R(s)} = \frac{C(s)G(s)}{1 + C(s)G(s)H(s)} \quad (1)$$

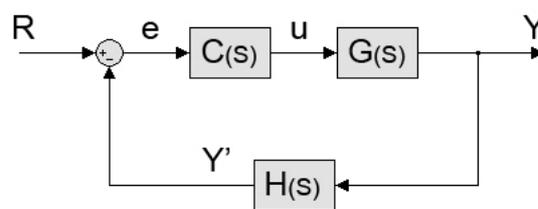


Figura 15: sistema genérico em malha fechada.

Via de regra, deseja-se que o sinal de saída iguale-se ao de referência após um período de transição. No caso do TV, deseja-se fazer com que a velocidade do ar (V_{atual}) siga uma velocidade de referência (V_{ref}), e para isto o controlador deve calcular a frequência do inversor (F_i) adequada em cada instante.

O diagrama da Figura 16 representa o sistema de controle do TV e permite visualizar a nomenclatura adotada nesta aplicação. A ausência do bloco $H(s)$, referente ao sensor, deve-se ao fato de que o único acesso que se tem à velocidade do ar é através das medidas do ManoAir-500. Sendo assim, seu comportamento foi incorporado ao do processo $G(s)$.

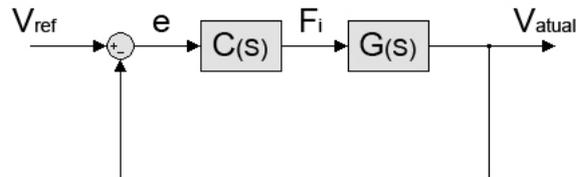


Figura 16: representação do sistema de controle do Túnel de Vento.

A Figura 17 apresenta uma visão mais completa do sistema de controle de velocidade do ar do Túnel de Vento, na forma de um diagrama de blocos acrescido de outras figuras para melhor compreensão. A área demarcada pelo quadro azul (linha pontilhada) representa as funções desempenhadas pelo programa de aquisição, registro e controle, pois algumas delas estão além da definição de um bloco de controle. O cálculo do sinal de erro a partir da velocidade de referência selecionada pelo operador e da velocidade atual calculada a partir dos dados recebidos do ManoAir-500 são exemplos destas funções extras. O processo inclui o inversor de frequência, o motor, a hélice, o túnel de vento em si e o ManoAir-500. O processo recebe em sua entrada o sinal de frequência calculado pelo controlador e apresenta em sua saída os dados do ManoAir-500, que representam a velocidade atual do ar.

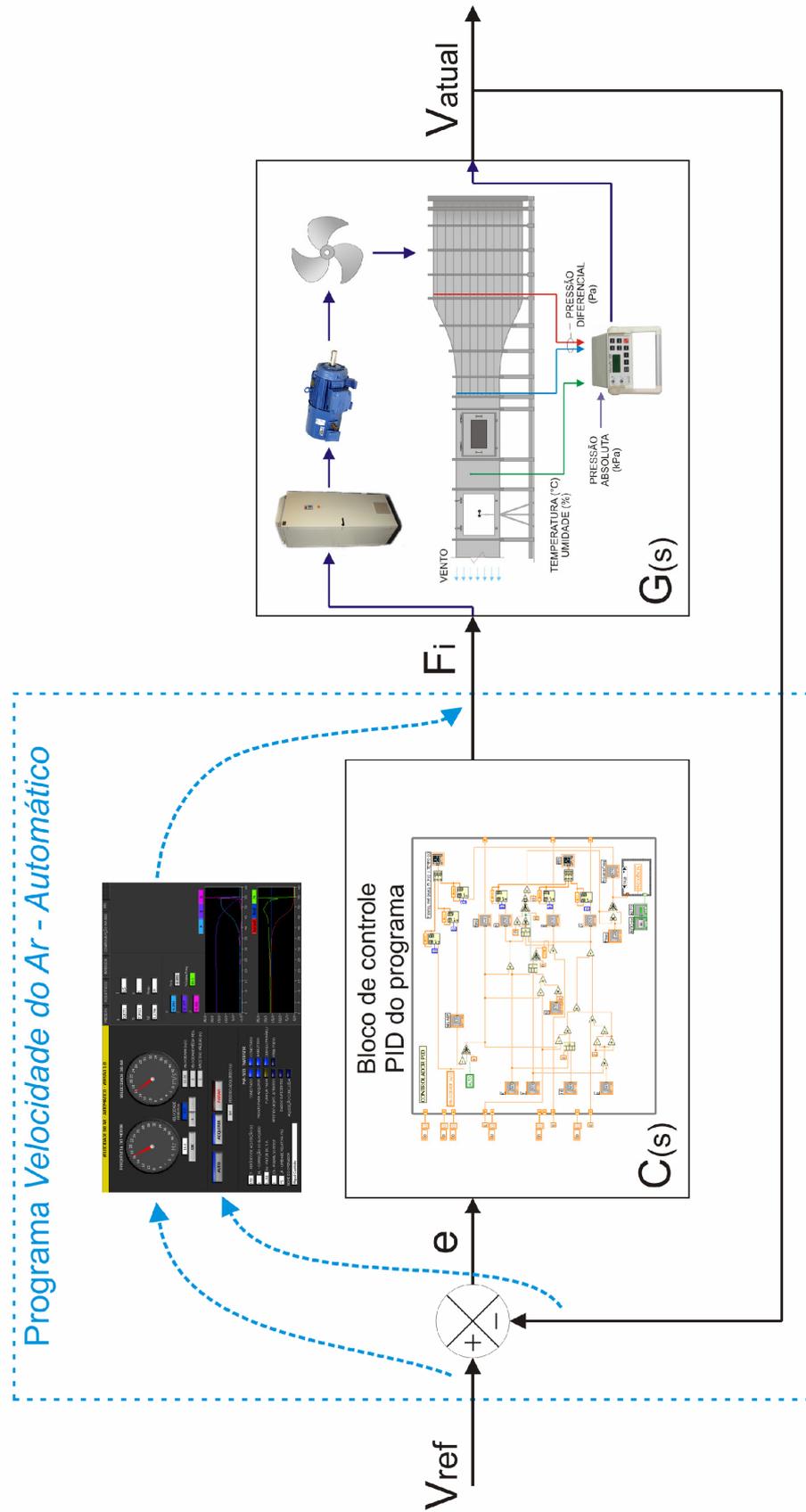


Figura 17: componentes do novo sistema de controle de velocidade do ar.

4.2 PROGRAMAS DE AQUISIÇÃO, REGISTRO E CONTROLE

A troca de dados entre os diversos componentes do sistema é feita através de programas que foram desenvolvidos especificamente para esta aplicação. Tais programas desempenham as seguintes funções:

- Possibilitar a comunicação com os instrumentos e com o inversor de frequência;
- Realizar o cálculo da velocidade do ar, a partir das medidas dos instrumentos;
- Realizar o registro dos dados adquiridos na forma de planilhas;
- Implementar a equação de controle;
- Proporcionar uma Interface Homem-Máquina amigável, acessível e intuitiva.

Os diversos tipos de ensaios realizados no Túnel de Vento Professor Joaquim Blessman levaram ao desenvolvimento um programa principal e duas versões derivadas dele, para dar conta da comunicação com o arranjo de instrumentos utilizados em cada tipo de ensaio.

4.2.1 Descrição geral dos programas

O programa principal, *Velocidade do Ar*, foi o primeiro a ser desenvolvido e é destinado ao uso geral do TV, como por exemplo, o ensaio de modelos reduzidos de edificações. Uma versão inicial deste programa, apresentada na Figura 18, comunica-se com um ManoAir-500, realiza o cálculo da velocidade do ar e o registro dos dados. Esta versão inicial era bastante limitada e não permitia comunicação com o inversor de frequência.

A interface dos programas é dividida em duas áreas: uma tela principal no lado esquerdo e diversas “abas” no lado direito. A tela principal é fixa para cada programa e apresenta as informações mais relevantes dos instrumentos em uso, como a velocidade do ar, os parâmetros utilizados em seu cálculo, o estado da comunicação serial e a função que o

programa está executando no momento. No lado direito da tela são apresentadas diversas medidas e ajustes, separadas em abas que o operador pode selecionar com um clique durante a execução do programa. Todos os programas possuem as abas “Medidas”, “Resultados” e “Configuração MA-500”, e podem possuir outras conforme suas funções específicas.

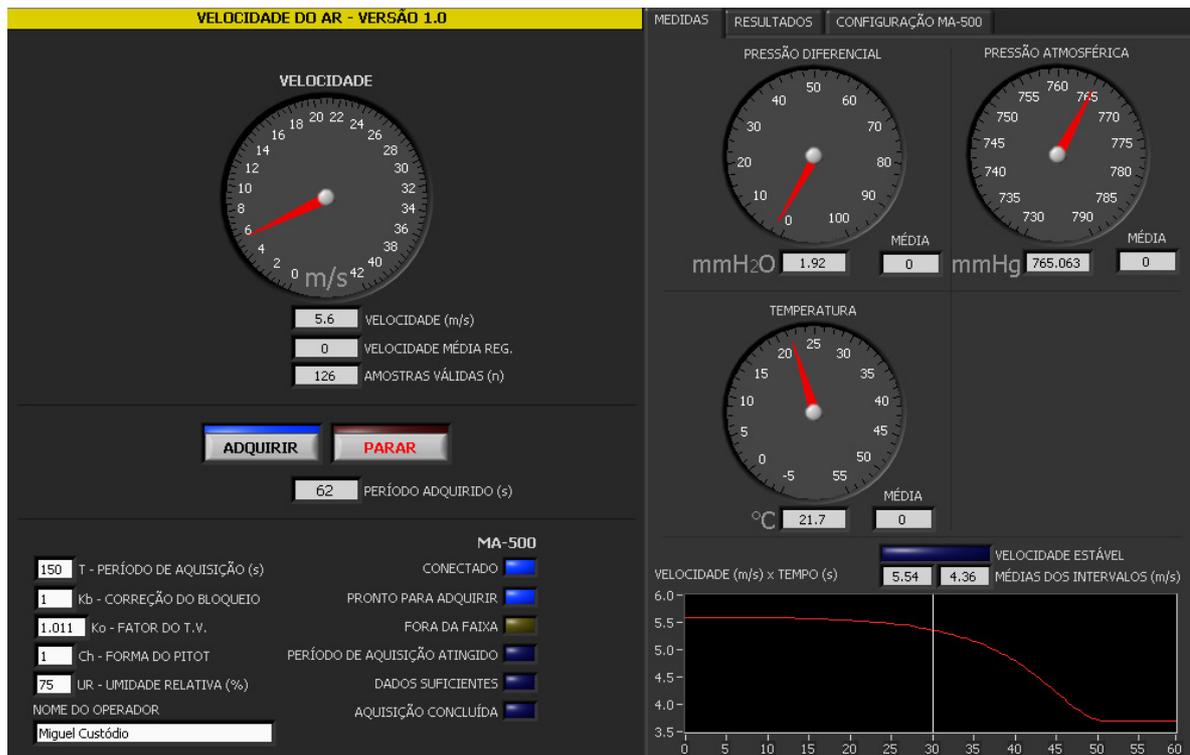


Figura 18: primeira versão do programa Velocidade do Ar - tela principal e aba de medidas.

A aba “Medidas” apresenta as medidas de condições ambientais e um gráfico com a evolução da velocidade do ar nos últimos 60 segundos. A aba “Resultados” permite definir se e onde serão gravados os dados do arquivo de registro, ajustar seu cabeçalho e pré-visualizar os resultados da última aquisição, como pode ser visto na Figura 19.

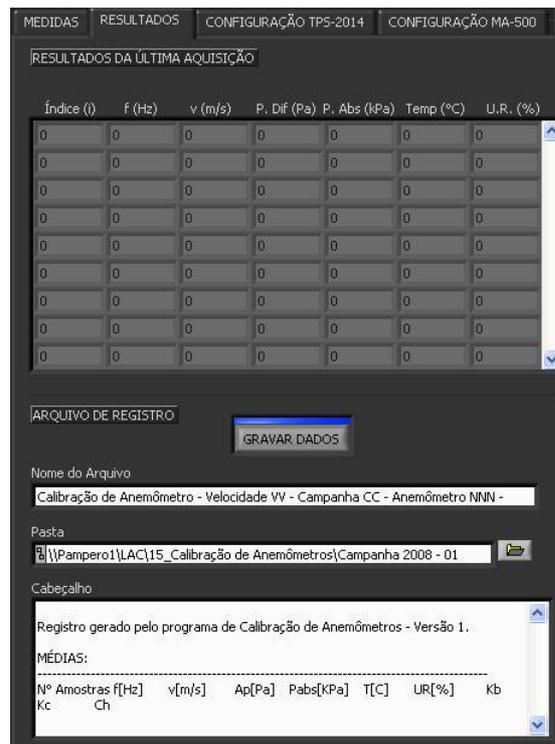


Figura 19: aba “Resultados”.

A aba “Configuração MA-500”, apresentada na Figura 20, permite ajustar os parâmetros da configuração serial com o instrumento e também a visualização dos dados recebidos não-interpretados, para depuração.



Figura 20: aba “Configuração MA-500”.

Sobre o programa *Velocidade do Ar* foi adicionada a comunicação com um osciloscópio digital para que o sinal gerado pelo anemômetro fosse também registrado. Esta versão que se comunica tanto com um ManoAir-500 quanto com o osciloscópio foi chamada de *Calibração de Anemômetro* e é apresentada na Figura 21.

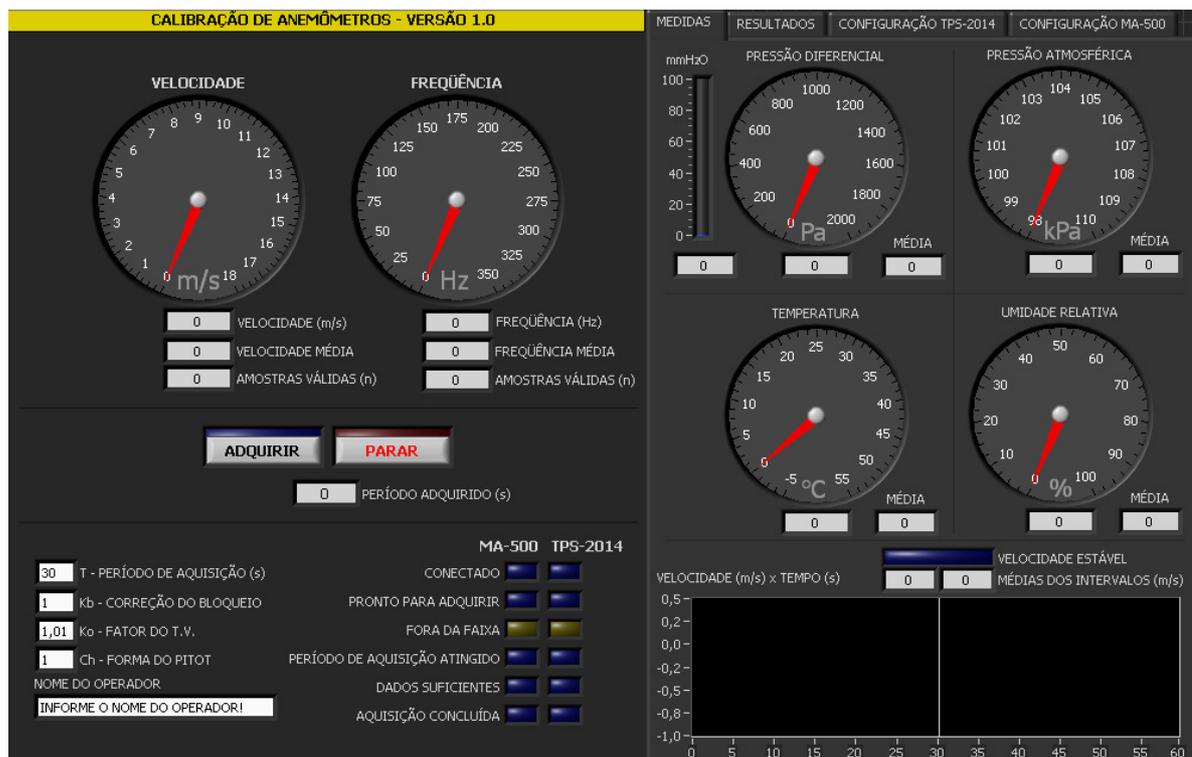


Figura 21: programa Calibração de Anemômetros - tela principal e aba de medidas.

Para o programa *Calibração de Anemômetros* foi criada uma nova aba, a “Configuração TPS-2014”, apresentada na Figura 22. Esta permite ajustar os parâmetros da configuração serial com o instrumento e também as mensagens que serão enviadas ao instrumento com ajustes e solicitação de dados.

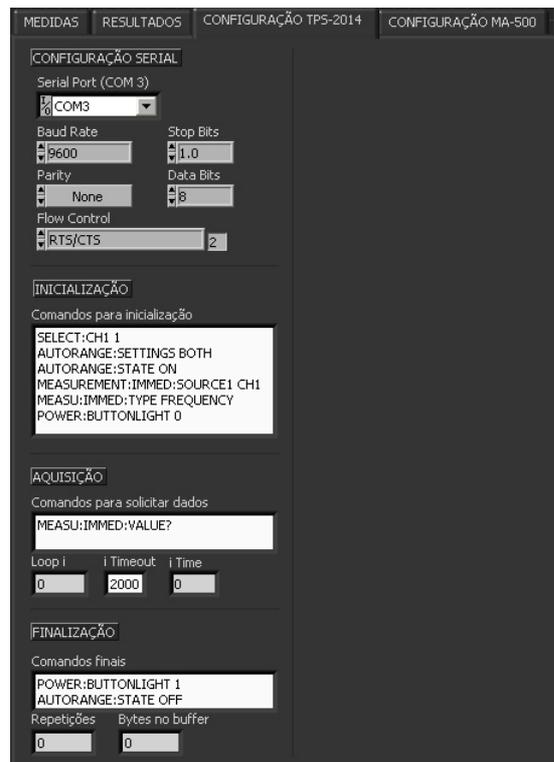


Figura 22: aba “Configuração TPS-2014”.

Outra adaptação feita sobre o programa *Velocidade do Ar* foi a inclusão da comunicação com um segundo ManoAir-500, para possibilitar que se fizessem avaliações da qualidade do escoamento através de duas medidas pontuais de velocidade, realizadas simultaneamente com dois tubos de Pitot-Prandtl. Esta versão que se comunica com dois ManoAir-500 simultaneamente foi chamada de *Verificação do Escoamento* e é apresentada na Figura 23. As cores verde e amarela são utilizadas por que o laboratório possui dois kits ManoAir-500 idênticos. Os instrumentos e todos os seus acessórios possuem etiquetas em sua respectiva cor para facilitar a identificação, caso contrário poderiam ser confundidos e realizar medidas incorretas. No programa *Verificação do Escoamento*, o único que utiliza ambos

ManoAir-500 em simultâneo, a cor das agulhas dos mostradores indica o instrumento a que se referem.

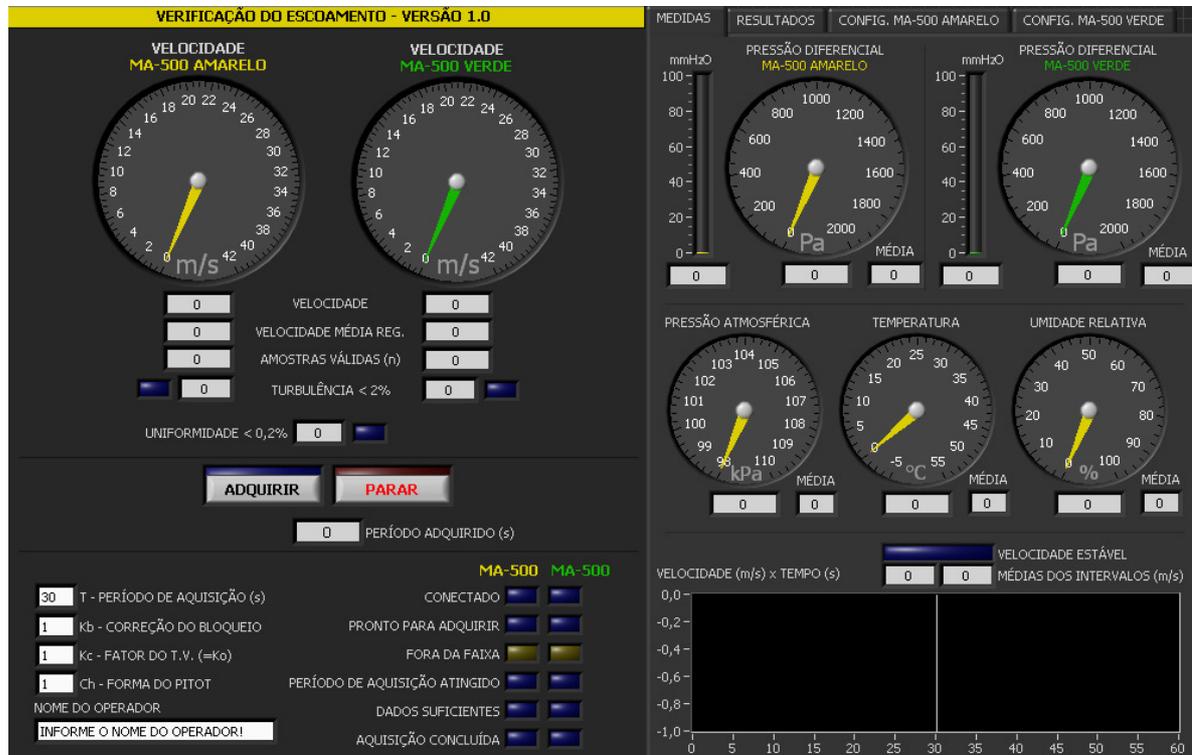


Figura 23: programa Verificação do escoamento - tela principal e aba de medidas.

O desenvolvimento de novas funções ocorre sempre sobre o programa *Velocidade do Ar*, para em seguida ser estendido ao de *Calibração de Anemômetros* e *Verificação do Escoamento*. No caso das funções de comunicação com o inversor e controle automático de velocidade esta regra também foi seguida, e neste momento estas funções estão implementadas apenas no *Velocidade do Ar*. Elas devem ser exaustivamente testadas antes que possam ser adicionadas aos outros dois programas.

4.2.2 Primeira solução: laço aberto

Inicialmente os programas de aquisição e registro foram desenvolvidos para receber os dados dos instrumentos, realizar o cálculo da velocidade do ar e o registro dos dados. Não possuíam qualquer tipo de comunicação com o inversor de frequência. Sendo assim, era o

operador quem fechava a malha de controle e regulava manualmente a frequência aplicada ao motor até obter a velocidade desejada. No momento em que foram realizados estes primeiros testes, o único tipo de comunicação disponível para ligar o inversor ao sistema de controle era o RS-232. Segundo o manual do inversor de frequência, o comprimento máximo do cabo RS-232 é de 10m, o que não é suficiente para conectar estes equipamentos da maneira como ficam dispostos no laboratório. Sendo assim, os ajustes na frequência precisavam ser realizados diretamente na IHM localizada no painel do inversor, o que exigia o deslocamento do operador a cada mudança na velocidade.

A Figura 24 representa o funcionamento destes programas através de um algoritmo simplificado, onde fica claro que este se comunica constantemente com os instrumentos até que o operador pressione o botão PARAR ou que uma aquisição esteja concluída, caso em que será gerado um arquivo de registro contendo as amostras individuais de cada grandeza medida e suas médias.

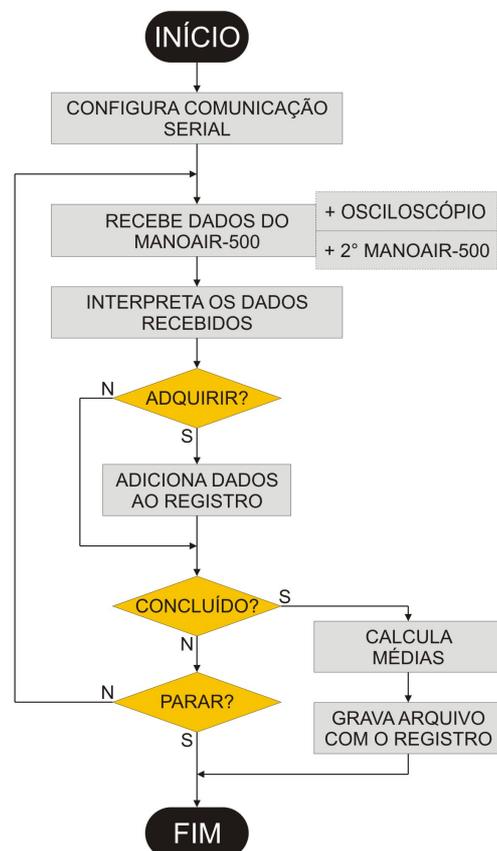


Figura 24: algoritmo simplificado dos programas - versões iniciais.

Em um segundo momento, foi adquirido um conversor USB - RS-485, que permite que se utilizem cabos de até 1000m e possibilitou a conexão física do inversor de frequência ao sistema de controle. A solução de software adotada nesta situação foi o uso simultâneo dos programas de aquisição e registro com um programa fornecido pela WEG, o SuperDrive 5.8, mostrado na Figura 25. Este programa simula a IHM do inversor e permite que o operador ajuste a frequência à distância, o que representa uma melhoria significativa no sistema de controle. Ainda assim, esta solução não seria definitiva por que o SuperDrive não é capaz de trocar dados com outros programas em tempo de execução, e portanto não permite que o sistema opere em laço fechado.

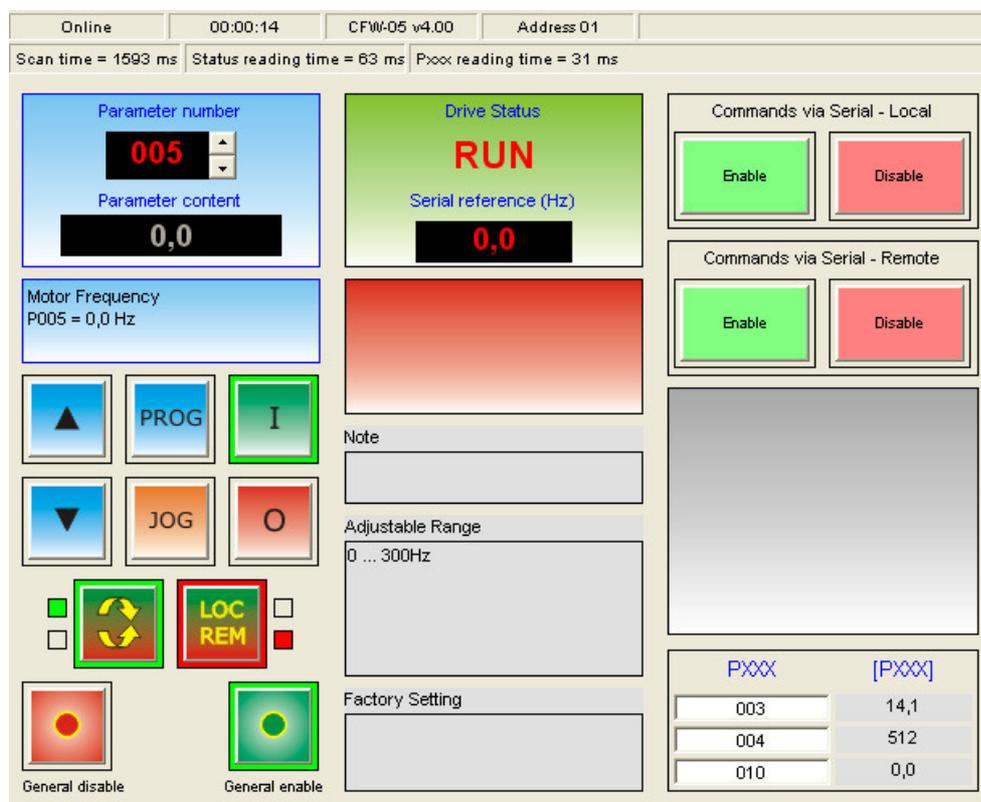


Figura 25: interface do programa SuperDrive 5.8.

4.2.3 Inclusão da comunicação com o inversor

O próximo passo no desenvolvimento dos programas de aquisição e registro foi a inclusão de rotinas para permitir a comunicação com o inversor de frequência. O objetivo principal desta etapa era dispensar uso do programa SuperDrive e permitir que a frequência enviada ao motor fosse ajustada diretamente no programa *Velocidade do Ar*. Objetivos secundários seriam a criação de indicadores que facilitassem a visualização dos parâmetros relevantes do inversor de frequência: rotação, corrente de saída, tensão CC, tensão AC de saída, potência de saída e horas de uso do motor. Nota-se, então, que nesta etapa não seria implementada uma equação de controle que permitisse ao operador definir diretamente a velocidade de referência, ainda que o projeto evoluísse mais um passo nesta direção. A partir deste ponto, o programa passou a ser identificado por “*Velocidade do Ar – Inversor*” e pôde ser considerado um programa de aquisição, registro *e controle*, já que passou a ser capaz de modificar a velocidade do ar no TV.

As rotinas de comunicação foram criadas tendo como base o Manual da Comunicação Serial - Conversor de Frequência Série CFW-05 disponibilizado pela WEG (WEG BRASIL, 1997), que descreve detalhadamente o protocolo de comunicação adotado por este inversor. Esta comunicação se dá entre um mestre, que é o sistema de controle, e um escravo, que é o inversor, através de telegramas de leitura e telegramas de escrita, que podem ser descritos da seguinte maneira:

Telegramas de leitura:

- O mestre envia ao inversor o número do parâmetro que quer receber.
- O inversor responde com o número do parâmetro questionado e o seu valor atual.

Telegramas de escrita:

- O mestre envia ao inversor o número do parâmetro que quer atualizar e o novo valor.

- Caso a ordem seja aceita, o inversor responde *Acknowledge* (caractere ASCII *ACK*, 0x06).
- Caso a ordem seja rejeitada, o inversor responde *Not-Acknowledge* (caractere ASCII *NAK*, 0x15).

Para acomodar os indicadores e parâmetros de configuração referentes ao inversor, foi criada uma nova aba “Inversor”, apresentada na Figura 26. Esta permite ajustar os parâmetros da configuração serial com o equipamento e monitorar o sucesso da troca de telegramas entre o sistema de aquisição e o inversor, além de apresentar os indicadores já mencionados anteriormente.

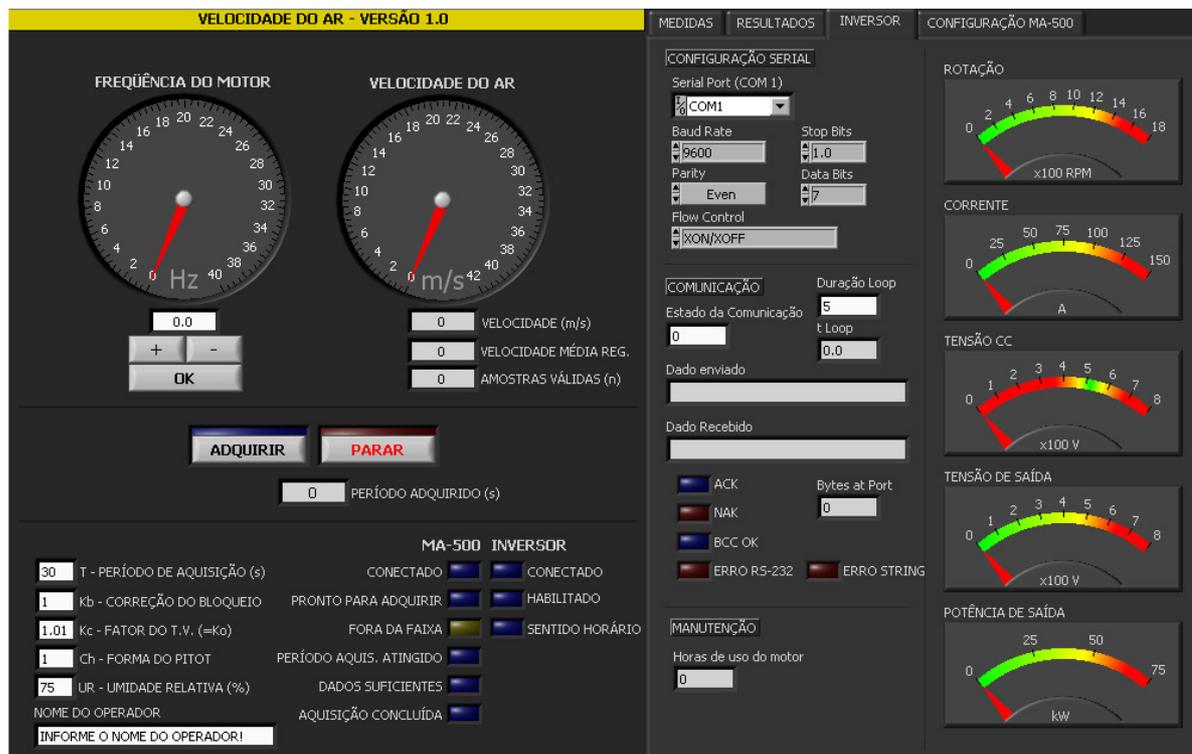


Figura 26: programa Velocidade do Ar - Inversor - tela principal e aba do inversor.

4.2.4 Programa com equação de controle

A última etapa na evolução dos programas de aquisição, registro e controle foi a inclusão do bloco de controle PID. O objetivo principal desta função é permitir que o operador selecione diretamente a velocidade do ar desejada, sem se preocupar com a

frequência que deve ser aplicada no motor, e que o escoamento se ajuste a esta nova velocidade mais rapidamente do que quando opera em laço aberto, conforme os objetivos específicos deste projeto.

A escolha do tipo de controlador foi feita a partir da função de transferência do TV, que relaciona o comportamento da velocidade do ar com a frequência selecionada no inversor. Esta função de transferência foi obtida através dos ensaios descritos no item 4.3. O projeto do controlador e a maneira como seus parâmetros foram ajustados são apresentados no item 4.4.

Ao receber o bloco de controle, o programa passou a ser chamado de *Velocidade do Ar - Automático*. As mudanças feitas na interface foram pequenas, já que o funcionamento do controlador deve ser transparente para o operador. Foram criados um campo “Velocidade Desejada” e um botão “Auto” na tela principal, além de uma aba “PID” para depuração. O botão AUTO permite que o operador escolha se irá ajustar a frequência do inversor ou a velocidade do ar (V_{ref}), conforme o ensaio que irá realizar. A aba PID permite monitorar o comportamento do controlador através de dois gráficos – um com a evolução de cada ação de controle (P , I e D) e outro com a velocidade atual (V_{atual}), a velocidade de referência (V_{ref}) e a próxima frequência do inversor (F_i). Também é possível ajustar os seguintes parâmetros: ganho (K), tempo integral (T_i) e tempo derivativo (T_d), período de amostragem (T), posição do pólo mais rápido (p) e frequência máxima que pode ser enviada ao inversor (F_{max}). Assim como a aba referente à comunicação com o inversor, a “PID” foi criada para facilitar o desenvolvimento e depuração destes programas e não precisa ser utilizada durante a operação cotidiana do TV. Os parâmetros do controlador só devem ser ajustados caso haja mudanças na instrumentação ou no túnel de vento em si e por tanto não precisam estar facilmente acessíveis. Uma vez que este programa é utilizado apenas no âmbito do LAC, por poucos operadores treinados, o acesso aos parâmetros PID não foi bloqueado. Isto seria realmente necessário caso se tratasse de um programa comercial. A Figura 27 apresenta a tela do

Velocidade do Ar - Automático logo após a velocidade de referência ter sido ajustada para 16m/s.

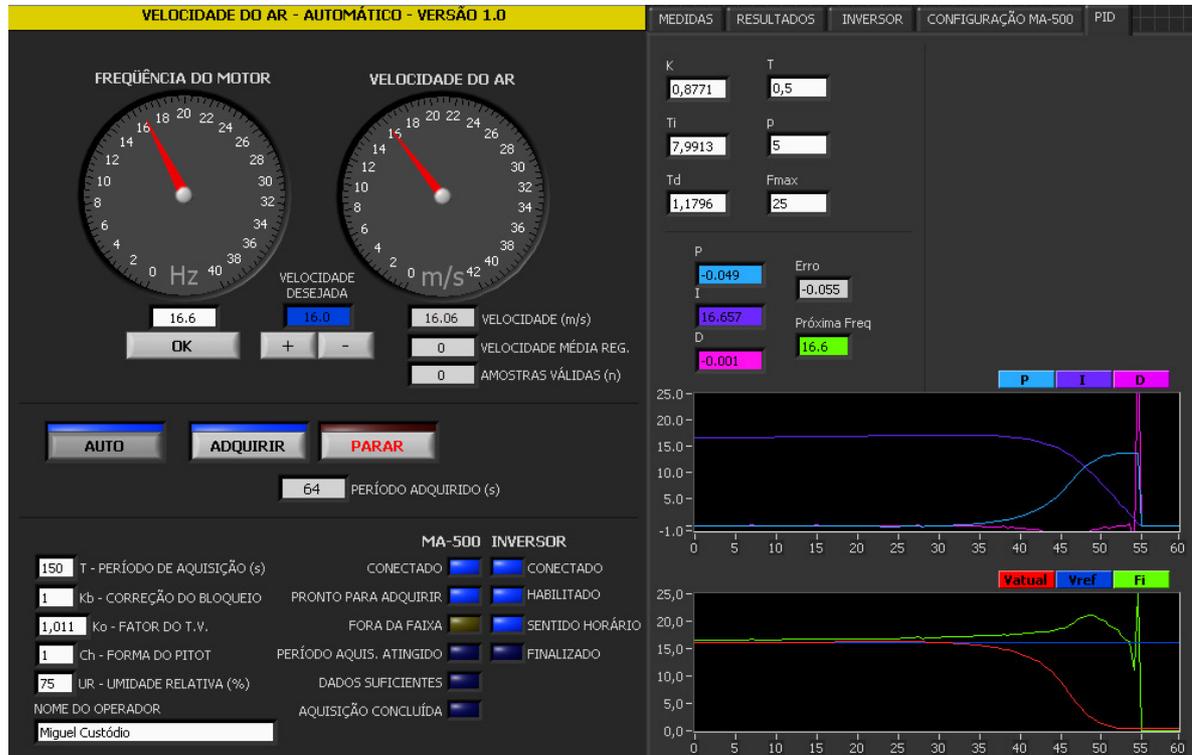


Figura 27: programa Velocidade do Ar - Automático - tela principal e aba PID.

A Figura 28 representa o funcionamento deste programa através de um algoritmo simplificado, onde se notam dois ciclos de instruções independentes. Para fins práticos pode-se considerar que o comportamento é o de dois algoritmos executados em paralelo. Não se pretende com isto considerar que o programa execute “processamento paralelo”, até por que a maneira exata como o LabVIEW ordena a execução de tais funções não é acessível ao programador. De qualquer maneira, a linguagem de programação gráfica do LabVIEW permite que estes dois ciclos de instruções sejam sincronizados para que os cálculos da equação de controle considerem as amostras corretas de velocidade.

Também nesta versão, o programa se comunica constantemente com os instrumentos e com o inversor, até que o operador pressione “parar” ou que uma aquisição esteja concluída,

caso em que será gerado um arquivo de registro contendo as amostras individuais de cada grandeza medida e suas médias.

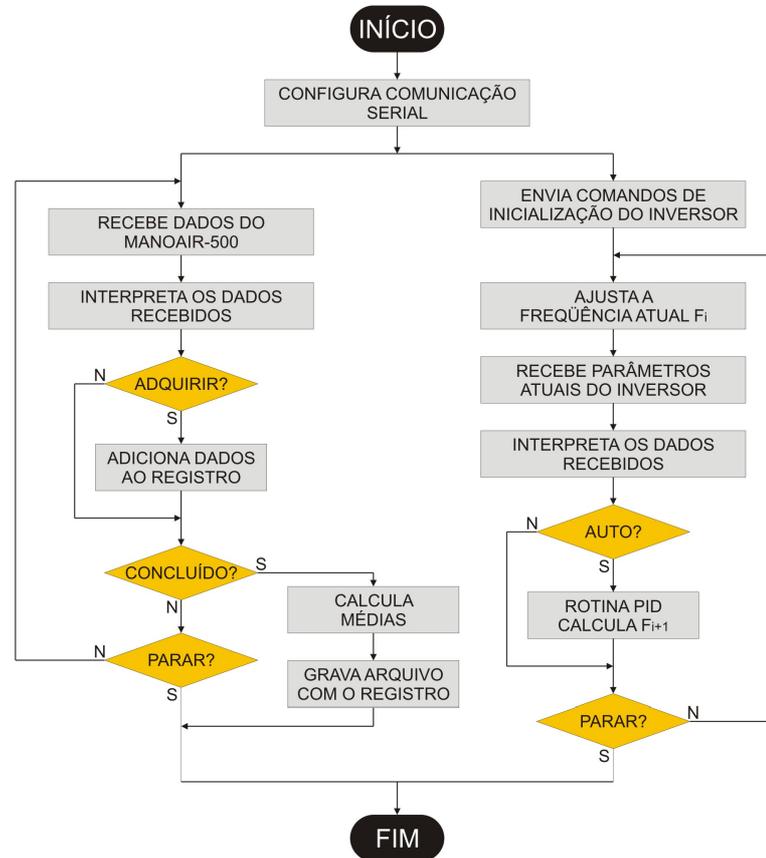


Figura 28: algoritmo simplificado do programa Velocidade do Ar.

Conforme o exposto no item 3.3, a plataforma LabVIEW utiliza uma linguagem gráfica de programação, em que as funções, variáveis, sinais, laços e demais componentes do programa são dispostos e interconectados em uma tela chamada “block diagram”, ou diagrama de blocos em inglês. A Figura 29 apresenta o “block diagram” do programa *Velocidade do Ar – Automático* e permite identificar 11 conjuntos principais de funções, que serão também chamados de “blocos” e descritos a seguir.

Cada um destes blocos somente é executado no momento em que todos os sinais de entrada estejam disponíveis. Blocos em que não há sinais de entrada são executados imediatamente no início do programa. Para evitar que todos os blocos iniciassem antes de ter

seus valores zerados, foram utilizadas linhas de sinal que ligam o bloco 1 aos demais e levam um valor “true” que é imediatamente descartado.

1. Bloco de Comandos de Inicialização:

Foi construído em uma estrutura “flat sequence”, que executa uma única vez o conteúdo de cada quadro, em sequência. Irá realizar as seguintes tarefas:

- Reiniciar todas as variáveis para seus valores iniciais
- Configurar a comunicação serial com o ManoAir-500 e o inversor, liberar o início da execução dos demais blocos, e da função que monitora se o programa está pronto para parar – o que ocorre ao final de uma aquisição ou ainda quando o operador pressiona o botão PARAR;
- Alertar o operador para que verifique os parâmetros do cálculo da velocidade (os campos piscam em amarelo no painel frontal), monitorar se o operador pressionou o botão ADQUIRIR.

2. Bloco de Aquisição do ManoAir-500:

Foi construído em uma estrutura “while loop”, que irá repetir a execução de seu conteúdo até que a condição de parada seja satisfeita. Este loop reinicia quando todas as instruções nele contidas tiverem sido concluídas e, neste caso, a condição de parada é o programa estar pronto para parar, como descrito no bloco 1.

Assim que a comunicação serial é iniciada, o ManoAir-500 passa a enviar as suas medidas automaticamente, ou seja, sem que o programa necessite solicitar tais medidas. Estas chegam ao buffer de entrada na forma de uma linha de texto, ou “string”, a uma taxa de 2 amostras por segundo.

Este bloco irá aguardar a chegada de um “fim de linha” (caractere ASCII *NL*, 0x0A), para então ler a string armazenada no buffer de entrada. A string contém as medidas de pressão diferencial, pressão absoluta, temperatura e umidade relativa, e passa por uma subrotina que a interpreta para que sejam extraídos dela os valores numéricos e suas unidades.

3. Bloco de Teste de Velocidade Estável:

Também construído em uma estrutura “while loop”, recebe as amostras de velocidade do ar e apresenta um gráfico na aba “Medidas” com os seus últimos 60 segundos. A condição de parada é a mesma do bloco 1.

A Rede MEASNET propõe o seguinte teste para que o operador garanta que a velocidade do ar está estável antes de iniciar uma aquisição: dois intervalos sucessivos de 30s devem apresentar menos de 0,05m/s de diferença entre suas velocidades médias. Este teste também é realizado neste bloco e seu resultado aciona o indicador luminoso “Velocidade Estável”, na aba “Medidas”.

4. Bloco de Registro:

Também construído em uma estrutura “while loop”, este bloco é executado quando o operador pressiona o botão *ADQUIRIR*, na tela principal. Sua função principal é registrar as medidas de pressão diferencial, pressão absoluta, temperatura e umidade recebidas do ManoAir-500 e da frequência atual do inversor. Este bloco monitora a execução do bloco de aquisição para registrar as novas amostras assim que forem recebidas, na forma de uma tabela. Para cada amostra, uma nova linha é adicionada ao registro final.

Duas condições podem encerrar a sua execução: caso o operador pressione o botão PARAR, ou a quantidade de dados registrados seja suficiente – o que significa que o período de aquisição selecionado foi atingido e as amostras chegaram corretamente. Caso o programa receba amostras inválidas - com medidas fora das faixas aceitáveis, ou com unidades incorretas - estas são descartadas e é adicionada uma linha de zeros ao registro. A aquisição somente encerra quando a quantidade necessária de amostras válidas é recebida, ainda que isto ocorra após o fim do período de aquisição selecionado.

5. Bloco de Médias e Organização dos Dados:

Este bloco não é construído dentro de uma estrutura, pois ele é executado uma única vez logo após o bloco de registro; e todas as suas funções podem operar simultaneamente. O histórico de valores das diversas medidas será concatenado em uma única tabela e apresentado na aba “Resultados”. De cada uma destas medidas também será extraída a média aritmética, considerando apenas as amostras válidas. Todos estes dados são então repassados ao bloco de Geração do Arquivo de Registro.

6. Bloco de Geração do Arquivo de Registro:

A execução deste bloco é condicionada ao botão GRAVAR DADOS, da aba “Resultados”. Uma estrutura “flat sequence” é utilizada para que os dados sejam gravados na ordem desejada. Em primeiro lugar, o arquivo é gerado com o cabeçalho, data, hora e nome do operador, seguidos das médias calculadas pelo bloco 5. Em seguida, é adicionada ao arquivo a tabela com todos os dados adquiridos.

Além do nome selecionado pelo operador na aba “Resultados”, o programa adiciona automaticamente a data, a hora e a extensão “.lac”, o que torna praticamente impossível que um arquivo de registro seja sobrescrito. Além de não modificar o nome do arquivo, operador teria de realizar duas aquisições durante o mesmo minuto, para que os dados fossem gravados no mesmo arquivo.

7. Bloco de Comunicação com o Inversor:

Foi construído em uma estrutura “while loop”, e é executado logo no início do programa. Diferentemente do ManoAir-500, o inversor não envia dados automaticamente. A cada ciclo da comunicação o programa deve enviar um telegrama de escrita ou de leitura, que são sequências padronizadas de caracteres ASCII, aguardar até que o inversor processe este telegrama, e então ler os dados recebidos no buffer de entrada. Esta execução passo-a-passo é implementada por uma estrutura “flat sequence”. Um pequeno “while loop” com um cronômetro garante que o intervalo mínimo entre os envios de dois telegramas seja respeitado.

Foram programados 11 estados da comunicação, ou seja, 11 tipos de telegramas para a troca de dados entre o *Velocidade do Ar – Automático* e o inversor. As funções dos blocos 8, 9 e 10 irão definir o estado atual, através da variável “Estado da Comunicação”. Uma estrutura do tipo “case” irá selecionar e preparar o telegrama adequado para enviar ao inversor, de acordo com o valor dessa variável. Os 11 estados da comunicação são descritos a seguir:

1 – Modelo?

Telegrama de leitura que solicita o modelo do inversor, para confirmar que esteja conectado.

2 – Desabilitar!

Telegrama de escrita que coloca o inversor no modo “Ready”, ou seja, desabilita o estágio de saída de potência do inversor.

3 – Ajustar F!

Telegrama de escrita que envia a referência de frequência para o inversor. Esta frequência pode ser ajustada manualmente pelo usuário, ou vir do resultado do bloco de controle.

4 – Frequência atual?

Telegrama de leitura que solicita a frequência atual, para confirmar que seja a desejada pelo operador.

5 – Corrente?

Telegrama de leitura que solicita a corrente de saída atual, para monitoração.

6 – Tensão Vcc?

Telegrama de leitura que solicita a tensão contínua atual, para monitoração.

7 – Tensão Vo?

Telegrama de leitura que solicita a tensão de saída atual, para monitoração.

8 – Potencia Po?

Telegrama de leitura que solicita a potência de saída atual, para monitoração.

9 – Hora habilitado?

Telegrama de leitura que solicita o tempo durante o qual inversor esteve habilitado, para controle de manutenção deste e do motor.

10 – Habilitar!

Telegrama de escrita que coloca o inversor no modo “Run”, ou seja, habilita o estágio de saída de potência do inversor.

11 – Estado do inversor?

Telegrama de leitura que solicita o modo de operação em que se encontra inversor e o sentido de rotação. O modo pode ser Habilitado - “Run”, Desabilitado - “Ready” ou Subtensão - “Sub”. O sentido de rotação é apresentado apenas por segurança, uma vez o túnel precisa que o vento desloque-se sempre no mesmo sentido. O parâmetro de configuração correspondente foi bloqueado no valor “horário”.

A resposta do inversor passa por uma estrutura “flat sequence” para que seja interpretada. Cada passo irá avaliar um segmento do telegrama recebido, conforme o exposto a seguir:

- Erro?

Uma mensagem válida é sempre iniciada pelo endereço do inversor na rede. Como este sistema tem um único inversor, a mensagem deve começar pelo endereço A (caractere ASCII A, 0x0A), ou será descartada. Atualiza o indicador luminoso “Erro String”

- ACK / NAK?

Após receber um telegrama de escrita, o inversor irá responder *Acknowledge* (caractere ASCII ACK, 0x06), caso a ordem seja aceita, ou *Not-Acknowledge* (caractere ASCII NAK, 0x15), caso seja rejeitada. Atualiza os indicadores luminosos “ACK” e “NAK”.

- Modelo Correto?

Confirma o modelo do inversor para garantir que esteja conectado. Atualiza o indicador luminoso “Conectado”.

- Estado?

Atualiza os indicadores luminosos “Habilitado” e “Sentido Horário”.

- Atualiza indicador.

Atualiza os indicadores analógicos Rotação, Corrente, Tensão CC, Tensão de Saída e Potência de Saída.

8. Bloco de Mensagens de Inicialização do Inversor:

Uma estrutura “flat sequence” é executada ao início do programa, para definir uma sequência de estados da comunicação que consulta se o inversor está conectado e faz parar o motor. Este bloco é executado uma única vez, então o inversor já deve estar conectado ao computador no momento em que o operador inicia o programa. Caso o operador pressione o botão PARAR, os passos que ainda não tenham sido executados são cancelados, inclusive os dos blocos 9 e 10. Neste bloco, são selecionados os seguintes estados de comunicação:

- 1 – Modelo?
- 2 – Desabilitar!
- 3 – Ajustar F! (= 0Hz)
- 9 – Hora habilitado?

9. Bloco de Mensagens Trocadas a Cada Ciclo:

Durante a operação do inversor é necessário que se atualizem os indicadores analógicos e que se envie a referência de frequência constantemente. Para isto foi empregada uma estrutura “While loop”, que será repetida até que o programa esteja pronto para parar. Este “While loop” contém uma estrutura “Flat sequence” com os passos necessários a estas atualizações, ou seja, o estado da comunicação correspondente a cada medida que se deseja atualizar.

Caso o operador pressione o botão PARAR, os passos que ainda não tenham sido executados são cancelados, inclusive os do bloco 10. Foi criada uma função

do tipo WatchDog para garantir que o programa não fique trancado em um determinado passo deste bloco, o que poderia ocorrer em caso de falha na comunicação serial. A cada ciclo, são selecionados os seguintes estados de comunicação:

3 – Ajustar $F!$ ($= F_i$)

11 – Estado do inversor?

4 – Frequência atual?

10 – Habilitar! / **2** – Desabilitar! (conforme estado atual e F_i)

5 – Corrente?

6 – Tensão V_{cc} ?

7 – Tensão V_o ?

8 – Potencia P_o ?

10. Bloco de Mensagens de Encerramento do Inversor:

Uma estrutura “flat sequence” é executada ao final do programa, para definir uma sequência de estados da comunicação que faz parar o motor e desabilita o inversor. Neste bloco, são selecionados os seguintes estados de comunicação:

3 – Ajustar $F!$ ($= 0\text{Hz}$)

2 – Desabilitar!

Ao final, o indicador luminoso “Finalizado” é ligado para indicar que o inversor já encerrou sua operação.

11. Bloco do Controlador PID:

O bloco de controle foi construído dentro do mesmo “While Loop” do bloco de aquisição do ManoAir-500, para garantir que operem na mesma base de tempo. A

função principal deste bloco é executar o cálculo da próxima frequência F_i que será enviada ao inversor, a partir da equação da rotina controle PID que será apresentada no item 4.4.

Para facilitar a depuração do programa, dois gráficos são apresentados ao operador/programador: um com a evolução de cada ação de controle (P , I e D) e outro com a velocidade atual (V_{atual}), a velocidade de referência (V_{ref}) e a próxima frequência do inversor (F_i).

O botão AUTO condiciona a execução desta rotina: caso não esteja pressionado, a variável erro irá receber o valor 0 e a próxima frequência calculada não será enviada para o inversor. Foi implementada uma função “anti-windup” para evitar que a ação integral acumulasse um valor negativo muito grande quando fosse selecionado $V_{ref} = 0$. Também foi implementado um mecanismo que limita a frequência enviada ao inversor ao valor F_{max} , por segurança.

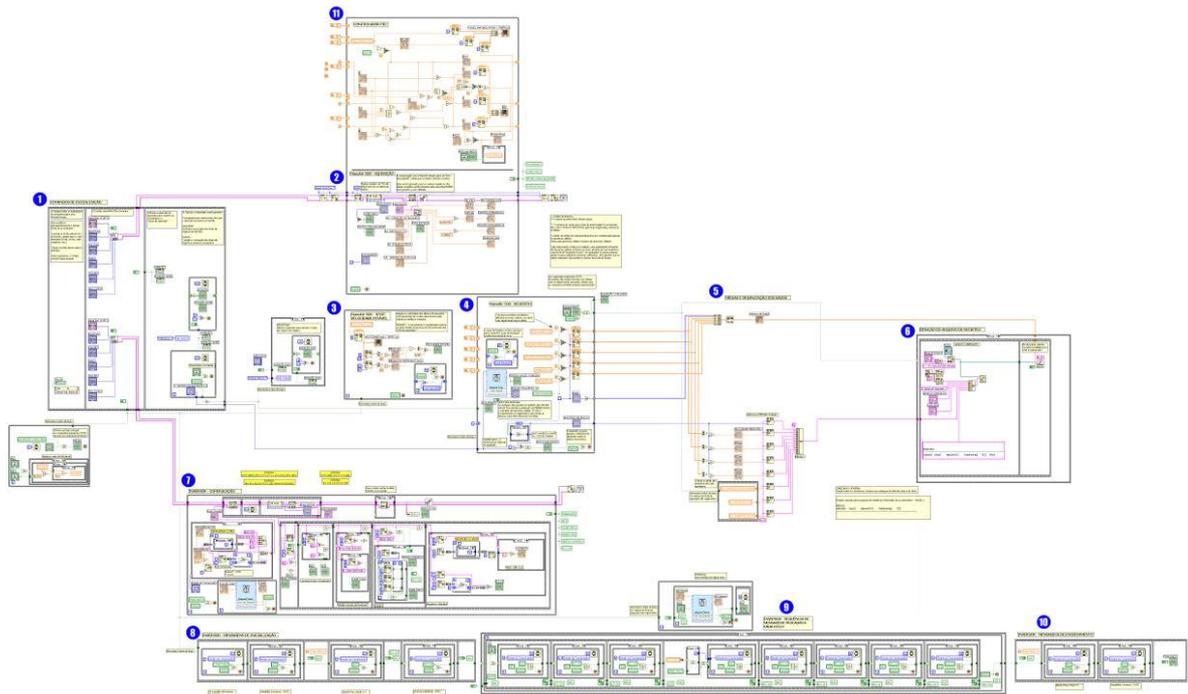


Figura 29: diagrama de blocos do Velocidade do Ar - Automático⁹.

4.3 MODELO DO TÚNEL DE VENTO

Conforme descrito no item 4.2.4, deseja-se que o sistema de controle da velocidade do ar seja capaz de gerar sinais de controle (F_i) que levem a velocidade do ar (V_{atual}) a seguir uma velocidade de referência (V_{ref}) selecionada pelo operador. Para que seja possível gerar estes sinais, é necessário que se conheça o comportamento do processo, ou seja, obter um modelo matemático que descreva a relação entre sua entrada e sua saída. De posse deste modelo, também chamado de função de transferência ($G(s)$), é possível realizar-se simulações utilizando ferramentas como as oferecidas no pacote de Sistemas de Controle do Matlab. Estas simulações servem como uma estimativa do comportamento do sistema real, permitem ajustar os parâmetros do controlador e realizar ensaios virtuais, o que facilita em muito o projeto do controlador.

⁹ Uma cópia ampliada desta figura encontra-se no final deste documento.

De acordo com Souza (2010, p.5), existem duas abordagens para a obtenção destes modelos matemáticos: sistemas mais simples podem ser modelados com base na física do processo, a partir das leis da natureza que regem o seu comportamento. Esta abordagem tem a vantagem de que os parâmetros do modelo têm significado físico, mas a complexidade do modelo pode ser impeditiva para sistemas com muitos componentes. A segunda abordagem a obtenção de um modelo baseado apenas na relação entrada-saída do processo, a partir de ensaios adequados. Para estes modelos, chamados de “black-box”, os parâmetros não têm significado físico. Deve-se procurar entre um conjunto de modelos padronizados (candidatos) o que melhor se ajusta aos dados observados.

4.3.1 Considerações iniciais sobre a modelagem do Túnel de Vento

De acordo com o exposto por Souza (2010, p.5), o comportamento do Túnel de Vento pode ser considerado um sistema bastante complexo e deve ser obtido pela abordagem “black-box”. Não é possível prever de antemão qual será a velocidade do ar a partir da frequência ajustada no inversor, pois esta depende de diversos fatores, como por exemplo:

Comportamento do inversor (rampa de subida/descida);

Características elétricas e mecânicas do motor;

Características aerodinâmicas da hélice;

Características aerodinâmicas do túnel em si (forma, seção, simuladores);

Características aerodinâmicas dos modelos/anemômetros instalados no TV;

Características dos instrumentos de medida da velocidade do ar.

Condições ambientais.

A maioria destes fatores que influenciam na resposta do túnel é constante, ou ao menos mensurável e terá sua influência considerada automaticamente no momento da

realização dos ensaios para a obtenção do modelo. Exceção a esta regra é a presença de qualquer objeto no interior do TV, como modelos ou anemômetros para calibração, que irá causar algum bloqueio à passagem do ar, de acordo com suas dimensões. Esta influência não é constante, e será avaliada, pois pode ser significativa. A Figura 30 exemplifica esta situação com um anemômetro de conchas e um modelo seccional de ponte e instalados no TV.



Figura 30: exemplos de objetos de diferentes dimensões instalados no TV.

4.3.2 Modelo candidato

Por envolver a movimentação de uma grande massa de ar, uma mudança na frequência do inversor irá levar alguns segundos até se refletir em efetiva variação da velocidade do ar, o que caracteriza um atraso de transporte. Ao se aplicar esta mudança na frequência, a resposta do túnel apresenta uma forma conhecida como “curva S”, como a que é mostrada na Figura 31.

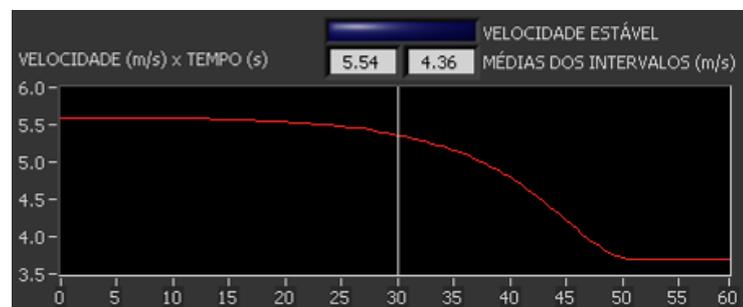


Figura 31: resposta do TV a uma mudança na frequência do motor.

De acordo com Souza (2010, p. 43), este tipo de comportamento é típico dos sistemas de segunda ordem sobreamortecidos. A equação 2, proposta por Souza (2010, p. 42) é uma

função de transferência que representa um sistema sobreamortecido de segunda ordem com atraso de transporte e será, por tanto, utilizada como modelo candidato para o TV.

$$G(s) = \frac{e^{-\tau_d s}}{(\tau_1 s + 1)(\tau_2 s + 1)} \quad (3)$$

4.3.3 Identificação dos parâmetros do modelo

Uma vez proposta a forma o modelo, a próxima etapa é chamada de identificação, e consiste na realização de ensaios para obter valores numéricos para os parâmetros do modelo. Souza (2010, p. 42) propõe que os parâmetros τ_1 , τ_2 e τ_d sejam obtidos a partir de um ensaio em malha aberta, ou seja, sem realimentação, conhecido como “degrau”, ou “salto”, que consiste em aplicar uma variação instantânea na variável manipulada. Este ensaio é bastante conveniente, tanto por sua simples realização, quanto por representar a operação típica do TV, em que o operador simplesmente seleciona o valor da frequência e aguarda até que a velocidade do ar estabilize.

Foram realizados dois ensaios em malha aberta: um com o TV livre e outro com um anemômetro de conchas instalado. Em ambos foi aplicado um salto de frequência de 0 a 16Hz, Esta amplitude é grande o suficiente para que a variação na velocidade do ar supere em muito o ruído de medida, e também resulta em uma velocidade final próxima dos 16m/s, que é a velocidade máxima utilizada na calibração de anemômetros de conchas. A partir dos dados obtidos nestes foram criados dois modelos para o TV: $G_{Livre}(s)$ e $G_{Anem}(s)$.

Os resultados dos dois ensaios podem ser vistos na visto na Figura 32, bem como o salto de frequência que foi aplicado no inversor no instante $t=10s$. O comportamento do túnel foi muito semelhante nos dois casos, como era esperado, uma vez que a área bloqueada pela presença do anemômetro é muito pequena em relação à seção do TV. Nota-se que o ganho

estático do processo, definido como $G(0) = \frac{v_{final}}{F_{final}}$, ficou muito próximo de 1 nos dois casos,

com uma diferença inferior a 5%.

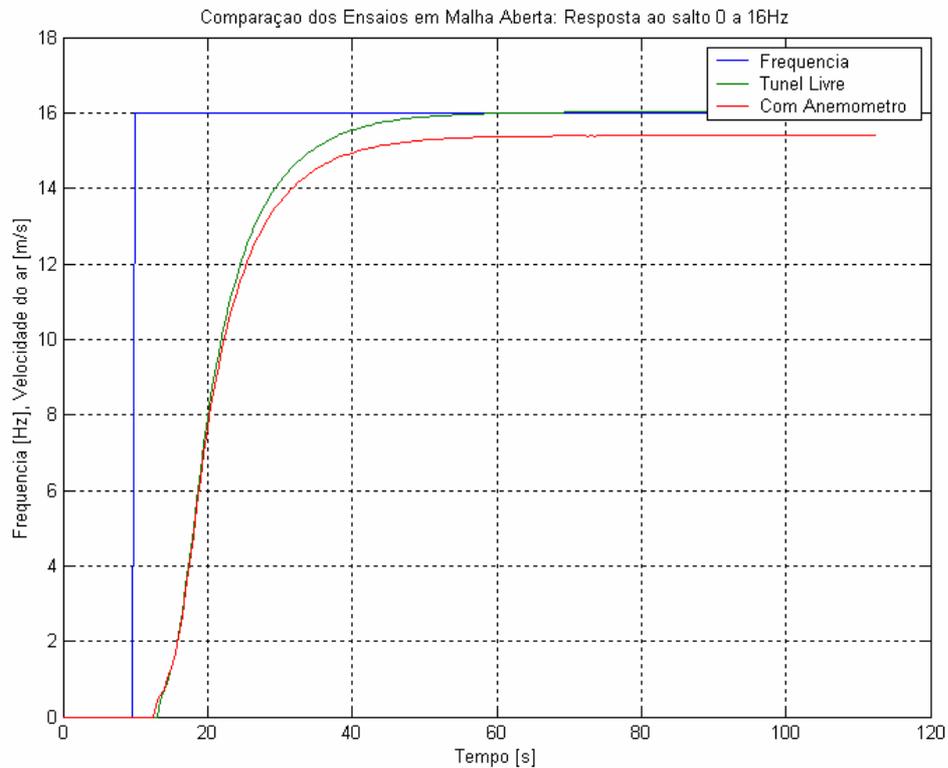


Figura 32: ensaios em Malha Aberta: Resposta ao salto de 0 a 16Hz.

A literatura consultada: (BAZANELLA E SILVA JR, 2005), (OGATA, 1998), e (LJUNG, 1999) somente descreve métodos para a identificação de parâmetros para sistemas de segunda ordem do tipo subamortecido. Estes sistemas possuem um par de pólos complexos conjugados e apresentam resposta oscilatória, o que não é o caso do TV. Para sistemas sem oscilações, mencionam que podem ser aproximados por sistemas de primeira ordem caso haja um pólo dominante, ou seja, um pólo negativo com a parte real pelo menos 5 vezes menor que a do outro, o que não pode ser garantido de antemão. Souza (2010, p. 44) propõe um procedimento para a identificação dos parâmetros de sistemas de segunda-ordem

sobreamortecidos, que foi adotado na obtenção dos modelos. O caso do modelo para o Túnel Livre ($G_{Livre}(s)$) será descrito a seguir, por entender-se ser mais abrangente.

A Figura 33 auxilia na compreensão do significado dos parâmetros extraídos destes ensaios. A área em verde é dada por:

$$m_1 = \int_0^{\infty} (1 - v(t)) dt \quad (4)$$

A área sombreada m_1 está relacionada com a função de transferência $G_{Livre}(s)$ por

$$m_1 = \tau_1 + \tau_2 + \tau_d \quad (5)$$

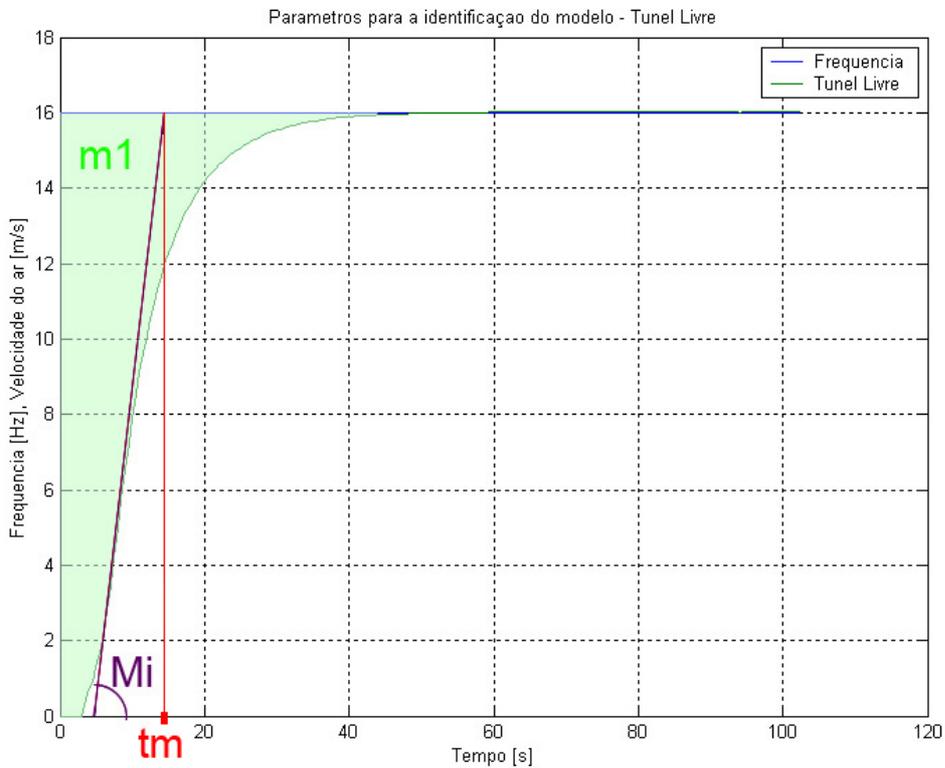


Figura 33: parâmetros para a identificação do modelo – Túnel Livre.

M_i corresponde à inclinação da reta que tangencia a curva no ponto de inflexão

$$M_i = \frac{\eta^{1/(1-\eta)}}{\alpha(\eta - 1)} \quad (6)$$

Onde $\eta = \tau_1 / \tau_2$ e $\alpha = \tau_1 \tau_2 / (\tau_1 - \tau_2)$.

t_m corresponde ao o instante em que esta reta tangente intercepta o valor final de $v(t)$ e é dado por

$$t_m = \tau_d + \alpha \left[\ln \eta + \frac{\eta^2 - 1}{\alpha(\eta - 1)} \right] \quad (7)$$

Combinando as equações 8, 9 e 10, obtém-se

$$M_i(t_m - m_1) = \frac{\eta^{1/(1-\eta)}}{\eta - 1} \ln \eta \quad (11)$$

Substituindo η por $1/\eta$, o que não altera a equação, e fazendo $\lambda = M_i(t_m - m_1)$ e

$\chi = \frac{\ln \eta}{\eta - 1}$, a equação 12 pode ser reescrita na forma

$$\lambda = \chi \ln^{-\chi} \quad (13)$$

Finalmente, pode-se calcular τ_1 , τ_2 e τ_d como segue

$$\tau_1 = \frac{\frac{\eta}{\eta^{1-\eta}}}{M_i} \quad (14)$$

$$\tau_2 = \frac{\frac{\eta}{\eta^{1-\eta}}}{M_i} \quad (15)$$

$$\tau_d = m_1 - \tau_1 - \tau_2 \quad (16)$$

Souza (2010, p. 45) propõe um procedimento para o cálculo destes parâmetros utilizando o Matlab, que foi ajustado para este caso e deu origem ao programa *identifica.m* cujo código é apresentado a seguir:

```

%%%%% INÍCIO DO CÓDIGO %%%%%
clear all
close all
%Parametros conhecidos do sistema:
Yfinal = 1; %Valor final da saida
KG=1.000982 %Ganho estatico
R=1 %Amplitude do salto
% Carrega os dados de ensaio
y = xlsread('vazio0a16norm.xls');
t = xlsread('T.xls');

m1=0; %condição inicial de integração
deltat=t(2)-t(1); %variação do vetor tempo
% Cálculo da área m1=1-y(t)
for i=1:(size(y,1)),
m1=m1+((Yfinal-y(i,1))/Yfinal)*deltat;
end
m1
% Cálculo do ponto de inflexão
difmax=0;
for i=2:length(y)-1,
dif(i)=y(i+1)-y(i);
if dif(i)>difmax,
difmax=dif(i);
Y0=y(i);
T0=t(i);
end
end
difmax

% Inclinação da reta tangente ao ponto de inflexão
Mi=(difmax/deltat)
% Projeção no eixo de tempo do ponto no qual a reta tangente
%intercepta uma linha correspondente ao valor do ganho
tm=((Yfinal-Y0)/Mi)+T0
% Cálculo do parâmetro lambda
lambda=(tm-m1)*Mi/R

% O parâmetro eta é estimado de acordo com o gráfico resultante
%da resolução da equação:
%
% lambda=chi*exp(-chi),
%
%onde lambda=chi*exp(-chi) e chi=ln(eta)/(eta-1)
eta=[0.01:0.01:1];
%chi=log(eta)/(eta-1)
a=log(eta);
chi=a./(eta-1); %divisão ponto a ponto
lambda=chi.*exp(-chi); %multiplicação ponto a ponto

figure(2);
plot(lambda,eta);
title('Gráfico eta x lambda');
xlabel('lambda');ylabel('eta');grid;

```

```

% Parâmetro eta estimado "etaest"
etaest=0.21; % <---Preencher de acordo com o gráfico!!!

% Cálculo das constantes de tempo e do atraso teta
tau1=(etaest^(etaest/(1-etaest)))/Mi
tau2=(etaest^(1/(1-etaest)))/Mi
teta=m1-tau1-tau2
% Modelo obtido
n1=[1];d1=[tau1 1];
n2=[1];d2=[tau2 1];
[num,den]=series(n1,d1,n2,d2);
% Aproximação de Padé (para representar o atraso de tempo)
g=3; %grau do polinômio
[np,dp]=pade(teta,g);
% Modelo obtido + Aproximação de Padé
[n,d]=series(num,den,np,dp);
% Resposta ao degrau do sistema original
figure(1);
plot(t,y);
hold;
% Resposta ao degrau do modelo obtido
[ys,x,t]=step(n,d);
plot(t,ys,'g');
title('Comparação Ensaio Malha Aberta x Modelo Obtido');
legend('Dados do Ensaio','Modelo',0);
xlabel('Tempo [s]');ylabel('Velocidade do Ar [m/s]');grid;
%%%% %%%% FINAL DO CÓDIGO %%%% %%%%

```

Este programa deve ser executado no mínimo duas vezes: Na primeira o usuário lê o valor de λ e estima o valor do parâmetro η a partir primeiro gráfico gerado pelo programa, como mostra a Figura 34. O valor de η é ajustado no código do programa (variável “etaest”) e então ele é executado uma segunda vez.

Antes de serem lidos pela rotina, os valores dos dados dos ensaios foram normalizados, (divididos pelos respectivos valores de v_{final}). No ensaio com o túnel livre, $v_{final} = 16,02\text{m/s}$, e com o anemômetro, $v_{final} = 15,40\text{m/s}$. O programa cria uma função de transferência sem o atraso de transporte (variáveis $\frac{num}{den}$) e, em seguida, uma segunda versão que representa este atraso através da aproximação de Pade, o que acrescenta 4 pólos e 4 zeros à função de transferência (variáveis $\frac{n}{d}$).

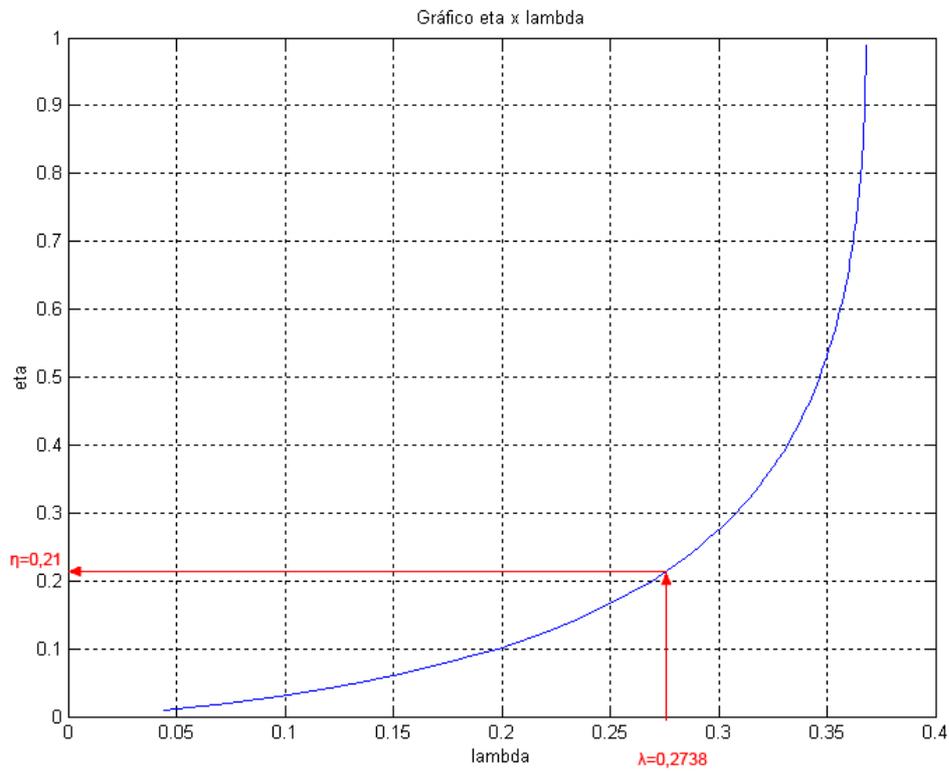


Figura 34: gráfico utilizado para estimar eta (η).

Ao final da segunda execução do programa, é gerado o gráfico da Figura 35, em que o modelo calculado (com atraso) é submetido a uma entrada do tipo salto e sua saída é comparada aos dados do ensaio em malha aberta, para validação. Pode-se notar por esta figura que o modelo obtido representa uma boa aproximação para o comportamento do TV.

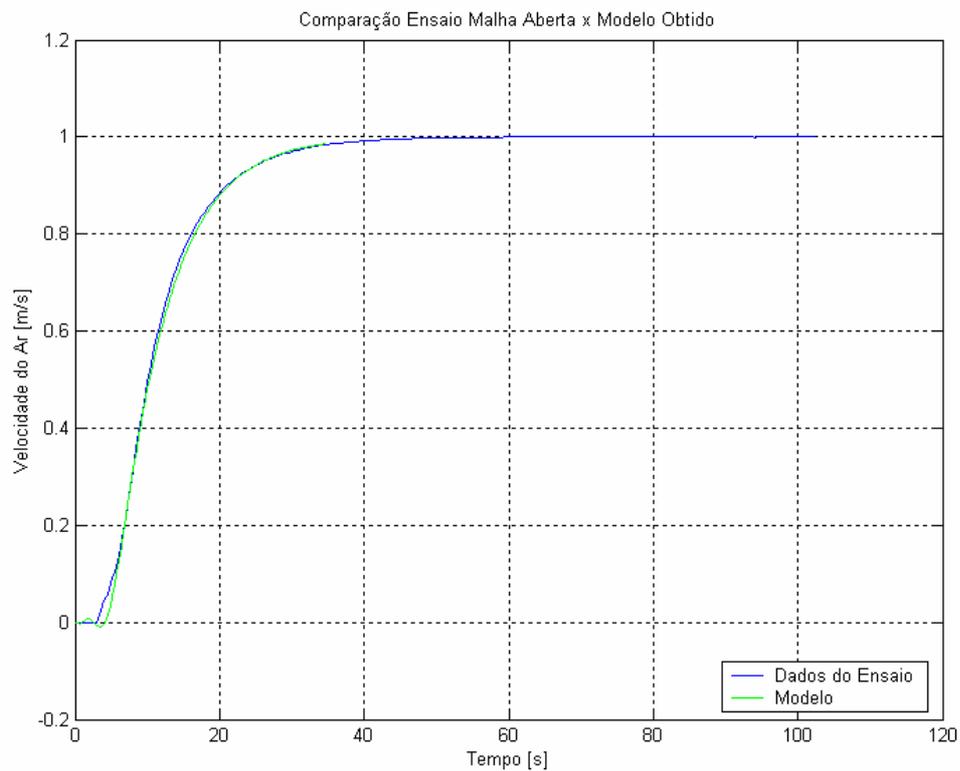


Figura 35: comparação dos dados de ensaio com os do modelo.

As funções de transferência obtidas para as duas situações testadas foram as seguintes:

$$G_{Livre}(s) = \frac{1,0010 \cdot e^{-4,0313s}}{(6,8050s + 1)(11,4291s + 1)} = \frac{0,10293 \cdot e^{-4,0313s}}{(s + 0,6998)(s + 0,147)} \quad (17)$$

$$G_{Anem}(s) = \frac{0,9625 \cdot e^{-4,041s}}{(6,8341s + 1)(1,3668s + 1)} = \frac{0,10304 \cdot e^{-4,0541s}}{(s + 0,7316)(s + 0,1463)} \quad (18)$$

Como era esperado, estas funções de transferência são muito semelhantes, inclusive no atraso de transporte representado por $e^{-4,0313s}$ e na posição do pólo mais lento, próximo a $s = -0,147$.

4.3.4 Validação do modelo

Segundo Bazanella e Silva Jr (2005, p.114) não é correto validar um modelo apenas observando a resposta à excitação que o gerou, então foi realizada uma segundo ensaio em

malha aberta, desta vez para produzir uma sequência de 11 saltos de amplitude 2Hz, entre 0 e 22Hz, sendo um salto a cada 100segundos. Não haveria sentido em validar o modelo a partir de outro tipo de sinal que não o “salto”, como por exemplo uma senóide, tendo em vista que os ensaios realizados no TV sempre utilizam velocidades de referência constantes.

Para a simulação das respostas dos modelos, foi utilizada a ferramenta “Simulink”, que faz parte do conjunto de ferramentas de sistemas de controle do Matlab. Esta é uma ferramenta gráfica que simplifica em muito a simulação deste tipo de sistema, além de permitir maior precisão no efeito do atraso de transporte. O Simulink possui um bloco “transport delay” específico para este fim, e não precisa utilizar a aproximação de Pade. O arranjo criado no Simulink para simular os ensaios em malha aberta e validar o modelo $G_{Livre}(s)$ é mostrado na Figura 36.

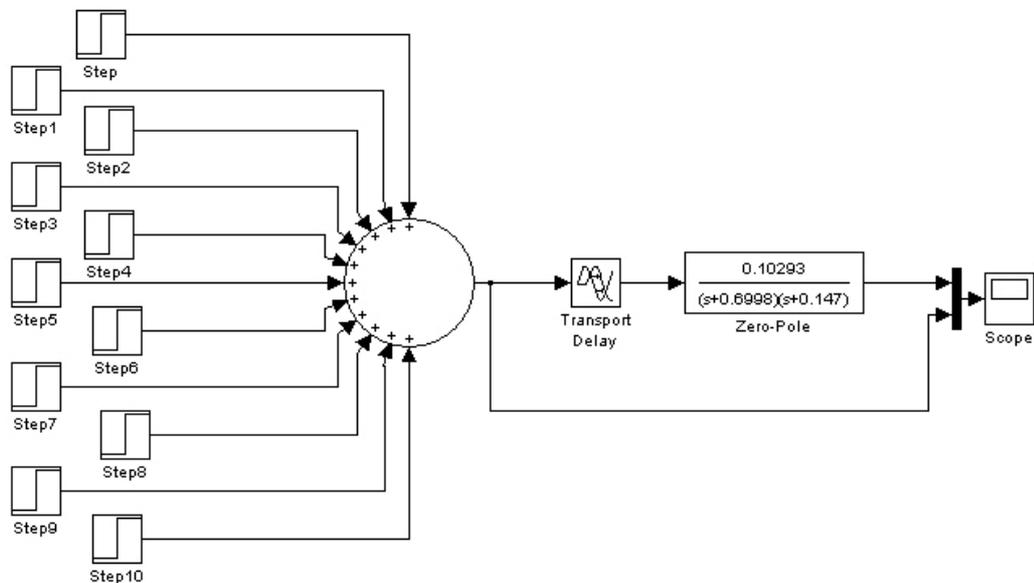


Figura 36: diagrama utilizado na validação do modelo do TV - Livre.

O resultado desta simulação é apresentado na Figura 37, onde pode-se notar que o modelo realmente segue o comportamento do processo real. Nota-se que o comportamento do modelo simulado é mais preciso para os valores próximos dos 16m/s, pois esta é a velocidade

final do ensaio a partir do qual o modelo foi gerado. O mesmo tipo de validação foi aplicado ao modelo $G_{Anem}(s)$, com resultados muito semelhantes.

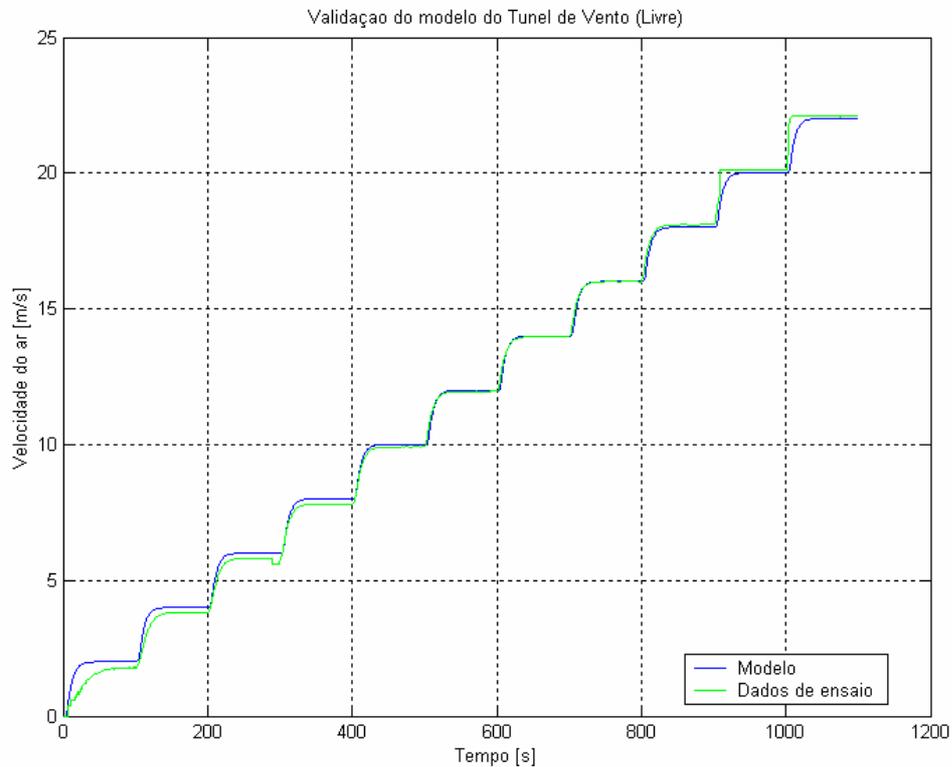


Figura 37: validação do modelo do TV - Livre.

4.4 PROJETO DO BLOCO DE CONTROLE

Conforme apresentado no item 4.1, a função do bloco de controle deste sistema é calcular o valor do sinal de controle F_i a cada instante, e deve fazê-lo de maneira a garantir que a velocidade do ar não oscile ou aumente perigosamente. Vale ressaltar que um ajuste inadequado do controlador, que resulte em oscilações crescentes na velocidade, poderia levar à destruição de alguns dos modelos testados no túnel, o que evidentemente seria inaceitável.

4.4.1 Ações básicas de controle

Segundo Bazanella e Silva Jr (2005, p. 32) *ação de controle* é o nome dado às operações matemáticas realizadas pelo controlador. Existem três tipos básicos de ações de

controle que, sozinhas ou combinadas entre si, são suficientes para controlar grande parte dos processos utilizados comumente na indústria. São elas: *Ação Proporcional*, *Ação Integral* e *Ação Derivativa*.

- **Ação Proporcional:** O sinal de controle será proporcional à amplitude instantânea do sinal de erro. Quanto maior o ganho K , mais rápida será a resposta do sistema e menor será o erro em regime permanente, ainda que este erro nunca chegue a zero com o controle proporcional puro. Um aumento excessivo no ganho também pode levar o sistema à instabilidade.

$$u(t) = Ke(t) \quad (19)$$

- **Ação Integral:** O sinal de controle será proporcional à integral do sinal de erro, ou seja, depende dos valores anteriores do erro. Para uma referência constante, esta ação irá ajustar o valor de $u(t)$ até que o erro seja zerado.

$$u(t) = \frac{1}{T_i} \int_0^t e(\tau) d\tau \quad (20)$$

A função de transferência da ação integral é apresentada abaixo. Ela irá acrescentar um pólo na origem, o que leva o sistema responder mais lentamente e menos estável, motivo pelo qual esta ação não é aplicada de maneira isolada.

$$C(s) = \frac{u(s)}{e(s)} = \frac{1}{sT_i} \quad (21)$$

- **Ação Derivativa:** O sinal de controle será proporcional à derivada do sinal de erro. Esta ação baseia-se em uma estimativa do próximo valor de erro, ou seja, é dita como uma ação preditiva. Esta ação não é utilizada isolada, uma vez que

os sinais de alta frequência como ruídos elétricos gerariam sinais de controle de grande amplitude.

$$u(t) = T_d \frac{de(t)}{dt} \quad (22)$$

A função de transferência da ação derivativa utilizada na prática é apresentada abaixo. Nota-se que além do zero do controlador, foi introduzido um pólo (p) para atenuar a resposta às altas frequências e permitir que a equação seja implementável.

$$C(s) = \frac{u(s)}{e(s)} = T_d \frac{s}{s + p} \quad (23)$$

-
- **Controlador PID:** Uma das combinações mais comuns entre estas ações de controle é a reunião das três em um controlador chamado PID. Este controlador reúne as qualidades das três ações básicas para calcular um único sinal de controle. Um sistema controlado por um PID irá reagir rapidamente às variações na referência, devido à ação proporcional, seguir referências constantes com erro nulo, devido à ação integral, e antecipar o comportamento do processo, devido à ação derivativa. Conforme Bazanella e Silva Jr (2005, p.49), a equação que calcula o sinal de controle PID e sua função de transferência são respectivamente:

$$u(t) = K \left(e(t) + \frac{1}{T_i} \int_0^t e(\tau) d\tau + T_d \frac{de(t)}{dt} \right) \quad (24)$$

$$C(s) = \frac{u(s)}{e(s)} = K \left(1 + \frac{1}{T_i s} + T_d \frac{p \cdot s}{s + p} \right) \quad (25)$$

$$= K \left(\frac{(s + z_1)(s + z_2)}{s(s + p)} \right) \quad (26)$$

4.4.2 Ferramenta utilizada - *rltool*

Para simplificar o projeto do bloco de controle, foi utilizada uma ferramenta de simulação chamada *rltool*, que também faz parte do pacote de Sistemas de Controle do Matlab. Esta é uma ferramenta gráfica que permite visualizar a posição dos pólos e zeros da função de transferência do sistema $T(s)$ sobre o plano complexo, e também do *lugar das raízes* (ou root locus).

Ao fechar a malha de realimentação do sistema, as posições dos seus pólos irão se deslocar em relação às posições dos pólos das funções de transferência $C(s)$ e $G(s)$. O lugar das raízes é o conjunto de posições do plano complexo que podem ser assumidas por estes pólos de T ao se fazer variar um determinado parâmetro. Por exemplo, um sistema hipotético com $C(s) = K$ e $G(s) = \frac{1}{s+1}$ terá a seguinte função de transferência: $T(s) = \frac{K}{s+2}$. Ao fazer variar o ganho K de 0 a ∞ , a posição do pólo do sistema em malha fechada irá se deslocar desde em $s=-1$, a posição original do pólo de G em malha aberta, até $s=-\infty$. A Figura 38 apresenta a tela do *rltool* para este sistema. A ferramenta representa os pólos e os zeros do por “x” e “o”, respectivamente. As singularidades do processo são marcadas na cor azul e são fixas, uma vez que normalmente não é possível alterar o comportamento dele, enquanto as do controlador são marcadas em vermelho e podem ser deslocadas com o mouse. O lugar das raízes é representado por linhas azuis e a posição dos pólos em malha fechada por quadros cor-de-rosa, que também podem ser deslocados com o mouse.

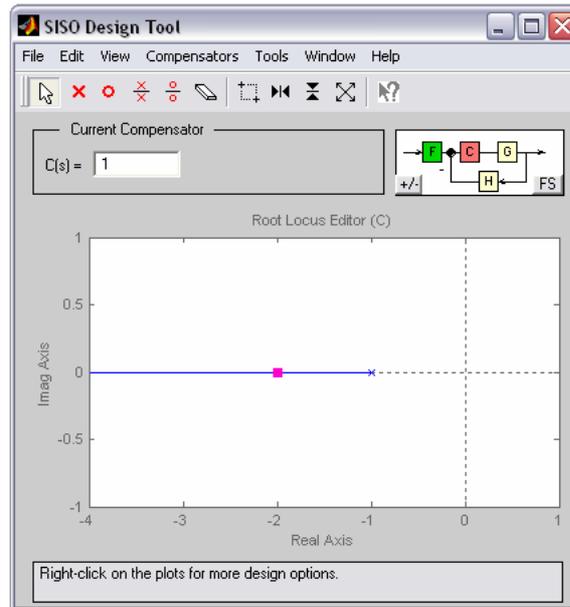


Figura 38: tela da ferramenta rtool.

4.4.3 Projeto do controlador

O projeto deste controlador foi feito a partir das ações básicas de controle apresentadas na item 4.4.1, da função de transferência do Túnel de Vento $G_{Livre}(s)$ obtida no item 4.3, e do desempenho desejado para o sistema:

- Seguimento de referência constante com erro nulo em regime permanente ($e_{RP} = 0$);
- Tempo de acomodação $t_s \leq 20s$;
- Máximo sobrepasso $M_o \leq 10\%$.

Optou-se por utilizar o modelo do TV livre, ao invés do modelo com anemômetro, por se entender que representa uma situação mais genérica, e que estes dois modelos são muito semelhantes.

A posição dos pólos dessa função de transferência $G_{Livre}(s)$ irá determinar a complexidade do controlador necessário. Um processo que já possua um pólo em $s=0$ em sua função de transferência será capaz de seguir referências constantes com um simples controlador Proporcional. Caso o processo não possua o pólo em zero, será necessário

adicionar a ação de controle Integral para eliminar o erro em regime permanente, ou seja, utilizar um controlador PI. Conforme o desempenho transitório desejado, pode ser necessário adicionar também a ação Derivativa, para diminuir o tempo de acomodação do sistema.

A função de transferência do Túnel de Vento,

$$G_{Livre}(s) = \frac{0,10293 \cdot e^{-4,0313s}}{(s + 0,6998)(s + 0,147)}$$

não possui o pólo em $s=0$ e por tanto necessita, no mínimo, de um controlador do tipo PI. Utilizando-se a ferramenta rltool, não foi encontrada nenhuma configuração de ganho K e tempo integral T_i que satisfizesse o desempenho transitório desejado, o que leva à necessidade de se utilizar um controlador do tipo PID. A representação do $G_{Livre}(s)$ pela ferramenta rltool é apresentada na Figura 39, considerando-se $C(s) = 1$. Pode-se notar os pólos do modelo em $s = -0,147$ e $s = -0,6998$, além de uma série de outros pólos e zeros que representam a aproximação de Pade para o atraso, uma vez que a ferramenta não aceita que se adicione a propriedade “delay” à descrição dos sistemas. O pólo mais lento do processo está localizado em $s = -0,147$. Considerando-se a aproximação $t_s = \frac{4}{p}$, calcula-se um tempo de acomodação próximo aos 28 segundos. Nota-se também as barras na cor cinza que representam os limites impostos pelo desempenho transitório desejado. Os pólos do sistema realimentado devem estar à esquerda destas barras para que este desempenho seja alcançado.

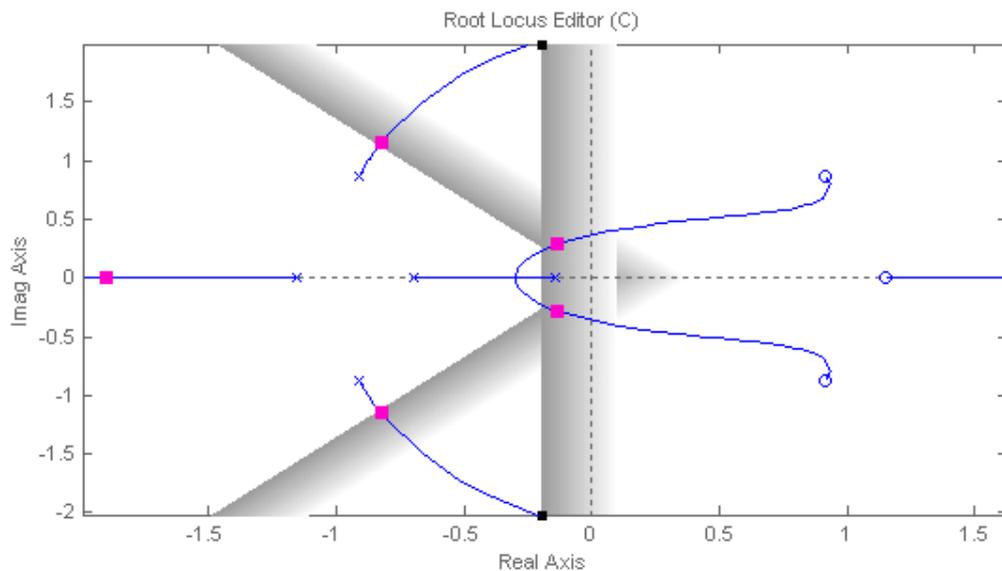


Figura 39: rltool - G(s)

Uma solução testada foi a de “matar” o pólo lento do processo, ajustando um zero do controlador com o seu mesmo valor. Como pode ser visto na Figura 40, a ferramenta rltool indicou uma configuração em que todos os pólos do sistema em malha fechada estavam em posições convenientes do plano complexo. A função de transferência

$$C_{PID_{morto}}(s) = \frac{1,71(s + 0,147)(s + 0,5)}{s(s + p)}$$

aparentava ser uma solução para o projeto do controlador. Entretanto ao simular o sistema com este controlador no Simulink, a resposta obtida não foi satisfatória. Possivelmente a diferença entre as duas simulações seja devida à representação do atraso de transporte. A ferramenta rltool exige que se utilize a aproximação de Pade, enquanto o Simulink possui um bloco de atraso propriamente dito, que é mais preciso. A solução de “matar” o pólo lento seria uma primeira aproximação, uma vez que ela não é muito confiável. Esta solução exige que a função de transferência $G_{Livre}(s)$ seja extremamente precisa, o que não pode ser garantido nesta aplicação. Caso contrário, o zero do controlador seria ajustado em um valor incorreto não iria efetivamente eliminar o efeito deste pólo lento.

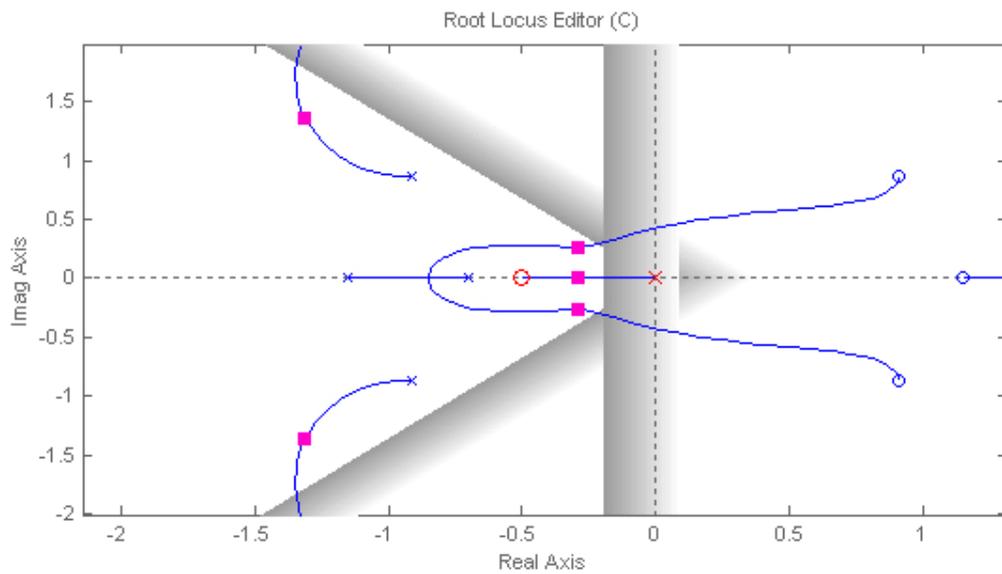


Figura 40: rltool - $G(s)$ e $C(s)$, sem o pólo em $s = -0,147$.

A melhor solução encontrada foi posicionando de um dos zeros do controlador em $s = -0,154$ e o outro em $s = -0,589$. O ganho foi ajustado de tal maneira que o pólo mais lento do sistema em malha fechada esteja em $s = -0,222$, o que leva a um tempo de acomodação de aproximadamente 18 segundos, coerente com o desempenho desejado. O máximo sobrepasso também ficou dentro de acordo com o projetado, como pode ser visto na Figura 41. A Figura 42 apresenta esta mesma configuração de maneira mais detalhada.

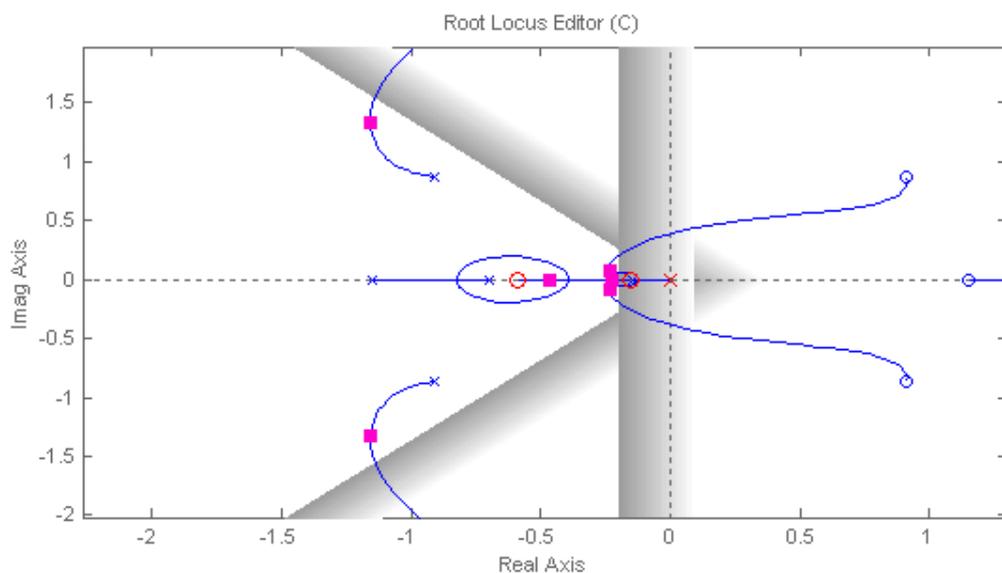


Figura 41: rltol - G(s) e C(s), solução final.

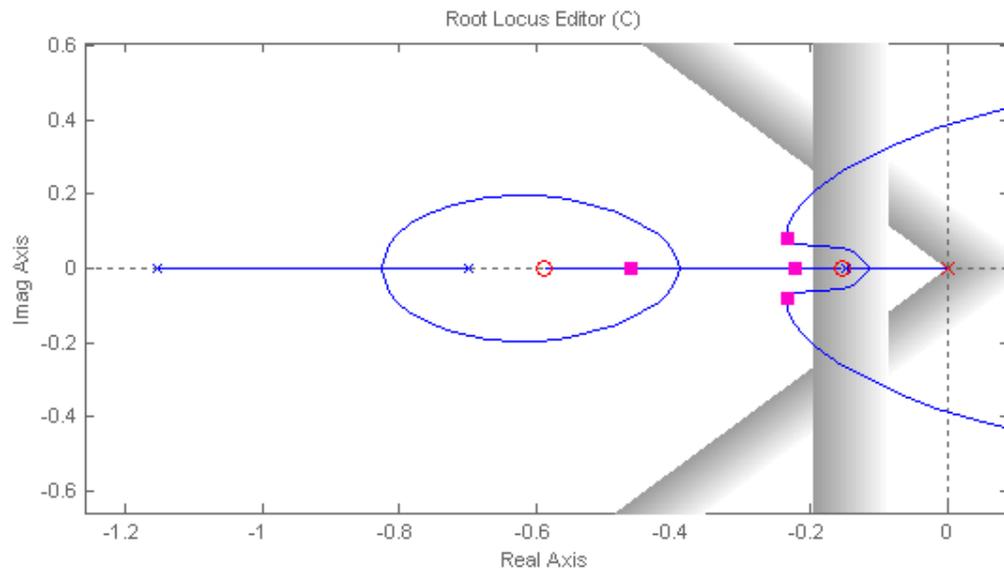


Figura 42: rltol - G(s) e C(s), solução final em detalhe.

A função de transferência do controlador,

$$C_{PID}(s) = \frac{6,05(s + 0,154)(s + 0,589)}{s(s + 5)}$$

inclui também um pólo extra em $s = -5$, que é necessário para limitar a resposta da ação derivativa aos ruídos de alta frequência. O posicionamento pólo deste seguiu o proposto por Bazanella e Silva Jr (2005, p.65) para que sua influência sobre o funcionamento do sistema fosse minimizada, o que ocorreu de fato, como mostra a figura @@próx item@.

A equação 27 pode ser reescrita na forma

$$C(s) = \frac{u(s)}{e(s)} = \frac{K(1 + pT_d) \left(s^2 + \frac{1 + pT_i}{T_i(1 + pT_d)} s + \frac{p}{T_i(1 + pT_d)} \right)}{s(s + p)} \quad (28)$$

Os parâmetros de ajuste do controlador PID podem ser calculados partir das equações

$$a = \frac{1 + pT_i}{T_i(1 + pT_d)} \quad (29)$$

$$b = \frac{p}{T_i(1 + pT_d)} \quad (30)$$

onde podemos isolar e calcular o valor de T_i

$$T_i = \frac{(ap - b)}{bp} \quad (31)$$

e em seguida o valor de T_d e $K_{paralelo}$

$$T_d = \frac{(1 + pT_i - aT_i)}{apT_i} \quad (32)$$

$$K_{paralelo} = \frac{K}{1 + pT_d} \quad (33)$$

O que resulta nos seguintes valores:

$$K_{paralelo} = 0,8771 \quad T_i = 7,9913s \quad T_d = 1,1796s$$

4.4.4 Simulação do desempenho no Simulink

Novamente, a ferramenta Simulink foi utilizada para simular o comportamento do sistema, mas desta vez considerando todos os seus componentes. A Figura 43 demonstra o esquema criado para esta simulação, onde se podem ver: o controlador PID em sua forma paralela, a função de transferência da planta em série com seu atraso de transporte, a realimentação que chega ao somador onde é calculado o sinal de erro, a função “salto” ligada na entrada e um traçador de gráficos na saída.

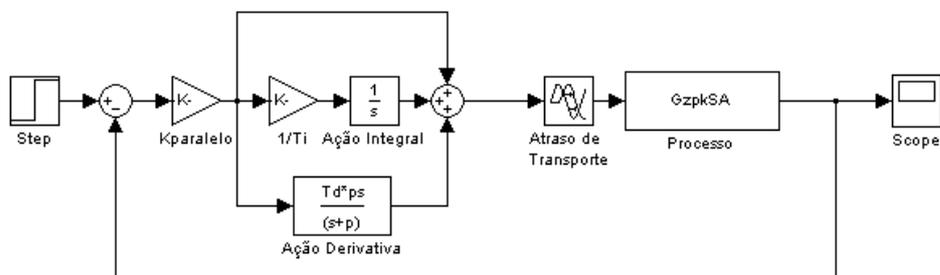


Figura 43: diagrama utilizado na simulação do sistema completo.

O resultado desta simulação foi bastante próximo às especificações do projeto:

Sistema:	Simulado (laço fechado)	Real (laço aberto)
Erro em reg. permanente:	$e_{RP} = 0$	(Não se aplica)
Tempo de acomodação:	$t_s = 24s$	$t_s = 33s$
Máximo sobrepasso:	$M_o = 0\%$	$M_o = 0\%$

A Figura 44 apresenta estes resultados na forma de um gráfico Velocidade x Tempo.

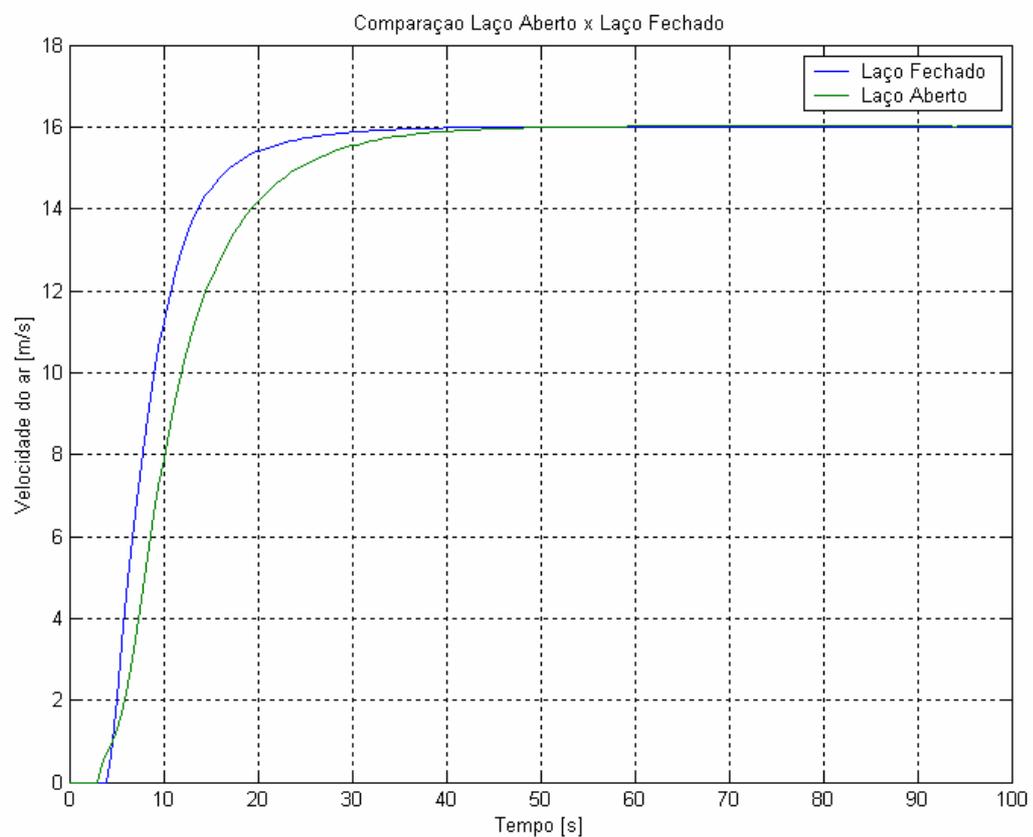


Figura 44: comparação do comportamento do sistema em malha aberta e fechada.

Na Figura 45 é mostrado que a inclusão do pólo mais rápido em $s = -5$ irá provocar um pequeno aumento no tempo de acomodação do sistema, pouco significativo.

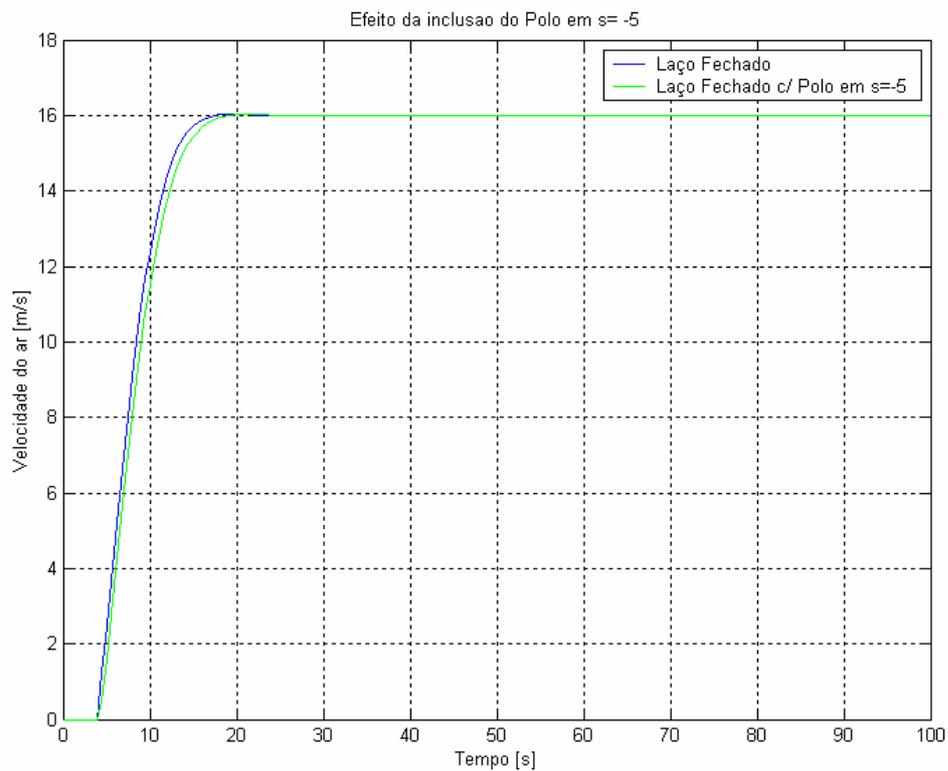


Figura 45: avaliação do efeito do pólo em $s=-5$.

4.4.5 Bloco de Controle implementado no LabVIEW

De posse da função de transferência do controlador, o próximo passo adotado foi a sua implementação digital no programa *Velocidade do Ar - Automático*. Bazanella e Silva Jr (2005, p.69) propõe uma rotina que realiza o cálculo do sinal de controle, criada a partir da equação de recorrência de cada ação de controle. Esta rotina, apresentada na íntegra a seguir, é foi escrita na linguagem de programação do Matlab, ou seja, em forma de texto, e teve de ser adaptada para programação em linguagem gráfica do LabVIEW.

```
%início da rotina PID
y = medida_saída
erro = ref - y
P = K*erro
I = I_ant + K*T*(erro+erro_ant)/2*T_i
D = D_ant*(2-p*T)/2+p*T + 2*p*K*T_d)/(2+p*T) *(erro-erro_ant)
sinal_controle = P + I + D
erro_ant = erro
I_ant = I
D_ant = D
%fim da rotina PID (BAZANELLA E SILVA JR, 2005, p.69)
```

No caso do programa Velocidade do Ar – Automático, o bloco de controle irá calcular a próxima frequência do inversor (F_i) a partir da velocidade atual (V_{atual}) e da velocidade de referência (V_{ref}), sempre que o botão AUTO estiver pressionado. As funções matemáticas necessárias para a realização destes cálculos foram programadas dentro da mesma estrutura “while loop” que realiza comunicação com o ManoAir-500, para garantir que a frequência seja calculada a partir da amostra mais atual da velocidade.

Segundo Bazanella e Silva Jr (2005, p.67), o período de aquisição deve ser tal que se colete um mínimo de 5 amostras em uma constante de tempo do sistema. O ManoAir adquire uma amostra a cada 0,5s, ou 5 amostras em 2,5s, o que atende com folga a este critério.

A Figura 46 apresenta a parte do diagrama de blocos do programa em que está programada a rotina de controle. Além dos cálculos propostos pela rotina PID citada acima, foram criadas duas funções de adicionais: a primeira impede que sejam enviadas ao inversor frequências superiores a um valor estabelecido pelo operador, por segurança. A segunda avalia se a frequência calculada é negativa e, em caso afirmativo, envia zero ao inversor e mantém constante o valor da ação Integral, para evitar que esta acumule um valor negativo muito grande e aumente o tempo de resposta do sistema (*wind-up*). O item 4.2.4 apresenta mais informações a respeito da programação do bloco de controle.

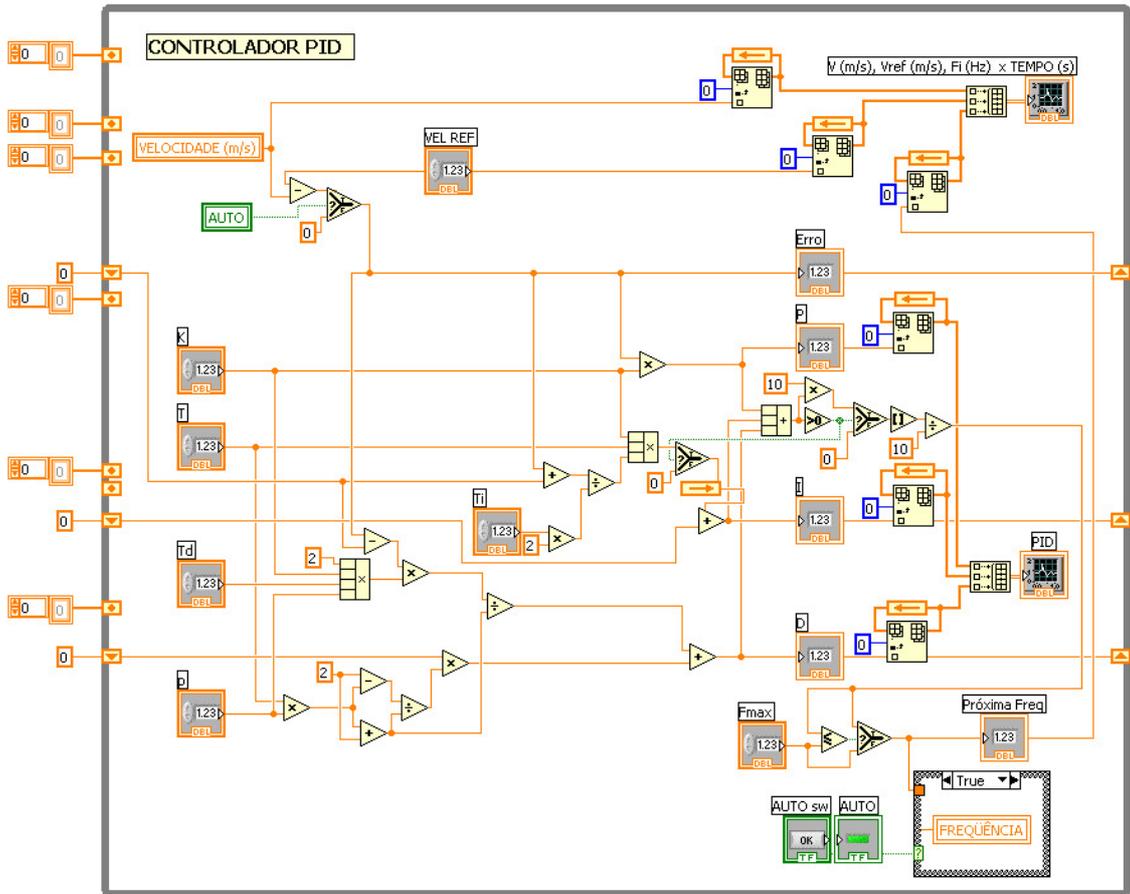


Figura 46: controlador PID no diagrama de blocos do *Velocidade do Ar – Automático*.

5 RESULTADOS ALCANÇADOS

Com a conclusão da última etapa do projeto, que foi a inclusão do bloco de controle no programa *Velocidade do Ar – Automático*, o sistema completo pode finalmente ser testado. Isto foi feito aplicando-se um salto de 0 a 16m/s na velocidade de referência. O comportamento do sistema alguns segundos após a aplicação deste salto pode ser visto na Figura 47. O sistema se comportou exatamente como era esperado: imediatamente após a mudança da velocidade de referência, a ação proporcional, mostrada na cor azul-claro, assumiu um valor próximo a 87% do erro (lembra que $P = K * e = 0,8771 * e$), e foi diminuindo até chegar a um valor próximo de zero, conforme a velocidade atual se aproximava da referência. A ação derivativa, mostrada na cor rosa, assumiu um grande valor nos primeiros instantes após o salto. Em seguida passou a um pequeno valor negativo, como que para evitar o sobrepasso, e em regime permanente chegou a um valor próximo de zero. A ação integral, mostrada na cor lilás, apresenta uma variação mais lenta e seu valor cresce até estabilizar no valor de regime permanente da frequência do inversor.

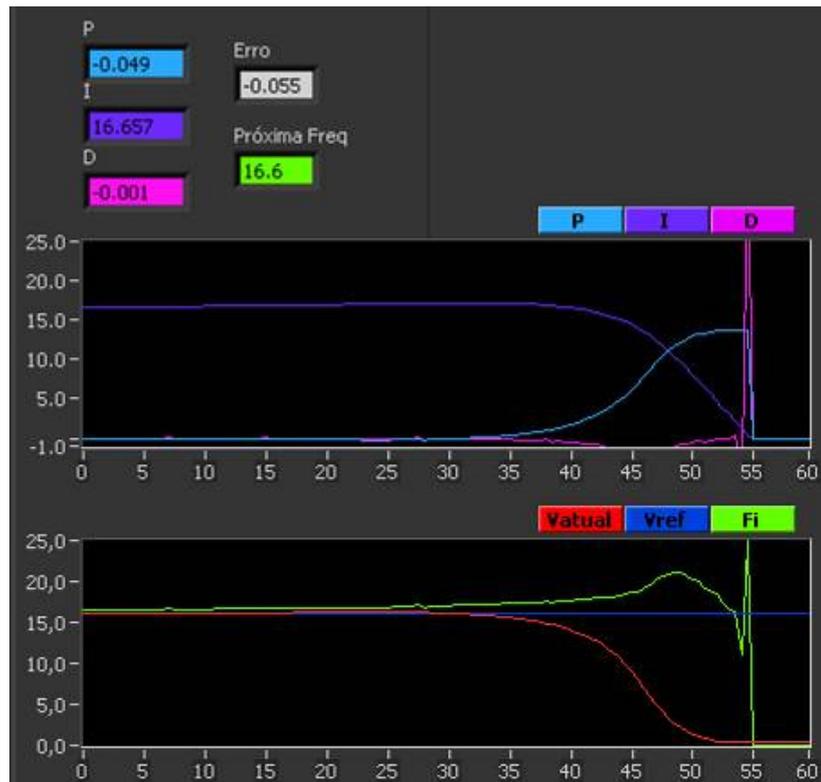


Figura 47: teste final do sistema de controle.

O resultado deste teste é apresentado a seguir, juntamente aos resultados simulados e de laço aberto:

Sistema:	Desejado	Real (laço fechado)	Simulado (laço fechado)	Real (laço aberto)
Erro em reg. permanente:	$e_{RP} = 0$	$e_{RP} = 0$	$e_{RP} = 0$	(Não se aplica)
Tempo de acomodação:	$t_s \leq 20s$	$t_s = 20,5s$	$t_s = 24s$	$t_s = 33s$
Máximo sobrepasso:	$M_o \leq 10\%$	$M_o = 0,25\%$	$M_o = 0\%$	$M_o = 0\%$

6 CONCLUSÃO

O objetivo deste projeto de diplomação é: *Desenvolver um sistema automático para medir e controlar a velocidade do ar para no Túnel de Vento Prof. Joaquim Blessmann.*

A partir da avaliação de seus os objetivos específicos:

- *Adequar o sistema de medida da velocidade do ar às normas da Rede MEASNET:*

O novo arranjo de instrumentação é capaz, de fato, de realizar as medidas de acordo com o que especifica a Rede MEASNET.

- *Criar um sistema capaz de ajustar-se a velocidade escolhida pelo operador de forma automática:*

O novo arranjo do sistema de controle de velocidade, composto pelo novo motor, inversor de frequência, o programa Velocidade do Ar – Automático e o sensores do ManoAir-500 é, de fato, capaz de ajustar-se à velocidade escolhida pelo operador de forma automática.

- *Diminuir o tempo de acomodação da velocidade para 20 segundos:*

O sistema apresentou tempo de acomodação de 20,5s, suficientemente próximo ao desejado.

- *Limitar o sobrepasso da velocidade a 10%:*

O sistema praticamente não apresentou sobrepasso.

Considera-se que o objetivo do projeto foi, de fato, alcançado. Considera-se também que: a incerteza da medida de velocidade poderá ser reduzida caso o laboratório venha a adquirir um modelo do ManoAir-500 com faixa de medidas de pressão diferencial mais estreita. O tempo de acomodação pode ser reduzido através de um novo ajuste nos parâmetros do controlador, levando-se em conta que há uma grande margem na especificação do

sobrepasse. O bloco de controle deve ser adicionado aos programas *Calibração de Anemômetros* e *Verificação do Escoamento*.

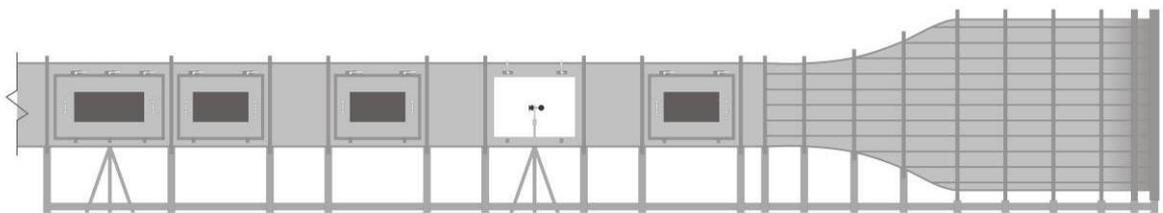


Figura 48: ilustração do Túnel de Vento com um anemômetro de conchas.

REFERÊNCIAS

- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR-10520**: Informação e Documentação - Apresentação de citações em documentos. Rio de Janeiro, 2002a, 4 p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR-14724**: Informação e Documentação - Trabalhos Acadêmicos - Apresentação. Rio de Janeiro, 2002b. 6 p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR-17025**. Requisitos gerais para competência de laboratórios de ensaio e calibração. Rio de Janeiro, 2005. 31p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR-9001**. Sistemas de gestão da qualidade - Requisitos. Rio de Janeiro, 2008. 28p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR-6023**: Informação e Documentação - Referências - Elaboração. Rio de Janeiro, 2002c. 22 p.
- BAZANELLA, Alexandre Sanfelice. SILVA JR, João Manoel Gomes da. **Sistemas de controle: princípios e métodos de projeto**. Porto Alegre: Editora da Universidade/UFRGS, 2005. 297 p.
- CRESESB: Centro de Referência em Energia Solar e Eólica Sergio de Salvo Brito . Rio de Janeiro. **Atlas Do Potencial Eólico Brasileiro**. Disponível em: <http://www.cresesb.cepel.br/index.php?link=/atlas_eolico_brasil/atlas.htm>. Acesso em: 06 maio. 2010.
- EPE. Empresa de Pesquisa Energética. **Informe à imprensa: Leilão de Energia de Reserva - Eólica**, 2009. Disponível em: http://www.epe.gov.br/imprensa/PressReleases/20091214_1.pdf. Acesso em: 17 abril 2010.
- LJUNG, Lennart. **System Identification: Theory for the user**. 2a ed. Upper Saddle River, N.J.:Prentice Hall PTR,c1999. 609p.
- MEASNET. **Measuring Network of Wind Energy Institutes**. Disponível em: <http://www.measnet.org/>. Acesso em: 12 janeiro 2010.
- OGATA, Katsuhiko. **Engenharia de controle moderno**. 3. ed. Rio de Janeiro: Prentice-Hall do Brasil, c1998. xiv, 813 p.

PETROBRÁS. **Energia Eólica** Disponível em:

http://www2.petrobras.com.br/Petrobras/portugues/perfil/Perfil_energia_eolica.htm. Acesso em: 06 maio 2010.

PROTOCOLO DE QUIOTO: A convenção sobre mudança no clima. Brasília: Ministério da Ciência e Tecnologia. Disponível em: <http://www.mct.gov.br/upd_blob/0012/12425.pdf>. Acesso em: 18 junho. 2010.

RMRS: **Rede Meteorológica do Rio Grande do Sul**. Disponível em: <http://redemetrologica.com.br/site/principal/> . Acesso em: 03 março 2010.

SOUZA, Anivaldo Matias de. **Apostila de laboratório de análise de sistemas III. PUC-Minas**. Belo Horizonte, 2010. Disponível em: <http://apostilas.netsaber.com.br/apostilas/1751.pdf>. Acessado em: **14 de junho de 2010**

VENTOS DO SUL ENERGIA. O maior parque eólico da América Latina. **Energia Eólica**. Disponível em: <http://www.ventosdosulenergia.com.br/highres.php>. Acesso em: 29 maio 2010.

WEG BRASIL. **Manual da Comunicação Serial Conversor de Frequência Série cfw-05 Software : v3.XX ou v4.XX**. WEG automação LTDA, Jaraguá, 1997. 24p.

WEG BRASIL. **Manual do Inversor de Frequência CFW-05 1998** WEG automação LTDA, Jaraguá, 1998. 178p.