

Desenvolvimento de uma Bancada para o Teste Automático de Cata-ventos

Ricardo Jorge Silva Gonçalves

Dissertação do MIEM

Orientadores na FEUP: Prof. Armando Santos

Prof. Joaquim Mendes



FEUP

Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto

Mestrado Integrado em Engenharia Mecânica

Julho 2010

Resumo

Os cata-ventos são instrumentos de medição da direcção e sentido do vento. Como qualquer outro equipamento de medição, é necessário verificar ao longo do tempo se as suas características correspondem às indicadas pelo fabricante no momento da sua aquisição.

O objectivo deste projecto é desenvolver uma bancada de teste e caracterização automática de cata-ventos, para os diferentes modelos utilizados pelo Instituto de Engenharia Mecânica e Gestão Industrial (INEGI).

Numa primeira fase foram definidos os requisitos do projecto e os meios necessários para a execução. Foram estudadas duas soluções para conseguir um movimento relativo entre o leme e o corpo, uma actuando sobre o leme mantendo o corpo fixo, e vice-versa, após que se optou pela segunda hipótese porque conduziria a um desenho mais compacto e mais simples.

Desenhou-se um modelo 3D em SolidWorks® da bancada, utilizando um motor passo-a-passo para a rotação do sensor e um *encoder* angular como referência para a posição do cata-vento. Após que se procedeu ao fabrico das peças, à sua montagem e verificação geral de funcionamento.

Foi desenvolvida uma aplicação informática em LabVIEW™ para permitir o controlo do motor e a aquisição dos sinais dos sensores. Esta permite definir os parâmetros do teste tais como o número de sectores a avaliar e a possibilidade de efectuar testes num ou nos dois sentidos. Após o teste, os resultados apresentados em tabelas e sob a forma gráfica podem ser exportados para um ficheiro Microsoft Office Word.

Desta forma a verificação da exactidão dos cata-ventos torna-se num processo automático, reduzindo o tempo do teste em comparação à verificação manual, e reduzindo a possibilidade de erro humano.

Development of a bench for an automatic test of wind vanes

Abstract

The wind vanes are wind direction measurement instruments. Like any other measuring equipment, it is necessary to verify if their characteristics match those indicated by the manufacturer at the time of purchase, even after a long period of time.

The goal of this project is to develop a bench for an automatic test and characterization of wind vanes, for the different models used by Instituto de Engenharia Mecânica e Gestão Industrial (INEGI).

Initially were defined the project requirements and the resources needed to materialize it. Two solutions were study to achieve a relative displacement between the vane and the body of the sensor, one acting on the vane while keeping the body fixed, and the second acting on the body while keeping the vane fixed. The second option showed to be a more compact and with a simpler design, there for it was the one chosen.

A 3D model of the bench was drawn in SolidWorks®, using a stepper motor to rotate the sensor, and an angular encoder as reference for the wind vane position. Then the components were manufactured, assembled and a general checking of operation was performed.

Was developed a software application using LabVIEW™, to perform the engine control and signal acquisition from sensors. This application lets the user define the test parameters such as number of sectors to be assessed and as the ability to perform the test in one direction or in both directions. After testing, the results may be presented in tables and/or in graphical form or even be exported to a Microsoft Office Word file, enabling a fast and easy report generation.

Thus, the verification of the accuracy of wind vanes becomes an automatic process, reducing the testing time compared to manual checking, and reducing the possibility of human error.

Agradecimentos

Agradeço ao professor Armando Santos e professor Joaquim Gabriel pela sua orientação, disponibilidade e paciência no decorrer deste trabalho, que me ajudou bastante na realização deste projecto.

Gostaria de agradecer ao INEGI, pela possibilidade de efectuar esta Tese e pelos meios disponibilizados, e ao Engenheiro Miguel Marques por toda a disponibilidade e ajuda na realização deste projecto.

Ao Engenheiro Joaquim Fonseca e ao Engenheiro José Almacinha o meu obrigado pela orientação e ajuda no projecto e desenhos da bancada, e a todos os colaboradores das oficinas de maquinaria um obrigado pela ajuda na construção da mesma.

Por fim gostava de agradecer à minha família pela ajuda que me deram ao longo destes anos, e pela motivação e apoio prestado na realização deste trabalho.

Índice de Conteúdos

Capítulo 1	1
Introdução.....	1
1.1. Contexto e motivação	3
1.2. Objectivos.....	3
1.3. Estrutura do relatório.....	4
Capítulo 2	5
Estado da arte	5
2.1. Importância da medição do rumo do vento	7
2.2. Necessidade da calibração	10
2.3. O que é um cata-vento.....	11
2.4. Tipos de cata-ventos	13
2.5. Aplicações dos cata-ventos	16
2.6. Calibração.....	17
Capítulo 3	23
Escolha de componentes da bancada e estudos prévios.....	23
3.1. Modelos de cata-ventos.....	25
3.2. Selecção do motor.....	27
3.3. Selecção do encoder	28
3.4. Fonte de alimentação.....	30
3.5. Placa de aquisição de dados.....	31
3.6. Estudos prévios	32
Capítulo 4	37
Projecto elaborado.....	37
4.1. Projecto mecânico.....	39
4.2. Programa de controlo automático	46
4.3. Análise de incerteza	58
Capítulo 5	63
Resultados e discussão.....	63
5.1. Caracterização do escoamento à saída do túnel de vento	65
5.2. Verificação da exactidão dos cata-ventos.....	69
5.3. Comportamento do cata-vento no túnel de vento	73
Capítulo 6	79

Conclusões	79
Capítulo 7.....	83
Referências e bibliografia	83
ANEXOS	87
Anexo A: Desenhos de definição e conjunto.....	89
Anexo B: Relatório de verificação do cata-vento	119
Anexo C: Instruções de funcionamento	125
Anexo D: Ligações eléctricas	129

Índice de figuras

Figura 2.1 - Distribuição da frequência de ocorrência do vento e da velocidade média em cada sector	8
Figura 2.2 - Distribuição da energia contida em cada sector	8
Figura 2.3 - Efeito no perfil de velocidade e turbulência provocados pela obstrução de um edifício ...	9
Figura 2.4 – Área a evitar no seguimento de um edifício no mesmo rumo do vento predominante	9
Figura 2.5 – Exemplo de um cata-vento artesanal	11
Figura 2.6 Exemplo de um cata-vento mecânico com potenciómetro	12
Figura 2.7 – Sensor de monitorização do vento mecânico	14
Figura 2.8 – Sensor de monitorização do vento ultra-sónico 3D da THIES	15
Figura 2.9 – Utilização do cata-vento para o estudo do clima nos oceanos	17
Figura 2.10 – Calibração do cata-vento modelo “Compact” da “THIES” no túnel de vento	18
Figura 2.11 – Manómetro dinamométrico de aplicação no leme dos cata-ventos	20
Figura 2.12 – Exemplo da bancada de verificação de cata-ventos da “YOUNG USA”	21
Figura 3.1 – Cata-vento modelo “First Class” da “THIES”	25
Figura 3.2 - Cata-vento modelo “Classic” da “THIES”	26
Figura 3.3 - Cata-vento modelo “Compact” da “THIES”	27
Figura 3.4 – Motor modelo “ST4209S0404” da “Nanotec” e respectivo gráfico do binário em função da velocidade de rotação	28
Figura 3.6 – Drive do motor modelo “SMCI33-1” da “Nanotec”	29
Figura 3.5 – Encoder da “OMRON” com 2500 passos por rotação	29
Figura 3.7 – Fonte de alimentação de 24 V modelo “S-150-24” da “Mean Well Direct”	30
Figura 3.8 – Esquema do circuito eléctrico utilizado para fornecer os 5 V	31
Figura 3.9 – Placa de aquisição de dados utilizada modelo “NI-cDAQ 9172” com o módulo de leitura modelo “NI 9201” da “National Instruments”	32
Figura 3.10 – Exemplo de uma bancada com accionamento no leme	32
Figura 3.11 – Exemplo de uma bancada com accionamento no corpo e leme fixo por estrutura articulada	34
Figura 3.12 - Exemplo de uma bancada com accionamento no corpo e leme fixo por veio regulável em altura	35
Figura 4.1 – Desenho de conjunto em 3D da bancada projectada	39
Figura 4.2 – Visualização da estrutura de suporte do motor	40
Figura 4.3 – Vista local em corte do suporte e respectivos rolamentos e cavilha	41
Figura 4.4 – Desenho em 3D dos diversos casquilhos de suporte dos cata-ventos, a) modelo “Classic”, b) modelo “First Class”, c) modelo “Compact”	43
Figura 4.5 – Visualização do sistema de fixação do leme dos cata-ventos (o modelo em causa é o “Classic”)	44
Figura 4.6 – Casquilhos dos vários cata-ventos com os cabos de ligação no seu interior (na esquerda modelo “First Class”, no centro modelo “Compact”, na direita modelo “Classic”)	44
Figura 4.7 – Visualização dos componentes ligados à base	45
Figura 4.8 – Bancada resultante com um cata-vento montado	46
Figura 4.9 – Painel frontal simplificado do programa de controlo da posição do motor retirado do sítio da Internet do fabricante	47

Figura 4.10 – Bloco de programação para a leitura da posição angular do veio do motor através do <i>encoder</i>	50
Figura 4.11 – Bloco de programação para a leitura da posição do cata-vento	51
Figura 4.12 – Parte do bloco de programação “Stacked Sequence”	52
Figura 4.13 – Bloco de programação que inicia a rotação do motor conforme o número de sectores definido.....	53
Figura 4.14 – Bloco de programação para construção do gráfico posição vs erro	54
Figura 4.15 – Bloco de programação para cálculo do maior erro atingido e da média dos erros	54
Figura 4.16 – Página de “Configuração” do painel frontal do programa do teste automático.....	55
Figura 4.17 – Página de “Teste” do painel frontal do programa do teste automático	56
Figura 4.18 – Página de “Resultados” do painel frontal do programa do teste automático	57
Figura 4.19 – Página do “Teste dinâmico” do painel frontal do programa do teste automático	58
Figura 4.20 – Cálculo do desvio criado pela excentricidade.....	60
Figura 5.1 – Linha ilustrativa ao longo da qual foram efectuadas as medições da velocidade	65
Figura 5.2 – Pontos de medição nas secções do escoamento	67
Figura 5.3 – Instalação utilizada para a medição das velocidades	68
Figura 5.4 – Instalação utilizada no teste dinâmico	73
Figura 5.5 – Exemplificação da oscilação na medição de uma variável	74
Figura D.1 – Esquema de ligação dos fios do motor e da alimentação do <i>drive</i>	131
Figura D.2 - Esquema de ligação dos fios do <i>encoder</i>	131
Figura D.3 - Disposição dos terminais dos conectores da base.....	132

Índice de tabelas

Tabela 2.1 – Comparação das características entre cata-ventos mecânicos e ultra-sônicos do mesmo fabricante	15
Tabela 4.1 – Medição do diâmetro do furo dos diversos exemplares do modelo “Classic”	42
Tabela 4.2 – Medição do diâmetro do furo dos diversos exemplares do modelo “First Class”	42
Tabela 4.3 – Medição do erro associado ao alinhamento do Norte do cata-vento	60
Tabela 5.1 – Velocidade do escoamento ao longo da linha de medição da secção do túnel.....	66
Tabela 5.2 – Velocidade do escoamento ao longo dos diferentes pontos das secções	67
Tabela 5.3 - Resultados obtidos no teste do primeiro cata-vento “Compact”	70
Tabela 5.4 - Resultados obtidos no teste do segundo cata-vento “Compact”	72
Tabela 5.5 – Condições do teste dinâmico.....	74
Tabela 5.6 – Resultados do teste dinâmico para uma frequência de aquisição de 500 Hz.....	75
Tabela 5.7 - Resultados do teste dinâmico para uma frequência de aquisição de 50 Hz.....	75
Tabela 5.8 - Resultados do teste dinâmico para uma frequência de aquisição de 10 Hz.....	76

Índice de gráficos

Gráfico 2.1 – Resultados da calibração do modelo “Compact” da “THIE”	19
Gráfico 5.1 – Perfil de velocidades obtido ao longo da linha com linha de tendência	66
Gráfico 5.2 – Erro obtido em cada posição em ambos os sentidos para o primeiro cata-vento “Compact”	71
Gráfico 5.3 - Erro obtido em cada posição em ambos os sentidos para o segundo cata-vento “Compact”	72

Capítulo 1

Introdução

1.1. Contexto e motivação

Os instrumentos meteorológicos já há muito que existem, e o cata-vento foi um dos primeiros a ser utilizado. Se em tempos passados a indicação do rumo do vento era adquirida através da visualização da extremidade de um objecto, hoje em dia é necessário utilizar instrumentos que nos indiquem e permitam o registo da informação do rumo do vento de uma forma muito mais precisa. Os cata-ventos actualmente são utilizados em diversas áreas, tais como meteorologia, indústria química, meios navais, levantamento do potencial eólico de locais, entre outros. Estes instrumentos são amplamente utilizados no estudo das condições meteorológicas para a previsão do estado do tempo, e na caracterização do regime de ventos de locais com potencial para o aproveitamento da energia eólica, sendo esta uma indústria bastante consolidada em Portugal mas em constante crescimento.

Devido às exigências actuais e à constante procura da qualidade máxima por parte das empresas, a utilização de recursos e meios informáticos para automatizar os mais variados processos tem vindo a aumentar. Aliar esta possibilidade a processos de verificação de instrumentos de medição permite reproduzir resultados fiáveis, com elevado nível de precisão, nos quais se pode confiar.

1.2. Objectivos

Este trabalho tem como objectivo o desenvolvimento de uma bancada que possibilite a montagem de diferentes tipos de cata-ventos utilizados pelo Instituto de Engenharia Mecânica e Gestão Industrial (INEGI) e a determinação automática da sua resposta.

É necessário efectuar um projecto mecânico de uma bancada que utilize um motor eléctrico para criar um deslocamento angular entre o corpo do cata-vento e o seu leme. Existem vários modelos diferentes, com dimensões diferentes e deve ser possível fixar cada um para se proceder ao teste. Os elementos necessários para a construção devem ser seleccionados e adquiridos.

O controlo de posicionamento do motor deve ser efectuado usando uma aplicação informática, que permita também ler a posição angular do motor e o valor de saída do cata-vento, comparando os dois sinais de forma a descobrir o erro em relação ao valor verdadeiro (posição do motor). A aplicação informática deve ser capaz de controlar o número de sectores em que uma rotação de 360° vai ser dividida. Os resultados obtidos pelo teste têm de ser apresentados numa tabela e num gráfico e depois ser exportados para um ficheiro *Microsoft Office Word*. A bancada desenvolvida deve ser o mais possível à prova de erro humano.

O comportamento dos cata-ventos deve ser estudado quando ele se encontra sob o efeito de um escoamento, verificando a sua resposta, utilizando o túnel de vento para criar o escoamento.

Este trabalho tenta preencher uma lacuna existente em indústrias que utilizam instrumentos de medição. Após a aquisição e utilização dos instrumentos as suas características vão sendo alteradas, sendo necessário aferir se os valores por estes lidos se afastam do valor real mais do que o estipulado pelo fabricante.

O método mais acessível e a que primeiramente se recorre é a comparação do sinal de saída com um padrão por meios manuais de baixa precisão e que serve apenas como meio de expedito de avaliar superficialmente a exactidão de um aparelho de medida. A alternativa apresentada consiste na execução de um processo automático com o mínimo de participação do técnico da verificação, em que através de meios informáticos é activado um motor eléctrico acoplado a um *encoder* que vai servir de valor de referência, e que vai rodar de posição em posição nas quais vão ser lidos o valor do cata-vento e do *encoder*, calculando-se o erro em cada posição e o erro máximo atingido. Este trabalho resulta num processo quase totalmente automático, com valores de elevada exactidão que permitem criar uma base de dados com a informação extraída em cada teste, sobre cada cata-vento existente na empresa.

1.3. Estrutura do relatório

O relatório encontra-se dividido em sete capítulos. No capítulo seguinte, faz-se uma descrição do estado da arte relativamente à importância da medição do rumo do vento no estudo dos locais potencialmente propícios para o aproveitamento da energia eólica através de aerogeradores, uma descrição do que é um cata-vento, os diferentes tipos existentes e as principais aplicações. É também descrito o processo de calibração por um fabricante deste tipo de sensores, e de uma bancada de um outro fabricante utilizada para a verificação da exactidão de cata-ventos.

No capítulo três, são enunciados os componentes utilizados na construção da bancada bem como o porquê da sua escolha, tais como motor, fonte de alimentação, entre outros. São mostrados também as várias soluções que foram pensadas para o projecto de desenho da bancada.

A informação contida no capítulo quatro descreve a opção tomada quanto à construção da bancada, dando ênfase aos aspectos mais importantes. Descreve também os passos dados na programação do *software* onde são indicados alguns blocos de programação que foram construídos no decorrer do trabalho, como também a parte gráfica com que o utilizador vai comunicar.

No capítulo cinco é efectuada a caracterização do escoamento na secção de saída do túnel de vento, bem como são efectuados alguns testes de verificação da exactidão de cata-ventos fornecidos pelo INEGI, e a verificação do desempenho de um cata-vento num teste dinâmico.

Relativamente ao capítulo seis, são tecidas algumas considerações acerca do trabalho desenvolvido. O capítulo seguinte tem a informação relativa às referências utilizadas para a execução deste trabalho.

Capítulo 2

Estado da arte

2.1. Importância da medição do rumo do vento

O vento é a deslocação de uma massa de ar, originada indirectamente pela radiação solar. O aquecimento desigual dos oceanos e do solo entre os pólos e os trópicos criam diferenças de pressão atmosféricas, que forçam à deslocação de massas de ar, que juntamente com o movimento rotacional da Terra origina os ventos geostróficos. A um nível mais local, a deslocação das massas de ar podem ser provocadas pela diferente capacidade de absorção de calor por parte da terra em relação ao mar, pelo aquecimento diurno e arrefecimento nocturno das montanhas. Simultaneamente com a orografia e a cobertura do solo, estes são os principais factores que influenciam o vento tanto em rumo como em velocidade. Há locais em que o rumo dominante do vento pouco varia, não mais que os 30°, porque a circulação atmosférica naquele local é muito vincada pela circulação global e que sofre poucas alterações. Noutros locais, como existentes em Portugal, não há um rumo claramente dominante porque são diversos os regimes atmosféricos que tornam o local interessante para o aproveitamento energético pela conversão da energia eólica em energia eléctrica.

Os aerogeradores actuais encontram-se munidos de instrumentos de medição das características do vento na parte superior da *nacelle*, sendo o cata-vento um exemplo. A informação recolhida por este sensor e pelos sensores colocados nas torres de medições existentes nos parques eólicos vai indicar a direcção incidente do vento, e posteriormente será dada uma ordem de accionamento aos motores que fazem o posicionamento da *nacelle* em torno do seu eixo vertical, para que o eixo do rotor se posicione no sentido em que incide o vento. De referir que a rotação da *nacelle* para que o rotor esteja alinhado com a direcção do vento vai criar esforços na estrutura da torre e a exposição a ventos cruzados provocados pela mudança de direcção criam esforços nas pás, principalmente de fadiga, sendo necessário muito cuidado no dimensionamento dos componentes.

Como os aerogeradores tem a auto-capacidade de se alinharem com a direcção do vento e deste modo receber a máxima energia possível para aquele determinado instante pode-se pensar que o estudo do rumo do vento é dispensável. Porém isto não é verdade, o rumo do vento não interfere apenas no posicionamento do rotor do aerogerador em tempo real, mas também no planeamento da disposição dos vários aerogeradores. [MATHEW 2006]

Todos os estudos do potencial eólico de um local, tem obrigatoriamente que incluir dados relativos à medição do rumo do vento. A informação relativa ao rumo e velocidade do vento de um local é geralmente apresentada recorrendo-se a uma rosa-dos-ventos. Esta representação gráfica consiste num gráfico usualmente dividido em 16 sectores igualmente espaçados, as quais representam as várias direcções possíveis do vento. No caso do rumo do vento, em cada sector é representado a frequência com a qual o vento incidiu durante o tempo de estudo, no caso da velocidade é representada em cada sector a velocidade média do vento, como representado na figura 2.1.

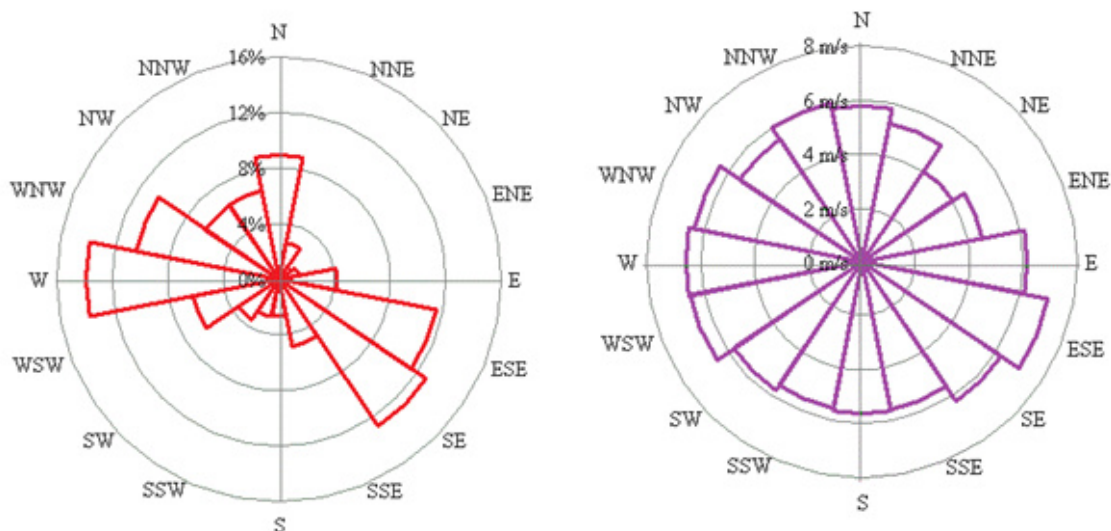


Figura 2.1 - Distribuição da frequência de ocorrência do vento e da velocidade média em cada sector

Através destes dados constrói-se um outro gráfico relativo à distribuição da energia em cada sector, figura 2.2, resultado da multiplicação da frequência de incidência do vento de um determinado sector com o cubo da velocidade média do mesmo sector. Ao sector que apresenta a maior frequência de ocorrência de vento, corresponde o que se chama “rumo dominante”. O sector que apresenta o conteúdo mais energético corresponde o que se chama de “rumo mais energético”. De referir que estes dois sectores podem não coincidir. [MATHEW, 2006]

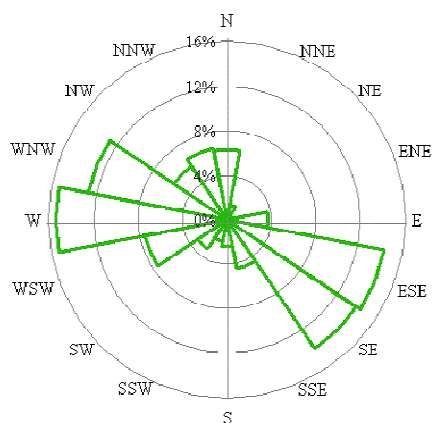


Figura 2.2 - Distribuição da energia contida em cada sector

O terreno influencia de forma determinante o escoamento atmosférico. Seja pelas características da sua cobertura, em que árvores ou arbustos actuam como obstáculos de menor dimensão, ou por se tratar de lagos ou áreas construídas, áreas mais abertas, a cobertura do solo define a rugosidade da superfície, afectando o escoamento. Por outro lado, as características orográficas do terreno – montanhas, vales, planícies – surgem como obstáculos de maior dimensão que condicionam de forma significativa o rumo e intensidade do vento. Junto ao topo de uma montanha o vento acelera enquanto num vale a velocidade é menor.

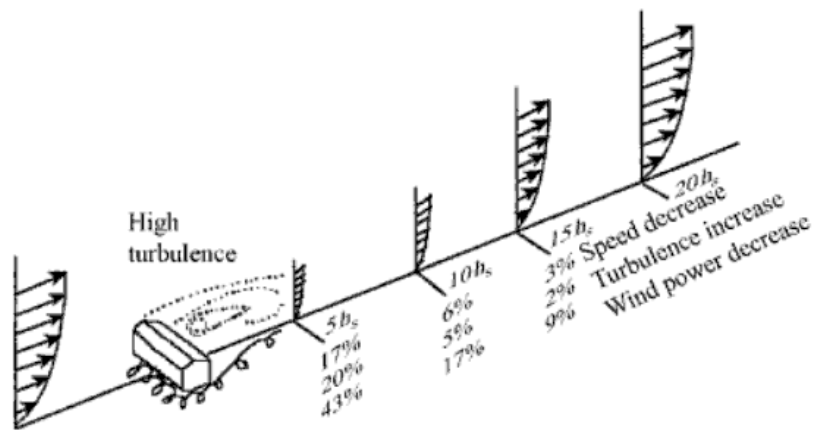


Figura 2.3 - Efeito no perfil de velocidade e turbulência provocados pela obstrução de um edifício
(Fonte: Wind Energy: Fundamentals, Resource Analysis and Economics, 2006)

Os efeitos provocados pelos obstáculos de menor dimensão são considerados nulos após uma distância horizontal de 15 vezes a altura do obstáculo, figura 2.3, onde o perfil de velocidades será semelhante ao inicial e a potência extraível não sofrerá alterações. O estudo e conhecimento do rumo predominante do vento vão condicionar a planificação da disposição das torres em relação às distâncias que estas se devem situar aos obstáculos. [MANWELL, 2009]

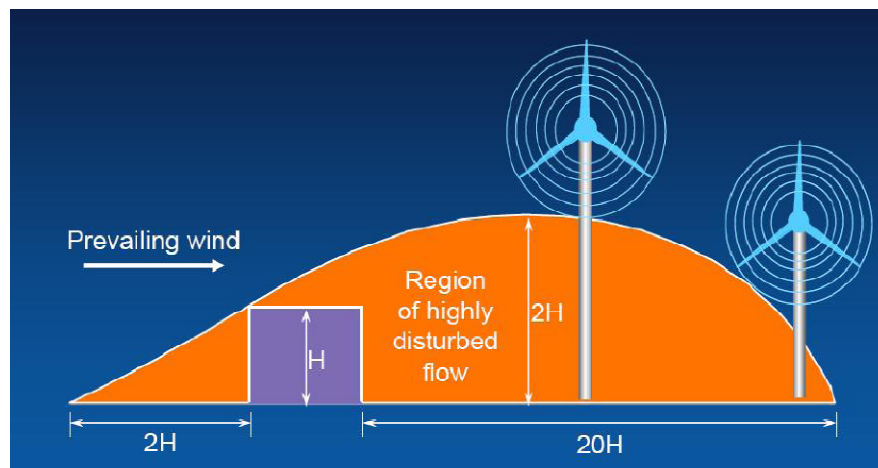


Figura 2.4 – Área a evitar no seguimento de um edifício no mesmo rumo do vento predominante
(Fonte: <http://www.peifa.ca/ul/Fundamentals%20of%20Wind%20Energy.pdf>)

A planificação da disposição dos vários aerogeradores é mesmo um dos desafios técnicos na elaboração do projecto de um parque eólico. O local onde são colocadas e o espaço entre elas são os principais aspectos a considerar. O primeiro está relacionado com a quantidade do recurso disponível, ao longo do terreno no qual o parque está a ser projectado fruto da orografia do terreno e da presença de obstáculos, tal como anteriormente explicado. Quanto ao segundo aspecto, o aerogerador em funcionamento modifica o escoamento devido ao movimento das pás, provocando uma diminuição da velocidade do vento como também o

aumento da turbulência, resultando em menor energia extraível e num aumento dos esforços de fadiga. A energia que um gerador eólico fornece provém da transformação da energia cinética que o vento possui. Isto faz com que a velocidade do vento à saída do rotor seja bastante inferior à velocidade de entrada o que condiciona os geradores que se encontram a jusante. Logo a energia capturada de um dado número de geradores de um parque será sempre inferior à energia capturada se estas máquinas estivessem colocadas isoladamente com as mesmas características de vento. O défice de energia do vento da esteira de um gerador eólico vai ser anulado após uma certa distância através da troca de energia cinética com o vento circundante. Esta distância depende principalmente do tamanho do rotor, mas não só. [MANWELL, 2009]

A distribuição anual em frequência do rumo do vento é uma das causas das perdas que influencia a perda enunciada acima. A distância transversal ou longitudinal entre aerogeradores vai depender do rumo predominante do vento. Assim as perdas por efeitos de esteira necessitam de ser calculadas de acordo com a distribuição da frequência do vento ao longo dos sectores da rosa-dos-ventos, em conjunto com a informação da velocidade e da turbulência. [MANWELL, 2009]

As esteiras provocadas pelos rotores dos aerogeradores criam turbulência e diminuição da velocidade do vento o que resulta numa perda de energia extraída pelas filas seguintes. A escolha do posicionamento dos aerogeradores num parque eólico tem assim como base um compromisso entre os custos da instalação e a energia produzida, entre outras constantes. As filas de aerogeradores são posicionadas perpendicularmente ao rumo predominante do vento e a distância entre filas vai ser em função da quantidade de energia perdida e o preço do terreno, bem como da quantidade de máquinas que se querem instalar, e da limitação do terreno. As torres querem-se também mais próximas para que os custos de ligação sejam menores.

A distância entre colunas de aerogeradores deve ser entre 2 e 4 diâmetros do rotor dos aerogeradores, e a distância entre linhas (situação mais prejudicial) deve ser entre 5 a 10. A escolha de dentro destes intervalos vai ter em conta os aspectos em cima referidos. [NELSON, 2009]

Existem parques em que devido aos custos do terreno, a distância entre as várias filas foi de tal forma diminuída que as perdas de energia na segunda fila foram na ordem dos 12% e na terceira fila na ordem dos 35%. [NELSON, 2009]

Estes valores demonstram que mesmo sendo conhecida o rumo predominante do vento, e utilizando valores de distância entre filas de acordo com os intervalos em cima referidos, existem sempre perdas nas filas seguintes. Sendo assim, em fase de projecto de um parque eólico, é necessário que se obtenham dados fidedignos do rumo do vento, para se conhecer a distribuição sectorial de ocorrências, importando o sector dominante, de modo a que seja desenhado um arranjo de parque, *layout*, que permita maximizar a produção eléctrica, garantindo um funcionamento correcto de todos os aerogeradores.

2.2. Necessidade da calibração

A pequena variabilidade da mudança do rumo do vento em algumas regiões faz com que o sensor, geralmente um potenciómetro constituído por uma pista de carbono, seja apenas

solicitado numa pequena parte, criando um desgaste desigual o que pode alterar as medições introduzindo um erro adicional. O facto de os cata-ventos possuírem peças móveis, faz com que o desgaste dos componentes possa introduzir erros inadmissíveis e levar à anulação de uma parte das medições.

Os próprios fabricantes aconselham a definição de um intervalo de tempo entre os quais os sensores devem ser verificados para garantir o bom funcionamento, e a validade dos dados recolhidos.

Uma boa prática na manutenção dos cata-ventos, consiste na verificação do seu funcionamento no fim da utilização nas estações de medição. Assim existe a certeza que o sensor está apto para efectuar novas medições.

2.3. O que é um cata-vento

A monitorização do rumo do vento é efectuada há milhares de anos, e o cata-vento é provavelmente o instrumento meteorológico mais antigo. Acredita-se que as primeiras medições do vento foram através da observação do efeito que este exercia em objectos que se encontravam ao redor das pessoas. Desde a sua criação, o desenho básico do cata-vento mudou muito pouco. Tipicamente consiste num veio horizontal, ou semelhante, suportando um leme num dos lados e um contra-peso na outra extremidade. O ponto de equilíbrio deste conjunto é colocado num veio vertical, que é suportado por um rolamento, permitindo que o sistema rode e que o contra peso indique sempre qual o rumo do vento.



Figura 2.5 – Exemplo de um cata-vento artesanal
(Fonte: www.aimagemdapaisagem.nireblog.com)

A leitura que se conseguia noutros tempos, verificar aproximadamente se o vento soprava do Norte, Sul, Este, ou Oeste, já há muito que não é suficiente. Hoje em dia é necessário uma indicação exacta do rumo do vento, por vezes com uma exactidão elevada de $\pm 1^\circ$. Em adição a esta medição juntou-se a necessidade de introduzir uma dimensão temporal, de modo a que determinados instantes do tempo pudessem ser atribuídos as exactas direcções do vento naqueles instantes. Para isto ser possível surgiram os cata-ventos que produzem um sinal eléctrico (a maior parte das vezes em tensão), geralmente criado por um potenciómetro colocado dentro do sensor, exemplificado na figura 2.6, que depois de devidamente tratado nos dá indicação do rumo do vento em graus. Com os sistemas de recolha de dados a cada leitura é anexo a sua posição temporal, o que vai permitir um tratamento estatístico dos dados recolhidos.



Figura 2.6 Exemplo de um cata-vento mecânico com potenciómetro
(Fonte: www.ammonit.com)

Como já foi referido, o sinal é normalmente em tensão, o que, juntamente com a característica linear do potenciómetro, nos permite obter facilmente a relação entre a tensão medida e o rumo do vento em graus, após conversão, em relação ao “Norte” que é indicado no corpo do sensor.

O “Norte” indicado pelo cata-vento não necessita de ser o Norte verdadeiro, desde que seja conhecida a diferença entre ambos. Os dados recolhidos pelo cata-vento deverão depois ser tratados de modo a incluir essa diferença. Geralmente a montagem dos sensores aos mastros das torres de medição são efectuadas de modo a que o Norte indicado no sensor seja no mesmo rumo do suporte de fixação. Este procedimento deve-se à dificuldade que o técnico teria em alinhar o norte do cata-vento com o norte verdadeiro, estando suspenso na torre. Assim, basta conhecer o rumo do mastro, ver qual a diferença para o Norte, e incorporar esse valor nos valores medidos pelo sensor.

Dentro das características deste tipo de sensores podem destacar-se algumas. O valor mínimo da velocidade do vento para que se possa medir o rumo do vento. Devido às forças de atrito muito reduzidas o cata-vento necessita de pouca força para iniciar movimento, assim, a velocidade mínima para o seu accionamento é geralmente na ordem de 1 m/s. A resolução de um cata-vento é a menor variação do rumo do vento que o sensor consegue detectar. Este valor é da ordem de 1° . Reprodutibilidade de medição é a característica que define a capacidade do sensor produzir informação fidedigna durante um período de tempo. Esta informação é conseguida através da comparação da recolha de dados entre instrumentos de

medição semelhantes mas com períodos de uso diferentes. Outra das características é a exactidão do sensor, que define um intervalo de valores dentro do qual se encontra o valor “verdadeiro” da variável a medir. A fidelidade de medição é uma característica que indica a dispersão dos valores medidos de um determinado estado da variável, e pode ser avaliada pelo desvio-padrão. A exactidão de um sensor pode variar com o tempo, por isso se torna necessário efectuar a calibração dos equipamentos. [NELSON, 2009]

2.4. Tipos de cata-ventos

Existem dois tipos de sensores de medição do rumo do vento, os cata-ventos mecânicos e os sensores ultra-sónicos de monitorização do vento.

2.4.1. Cata-vento mecânico

A base construtiva do cata-vento mecânico é idêntica, à referida inicialmente neste relatório. O gerador de sinal é um transdutor da posição angular do veio, sendo utilizados diferentes tipos de transdutores. Estes podem ser potenciômetros, *encoders* angulares digitais, motores AC auto-síncronos. O mais utilizado é o sensor com potenciómetro, mas o sensor com *encoder* angular está cada vez mais a ser empregado.

Quando o vento atinge um dado valor de velocidade, a forma do contra-peso e do leme vão fazer com que as forças exercidas pelo vento nas suas superfícies façam com que o contra-peso aponte para o rumo de onde o vento sopra. O veio no qual roda o leme, tem acoplado o terminal de ligação ao potenciómetro que é o responsável pela variação do valor da resistência entre um ponto de referência e esse mesmo terminal, podendo assumir um valor muito perto de zero ou o valor máximo da resistência utilizada no potenciómetro. Ao aplicar-se uma tensão constante aos terminais do potenciómetro, o sinal de saída do terminal acoplado ao veio é um sinal em tensão directamente proporcional ao valor do ângulo de posição do leme.

Este tipo de cata-ventos normalmente apresenta um intervalo sem sinal (*North gap*). Este intervalo geralmente situa-se exactamente antes dos 360°, e pode apresentar uma amplitude na ordem dos 5°, sendo a gama de leitura dos 0° aos 355°. Este fenómeno acontece devido à limitação da colocação dos extremos do potenciómetro, imediatamente um a seguir ao outro. Contudo, existem cata-ventos mecânicos que possuem uma gama de leitura de 0 a 360°.

O veio que o leme faz rodar é suportado por rolamentos de esferas, para um baixo atrito e para que inicie rotação com a menor força possível. Este é um dos elementos que apresenta desgaste ou outro tipo de inconveniente como sujidade nas pistas, o que interfere no normal funcionamento do sensor e na capacidade de aferir o rumo do vento. Para este elemento o fabricante recomenda troca de rolamentos a cada 24 meses.

Uma das opções na compra destes sensores é a capacidade de aquecimento do seu interior. Isto pode ser necessário quando eles são colocados em locais com condições meteorológicas adversas, tais como baixas temperaturas, em que há tendência para a formação de gelo nos componentes interiores dificultando o movimento rotacional.

Este tipo de cata-vento normalmente tem o aspecto do presente na figura 2.6, mas existem cata-ventos mecânicos que na mesma estrutura também contém um anemómetro de hélice,

como se vê na figura 2.7. Com apenas um instrumento consegue-se medir a velocidade e o rumo do vento.



Figura 2.7 – Sensor de monitorização do vento mecânico
(Fonte: www.youngusa.com)

Quando o rumo do vento varia repentinamente, a resposta deste tipo de cata-vento é caracterizada por *overshoot* e oscilação à volta da posição verdadeira, em que esta vai perdendo amplitude. Isto, por se tratar de um sistema sub-amortecido com uma razão de amortecimento inferior a 1. Esta razão é o rácio existente entre o amortecimento do sistema e o amortecimento crítico (valor que permite a resposta transiente mais rápida a um degrau sem ocorrer *overshoot*). O valor da razão de amortecimento deve-se situar entre os 0,3 e os 0,7, para se obter uma resposta rápida e com pouco *overshoot*. [WMO, 2008]

2.4.2. Sensores ultra-sónicos de monitorização do vento

Este tipo de sensores usa ondas de som para determinar a velocidade do vento e o seu rumo. Normalmente consiste num par ou conjunto de pares emissor-receptor, em que o emissor emite um sinal sónico. A componente da velocidade na direcção de propagação do som vai interferir na sua velocidade, levando a que a velocidade do sinal sonoro se altere. A medição também é executada no sentido contrário, e se na medição anterior a velocidade de propagação aumentou, neste caso ela vai diminuir. Este conjunto de medições na mesma direcção mas em sentidos diferentes prende-se com o facto da velocidade de propagação do som depender da temperatura do ar, e com o recurso a este método esse facto é compensado. Após a comparação das medições dos vários pares, que correspondem às várias componentes dimensionais é possível conhecer a velocidade nas três dimensões e rumo do vento.

Devido à sua elevada resolução temporal, ele é apropriado para a medição da turbulência, e como não tem inércia, consegue medir rajadas e picos de velocidade. Não possuem partes móveis minimizando a sua manutenção e, normalmente, são construídos em aço inoxidável permitindo a utilização em ambientes adversos. Esta tecnologia permite obter resultados de elevada precisão. Um exemplo deste tipo de sensores com medição das 3 componentes do vento pode ser visto na figura 2.8.



Figura 2.8 – Sensor de monitorização do vento ultra-sónico 3D da THIES
(Fonte: www.thiesclima.com)

2.4.3. Mecânico vs sónico

Além das breves descrições dos diferentes tipos de cata-ventos, a tabela seguinte foi elaborada para se poder verificar as diferenças técnicas, usando um modelo mecânico e um modelo ultra-sónico do mesmo fabricante.

Tabela 2.1 – Comparação das características entre cata-ventos mecânicos e ultra-sónicos do mesmo fabricante

Característica	Mecânico	Ultra-sónico
Intervalo de medição	0° - 360°	0° - 360°
Exactidão	± 2°	± 1°
Resolução	1 °	Não disponível (geralmente 0,1°)
Temperatura de funcionamento	-35 °C a 80 °C	-50 °C a 70 °C
Potencia máxima necessária (sem aquecimento)	1,5 W	2,5 W

Com este tipo de informação é possível comparar os dois tipos de sensores e verificar se o que incorpora uma tecnologia mais avançada, o torna superior em desempenho. Podem-se destacar três pontos nesta análise. A exactidão do sensor ultra-sónico é superior ao do mecânico, apresentando também melhor resolução. Por fim pode-se atender à potência consumida pelos dois, em que o mecânico ganha vantagem porque apresenta um valor de quase metade em relação ao ultra-sónico.

Para uma análise onde não entrem mais variáveis, o cata-vento ultra-sónico aparenta ter uma enorme vantagem. Contudo para a utilização na caracterização do regime de ventos dum dado

local visando o aproveitamento da energia eólica, variáveis como preço e energia consumida pelo equipamento, adquirem alguma importância. Para o caso indicado, as limitações apresentadas anteriormente sobre o cata-vento mecânico, exactidão e resolução, não colocam nenhum entrave ao tipo de medições que se querem executar. Contudo, as mais-valias dos cata-ventos ultra-sónicos, tais como a quase inexistência de manutenção poderiam ser motivo de escolha ao invés do mecânico, mas neste campo a energia consumida pelos sensores toma grande importância, dando grande vantagem ao mecânico. Como se sabe, grande parte das torres de medição encontram-se em locais remotos, e o equipamento nela colocado tem de ser alimentado por uma fonte própria. Geralmente é utilizado um colector fotovoltaico, com uma área bastante reduzida para alimentar o modem e/ou sensores de humidade e temperatura, e pilhas de 9 V os sensores de velocidade e rumo, sendo de extrema importância que a energia por estes consumida, seja a menor possível.

2.5. Aplicações dos cata-ventos

Existem diversas situações em que necessitamos de conhecer o rumo do vento. Em alguns casos através da observação do meio envolvente, tais como árvores ou objectos que estejam sob efeito do vento, é possível verificar através do seu deslocamento o rumo sobre qual o vento incide. Um desses casos é as birutas, dispositivos colocados nas auto-estradas formados por um tecido em forma de um cilindro com duas aberturas sobre qual o vento passa e indica o rumo deste, e de alguma forma a intensidade também.

Porém, existem outras em que é necessária uma medição muito mais rigorosa. Um dos exemplos mais conhecidos é a utilização do conhecimento do rumo do vento na meteorologia, para se efectuar previsões meteorológicas e para prever mudanças climáticas a longo prazo. No estudo do regime dos ventos dos locais para o aproveitamento da energia eólica. Na aviação é necessário conhecer-se o rumo do vento entre outras condições atmosféricas, para se determinar se as descolagens e as aterragens podem ser executadas em segurança. Neste caso específico o rumo do vento é dada em relação ao norte magnético, ao invés das outras aplicações que é dada em relação ao Norte geográfico. No meio marítimo, o conhecimento do rumo vento é usado na navegação e para o estudo e observação do clima nos oceanos como exemplificado na figura 2.9. Neste último caso os cata-ventos utilizados tem a particularidade de possuírem um rolamento magnético que faz com que a posição dos 0° do potenciómetro esteja sempre alinhada com o norte magnético.

Para aplicação em estações meteorológicas, o rumo do vento deve ser medido com uma exactidão de 5°. [WMO 2008]



Figura 2.9 – Utilização do cata-vento para o estudo do clima nos oceanos
(Fonte: www.pmel.noaa.gov/pubs/PDF/frei2339/frei2339.pdf)

Na indústria, a medição do rumo do vento pode ser também importante, como no caso de fábricas de produtos químicos, em que se pretende controlar a dispersão de poluentes.

2.6. Calibração

Ao contrário dos anemómetros, não existe um procedimento padrão de calibração definido por uma organização. Para os sensores da velocidade do vento, o instituto da rede de medições de energia eólica, “MEASNET”, elaborou um procedimento aceite pelos seus membros e é considerado o procedimento de calibração mais aceite internacionalmente.

Este procedimento é baseado na norma IEC 61400-12-1:2005 “Wind turbines – Part 12-1: Power performance measurements of electricity producing wind turbines”, First edition 2005-12, anexo F. Esta norma é de extrema importância porque além de definir os procedimentos para medição da curva de potência, incorpora os requisitos dos equipamentos utilizados, o que se torna bastante útil na realização de campanhas de avaliação de recurso eólico. Porém, nesta norma não está descrito um procedimento de calibração de cata-ventos nem de anemómetros.

Esta deficiência a nível da ausência de informação sobre calibração, e de um procedimento aceite internacionalmente, levou a que as empresas criassem os seus próprios procedimentos. A recolha de informação para este capítulo foi efectuada através do certificado de calibração da Deutsche WindGuard Wind Tunnel Services, e do manual de instruções da R. M. YOUNG CORPORATION.

2.6.1. Calibração pela THIES

Um dos procedimentos de calibração estudado é o que vem descrito no certificado de calibração do fabricante dos cata-ventos que vão ser verificados na bancada construída, a “THIES GmbH & Co. KG”. Neste caso estamos perante uma calibração dinâmica porque as medições são efectuadas com o sensor posicionado à saída dum túnel de vento. No certificado é indicado que o procedimento é descrito e aceite pela GEO-NET, que é uma empresa de desenvolvimento e consultadoria nas áreas da energia eólica, poluição do ar ambiente. Apesar da tentativa de contacto para o fornecimento de informação nenhuma resposta foi obtida. É possível verificar as indicações do instrumento a ser calibrado, tais como o seu fabricante, o seu número de série e a data em que a calibração foi efectuada. Esta operação é efectuada em instalações que são regularmente calibradas e que estão de acordo com a norma ISO 9001.

Os instrumentos de medição utilizados são indicados no certificado. No caso presente é indicada a utilização de um “*data logger*” acompanhada com a informação relativa ao modelo, última data de calibração e número de série. O dispositivo que é utilizado para impor o movimento angular é um motor passo-a-passo com um incremento de ângulo ou resolução de $0,05^\circ$. O conjunto de programas informáticos utilizados também é referido.



Figura 2.10 – Calibração do cata-vento modelo “Compact” da “THIES” no túnel de vento
(Fonte: Certificado de calibração “Deutsche WindGuard Wind Tunnel Services, 03/2010, 10/1741 DKD-K-36801”)

Relativamente ao procedimento, o cata-vento é posicionado num mastro accionado pelo motor passo-a-passo, à saída do túnel de vento, figura 2.10, de modo a que o sensor fique posicionado na parte do escoamento homogéneo. O corpo do cata-vento é posicionado de modo a que o Norte indicado em si esteja alinhado com o escoamento do túnel, o vento tem uma velocidade de 5 m/s, e o motor vai rodar o cata-vento 30° de cada vez, até completar os 360° de uma volta. Os dados são recolhidos a uma frequência de 30 Hz, e a estes valores são calculadas as médias, que vão ser representadas numa tabela e num gráfico.

Neste método de calibração as condições ambientais são registadas. São medidos os valores da temperatura do ar, da pressão do ar e da humidade do ar.

A tabela dos resultados é composta por três colunas, sendo a primeira correspondente à posição do motor, a segunda a posição indicada pelo cata-vento e a terceira o erro entre os dois valores anteriores. Graficamente os dados inseridos são as posições de referência do motor que são colocadas no eixo das abcissas, e o erro entre a referência e o cata-vento no eixo das ordenadas.

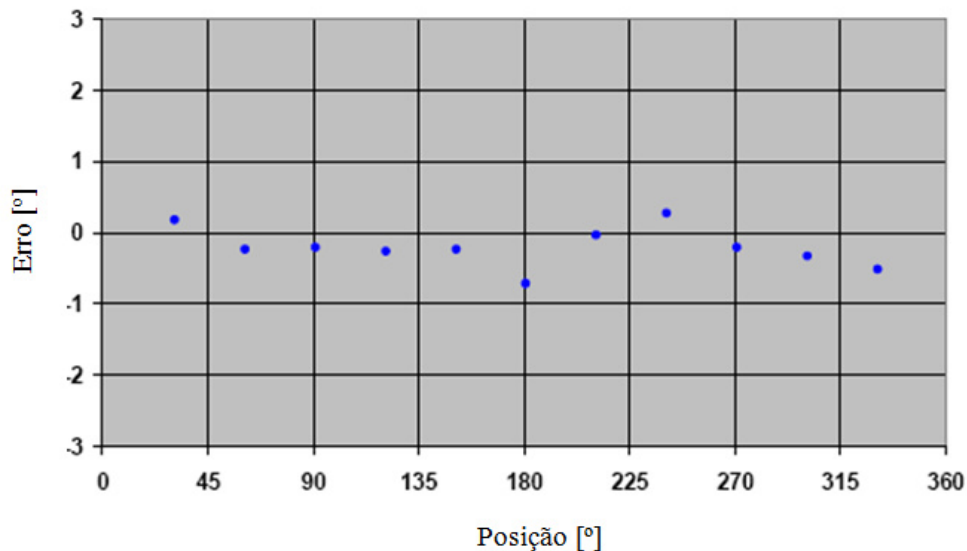


Gráfico 2.1 – Resultados da calibração do modelo “Compact” da “THIE”
(Fonte: Certificado de calibração “Deutsche WindGuard Wind Tunnel Services, 03/2010, 10/1741 DKD-K-36801”)

2.6.2. Calibração pela YOUNG

Este fabricante disponibiliza vários instrumentos de calibração para os seus instrumentos de medição do vento, e após contacto, disponibilizou um manual de instruções com variada informação contendo intervalos de calibração, procedimentos e equipamentos que se podem utilizar.

Para os intervalos de calibração, se o sensor for utilizado para efeitos de pesquisa ou estudo de um local, eles definem quatro tipos de verificação. A primeira, verificação na torre, recomendam um intervalo de 3 meses. A segunda, verificação em bancada, recomendam um intervalo de 6 meses. A terceira, verificação em laboratório, recomendam um período de 12 meses, e o quarto, verificação no fabricante, recomendam um período de 24 meses. A exactidão que os seus cata-ventos devem apresentar é de $\pm 3^\circ$.

A verificação na torre deve ser efectuada sempre que o sensor é instalado independentemente de qualquer verificação anterior. Esta averiguação incide em dois pontos, a força necessária para movimentar o leme do cata-vento, e o sinal de saída do cata-vento. A primeira verifica-se quando o vento está calmo soprando-se suavemente no leme, tentando-se observar movimentos irregulares ou zonas em que é necessário exercer mais força para o leme rodar. A segunda consiste em alinhar o leme com vários pontos de referência tais como os pontos cardeais, ou através de uma bússola e comparar com o sinal de saída. De referir que o INEGI executa esta verificação através da colocação de uma peça metálica dividida em vários sectores

em cima do leme do cata-vento, e o operador vai rodando o leme pelos pontos definidos e compara com o sinal lido no *data logger*.

Para a verificação em bancada o sensor é retirado da torre e colocado em bancadas de teste. São efectuadas verificações aos dois pontos descritos anteriormente, força para rodar o leme e direcção. Para o primeiro ponto, o sensor é colocado numa superfície lisa para se verificar a sua verticalidade, ajustando se for necessário. Após esta verificação monta-se o sensor na bancada de teste e coloca-se na sua parte superior o medidor de binário, figura 2.11, aplicando-se de seguida uma força constante na mola do medidor e deixa-se o leme rodar 360°, apontando-se os valores máximos de binário no sentido de rotação dos ponteiros do relógio e no sentido inverso. Estes valores são depois comparados com valores tabelados, caso os valores lidos sejam superiores aos tabelados é sinal que os rolamentos devem ser substituídos. Como exemplo, um dos modelos deste fabricante apresenta um binário típico no leme no valor de 0,00030 kgf.m e que equivale a uma velocidade mínima do vento de accionamento no valor de 1,1 m/s. Para a verificação da direcção, o sensor é colocado na mesma bancada, e roda-se o veio que segura o cata-vento em intervalos de 30° através da leitura do transferidor acoplado à bancada e compara-se com o sinal de saída do sensor.

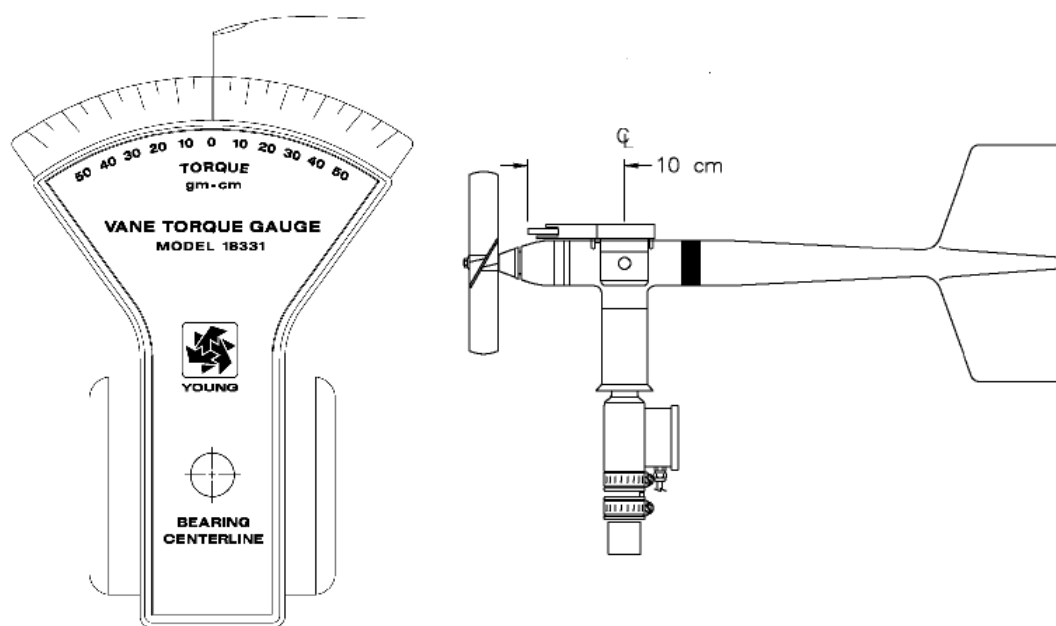


Figura 2.11 – Manómetro dinamométrico de aplicação no leme dos cata-ventos

(Fonte: R. M. YOUNG COMPANY, WIND SYSTEM CALIBRATION RECOMMENDED CALIBRATION INTERVAL, PROCEDURE, AND TEST EQUIPMENT, MODEL 18860-90)

Na verificação em laboratório, o sensor e o equipamento de tratamento de dados é retirado do local de medições e é transportado para um laboratório com instrumentos de calibração e que é operado por um técnico. Relativamente à força necessária para rodar o leme, o teste efectuado é semelhante ao anteriormente descrito acima. No que toca à direcção o procedimento do teste também é semelhante ao anterior, apenas são comparados mais um conjunto de direcções, 340°, 350° e 355°.



Figura 2.12 – Exemplo da bancada de verificação de cata-ventos da “YOUNG USA”
(Fonte: www.youngusa.com)

Quanto à verificação pelo fabricante, o sensor é enviado para as próprias instalações ou para um laboratório de calibração reconhecido. Neste caso é medido o binário do leme que vai ser traduzido no menor valor da velocidade do vento que vai fazer com que o leme rode. Em relação à direcção, o sensor é colocado num mastro que roda para posições definidas, sendo medido o sinal de saída e efectuada a função de relação entre o valor eléctrico e a posição angular.

Capítulo 3

Escolha de componentes da bancada e estudos prévios

Neste capítulo serão apresentados os modelos de cata-vento a serem testados e definidos os vários elementos que constituem o projecto da bancada de teste, tendo em conta os requisitos de cada um.

3.1. Modelos de cata-ventos

Para iniciar o projecto da bancada é necessário saber quais os cata-ventos que vão ser testados, visto que as características destes vão influenciar profundamente o tipo de construção utilizado, e as soluções empregues. O INEGI indicou três modelos diferentes, que são actualmente utilizados nas suas torres de medição. Todos os cata-ventos utilizam um potenciómetro de 2000 Ohm, podendo ser alimentados com uma tensão entre os 0 e os 30 V. Na utilização em campo eles são tipicamente alimentados com 5 V, mas como já foi referido, durante o teste vão ser alimentados através do regulador de tensão.

De seguida faz-se uma breve descrição das características dos tipos de cata-ventos considerados neste trabalho.

3.1.1. First Class

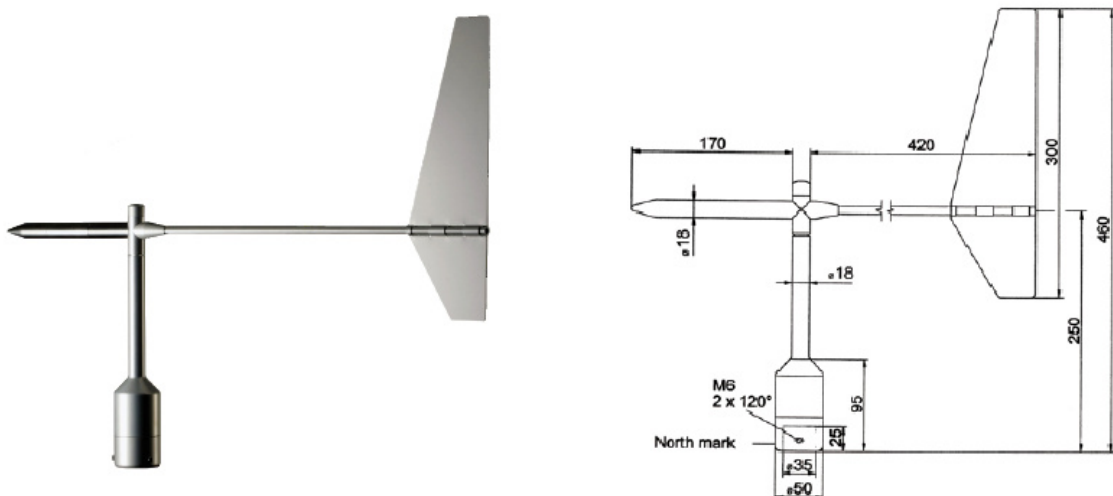


Figura 3.1 – Cata-vento modelo “First Class” da “THIES”
(Fonte: <http://www.ammonit.com/pt/produtos/sensores/cataventos>)

Este sensor utiliza um potenciómetro que converte a propriedade física num sinal analógico, tendo um intervalo de medição de 0° a 360°. A exactidão deste modelo é de $\pm 1^\circ$, e tem um peso aproximado de 0,7 kg e pode ser utilizado com uma velocidade máxima de 85 m/s. Para a montagem nas torres, é utilizado um tubo com um diâmetro exterior de 33.5 mm e um comprimento mínimo de 25 mm. O diâmetro interior deve ser no mínimo de 25 mm, de modo a permitir a passagem do conector. O sensor é fixado através de dois pernos M6.

3.1.2. Classic

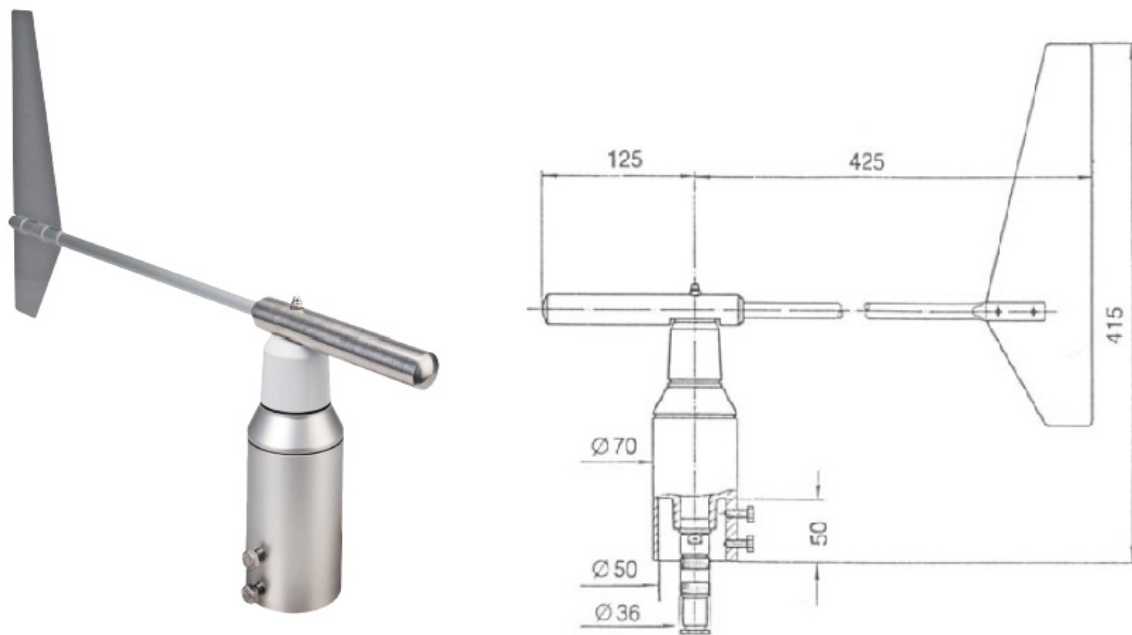


Figura 3.2 - Cata-vento modelo "Classic" da "THIES"
(Fonte: <http://www.ammonit.com/pt/produtos/sensores/cataventos>)

Também neste caso um potenciômetro converte a propriedade física num sinal analógico, tendo um intervalo de medição de 0° a 360°. Este modelo apresenta uma exactidão de $\pm 2^\circ$, uma resolução de 1° e um peso aproximado de 4,5 kg. A velocidade máxima a que pode ser sujeito é de 60 m/s. Para a montagem nas torres de medição é utilizado um tubo com um diâmetro exterior de 48 mm e um comprimento mínimo de 50 mm. O diâmetro interior deve ser no mínimo de 36 mm, para que o conector possa ser ligado à parte inferior do sensor. O sensor é depois fixado através de dois parafusos de cabeça hexagonal.

3.1.3. Compact

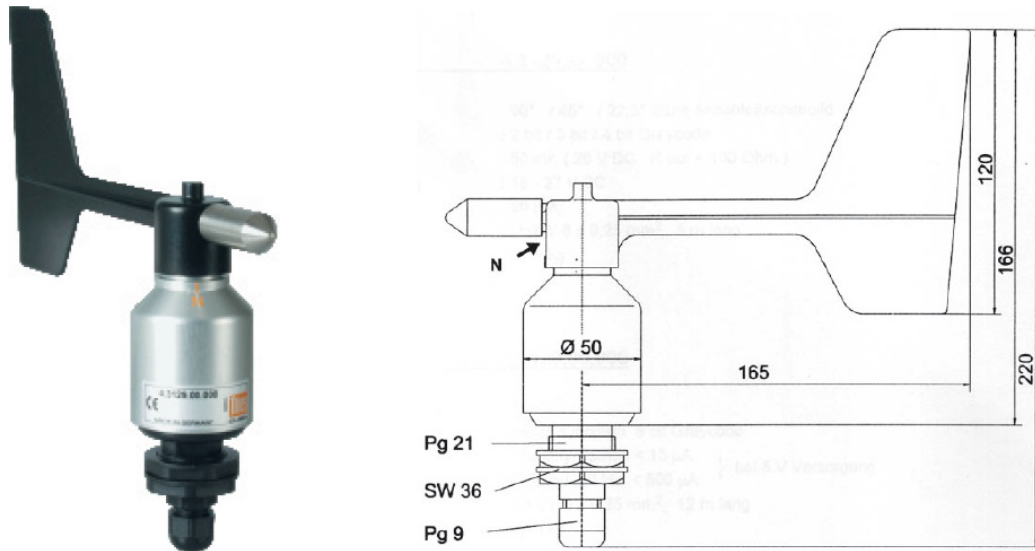


Figura 3.3 - Cata-vento modelo "Compact" da "THIES"
(Fonte: <http://www.ammonit.com/pt/produtos/sensores/cataventos>)

Este sensor incorpora também um potenciómetro, para a indicação da propriedade física medida, tendo um intervalo de medição de 0° a 360°. A sua exactidão é de $\pm 2^\circ$ e apresenta uma resolução de 0,5°. Pesa 1,55 kg e pode ser utilizado em velocidades de vento até os 80 m/s durante 30 minutos. Pode ser montado num tubo com uma rosca interior PG21, ou numa chapa com um furo de diâmetro 29 mm. Neste cata-vento não é introduzido nenhum conector na sua parte inferior, ele faculto o seu próprio cabo.

3.2. Selecção do motor

O movimento rotacional da base dos cata-ventos é criado através de um motor eléctrico.

Existe um vasto leque de motores alimentados quer por corrente eléctrica contínua (CC), quer por corrente alternada (CA). Dentro dos motores de corrente alternada estes podem ser monofásicos (corrente tipicamente disponível nas tomadas das nossas habitações) ou podem ser multifásicos (corrente tipicamente disponível em edifícios fabris). Quanto aos motores de corrente contínua estes são divididos em motores CC de escovas (*brush motor*), motores CC sem escovas (*brushless motor*) e motores passo-a-passo.

Motores passo-a-passo:

A base de funcionamento assemelha-se à de um motor trifásico síncrono, em que o rotor que contém ímanes alinha-se com o campo magnético produzido pelo conjunto de ligações do estator, controladas electronicamente. Este motor foi desenhado para operação intermitente, isto é, é usado essencialmente para posicionamento e não para operação contínua. Apresenta o máximo binário quando está parado, permitindo dispensar uma embraiagem ou travão. Dado que a posição é definida pela activação das bobinas correspondentes, o controlador conhece a

posição do motor, dispensando o uso de um sensor adicional, dependendo da sua programação, permite alterar o sentido e velocidade de rotação, e pararem num ângulo específico. O seu preço é comparativamente elevado devido ao *drive* necessário para controlá-lo.

A bancada de teste dos cata-ventos necessita um motor que possua capacidade de controlo em posição, a velocidades muito baixas e que o faça com precisão elevada. Após o motor rodar para a posição desejada, é fundamental que o seu veio esteja travado de modo a poderem ser efectuadas as medições correspondentes (posição angular, e posição fornecida pelo cata-vento). A dimensão do motor, apesar de não ser um ponto de elevada importância, deve ser compacto, de modo a que as dimensões gerais da bancada sejam reduzidas.

Após uma análise dos diversos tipos de motores, e de acordo com os principais requisitos enumerados, foi escolhido o motor passo-a-passo. Para a rotação da base dos cata-ventos e dos respectivos suportes, não é necessário um motor de elevado binário, logo pode ser usado um motor de reduzidas dimensões.

O escolhido foi o modelo “ST4209S0404” da “Nanotec”. Este motor apresenta um binário motor de aproximadamente 0,16 N.m até as 100 rpm, como se pode ver na figura 3.4, e um binário em situação de parado de 7,6 N.cm.

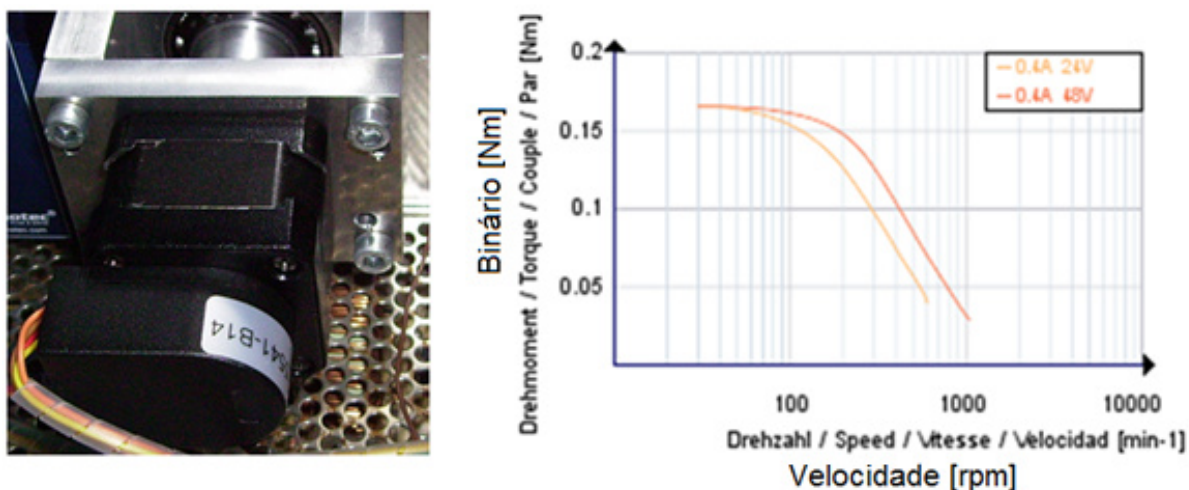


Figura 3.4 – Motor modelo “ST4209S0404” da “Nanotec” e respectivo gráfico do binário em função da velocidade de rotação

Este modelo foi o escolhido entre outros da mesma série porque possuía uma curva de binário semelhante aos demais mas apenas necessita de uma corrente de 0,4 A, valor bastante inferior dos outros modelos, o que permite temperaturas de funcionamento do motor e do respectivo *drive* bastante mais baixas. O motor apresenta uma resolução de 0,9°

3.3. Selecção do encoder

O *encoder* utilizado vem acoplado ao motor seleccionado. Tem uma característica de 1000 pulsos por 360°, o que equivale a dizer que tem uma resolução de 0,36°. O *encoder* é o transdutor padrão de referência e o principal responsável pela exactidão da medição da

bancada de testes e a sua resolução apresenta um valor algo elevado para uma calibração. Em conjunto com o INEGI foi definido que este valor é aceitável perante os cata-ventos actualmente disponíveis, que possuem exactidão de cerca de $\pm 2^\circ$. Contudo foi efectuada uma pesquisa de *encoders* com melhor resolução, que podem ser aplicados posteriormente:

Modelo: OMRON E6C3-CWZ3EH:2500P/R

Resolução: $360^\circ/2500=0,144^\circ$

Preço de tabela: 260€



Modelo: HENGSTLER RI58-0,10000ppr 58mm 5V

Resolução: $360^\circ/10000=0,036^\circ$

Preço de tabela: 290€

Figura 3.5 – Encoder da “OMRON” com 2500 passos por rotação
(Fonte: http://www.ia.omron.com/product/family/489/index_fea.html)

Foi utilizado o *drive* do motor recomendado pelo fabricante do motor modelo “SMCI33”, figura 3.6. Este *drive* contém a interface de ligação com o motor e o *encoder* incorporada, como também possui várias entradas e saídas. A comunicação com o computador poderá fazer-se via RS232 ou *USB*, tendo-se optado por este último porque a interface serie já é pouco comum nos computadores.



Figura 3.6 – Drive do motor modelo “SMCI33-1” da “Nanotec”.

3.4. Fonte de alimentação

O *drive* do motor necessita de ser alimentado com uma tensão entre os 24 V e os 48 V. Para esse fim é necessário escolher uma fonte de alimentação que seja possível aplicar na estrutura da bancada. Dentro das possibilidades, existem dois tipos de fontes que podem ser utilizadas: as comutadas (*switching*) e as lineares (*linear*).

As fontes lineares são de baixa eficiência energética. A energia não aproveitada é dissipada maioritariamente na forma de calor, sendo necessário recorrer a dissipadores.

As fontes comutadas caracterizam-se pela sua elevada eficiência e pela sua flexibilidade de uso em aplicações variadas e têm menos peso e volume em relação às lineares pois não necessitam de possuir a mesma capacidade de dissipação de calor para as mesmas potências.

Pelo lado negativo tem-se a produção duma tensão de saída com ruído provocadas pelo "*switching*", quer a montante, quer a jusante

Para a utilização na alimentação *drive* do motor, a que mais se enquadra é a fonte comutada. Isto, porque, para a situação em causa, a existência de ruído no sinal de saída não interfere com o bom funcionamento do *drive*, e como a bancada tem de ser compacta, o tamanho e peso tomam um papel importante. A somar a estas considerações, há que ter em conta o facto de possuir uma elevada eficiência.

A fonte seleccionada é do fabricante "Mean Well Direct", modelo S-150-24, figura 3.7. Tem como principais características: saída única, e arrefecimento por convecção natural. O sinal de saída tem uma potência de 150 W, uma tensão de 24 V e uma corrente de 6,5 A.

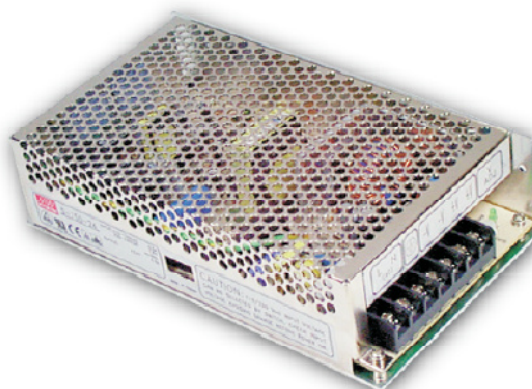


Figura 3.7 – Fonte de alimentação de 24 V modelo "S-150-24" da "Mean Well Direct"

(Fonte: <http://www.meanwelldirect.co.uk/products/150W-Single-Output-AC-DC-Enclosed-Power-Supply/S-150-Series/default.htm>)

Quando os cata-ventos são colocados nas torres de medição o valor da tensão de alimentação é de 5 V. Neste projecto para se manter as condições habituais, será usada uma tensão de alimentação de cerca de 5 V. Como se trata de uma instalação de verificação, é imperativo a redução das fontes de erro a valores baixos e controláveis, pelo que é importante que a fonte

de alimentação deverá fornecer uma tensão constante e sem ruído, caso contrário o valor de saída do cata-vento ia incorporar os efeitos desse ruído levando a que os resultados de medição sejam afectados. Neste caso, a escolha recaiu numa fonte de alimentação linear pela importante característica de introduzir muito pouco ruído na tensão fornecida, contudo a solução adoptada foi diferente.

Foi utilizado um regulador de tensão de 5V (7805) alimentado a 24 V, fornecidos pela fonte de alimentação referida anteriormente (ver esquema na figura 3.8). Obviamente que era necessário saber o valor verdadeiro da tensão fornecida para se efectuar uma correcta leitura da posição do cata-vento, tendo sido medido o valor de 4,81 V aos seus terminais. Dada a elevada diferença entre a entrada e a saída do regulador é possível assegurar uma tensão perfeitamente estabilizada.

Foi montado um pequeno circuito eléctrico que continha o regulador de tensão, juntamente com um fusível de 100 mA para proteger os cata-ventos, e também um *led* (*light emitting diode*) que indica se está a ser fornecida corrente eléctrica ao cata-vento.

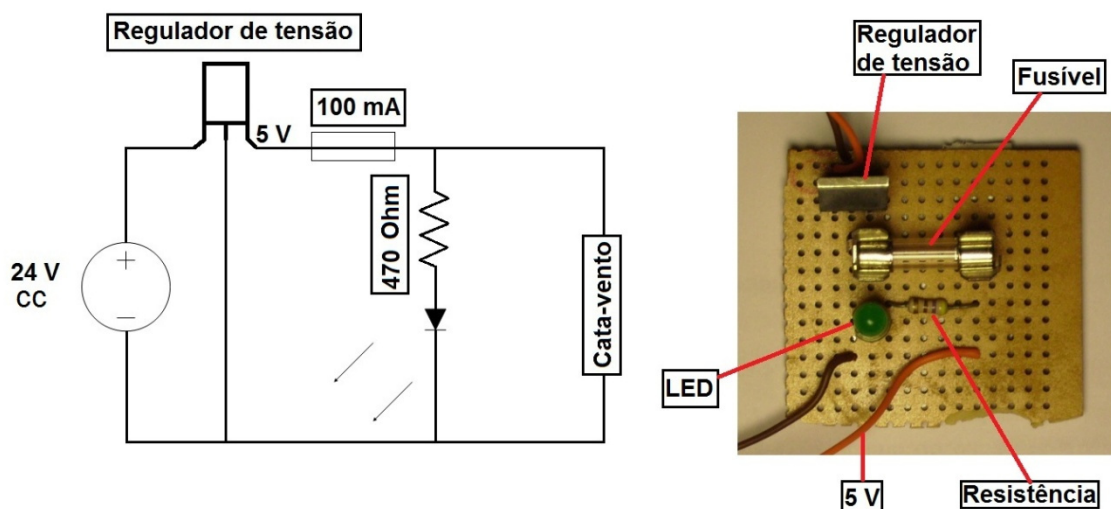


Figura 3.8 – Esquema do circuito eléctrico utilizado para fornecer os 5 V.

3.5. Placa de aquisição de dados

O sinal de saída do potenciómetro do cata-vento é lido utilizando o módulo de aquisição de dados da National Instruments, modelo NI 9201. Este módulo está a ser utilizado no chassis NI-cDAQ 9172, figura 3.9, ambos propriedade do INEGI.

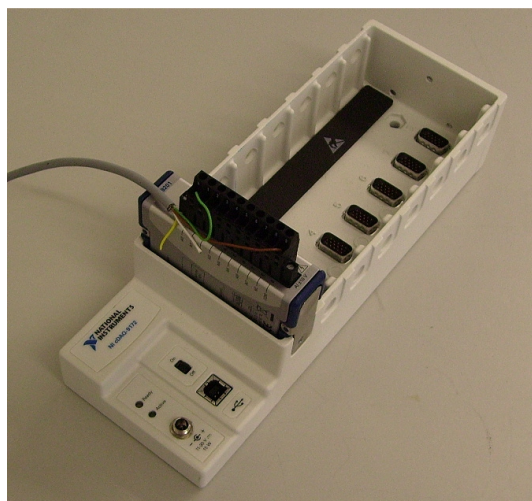


Figura 3.9 – Placa de aquisição de dados utilizada modelo “NI-cDAQ 9172” com o módulo de leitura modelo “NI 9201” da “National Instruments”

3.6. Estudos prévios

Nesta fase, os requisitos do projecto definidos pelo INEGI foram analisados e dentro das limitações impostas, foi considerado um conjunto de soluções que permitissem o teste dos modelos de cata-vento apresentados anteriormente. As ideias iniciais foram evoluindo para uma solução final e, após análise pelo INEGI, o qual indicou algumas alterações objectivas, culminou no projecto definitivo da bancada de teste automático.

Em conjunto com os orientadores da dissertação, foram concebidas as primeiras soluções mais genéricas quer com o accionamento do corpo do cata-vento, o que implica a fixação do leme; quer com o accionamento do leme do cata-vento estando o respectivo corpo fixo.

3.6.1. Accionamento no leme do cata-vento

Neste desenho, o motor deverá movimentar o leme, enquanto a base do cata-vento ficará fixa, como mostrado na figura 3.10.

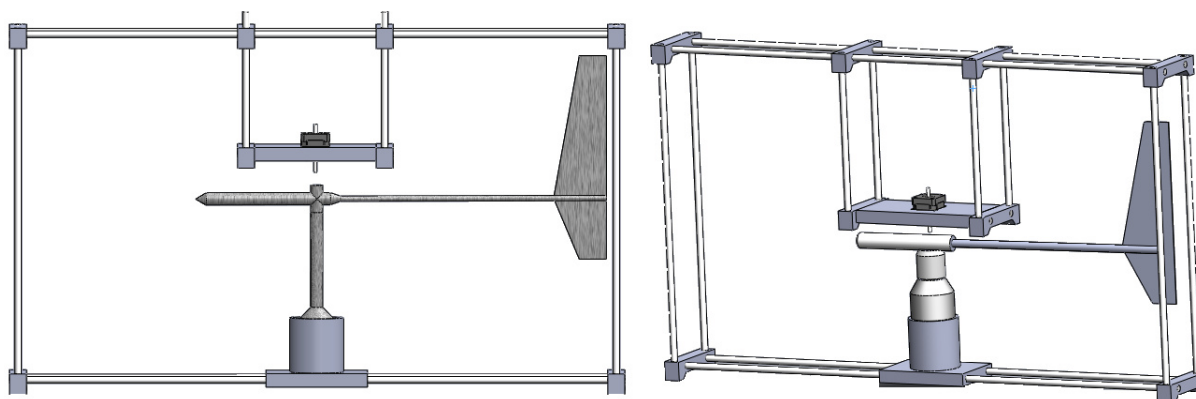


Figura 3.10 – Exemplo de uma bancada com accionamento no leme

Esta solução apresenta vários aspectos positivos. O facto de se actuar no leme, permite utilizar um motor de baixa potência, porque o binário necessário para fazer rodar o leme é apenas o suficiente para vencer o atrito dos rolamentos, o que é um valor muito reduzido. Esta opção também permitiria medir o binário necessário para rotação, o que depois de analisado podia indicar os estado dos rolamentos do sensor. Em termos construtivos esta opção não necessitaria de rolamentos, e os mecanismos de suporte do corpo seriam de baixa complexidade. Outro aspecto positivo seria a possibilidade de rotação sem qualquer entrave, visto que os fios do sensor e do motor estariam sempre fixos ao contrário de outras opções, em que o fio tem de seguir a rotação do corpo.

Pelo lado negativo, este sistema para alojar os diversos sensores existentes necessita de uma estrutura de dimensões consideráveis, visto que o sensor “First Class” apresenta um comprimento do leme na ordem dos 450 mm o que implica uma bancada com largura na ordem de 1000 mm. Outro aspecto negativo é o facto da estrutura que suporta o motor ter de se adaptar às diversas alturas dos diferentes cata-ventos, não sendo uma solução prática nem expedita. Finalmente, como a parte de cima de cada cata-vento é diferente, implicava que o dispositivo que transmite movimento do motor fosse específico para cada um, dificultando a sua utilização.

3.6.2. Accionamento no corpo

Com este tipo de accionamento é necessário fixar o leme e construir um suporte que consiga rodar os corpos dos diferentes cata-ventos. O motor deverá accionar esse suporte de forma directa como demonstrado na figura 3.11, ou através de um meio de transmissão mecânica, como por exemplo, uma polia.

- 1 - Cata-vento modelo Classic
- 2 - Suporte dos casquilhos
- 3 - Braço articulado
- 4 - Base
- 5 - Motor
- 6 - Suporte do motor
- 7 - Perna

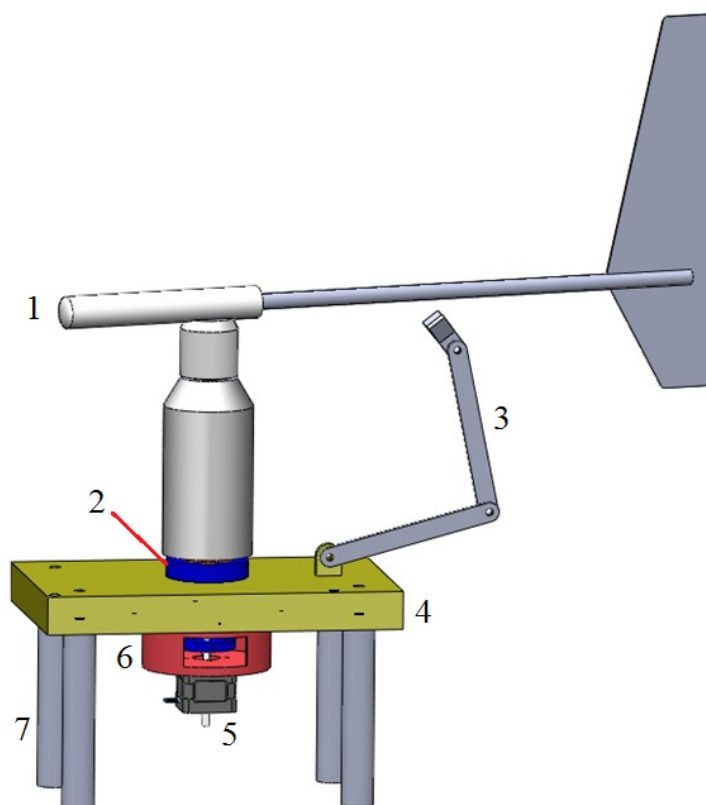


Figura 3.11 – Exemplo de uma bancada com accionamento no corpo e leme fixo por estrutura articulada

Nesta solução, cada modelo de cata-vento tem um suporte específico, que vai encaixar no suporte azul (2) que se pode visualizar na figura 3.11. Também se pode verificar que o exemplo demonstrado tem accionamento directo, o veio do motor (5) é fixo ao suporte azul (2), sem intermédio de outro tipo de transmissões. Esta opção permite que a leitura do *encoder* seja directa, evitando-se assim o eventual escorregamento o que permite uma leitura rigorosa da posição angular. Se, por outro lado, fosse utilizado algum tipo de transmissão de potência, como o caso de polias e correias, o posicionamento preciso do suporte estaria comprometido devido às deformações que a correia sofreria e devido à dificuldade de a manter tensionada. O motor utilizado não necessita de aplicar um binário elevado, mais uma vez a massa a mover é bastante concentrada no eixo de rotação e apresenta um valor relativamente baixo. O binário vai ter que superar o atrito existente nos rolamentos utilizados para apoio do suporte e respectivo conjunto suporte - cata-vento. Ligado à aplicação do movimento ao corpo, está o facto de os fios terem que acompanhar o movimento de rotação. Para a fixação do leme o sistema proposto consiste num braço articulado, o qual é possível mover-se para fixar a parte de trás do leme dos diferentes modelos de cata-ventos. Pelo lado positivo, destaca-se a facilidade com que o braço se adapta a cada cata-vento e pela sua estética. Pelo lado negativo, tem-se a incapacidade de fixar o leme de uma forma absoluta, porque não tem um dispositivo que “agarre” o leme de forma eficaz aliado à instabilidade posicional dos sistemas articulados.

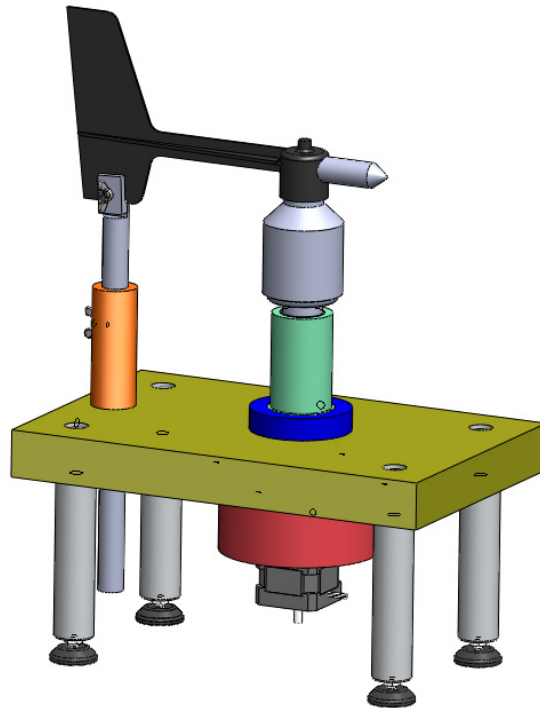


Figura 3.12 - Exemplo de uma bancada com accionamento no corpo e leme fixo por veio regulável em altura

Para eliminar o maior inconveniente da proposta anterior, o braço articulado, a solução encontrada assenta na utilização de um veio guiado através de um casquilho em bronze (peça laranja da figura 3.12), que é controlável em altura através do aperto de um parafuso de orelhas. O mesmo veio tem na parte superior uma chapa para fixação do leme pressionada por uma porca de orelhas.

Capítulo 4

Projecto elaborado

4.1. Projecto mecânico

Após avaliadas as opções possíveis de construção da bancada, optou-se por efectuar o accionamento do corpo do cata-vento (figura 4.1), ao invés do accionamento do leme, mantendo-se este fixo. As razões para esta opção são principalmente os aspectos negativos já descritos anteriormente no capítulo três para o accionamento do leme, e pela maior praticabilidade demonstrada pelo accionamento do corpo do sensor, para os diversos tipos de cata-vento usados actualmente pelo INEGI ou para os modelos futuros que possam vir a ser adquiridos. Contudo este ponto será mais explícito quando for feita a abordagem aos diversos suportes para os sensores.

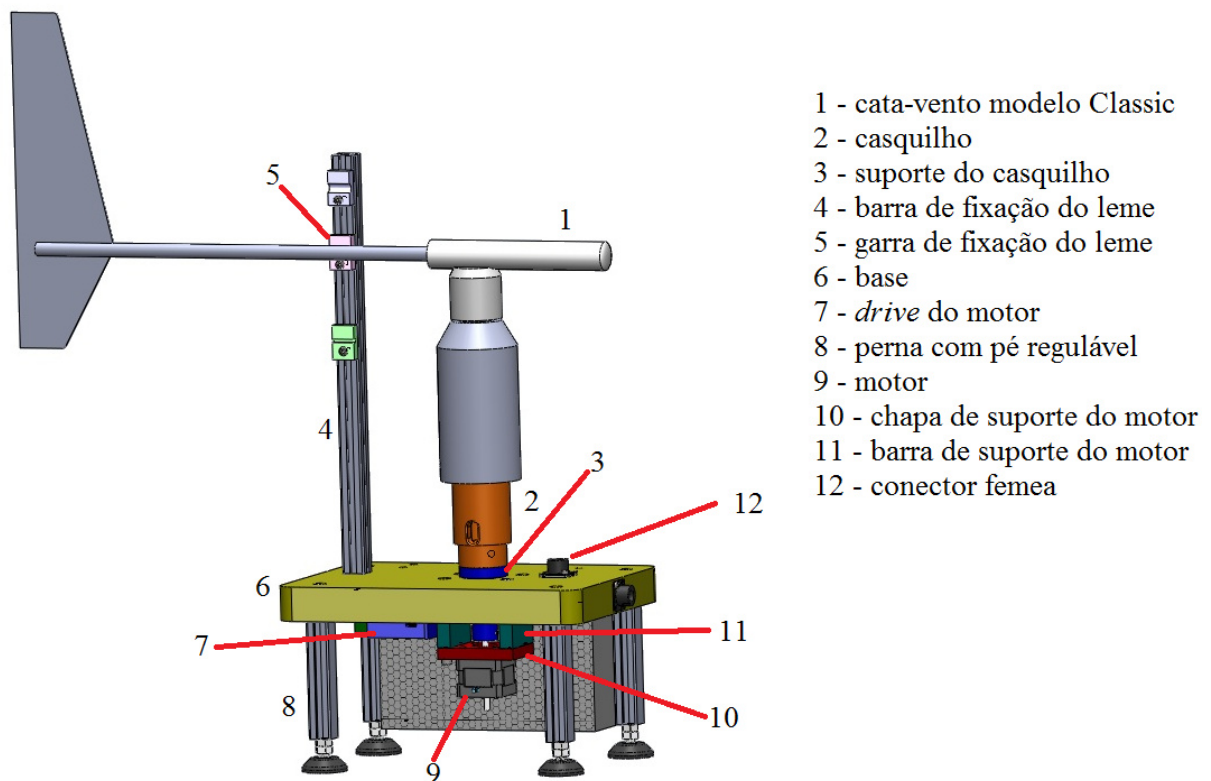


Figura 4.1 – Desenho de conjunto em 3D da bancada projectada

As decisões tomadas não foram fáceis. Como o objectivo da bancada é efectuar a verificação da exactidão de operação de um cata-vento, é necessário que o sistema por si só forneça o valor do rumo do cata-vento com a menor incerteza possível, para que se possa depois comparar com o valor lido pelo sensor. Assim, todas as decisões tomadas vão de encontro à construção de uma bancada que permita uma boa exactidão no posicionamento do cata-vento.

Para responder ao desafio anterior, deu-se especial atenção à transmissão da potência do motor ao suporte do corpo dos cata-ventos. A primeira solução idealizada utilizava uma transmissão por polia e correia. Deste modo, dependendo da relação utilizada poder-se-ia elevar o binário aplicado ao suporte, e utilizar-se sistemas de fixação dos sensores de maior peso e inércia. Mas esta opção tem uma característica que se torna prejudicial para um posicionamento de precisão. Ao utilizar-se uma correia, não é possível garantir a rigidez do

sistema de transmissão de potência quando se fazem arranques e paragens sucessivas. Assim, optou-se pelo accionamento directo do cata-vento acoplando-o directamente ao veio do motor, figura 4.2. Assim, o suporte tem um furo na sua parte inferior do mesmo diâmetro do veio do motor com um ajustamento H7. O veio foi facejado, e preso por um perno para impedir o escorregamento. Para se garantir a centricidade foram utilizadas cavilhas cilíndricas paralelas na barra onde está aparafusado o motor, tendo-se usado a mesma solução para a base.

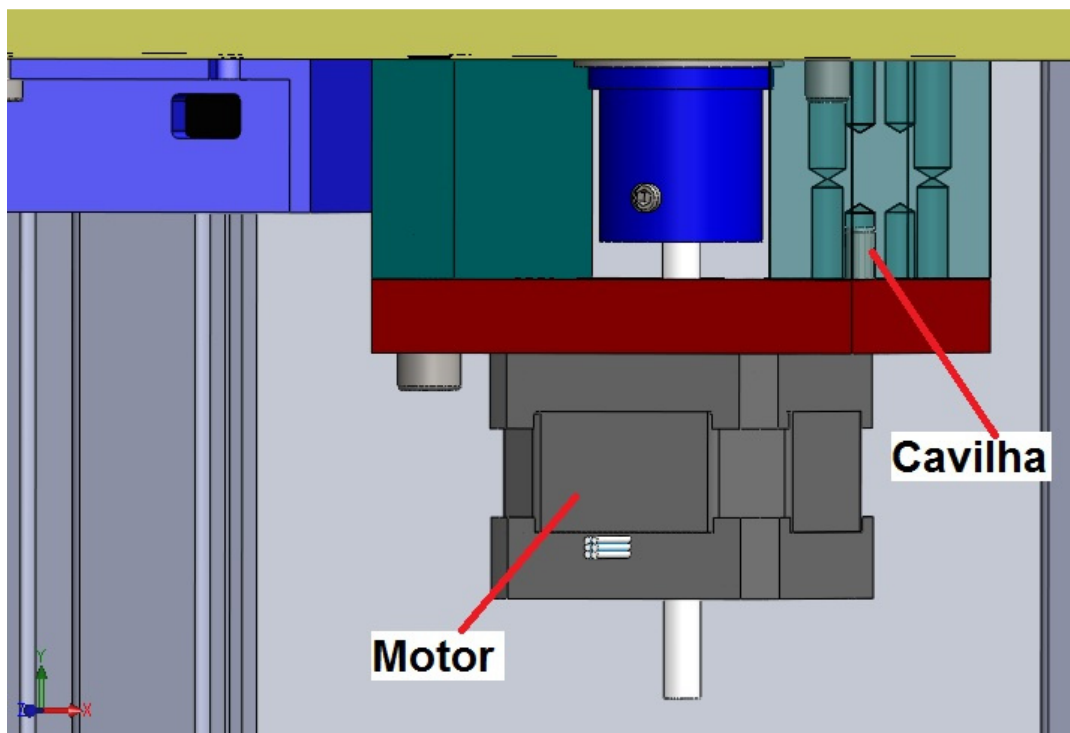


Figura 4.2 – Visualização da estrutura de suporte do motor

O suporte montado na bancada serve de apoio aos diferentes casquilhos utilizados, transmitindo o peso dos casquilhos e dos cata-ventos aos rolamentos de esferas e os rolamentos de esferas por sua vez transmitem-no à base. Estes rolamentos são colocados o mais distante possível um do outro para que não exista inclinação do suporte, principalmente pelo peso dos cata-ventos e pela sua altura. O suporte apresenta um diâmetro na sua parte superior, maior do que o diâmetro do furo da base, o que permite proteger os rolamentos de resíduos e pó, já que os rolamentos utilizados não são blindados. O uso de rolamentos não blindados deveu-se principalmente ao maior atrito que ia ser provocado pelo lubrificante, o que não é justificável dado as reduzidas velocidades de rotação.

No seu centro, o suporte tem colocado uma cavilha de 12 mm de diâmetro, figura 4.3, que é a responsável pela transmissão do movimento aos casquilhos dos sensores. Esta foi colocada à pressão para não permitir escorregamento entre si e o suporte. Como apresenta a aresta quebrada a colocação dos casquilhos é muito prática e rápida, mantendo uma centricidade elevada devido aos ajustamentos utilizados. Esta solução foi utilizada pela sua simplicidade de uso e por garantir a verticalidade dos cata-ventos.

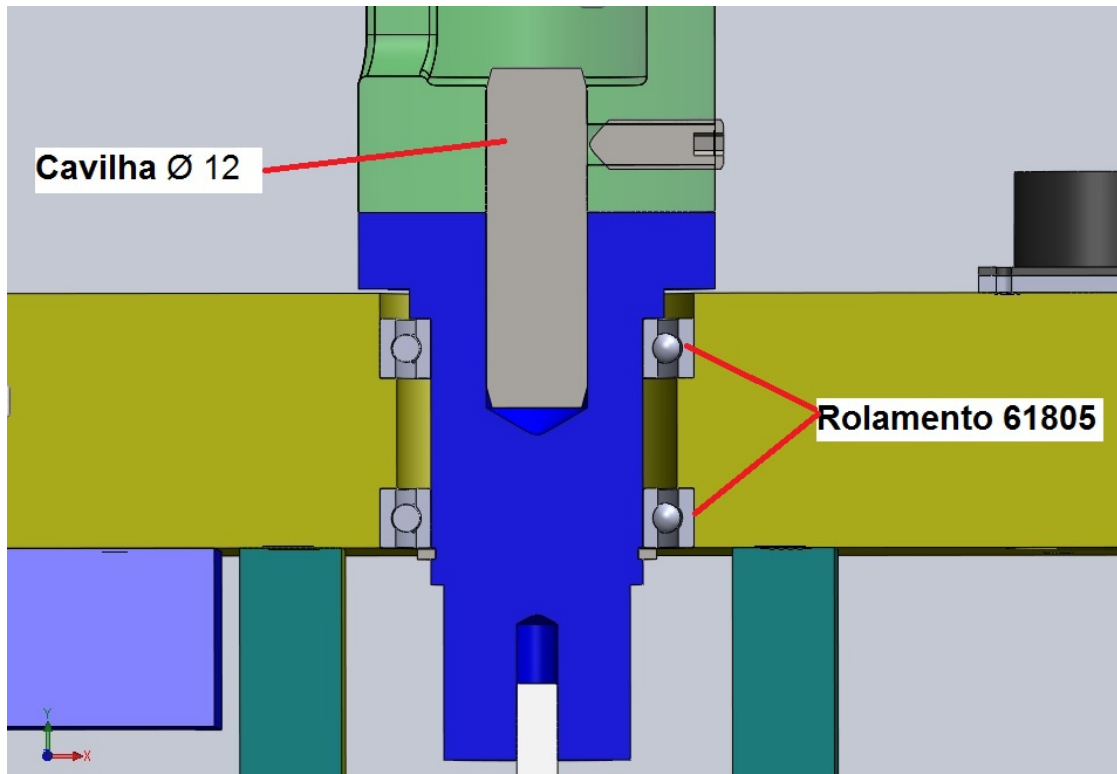


Figura 4.3 – Vista local em corte do suporte e respectivos rolamentos e cavilha.

Para completar o sistema que sustenta e segura o cata-vento falta referir os casquilhos utilizados para cada modelo. Uma das soluções tidas em conta foi a utilização de uma pinça semelhante às usadas nos tornos de maquinagem, que permitiria variar a distância das garras ao centro para poder acomodar os vários diâmetros dos furos dos cata-ventos. Esta opção teria como grande vantagem a auto-centragem entre o veio do motor e o corpo dos cata-ventos. Porém o peso desses dispositivos é exagerado, e poder-se-ia correr o risco de o motor não possuir binário suficiente, aumentando ainda fortemente o custo da bancada. Mais, devido à diferença de diâmetros dos furos para inserir o suporte entre dois dos actuais modelos, dificilmente se encontraria um dispositivo que conseguisse um intervalo de actuação para suportar estes diâmetros. Acresce que um dos cata-ventos é fixado por meio de rosca o que não permitiria o seu uso com este sistema, e se no futuro existissem modelos novos com dimensões do furo do suporte fora do intervalo de diâmetros criado pelos dois modelos actuais, a bancada já não podia ser utilizada.

A solução adoptada para a fixação do corpo dos cata-ventos passou pelo fabrico de casquilhos diferentes, para cada um dos três modelos existentes, como visto na figura 4.4. Dois dos cata-ventos têm um furo na sua parte inferior para a introdução do tubo de suporte. Após introduzir-se o tubo os cata-ventos têm dois parafusos nas suas laterais que vão pressionar o tubo contra a parede dos furos. Para a montagem nas torres de medição o diâmetro nominal do tubo não necessita de ser igual ao diâmetro nominal do furo dos cata-ventos, porque a excentricidade criada não vai afectar a medição do rumo do vento. Porém na bancada esta excentricidade vai criar uma diferença entre a posição angular do veio do motor e a posição angular do corpo do cata-vento. Para minimizar esta excentricidade, os diâmetros dos casquilhos que vão ser introduzidos nos furos dos corpos dos cata-ventos necessitam de se aproximar o mais possível dos diâmetros destes mesmos. Assim sendo, foram efectuadas

várias medições aos furos de fixação, de modo a conhecer-se o menor diâmetro entre os vários exemplares do mesmo modelo. Os resultados das medições podem ser visualizadas nas tabelas 4.1 e 4.2.

Tabela 4.1 – Medição do diâmetro do furo dos diversos exemplares do modelo “Classic”

Cata-vento “Classic”							
Exemplar 1		Exemplar 2		Exemplar 3		Exemplar 4	
Medição	Diâmetro (mm)	Medição	Diâmetro (mm)	Medição	Diâmetro (mm)	Medição	Diâmetro (mm)
1	50,27	1	50,03	1	50,39	1	50,37
2	50,32	2	50,06	2	50,20	2	50,36
3	50,30	3	50,07	3	50,38	3	50,38
4	50,32	4	50,07	4	50,37	4	50,33
5	50,31	5	50,00	5	50,39	5	50,36
Média	50,30	Média	50,05	Média	50,35	Média	50,36

Tabela 4.2 – Medição do diâmetro do furo dos diversos exemplares do modelo “First Class”

Cata-vento “First Class”					
Exemplar 1		Exemplar 2		Exemplar 3	
Medição	Diâmetro (mm)	Medição	Diâmetro (mm)	Medição	Diâmetro (mm)
1	35,05	1	35,01	1	35,05
2	35,06	2	34,96	2	35,02
3	35,06	3	34,98	3	35,05
4	35,07	4	35,01	4	35,08
5	35,04	5	34,90	5	35,04
Média	35,06	Média	34,97	Média	35,05

À menor média dos diâmetros de cada modelo foi subtraído 0,1 mm. O valor resultante é o que vai ser usado no diâmetro nominal do casquilho respectivo de cada modelo.

No modelo “Compact” este problema não se coloca, porque o método de fixação é através de um tubo roscado interiormente. Para se proceder à fixação neste modelo, é inicialmente introduzida uma porca hexagonal no cata-vento, e depois o cata-vento é apertado no casquilho até a dita porca fazer de batente, o que não vai permitir que o cata-vento se desaperte durante o funcionamento.

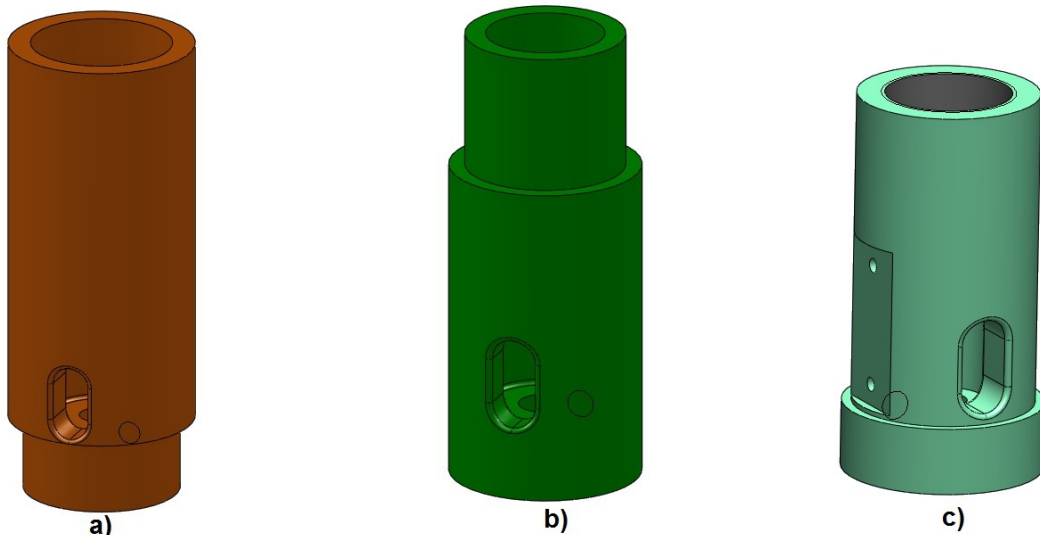


Figura 4.4 – Desenho em 3D dos diversos casquilhos de suporte dos cata-ventos, a) modelo “Classic”, b) modelo “First Class”, c) modelo “Compact”

Estes casquilhos têm um furo na sua parte inferior, de forma a acomodar o pino de 12 mm do suporte principal. A aresta do furo é quebrada para permitir uma introdução fácil do pino. É utilizado um perno de ponta cônica que rosca em cada casquilho e que através da força exercida no pino do suporte, garante que não existe escorregamento entre os dois. Este sistema permite uma troca rápida de casquilhos, em que só é necessário utilizar uma chave de *umbrako* para os pernos.

Na fixação dos lemes dos cata-ventos a ideia inicialmente considerada consistia num sistema de um veio guiado num casquilho, e que o utilizador tinha de mover verticalmente para acomodar os diversos cata-ventos que possuem alturas distintas de lemes. Na sua extremidade estaria uma pequena chapa pressionada contra os lemes através de uma porca de orelhas, como foi referido no capítulo três. Porém concluiu-se que não seria prático, principalmente pelos sistemas de aperto do veio e da chapa. A solução encontrada foi a utilização de uma barra fixada à base, que continha ao longo da sua face suportes nos quais os lemes poderiam encaixar, como pode ser visto na figura 4.5.

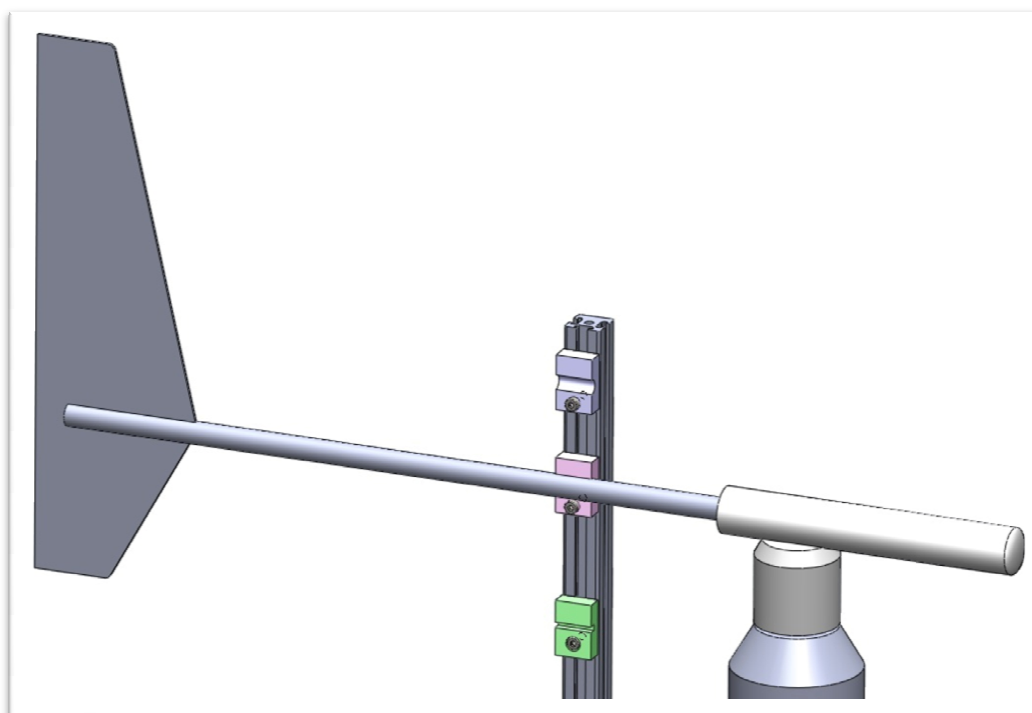


Figura 4.5 – Visualização do sistema de fixação do leme dos cata-ventos (o modelo em causa é o “Classic”)

A passagem dos cabos de ligação para fornecerem a tensão de alimentação e para medir a tensão do potenciômetro, dependem das opções tomadas anteriormente. Se a transmissão da potência fosse por polia e correia havia a possibilidade de os cabos dos cata-ventos passarem pelo centro dos casquilhos e do suporte e saírem pela parte inferior do suporte. Assim, para a solução adoptada, a única opção viável é os cabos saírem por um furo na parte lateral dos casquilhos que suportam os sensores, como se pode ver na figura 4.6.



Figura 4.6 – Casquilhos dos vários cata-ventos com os cabos de ligação no seu interior (na esquerda modelo “First Class”, no centro modelo “Compact”, na direita modelo “Classic”)

Os modelos “Classic” e “First Class” tem ligação por conector, enquanto o “Compact” é apresentado com os fios soltos. Para todos os modelos foi utilizado um cabo com um conector

comum a todos, que é o que vai ser ligado à base, e na outra extremidade tem o conector próprio de cada cata-vento no caso dos dois primeiros e um conector rápido no caso do “Compact”. Os cabos, como passam pelo furo de cada casquilho e tem nas suas extremidades os conectores, não podem ser retirados, estando sempre juntos, e para ligar um cata-vento ao conector da base para receber a tensão de alimentação e para a leitura da tensão nos terminais do potenciômetro, apenas é necessário ligar um conector ao corpo do cata-vento, inserir o casquilho, e depois ligar o conector da outra extremidade ao receptor. Com o “Compact”, os fios soltos passam pelo interior do casquilho e saem pelo furo lateral, e depois são ligados ao conector rápido que está aparafusado na lateral do casquilho.

A base é o componente que serve de suporte a grande parte dos componentes. As suas dimensões exteriores foram definidas de modo a criar uma bancada estável e rígida, e para que todas as peças possam ser montadas de forma a criar uma bancada compacta. A ela estão aparafusadas as pernas, a fonte de energia, o *drive* do motor, a estrutura de suporte do motor, e os conectores fêmea. As caixas no centro da base acomodam os rolamentos com um ajustamento deslizante, de modo a evitar dificuldades na rotação das esferas. Por uma questão estética e de funcionalidade todos os furos têm caixas para que as cabeças dos parafusos não fiquem salientes à superfície. Na figura 4.7 pode-se ver uma vista do desenho em 3D da base e dos respectivos componentes a ela associados.

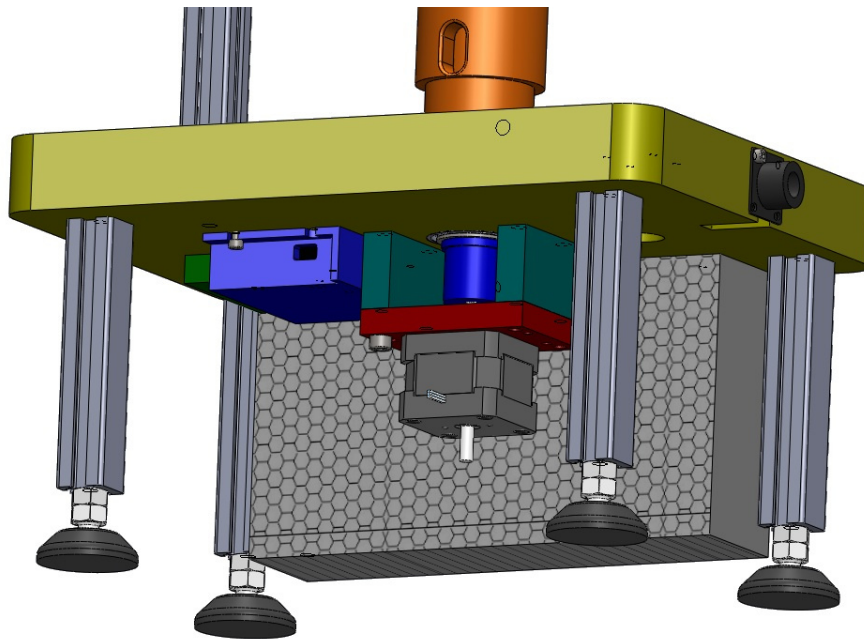


Figura 4.7 – Visualização dos componentes ligados à base

Esta bancada possui quatro pernas com pés em nylon de altura ajustável, que permitem manter a estrutura estável mesmo em superfícies mais irregulares. O uso de pés em plástico é também mais indicado do que o uso de pernas só em metal, porque estas vão estar em contacto com outros materiais e desta forma evita-se os riscos. As pernas e a barra de suporte dos lemes são constituídas em perfil de alumínio 20×20 mm, diminuindo-se o peso e a necessidade de maquinagem para o mesmo efeito, sendo apenas necessário abrir uma rosca no furo central do perfil.

Os desenhos de definição e de conjunto podem ser consultados no anexo A.

Na figura 4.8 é possível ver uma imagem da bancada montada.

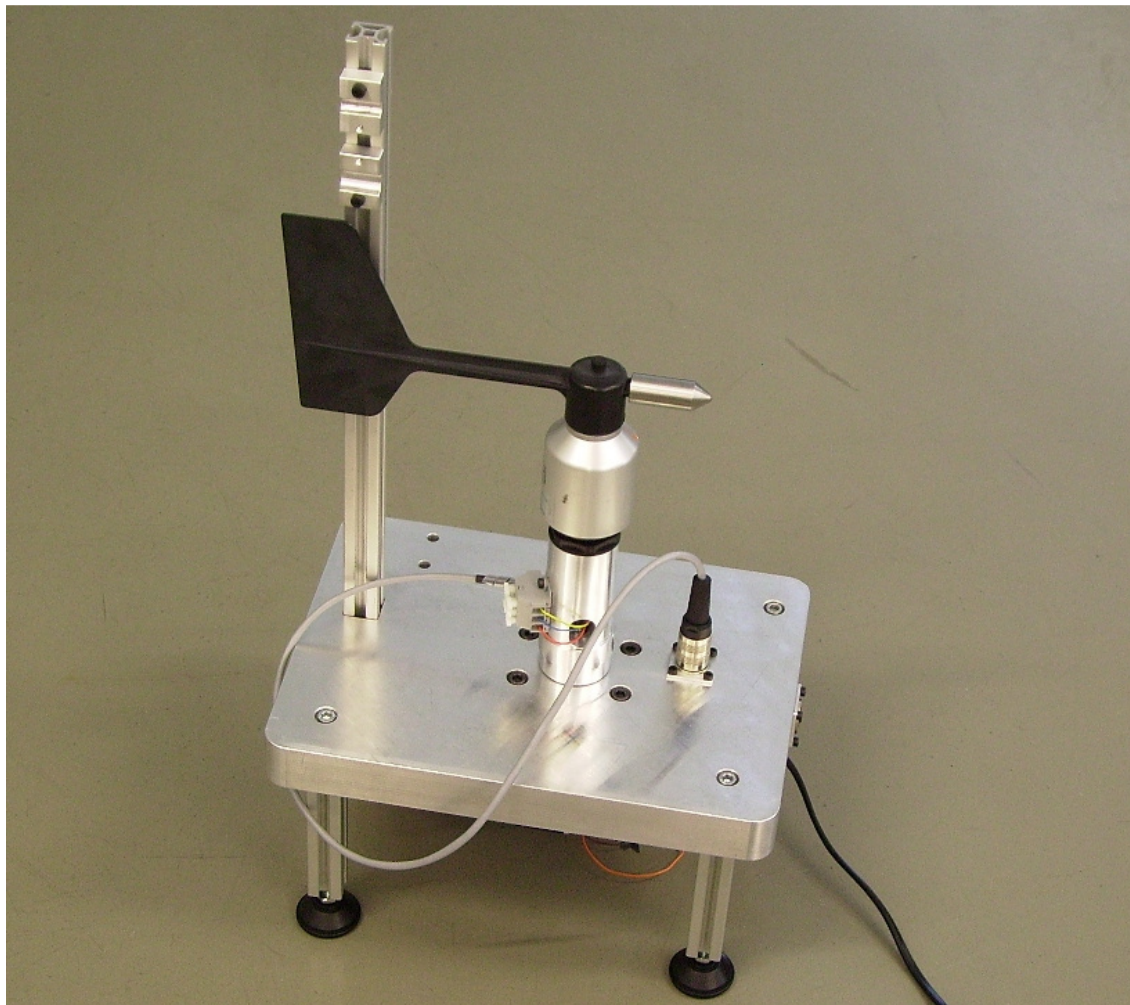


Figura 4.8 – Bancada resultante com um cata-vento montado

As informações relacionadas com as ligações eléctricas da bancada podem ser encontradas no anexo D.

4.2. Programa de controlo automático

O software de programação utilizado, o LabVIEW™ versão 9.0.1, é um *software* de desenvolvimento semelhante aos disponíveis comercialmente em linguagem C ou Basic, entre outros. Porém, apresenta uma grande diferença. Ao contrário dos anteriores, em que as linhas de código são criadas a partir de linhas de texto introduzidas pelo programador, este *software* usa uma linguagem de programação gráfica. Devido à sua interface gráfica bastante intuitiva, pessoas com pouca experiência em programação conseguem utilizar o LabVIEW™. Este *software* apresenta uma base de dados com exemplos que utilizam as diversas subrotinas

disponibilizadas, constituindo um modo de aprendizagem e de demonstração das suas capacidades.

Neste projecto, o programa utilizado vai ter de controlar todos os parâmetros necessários, a maior parte deles relacionados com o controlo do posicionamento do motor, gerir as entradas que são designadas pelo técnico responsável pela realização da verificação, e ler os valores de saída dos componentes que vão servir para avaliar o resultado da verificação, que são o sinal do *encoder* e o sinal do cata-vento.

A maior dificuldade desta etapa do projecto deveu-se ao controlo do motor e à leitura do *encoder*. O programa de controlo do motor é apresentado na figura 4.9 e foi desenvolvido com base em *templates* fornecidos pelo fabricante.

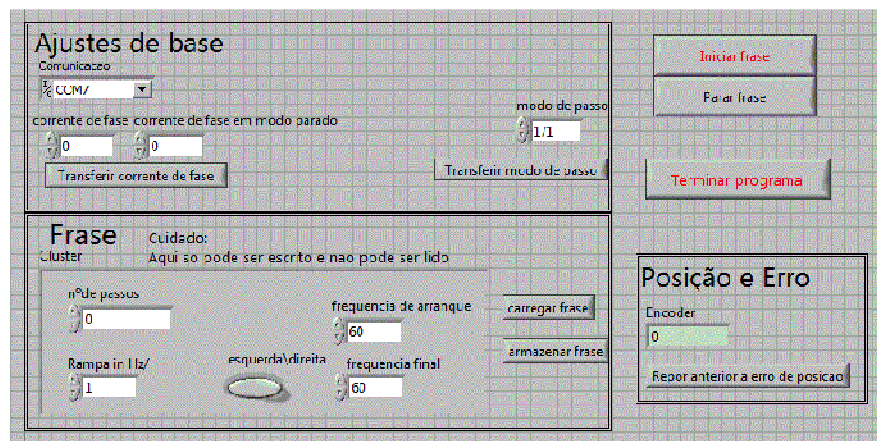


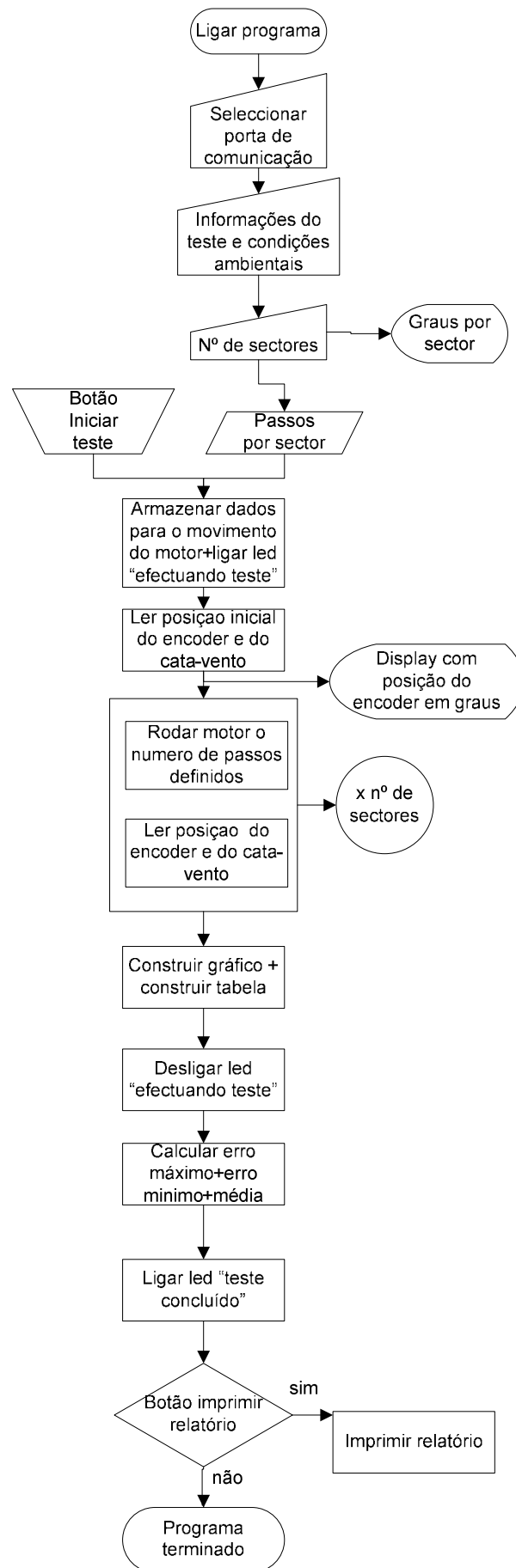
Figura 4.9 – Painel frontal simplificado do programa de controlo da posição do motor retirado do sítio da Internet do fabricante

Como se pode verificar, a informação que é necessário introduzir é a porta de comunicação do computador com o *drive* do motor. Esta pode ser conhecida após pesquisa no “Gestor de dispositivos” do computador. É necessário introduzir a corrente de fase em movimento e quando o motor está parado em percentagem. Estes valores vão determinar o binário criado tanto em movimento como quando o motor está parado. Na mesma secção existe ainda o modo de passo. Os valores que podem ser escolhidos são 1/1, 1/2, 1/4, 1/8, entre outros. Este valor vai permitir que o motor rode em intervalos inferiores a um passo. Como já foi indicado na escolha do tipo de motor, o motor utilizado roda 0,9° por cada passo, quando o modo de passo é de 1/1. Assim se este for 1/2 significa que o motor rodará 0,45°, ou se for 1/4 ele rodará 0,225°. Na entrada denominada “Frase” é indicado o número de passos que se pretende que o motor rode. Podemos ainda indicar a frequência de rotação de arranque, a final e a rampa de aceleração. Temos a hipótese de escolher igualmente o sentido de rotação. Depois de preencher estes valores é necessário “armazenar frase” e “carregar frase” de modo a que informação introduzida seja enviada para o *drive* do motor. Após este passo é que é possível iniciar movimento clicando no botão “Iniciar frase”. Para se parar o motor deverá pressionar-se o botão “Parar frase” ou o botão “Terminar Programa” que também desliga o programa. Na secção “Posição e Erro” podemos ler a posição do motor em número de passos. Temos também a opção de colocar a zero a leitura do *encoder* pressionando o botão “Repor anterior a erro de posição”.

Aquando do estudo desta aplicação, encontrou-se um erro que não permitia o bom funcionamento do programa e que comprometia o posterior desenvolvimento; o *encoder* nem sempre fazia a leitura da posição, não funcionando a maior parte das vezes. Pensava-se que tal ocorria devido ao mau contacto entre os pinos do *encoder* com os fios que ligavam ao *drive*. Contudo depois de se assegurar um bom contacto com os fios o problema persistiu, e a solução foi encontrada na actualização ao *firmware* do *drive* do motor.

Após o desenvolvimento do programa de controlo do motor, seguiu-se a construção de um algoritmo que representa todos os passos que a aplicação deverá efectuar, tendo em conta os *inputs* do técnico, as configurações de controlo do motor, e a comparação dos *outputs* do *encoder* e do cata-vento. Após a construção deste algoritmo, a implementação e a programação tornaram-se mais simples.

Basicamente, para a parte de controlo do motor, a programação efectuada tenta reproduzir um conjunto de acções humanas, que consistiriam no accionamento dos botões descritos anteriormente tendo em conta a sequência definida, para que o motor rodasse um determinado número de passos equivalente ao número de graus por cada sector definido.



A programação por blocos, basicamente é a implementação do algoritmo em linguagem de programação. A seguir são apresentados alguns blocos utilizados, acompanhados por uma breve descrição da sua função.

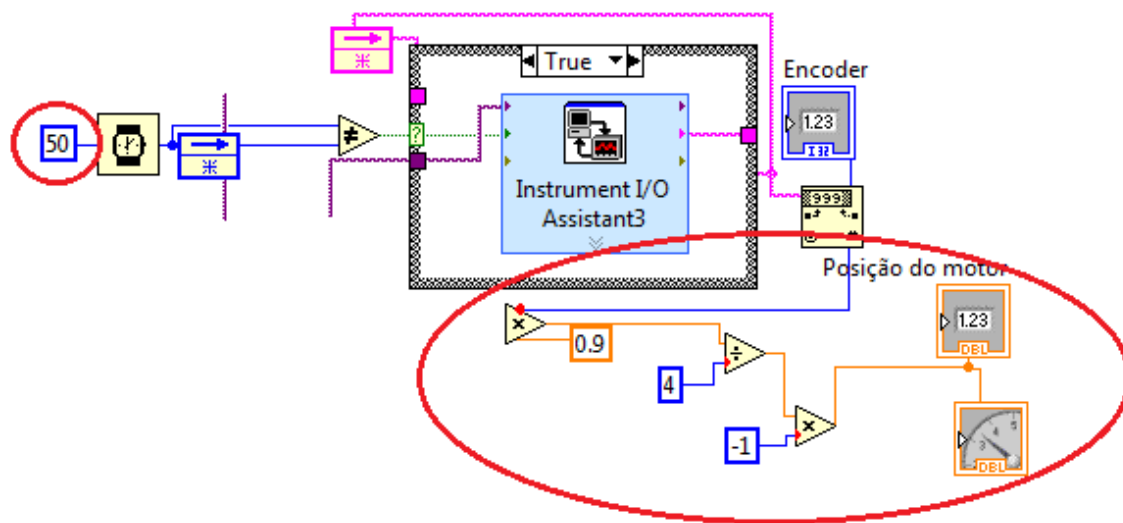


Figura 4.10 – Bloco de programação para a leitura da posição angular do veio do motor através do *encoder*

Na figura 4.10 está o bloco utilizado para a leitura da posição do *encoder*. No caso do mais pequeno, o que o número 50 representa é o intervalo de tempo em ms entre actualizações do valor da posição. Na linha de maior dimensão o que se efectuou foi a transformação do sinal de saída do *encoder* que indicava a rotação do veio do motor em número de passos, o qual foi multiplicado pelo ângulo de passo (0,9), e posteriormente dividido pelo inverso do valor do modo de passo utilizado, isto é 1/4. A posterior multiplicação pela unidade negativa é devido ao sentido de rotação utilizado.

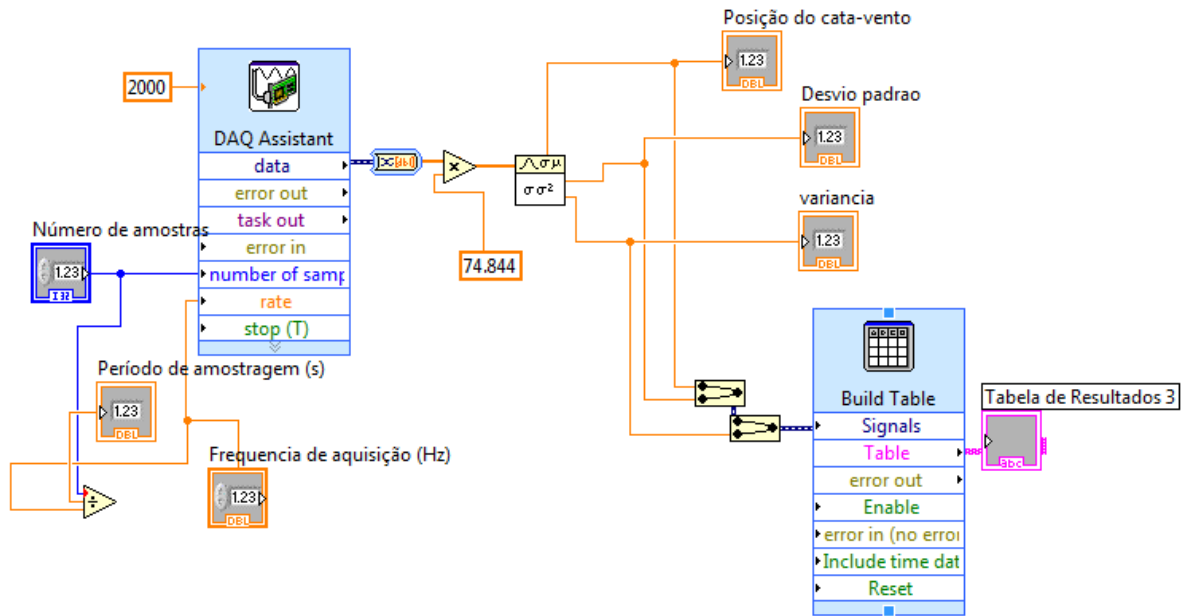


Figura 4.11 – Bloco de programação para a leitura da posição do cata-vento

O bloco de programação da figura 4.11 foi utilizado para fazer a leitura da posição do cata-vento, e o tratamento estatístico das mesmas medições. O sinal de saída do bloco “Assistant” é o conjunto das amostras, depois de multiplicado por 74,844, figura 4.11. Este valor resulta da relação que existe entre a tensão de alimentação do potenciômetro (4,81 V) e ângulo de rotação que pode tomar um valor máximo de 360°.

$$\frac{360}{4,81} = 74,844 \text{ } ^\circ/\text{V}$$

Após o tratamento estatístico, obtêm-se a média das amostras “Posição do cata-vento”, valor que é utilizado para comparar com o valor do *encoder*, o desvio-padrão e a variância. Estes três tipos de valores vão ser utilizados para a construção da tabela apresentada no separador “Teste dinâmico” da vista frontal do programa.

No bloco da figura 4.12 encontra-se o início da sequência utilizada para controlar o movimento do motor e a recolha de dados principalmente. O nome do bloco utilizado é “*stacked sequence*” em que é possível executar comandos de uma forma sequencial. O mostrado na figura seguinte não é o bloco utilizado no programa mas produz o mesmo efeito. Em termos gráficos é mais fácil de exemplificar com este bloco. No primeiro passo são inseridos os valores da corrente do motor em funcionamento e quando este está parado, representado pelos blocos azuis. Para inserir essa ordem é colocado um operador booleano com o sinal de saída “verdadeiro” que equivale a pressionar o botão “InsCorr”, e ao mesmo tempo pressiona os botões “efectuar teste” e “Reset do *encoder*”, que ligam o *led* de indicação de início do teste e fazem o reset ao valor do *encoder* respectivamente. O operador booleano com o sinal de saída “falso” está ligado ao botão “esquerda/direita” para garantir que o motor roda no sentido oposto aos ponteiros do relógio, caso o valor fosse “verdadeiro” o motor

rodava no sentido oposto. No passo seguinte está um temporizador que “obriga” o programa a esperar 1000 milissegundos até avançar para o próximo passo. A seguir encontra-se um operador booleano com valor “falso” que desactiva o botão do “Reset do *encoder*” e o “InsCorr”. Estes três passos em conjunto equivalem a uma acção humana de pressionar dois botões durante 1 segundo que inserem a corrente do motor e fazem reset ao *encoder*, a configurar o sentido de rotação e a ligar o *led* que indica que o teste está a ser efectuado.

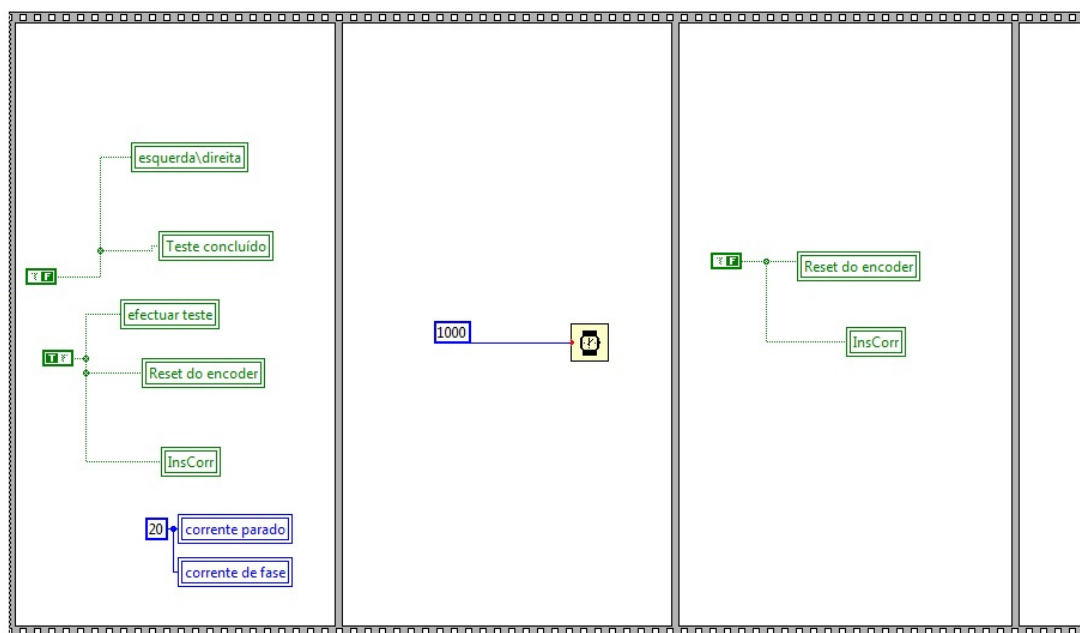


Figura 4.12 – Parte do bloco de programação “Stacked Sequence”

A mesma estrutura de programação apresentada, foi utilizada para simular o accionamento dos outros botões, tais como, o “Armazenar” e o “Carregar”.

O bloco seguinte apresentado (lado esquerdo da figura 4.13) é um dos passos da sequência referida anteriormente da qual se mostrou os três primeiros passos. Este, tem dentro de si um ciclo “*For Loop*”, que repete os comandos situados dentro de si um determinado número de vezes. Neste caso o ciclo vai repetir-se o número de vezes igual ao número de sectores definido pelo técnico. Dentro desse ciclo temos outra sequência de passos, que são os responsáveis pelo envio da ordem de arranque do motor e da recolha de dados. A sequência completa é visível na parte direita da figura, e começa com um temporizador de espera de 250 ms, seguindo-se a recolha do valor da posição do *encoder* do motor, e da posição do cata-vento. No terceiro passo temos mais um intervalo de espera ao qual se segue a activação do botão “INICIO” durante 555 ms após o qual o motor inicia a rotação. O sétimo passo é um temporizador que, dependendo do número de sectores, impõe um tempo de espera até se processar o passo seguinte. Esse valor depende do número de sectores porque o tempo de rotação é diferente se só existirem dois ou dezasseis sectores para percorrer.

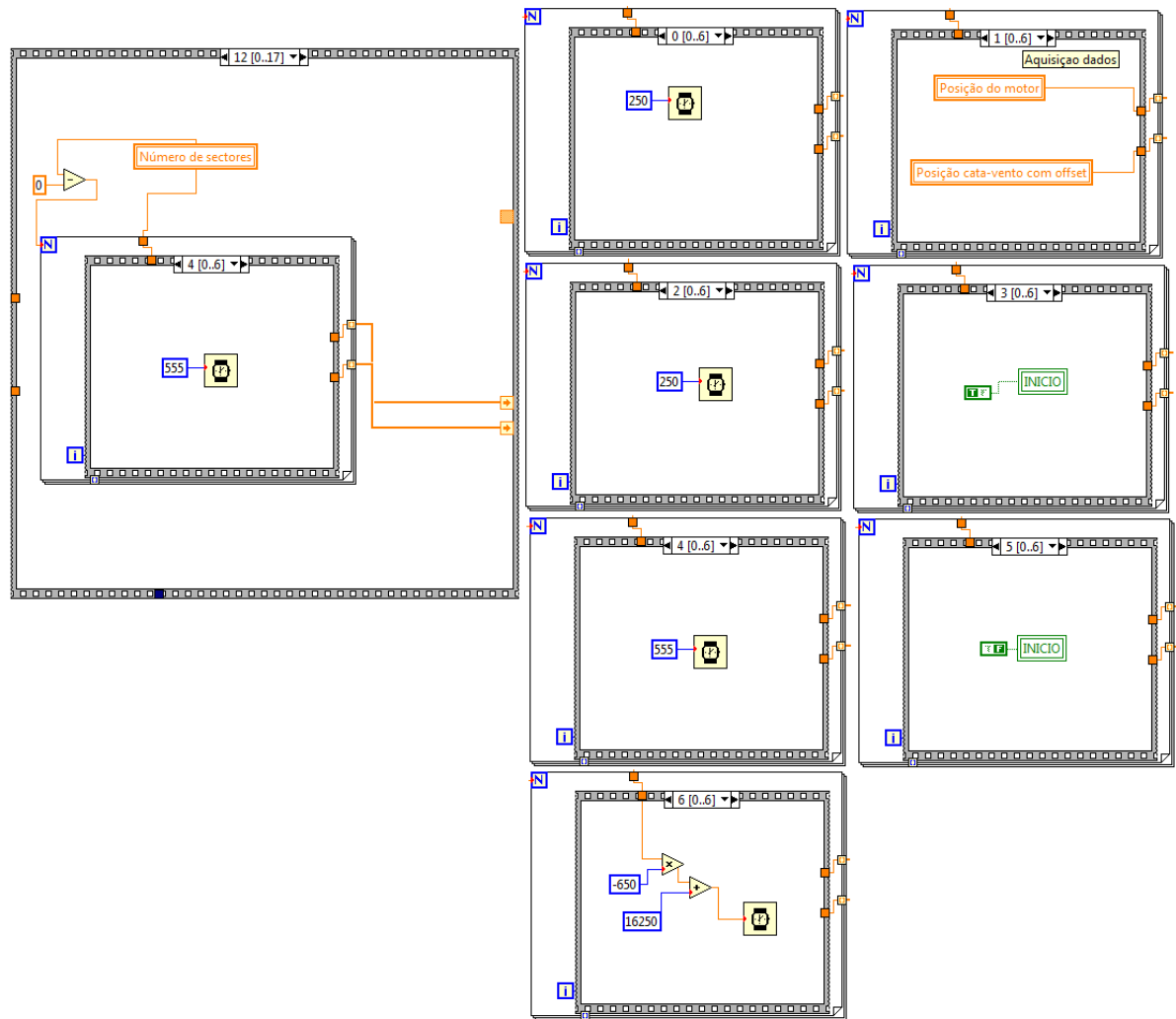


Figura 4.13 – Bloco de programação que inicia a rotação do motor conforme o número de sectores definido

A sequência principal tem como passo seguinte a construção do gráfico com os pontos de leitura do *encoder* no eixo das abcissas e o erro do cata-vento em relação ao *encoder* no eixo das ordenadas. Se analisarmos a figura 4.13 e a figura 4.14, as linhas laranjas mais pronunciadas da figura 4.13 que contém a informação das posições do *encoder* e do cata-vento, são transmitidos ao passo seguinte através da ligação destas às laterais do bloco. Na figura 4.14 vê-se que a informação do passo anterior está disponível também na lateral. A informação da posição do *encoder* é mostrada em “X Input”. À informação do cata-vento é subtraído o correspondente valor do *encoder* sendo o erro do cata-vento que entra no “Y Input”. Neste passo, estes três conjuntos de valores são transmitidos para o exterior da sequência para posterior criação de uma tabela.

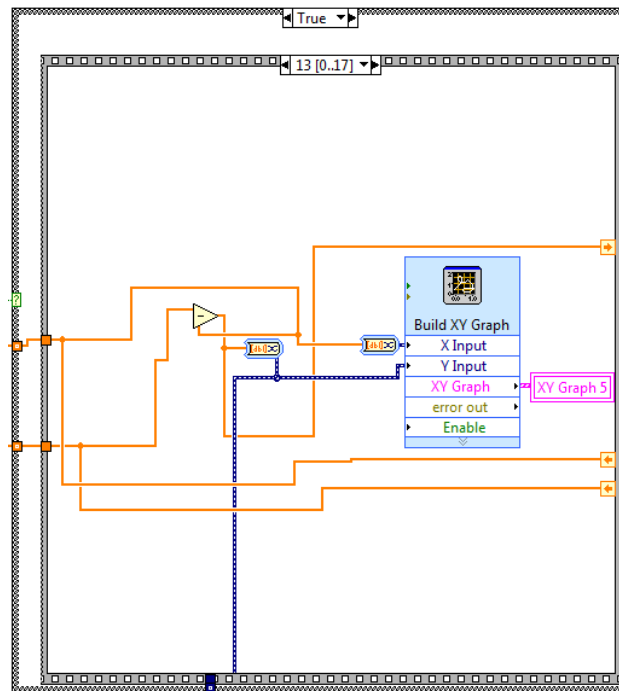


Figura 4.14 – Bloco de programação para construção do gráfico posição vs erro

O valor do erro é ligado à lateral também para transmitir os seus valores ao passo seguinte. Com o conjunto desses valores é calculada a sua média, para se obter o erro médio do teste, e é calculado o módulo do seu valor para se calcular o erro máximo e mínimo, como se pode ver na figura 4.15.

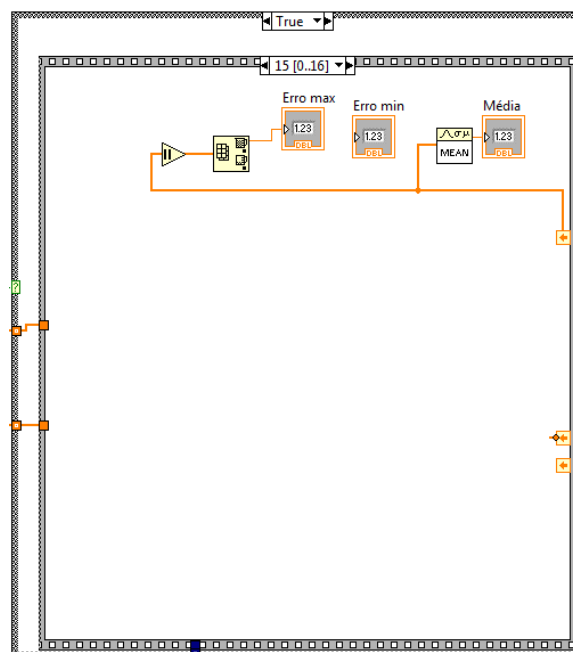


Figura 4.15 – Bloco de programação para cálculo do maior erro atingido e da média dos erros

A interface com o utilizador está organizada por páginas de modo a agrupar os diversos tipos de informação e para evitar o uso de barras de deslizamento.

Basicamente temos cinco páginas. A primeira, “Configuração”, é onde se inserem as informações do cata-vento, tais como fabricante, modelo e número de série. Nesta secção é necessário indicar o nome do técnico que vai executar o teste de verificação. Caso estejam presentes instrumentos de medição das condições atmosféricas, deve-se introduzir também os seus valores, tais como temperatura, pressão e humidade relativa. Na parte da comunicação, figura 4.16, é seleccionada a porta de comunicação entre o computador e o *drive* do motor, e é introduzido o endereço do relatório modelo, para o qual vão ser exportados os resultados do teste. É também possível visualizar uma figura do cata-vento a testar.

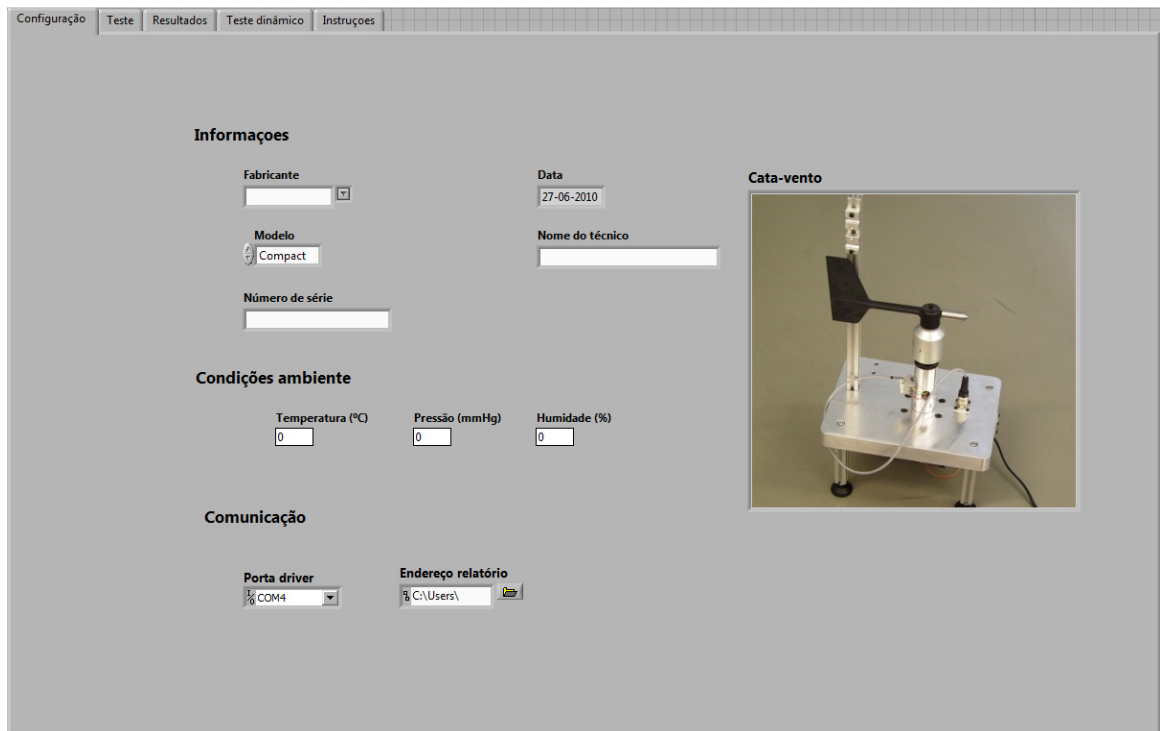


Figura 4.16 – Página de “Configuração” do painel frontal do programa do teste automático

Na segunda página, figura 4.17, é onde se controla o teste propriamente dito. Aqui o técnico selecciona o número de sectores em que pretende dividir uma rotação completa. Quando se altera este valor, no *display* ao lado é possível ver o ângulo correspondente a um sector. Para dar início ao movimento do motor e da recolha de dados existe o botão “INICIAR”. Logo abaixo encontra-se o botão “Parar motor”, que como o nome indica pára o movimento do motor, sem terminar o programa, contudo ele só fica parado até o programa dar ordem para iniciar o movimento do sector seguinte. O botão imediatamente abaixo, esse sim, permite parar o motor e terminar o programa. Durante o teste o *led* “Efectuando teste” é ligado para que o técnico tenha conhecimento que o teste está a ser executado. Durante a sua execução a posição do *encoder* e do cata-vento pode ser visualizada nos respectivos *displays*, e para uma maior percepção do estado do teste existe ainda um demonstrador gráfico que indica a posição lida pelo *encoder*. Quando os 360° são percorridos, o *led* “Efectuando teste” é desligado, e é dada ordem para a construção da tabela de resultados e do respectivo gráfico. Quando estes estão completos o *led* “Teste concluído” é ligado e o operador pode abrir a página dos resultados.

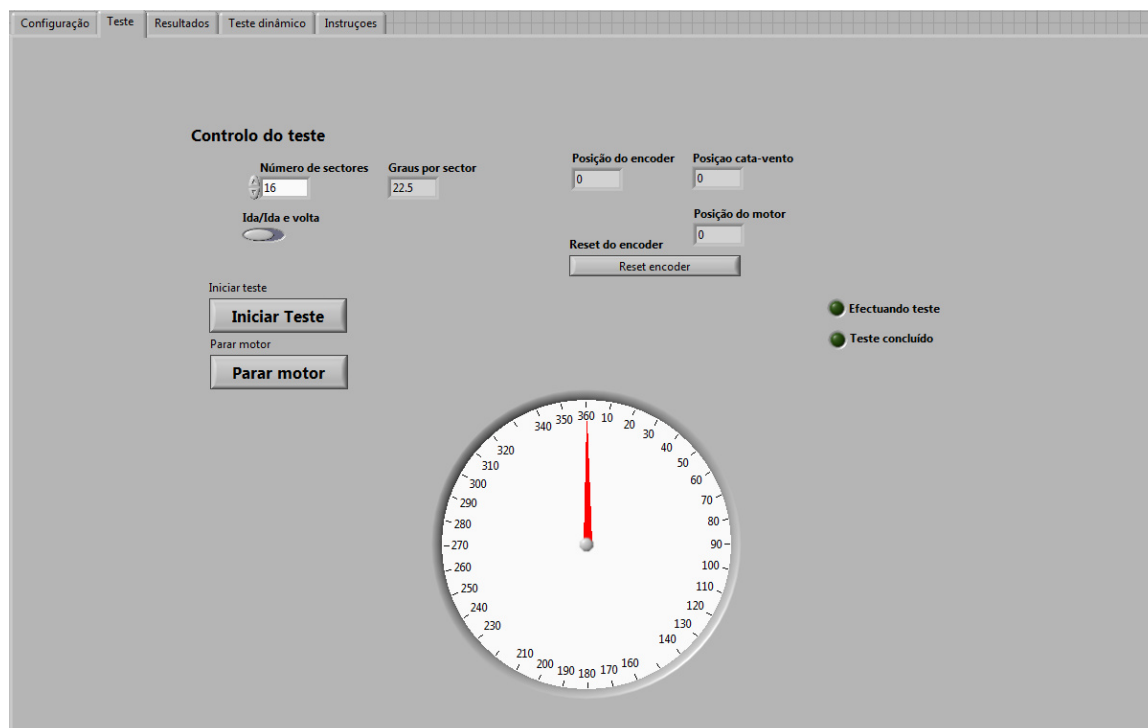


Figura 4.17 – Página de “Teste” do painel frontal do programa do teste automático

Na página seguinte encontra-se toda a informação necessária a ser guardada no relatório de certificação, figura 4.18. Esta página tem o intuito de compilar a informação relevante que vai ser transportada para o relatório, tais como as informações do cata-vento, condições ambientais, e os resultados em forma tabelar, onde se pode comparar o valor de referência do *encoder* com o valor obtido do cata-vento, e a respectiva diferença. A representação gráfica indica para os diversos ângulos testados qual a diferença do cata-vento para o valor real. São ainda indicados os valores dos erros máximo e mínimo, assim como a média dos erros obtidos. No fim da página encontra-se o botão que permite enviar toda esta informação para um ficheiro “Word”. Um exemplo deste relatório contendo informação da verificação de um cata-vento modelo “Compact” pode ser visualizado no anexo B.

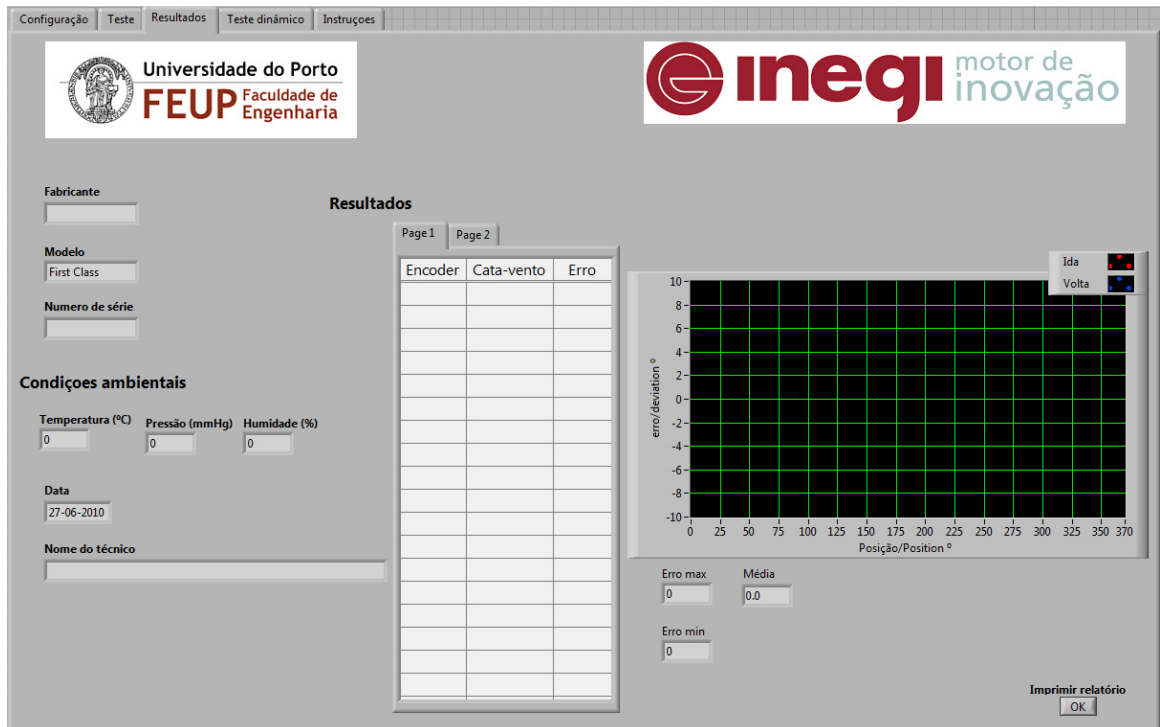


Figura 4.18 – Página de “Resultados” do painel frontal do programa do teste automático

A página “Teste dinâmico”, como o nome indica apenas é utilizada quando a bancada está no túnel de vento e o utilizador quer efectuar uma recolha dos dados estatísticos de um conjunto de medições, figura 4.19. É uma página simples que apresenta dois locais de entrada de dados, o número de amostras a adquirir, e a frequência com que essas amostras vão ser medidas. Pode-se ver no período de amostragem o intervalo de tempo necessário para medir o número de amostras definido e também o tempo em que os valores do tratamento estatístico vão ser carregados na tabela. A nota presente na página, visa alertar que o período de amostragem deve ser inferior a 0,5 segundos. Isto deve-se à necessidade de garantir que o valor da posição da média é actualizado constantemente e de forma célere para quando o motor parar o movimento e o programa fizer a leitura da posição do cata-vento, os valores utilizados para o cálculo da média sejam apenas referentes aos valores lidos quando o cata-vento está parado.

Configuração | Teste | Resultados | **Teste dinâmico** | Instruções

Número de amostras: 50
 Período de amostragem (s): 0.25
 Frequência de aquisição (Hz): 200

NOTA: Depois de utilizar o teste dinâmico garantir que o período de amostragem é inferior a 0,5 segundos

Média	Desvio padrão	Variância

Figura 4.19 – Página do “Teste dinâmico” do painel frontal do programa do teste automático

4.3. Análise de incerteza

Numa calibração/verificação, a aferição da aptidão do sensor testado não pode ser efectuada somente analisando os valores obtidos do erro em relação ao padrão. É necessário conhecer a incerteza inerente aos valores obtidos.

Todas as medições são afectadas por erros, nunca se conseguindo determinar o valor verdadeiro da variável a medir. Os erros podem ser classificados de duas formas, erros sistemáticos, e erros aleatórios. Os primeiros são intrínsecos ao sistema e por mais medições que se façam eles existem sempre e desviam sistematicamente o valor medido. Os segundos, são os erros de natureza aleatória inerentes a qualquer medição. Os erros aleatórios podem ser analisados recorrendo ao tratamento estatístico dos dados obtidos. Neste caso, quanto maior for o número de medições, mais a média dos valores medidos tende para o valor verdadeiro.

O erro sistemático é um erro que varia de forma previsível ou conhecida, e que não é alterado pelo aumento das medições efectuadas. Para se poder quantificar é necessário conhecer as fontes de erro de um sistema. No caso da bancada de teste automático, as fontes de erro conhecidas são a resolução do sensor de referência (*encoder*), a excentricidade do posicionamento do corpo do cata-vento em relação ao eixo de rotação do motor, o erro inerente ao alinhamento do Norte do cata-vento e a exactidão da placa de aquisição de dados/voltímetro. [SANTOS, 2010]

Relativamente ao *encoder*, o fabricante apenas indica a sua resolução de 1000 impulsos por volta, não indicando a exactidão. Assim sendo, admite-se que o erro inerente à sua leitura provém apenas da sua resolução. O *encoder* apresenta uma resolução (*R*) de 0,36°, sendo este

um erro aleatório. Admitindo uma distribuição uniforme rectangular, sendo “a” metade do intervalo possível de se encontrar o valor medido,

$$2 \times a = \text{Resolução}$$

$$2 \times a = 0,36 \Leftrightarrow a = 0,18$$

O desvio padrão experimental associado à sua leitura será

$$s = a/\sqrt{3} \Leftrightarrow s = 0,18/\sqrt{3} \Leftrightarrow s = 0,104$$

Como s é apenas uma estimativa de σ , a variável não segue a distribuição normal, mas sim a distribuição “t-Student”. Para uma confiança a 95% os limites de confiança do erro aleatório “P”, é calculado utilizando um $t=2$.

$$P_{encoder} = t \times s_{encoder} = 2 \times 0,104 = 0,21^\circ$$

De modo a aferir o valor máximo da excentricidade, recorreu-se a um esquema simples mas representativo da situação, para determinar o desvio máximo do cata-vento. Como se sabe o casquilho entra dentro da cavidade do corpo do cata-vento, sendo depois encostado à parede interior pelo intermédio de um parafuso. Isto vai criar uma distância horizontal entre os centros das duas circunferências representativas dos diâmetros do casquilho ($d=34,87$ mm) e da média mais alta dos diâmetros dos furos do modelo “First Class” ($d=35,06$ mm) de 0,095 mm

$$\left((35,06 - 34,87)/2 = 0,095\text{mm} \right)$$

Para se identificar o ângulo máximo de desvio, traça-se um segmento de recta horizontal com um comprimento de 0,095 mm, e num dos extremos traça-se um segmento de recta com 125mm, que representa a distância na horizontal, do centro do corpo do cata-vento, à barra que contém as garras dos lemes. Da extremidade desse segmento de recta traça-se outro até à outra extremidade do segmento de recta horizontal, e o ângulo formado por essas duas linhas é o ângulo máximo de desvio, figura 4.20.

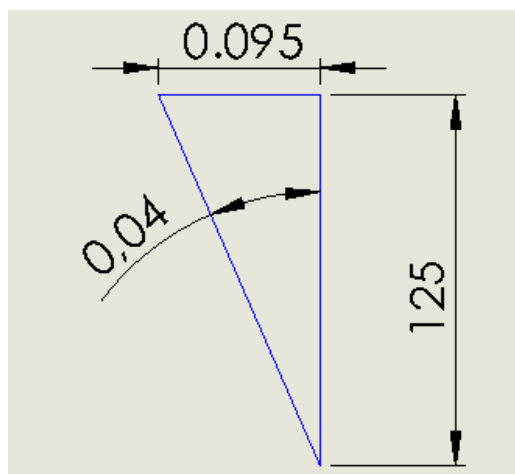


Figura 4.20 – Cálculo do desvio criado pela excentricidade

Isto retrata o movimento que o leme vai sofrer quando o corpo do cata-vento roda. O ideal seria mantê-lo sempre vertical mas devido à excentricidade ele sofre uma inclinação mínima. Como o valor obtido é muito inferior aos outros, vai ser desprezável para o cálculo da incerteza.

Relativamente ao erro sistemático do desalinhamento do Norte do cata-vento, este ocorre sempre que o técnico tenta alinhar o Norte do cata-vento antes do início de um teste. Neste caso, é necessário despende algum tempo, visto que se trata de uma verificação da exactidão de um aparelho de medida. Neste alinhamento é impossível obter o 0°, devido à própria resolução do sensor, e de modo a incluir este erro na incerteza dos resultados, foram efectuadas 11 tentativas de alinhamento de um cata-vento a funcionar correctamente, das quais foram retirados os valores do ângulo lido por ele. A média destes ângulos vai corresponder ao erro sistemático inerente ao alinhamento. Como se trata de um erro sistemático este valor vai ser usado como correcção do valor lido pelo cata-vento, *offset*. Para se utilizar um *offset* igual para todos os cata-ventos, seria necessário efectuar um estudo estatístico de um número considerável de sensores.

Tabela 4.3 – Medição do erro associado ao alinhamento do Norte do cata-vento

Tentativas (°)			Média (°)	Desvio padrão (°)
0,26	0,94	0,28	0.50	0.30
0,31	0,30	0,85		
0,27	0,27	0,87		
0,29	0,81			

Contudo o erro aleatório das medições anteriores tem que ser levado em conta. Para um número de amostras superior a 10, e seguindo a distribuição de “*t-Student*”, para um intervalo de confiança a 95%, *t* toma o valor aproximado de 2. O limite “*P*” deste erro aleatório pode ser dado por,

$$P_{alinhamento} = t \times s$$

$$P_{alinhamento} = 2 \times 0,3 = 0,60^\circ$$

A resolução e a exactidão da placa de aquisição de dados/voltímetro não são incluídos no cálculo da incerteza global, porque a sua contribuição é insignificante comparando com as restantes.

Calculando a Incerteza global U_x obtém-se,

$$U_x = \sqrt{P_{encoder}^2 + P_{alinhamento}^2}$$

$$U_x = \sqrt{0,21^2 + 0,60^2} = 0,64^\circ$$

Isto significa que a incerteza associada ao cálculo do erro do cata-vento para 95% de confiança é de $\pm 0,64^\circ$

Capítulo 5

Resultados e discussão

5.1. Caracterização do escoamento à saída do túnel de vento

O teste dinâmico do cata-vento pode ser efectuado colocando-o na secção de teste do túnel de vento. Neste caso foi colocado na parte exterior do túnel, para que o escoamento possa fluir à volta do cata-vento, sem sofrer os efeitos do constrangimento imposto pelas paredes da secção de trabalho do túnel.

Com a caracterização do campo de velocidades à saída do túnel pretende-se verificar se o escoamento criado à saída, apresenta um campo de velocidades uniforme com as dimensões necessárias que permitem envolver o leme do cata-vento.

A primeira fase desta caracterização consistiu na determinação do início da camada limite na secção do escoamento no final da conduta. A conduta apresenta uma secção quadrada de dimensões 400mm×400mm, tendo sido escolhido o eixo horizontal para a recolha dos diversos valores de velocidade, demonstrado na figura 5.1.

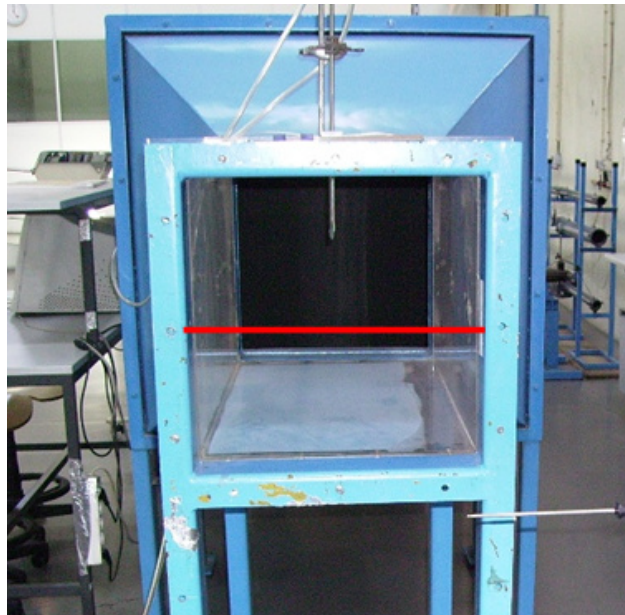


Figura 5.1 – Linha ilustrativa ao longo da qual foram efectuadas as medições da velocidade

Os valores obtidos ao longo da linha vermelha de 400 mm de comprimento encontram-se na seguinte tabela. A distância referida nas medições é em relação à parede do lado direito do túnel.

Tabela 5.1 – Velocidade do escoamento ao longo da linha de medição da secção do túnel

Perfil de velocidade			
Distância (mm)	Velocidade (m/s)	Distância (mm)	Velocidade (m/s)
5	3,7	195	5,2
19	4,4	215	5,4
35	4,5	228	5,2
59	4,6	249	5,2
73	4,7	277	5,3
81	5,0	302	5,5
104	5,4	322	5,0
130	5,4	343	4,7
147	5,4	355	4,6
159	5,4	375	4,3
172	5,4	381	4,3
190	5,4	397	3,6

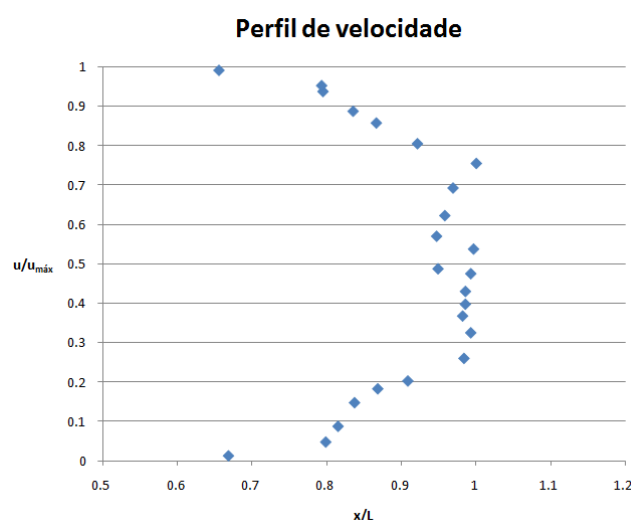


Gráfico 5.1 – Perfil de velocidades obtido ao longo da linha com linha de tendência

Após análise dos resultados, verifica-se que em 60% do perfil os valores de velocidade não variam mais do que 2% em relação à média desse intervalo. Assim pode-se dizer que nesta linha de 400 mm, apenas os 260 mm centrais apresentam uma zona de escoamento homogêneo.

Após ser conhecida a distância em relação à parede de onde começava a camada limite, seguiu-se a definição dos pontos de medição de velocidade das secções do escoamento a 0 mm, 250 mm e a 500 mm de distância à saída do túnel. Apesar da camada limite começar a 100 mm da parede, optou-se por posicionar alguns pontos de medição a 80 mm da parede de modo a cobrir um pouco mais de área. A figura 5.2 mostra a disposição dos pontos de medição.

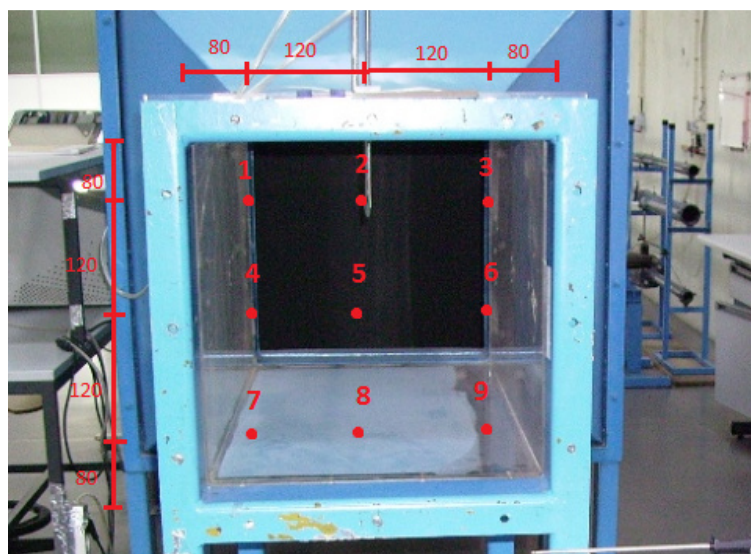


Figura 5.2 – Pontos de medição nas secções do escoamento

A tabela seguinte contém os valores da velocidade para os diversos pontos e para as diferentes distâncias em relação à secção de saída.

Tabela 5.2 – Velocidade do escoamento ao longo dos diferentes pontos das secções

Distancia ao túnel					
0 (mm)		250 (mm)		500 (mm)	
Ponto	Velocidade (m/s)	Ponto	Velocidade (m/s)	Ponto	Velocidade (m/s)
1	4,7	1	4,7	1	4,4
2	5,2	2	5,4	2	4,8
3	4,6	3	4,8	3	4,5
4	5,0	4	5,1	4	4,9
5	5,4	5	5,4	5	5,0
6	4,8	6	4,8	6	4,7
7	5,0	7	5,1	7	4,9
8	5,4	8	5,5	8	5,0
9	5,0	9	4,7	9	4,7

Como se pode verificar, os valores de velocidades quase que atingem uma diferença de 1 m/s entre pontos à mesma distância do túnel. Os pontos a 500 mm de distância apresentam valores de velocidade mais baixos do que as duas primeiras distâncias, mas são valores com pouca

variação entre si. Os pontos que mais próximos vão estar do leme do cata-vento são os pontos 2, 5 e 8, sendo os que apresentam os valores mais próximos entre si, o que indica que o cata-vento vai estar circundado por um escoamento muito perto do uniforme.

Estas medições foram efectuadas com um anemómetro de filme quente principalmente por duas razões. Para a velocidade utilizada, outra das possíveis soluções, o tubo de Pitot, não permitiria medir as pequenas variações de velocidade entre pontos porque as pressões criadas são demasiadas baixas e a sua colocação tem de ser cuidada para que a direcção do escoamento incida perpendicularmente à secção de entrada do tubo. A outra razão foi a facilidade de manuseamento do anemómetro de filme quente, aliada à disponibilidade imediata do valor da velocidade.

Os instrumentos de medição utilizados são do fabricante “TESTO”, o sistema de aquisição de dados é o modelo “testo 400” utilizando um bolbo quente de 3 mm robusto para medição de baixas velocidades com a referência 0635-1549. Estes equipamentos em conjunto apresentam um intervalo de medição de 0 a 10 m/s, com uma exactidão de $\pm 0,04$ m/s, e uma resolução de 0,01 m/s. Além do valor da velocidade, estes instrumentos permitem medir também a temperatura, ou outras propriedades dependendo da sonda utilizada. Na figura 5.3 é possível visualizar a instalação.

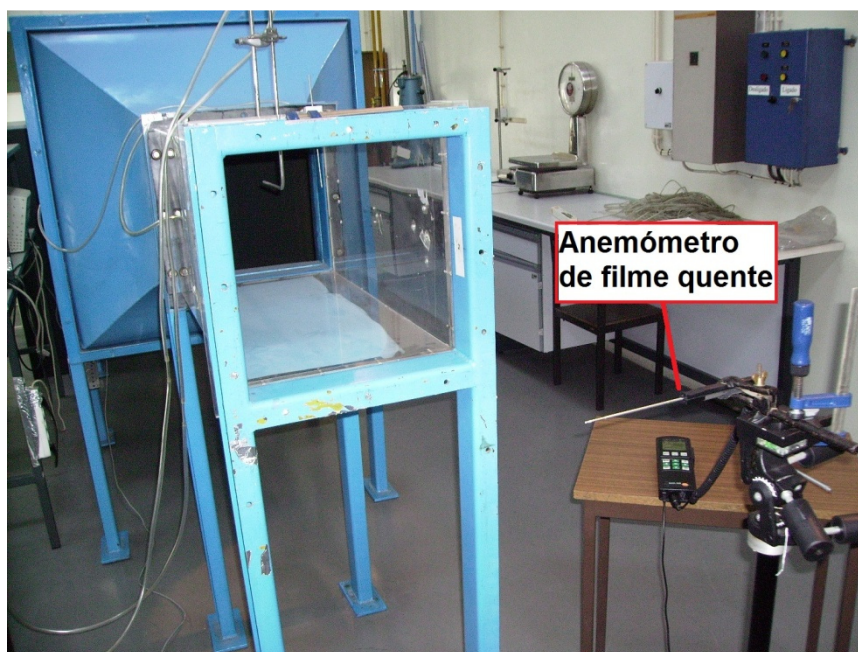


Figura 5.3 – Instalação utilizada para a medição das velocidades

Como a medição da velocidade do ar assenta nas leis da transferência de calor, foi prestado um cuidado especial à colocação da sonda. Esta foi posicionada perpendicularmente em relação à direcção do escoamento. Para se poder medir a velocidade ao longo da largura do túnel, verificou-se que a partir de metade da largura os valores de velocidade aumentavam, não mantendo a tendência anterior chegando a obter-se valores perto da parede, superiores aos do centro. Esta anomalia era causada pela estrutura que segurava a sonda que criava um obstáculo ao escoamento, e este era obrigado a aumentar a velocidade no resto da secção. De modo a eliminar esta adversidade, a estrutura era colocada no lado contrário ao indicado na

figura, para se medir os pontos mais próximos da parede do lado esquerdo. Contudo, durante a mudança de posição do suporte, a sonda era recolocada de modo que a superfície voltada para o escoamento fosse sempre a mesma, prevenindo-se assim eventuais heterogeneidades que alteram as condições de transferência de calor e consequentemente o valor da velocidade.

Com a afirmação anterior podia-se por em causa a necessidade de se efectuar a calibração do anemómetro de filme quente. Porém neste caso, o que está em causa não é o valor “verdadeiro” da velocidade, mas sim a caracterização do escoamento em termos de uniformidade.

5.2. Verificação da exactidão dos cata-ventos

Com a bancada e o software concluídos, era necessário testar a própria bancada. Em termos mecânicos, toda a construção e comportamento correspondeu ao esperado durante o seu planeamento. Em termos de software, o programa utilizado executava todas as ordens de acordo com o especificado. O programa final, pode-se dizer que é o resultado de uma evolução contínua, em que cada bloco novo de programação era imediatamente testado na bancada.

Sabendo-se agora que a bancada cumpria os requisitos planeados, era altura de pô-la à prova, fazendo exactamente aquilo para que ela foi criada, uma verificação da exactidão de um cata-vento. Na verdade efectuaram-se duas verificações a dois cata-ventos fornecidos pelo INEGI, do mesmo modelo. Por informação do INEGI um dos cata-ventos encontrava-se a funcionar correctamente e o outro encontrava-se avariado.

Na realização destes testes, foram seguidos os passos descritos nas instruções de funcionamento. Apenas não foram inseridos informações quanto às condições atmosféricas. Os cata-ventos foram colocados na bancada e efectuou-se o alinhamento do Norte com cuidado.

O primeiro cata-vento utilizado, modelo “Compact”, tem o número de série 0103782, e foi-lhe efectuado um teste de 16 sectores, de ida e volta. Os resultados apresentados foram retirados conforme estavam no relatório gerado após cada teste.

Tabela 5.3 - Resultados obtidos no teste do primeiro cata-vento “Compact”

Encoder	Cata-vento	Erro	Encoder	Cata-vento	Erro
-0.0	-0.1	-0.1	337.5	335.7	-1.8
22.5	21.4	-1.1	315.0	314.3	-0.7
45.0	43.6	-1.4	292.5	293.1	0.6
67.5	65.8	-1.7	270.0	270.7	0.7
90.0	88.4	-1.6	247.5	248.3	0.8
112.5	111.7	-0.8	225.0	225.5	0.5
134.8	134.8	-0.0	202.5	203.3	0.8
157.5	158.2	0.7	180.0	180.7	0.7
180.0	180.7	0.7	157.5	157.9	0.4
202.5	203.4	0.9	134.8	135.0	0.2
225.0	226.1	1.1	112.5	112.5	-0.0
247.5	248.1	0.6	90.0	89.2	-0.8
270.0	269.8	-0.2	67.5	66.1	-1.4
292.5	291.5	-1.0	45.0	43.5	-1.5
315.0	312.9	-2.1	22.7	23.0	0.3
337.5	335.5	-2.0	0.2	1.1	0.9

Pela análise das tabelas de resultados pode ver-se que os valores dos erros obtidos encontram-se maioritariamente abaixo dos 2°, apenas em duas situações esse valor foi atingido ou ultrapassado. O fabricante declara uma exactidão de $\pm 2^\circ$, e pela avaliação dos resultados obtidos podemos considerar que o cata-vento em questão encontra-se a funcionar em boas condições. Os valores obtidos na tabela da direita são os valores de quando o motor efectuava a rotação de “Volta”, passando pelas mesmas posições aquando da rotação de “Ida”.

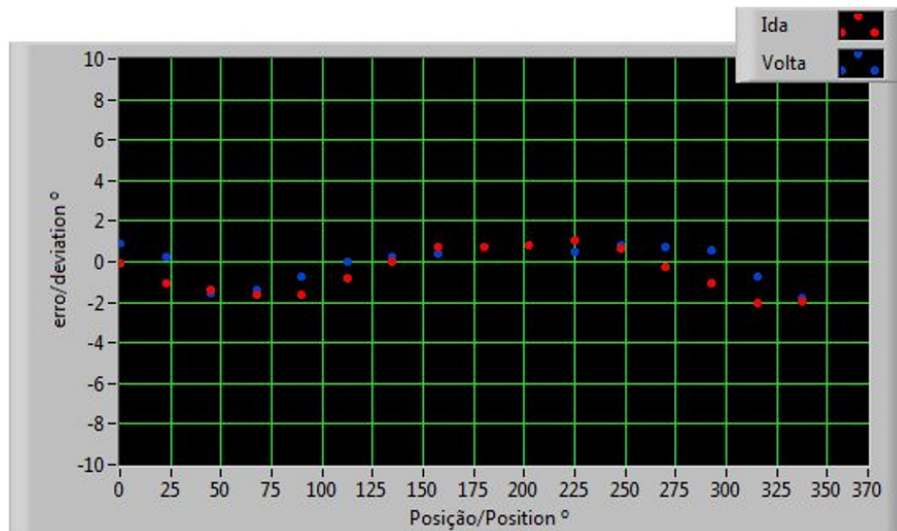


Gráfico 5.2 – Erro obtido em cada posição em ambos os sentidos para o primeiro cata-vento “Compact”

Com o gráfico podemos comparar se os erros na rotação de ida e na rotação no sentido inverso, se seguem a mesma tendência, ou até mesmo se existem efeitos de histerese. Neste caso vê-se uma semelhança na tendência dos erros entre os dois conjuntos de pontos. O erro máximo obtido foi de $-2,1^\circ$, e a média dos erros é $-0,26^\circ$. Entre os pontos medidos na volta de “Ida” e no sentido inverso “Volta”, existe uma pequena diferença que atinge o máximo de $1,4^\circ$ aos 315° da rotação. Assim podemos concluir que o cata-vento altera o seu valor de saída para a mesma posição quando o sentido de rotação é alterado.

O segundo cata-vento utilizado, modelo “Compact”, tem o número de série 1206609, e também foi submetido a um teste de 16 sectores, de ida e volta.

Tabela 5.4 - Resultados obtidos no teste do segundo cata-vento “Compact”

Encoder	Cata-vento	Erro	Encoder	Cata-vento	Erro
-0.0	-0.5	-0.5	337.5	335.1	-2.4
22.5	19.8	-2.7	315.0	313.1	-1.9
45.0	41.1	-3.9	292.5	290.9	-1.6
67.5	61.9	-5.6	270.0	267.4	-2.6
90.0	82.5	-7.5	247.5	244.4	-3.1
112.5	104.0	-8.5	225.0	220.6	-4.4
134.8	125.9	-8.9	202.5	197.0	-5.5
157.3	148.7	-8.6	180.0	172.9	-7.1
179.8	171.9	-7.8	157.3	149.4	-7.9
202.5	196.1	-6.4	134.8	126.4	-8.4
225.0	219.5	-5.5	112.5	104.2	-8.3
247.5	243.3	-4.2	90.0	82.9	-7.1
270.0	267.0	-3.0	67.5	62.3	-5.2
292.5	289.8	-2.7	45.0	42.0	-3.0
315.0	312.1	-2.9	22.7	21.8	-0.9
337.5	334.2	-3.3	0.2	1.0	0.8

Nestas tabelas verifica-se que os valores dos erros, ao contrário do cata-vento anterior, não se situam maioritariamente abaixo dos 2º, pelo contrário, quase todos os valores de erro são superiores aos 2º. Existe mesmo uma zona de posições entre os 90º e os 202,5º em que o erro assume valores bastante elevados.

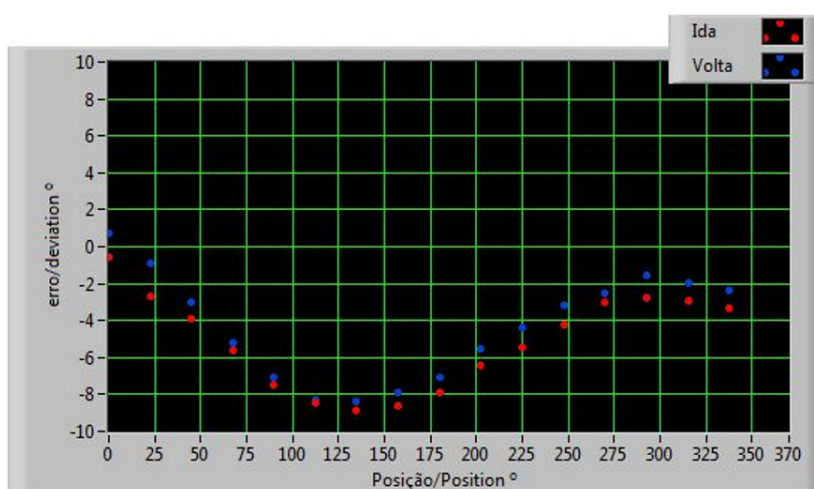


Gráfico 5.3 - Erro obtido em cada posição em ambos os sentidos para o segundo cata-vento “Compact”

Pela análise do gráfico vê-se claramente a zona de maior desvio do cata-vento em relação ao padrão. Ambas as curvas seguem a mesma tendência, analisando os valores atingidos nos dois sentidos de rotação fazem crer que o cata-vento não está de acordo com os parâmetros do fabricante. Neste caso também existe diferença nas curvas dos dois sentidos de rotação, reforçando a hipótese de existir alteração de valores para a mesma posição do cata-vento quando é invertida o sentido. O erro máximo atingido foi de $-8,9^\circ$ e média dos erros é de $-4,7^\circ$.

5.3. Comportamento do cata-vento no túnel de vento

Este estudo do comportamento, tem como objectivo verificar a variância dos valores obtidos do rumo do vento quando este provém continuamente do mesmo rumo. Idealmente o leme do cata-vento não deveria mover-se, mas, como em tudo, as pequenas irregularidades/assimetrias que a ele estão inerentes vão condicionar a sua performance.

A bancada de teste foi colocada à saída do túnel de vento caracterizado anteriormente. O modelo utilizado foi o “Compact” pois é o que possui menor dimensão do leme, ficando na zona central do escoamento com distribuição uniforme de velocidade. O posicionamento da bancada (ver figura 5.4) neste caso é importante porque é necessário que a base não seja colocada a uma altura superior à parede inferior do túnel, evitando-se assim uma possível distorção do escoamento, condicionando os resultados.

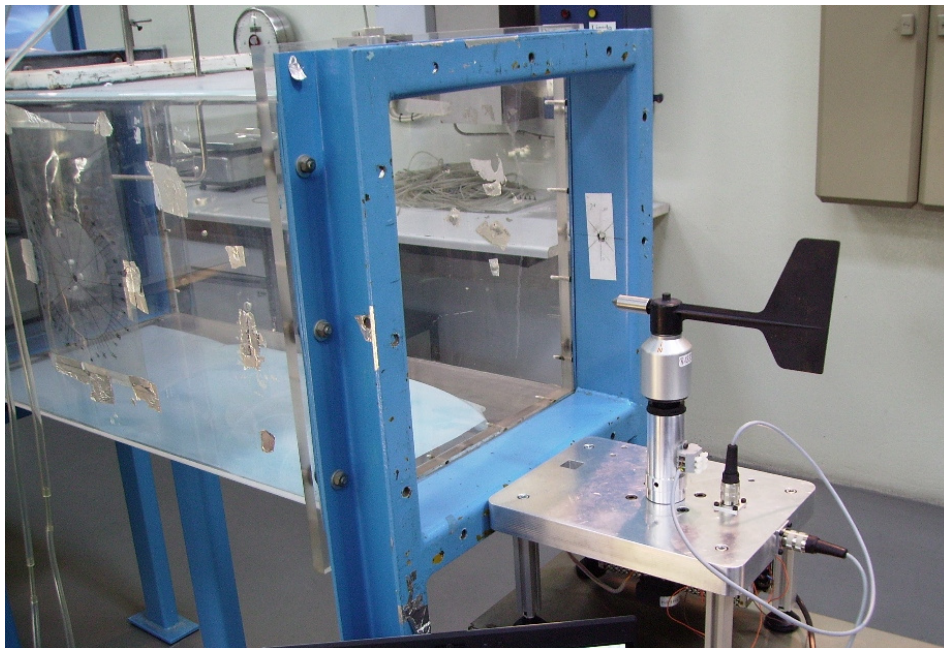


Figura 5.4 – Instalação utilizada no teste dinâmico

Algumas considerações iniciais acerca do escoamento têm de ser feitas. O túnel utilizado dispõe de elementos que visam reduzir a turbulência criada pelo ventilador e contribuir para que o campo de velocidades seja homogêneo. Neste caso vamos considerar que as linhas de escoamento dentro do túnel são aproximadamente rectilíneas e paralelas. Assim as oscilações

verificadas na rotação do leme são quase totalmente devido ao mesmo e não às condições de teste.

Outro dos pontos a ter em atenção é a frequência de amostragem e a dimensão das amostras. Como não existe nenhuma informação a nível da variação do valor indicado pelo sensor, é necessário recorrer a um intervalo de medições alargado.

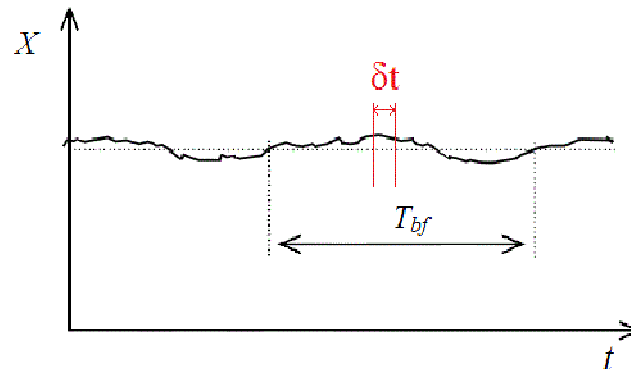


Figura 5.5 – Exemplificação da oscilação na medição de uma variável

(Fonte: apontamentos teóricos da disciplina “Métodos Experimentais em Energia Térmica” da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto)

Se o intervalo temporal de medição, δt , fosse o indicado na figura 5.5, o resultado obtido não corresponderia ao valor da média representado pela linha a ponteados horizontal. Assim, dever-se-á definir um intervalo de tempo representativo, isto é, superior ao período das oscilações de baixa frequência (T_{bf}) e com uma taxa de aquisição suficiente que permita obter uma recolha de pontos que representem todas as posições.

Para a recolha dos dados, montou-se o cata-vento conforme mostra a figura 5.4, ligou-se o túnel de vento e mediram-se as condições ambiente tais como temperatura e pressão atmosférica para se proceder ao cálculo da massa volúmica e da velocidade do ar. Durante todo o teste só foi utilizada uma velocidade. O posicionamento angular do cata-vento aqui não toma importância, apenas é necessário garantir que o seu corpo não se mova, nem rode.

Na tabela 9 especificam-se as condições de ensaio.

Tabela 5.5 – Condições do teste dinâmico

Pressão atmosférica	741	mmHg
	98760,48	Pa
Temperatura	25,5	°C
Massa volúmica ar	1,152	kg/m ³
Pressão dinâmica	58	Pa
Velocidade	10,03	m/s

A massa volúmica, ρ , foi obtida a partir da equação dos gases perfeitos,

$$\rho = \frac{P_{\text{atm}}}{R_{\text{ar}} \times T_{\text{ar}}}$$

e a velocidade, u , foi dada por,

$$u = \sqrt{\frac{2 \times \Delta p}{\rho}}$$

Onde Δp é a pressão dinâmica medida através de um tubo de Pitot estático.

Utilizou-se o programa elaborado em LabVIEWTM para efectuar a recolha de dados. Aqui foram utilizadas várias frequências de amostragem indo dos 10 Hz até os 1000 Hz, e vários períodos temporais de recolha, variando entre 1 e 60 segundos. Os valores medidos encontram-se em graus.

Tabela 5.6 – Resultados do teste dinâmico para uma frequência de aquisição de 500 Hz

Período de amostragem					
5 segundos		15 segundos		60 segundos	
Média (°)	Desvio padrão (°)	Média (°)	Desvio padrão (°)	Média (°)	Desvio padrão (°)
102,2	6,5	102,3	7,2	102,2	7,9
102,1	7,7	102,2	7,6	102,2	8,2
102,0	6,5	102,1	7,1	102,2	7,6
102,3	6,9	102,2	7,8		
102,3	6,9				

Tabela 5.7 - Resultados do teste dinâmico para uma frequência de aquisição de 50 Hz

Período de amostragem					
1 segundo		5 segundos		60 segundos	
Média (°)	Desvio padrão (°)	Média (°)	Desvio padrão (°)	Média (°)	Desvio padrão (°)
101,9	4,0	103,3	4,0	102,2	8,8
100,5	12,7	101,8	2,8	102,1	6,2
102,9	3,7	102,7	3,8	102,5	7,6
102,0	2,0	102,4	2,5	102,4	6,6
102,1	1,2				
102,7	3,6				
102,5	2,1				
101,9	4,7				
100,1	11,8				

Tabela 5.8 - Resultados do teste dinâmico para uma frequência de aquisição de 10 Hz

Período de amostragem					
1 segundo		5 segundos		60 segundos	
Média (°)	Desvio padrão (°)	Média (°)	Desvio padrão (°)	Média (°)	Desvio padrão (°)
101,5	1,4	102,8	2,6	102,0	4,1
102,2	3,6	104,8	13,4	101,6	7,9
103,4	2,4	103,0	5,4	101,6	5,9
102,4	1,3	103,0	2,8	102,1	7,4
101,8	0,9	101,7	1,7		
102,8	1,5	104,4	11,3		
101,6	1,8	103,3	5,6		
101,6	1,2	101,4	2,5		
102,0	0,9	102,6	8,5		

Efectuaram-se medições com frequências de amostragem de 250 Hz, e 1000Hz, como também com diferentes períodos de amostragem tais como 15 e 30 segundos. Porém a tendência observada é representável pelos valores aqui apresentados.

Para a frequência de amostragem de 500 Hz, no período de amostragem de 5 segundos os valores da média para os diferentes períodos de amostragem são muito semelhantes variando apenas 0,3 graus. O desvio padrão também não difere muito sendo cerca de 7°.

Com a frequência de amostragem de 50 Hz, utilizando períodos de amostragem de 1 segundo as médias variam entre si num intervalo de 2,6 °. Utilizando períodos de amostragem de 5 segundos variam entre si num máximo de 1,5°. No período de amostragem de 60 segundos variam no máximo 0,3°. Em relação ao desvio-padrão, verifica-se que para os dois primeiros períodos de amostragem os valores do desvio-padrão são mais pequenos, encontrando-se esporadicamente alguns valores bastante mais elevados.

Na frequência de amostragem de 10 Hz, e quando o período de amostragem é de 1 segundo, os valores das médias variam entre si num máximo de 1,9°. Os valores do desvio padrão também são muito baixos. Para um período de amostragem de 5 segundos as médias variam entre si num máximo de 4°, e os desvios-padrão são um pouco superiores aos anteriores, contendo alguns valores bastante mais elevados. Com um período de amostragem de 60 segundos, os valores da média variam no máximo 0,5°, e os valores do desvio-padrão são superiores aos anteriores.

Para analisar o comportamento do cata-vento vai-se ter em conta as medições em que as médias registadas diferem pouco entre si, o que significa que nessas medições os intervalos temporais são suficientes para incorporar todas as variações do valor da variável em estudo. Esse intervalo temporal deve ser superior a 5 segundos. Como se verifica para os períodos de amostragem de 60 segundos as médias são muito semelhantes, e os valores do desvio-padrão rondam os 7°, e é este o valor que deve ser utilizado no cálculo da incerteza da medição do rumo do vento.

Ainda que esta experimentação procurasse os valores do desvio-padrão para determinados períodos temporais, podemos concluir também que a dispersão de resultados verificados nos

intervalos de amostragem de 1 segundo, são indicativos da capacidade de resposta do cata-vento a mudanças bruscas de direcção.

Capítulo 6

Conclusões

Os cata-ventos fornecidos pelos fabricantes são previamente calibrados em laboratório certificado, de modo a aferir se a sua resposta está de acordo com os parâmetros para qual ele foi projectado. Quando o sensor é utilizado por longos períodos de tempo, estes tendem a alterar a sua resposta, tornando-se necessário verificar, através da comparação com um padrão, se o erro obtido está de acordo com o especificado pelo fabricante. Porém, não existem soluções técnicas no mercado que executem de forma automática e expedita a comparação da leitura da posição do sensor em relação a um padrão.

Num trabalho desta natureza, entende-se que a principal conclusão a realçar reside no seguinte facto: a consumação de um projecto de um dispositivo experimental capaz de permitir ao utilizador verificar de forma simples, rápida e automática o estado de funcionamento de cata-ventos, permitindo comprovar a aptidão do dispositivo ao fim a que se destina.

Na bancada projectada e construída no âmbito deste trabalho conseguiu-se incorporar todos os seus constituintes tais como o motor e respectivo *drive* de controlo, a fonte de alimentação e elementos de ligação com os sensores e a placa de aquisição de dados. Dado que cada tipo de cata-vento dispõe de um casquilho de fixação específico, foi necessário dotar a bancada de um suporte adaptável de forma simples e rápida às diversas configurações dos sensores. É através deste suporte que se transmite o movimento do motor ao sensor do cata-vento.

O programa de controlo desenvolvido controla a posição angular do cata-vento através de ordens dadas ao *drive* do motor, executando a leitura do *encoder* e do sensor cada vez que o movimento é interrompido ao longo de uma volta completa. A parte gráfica apresentada ao utilizador é de fácil interpretação, permitindo-o definir o número de sectores a verificar ao longo de uma volta completa. Pode optar-se pela execução do movimento apenas num sentido ou, se após a conclusão de uma volta, ele inverte o sentido e executa uma volta de regresso. Esta última opção vai permitir observar se existem efeitos de histerese provocados pela mudança do sentido de rotação, fenómeno que acontece com alguma frequência na utilização normal do cata-vento. A visualização dos valores obtidos, em tabelas e gráficos dá a oportunidade ao utilizador de averiguar o erro de leitura do cata-vento em cada posição pré-definida, existindo a possibilidade de imprimir um relatório com a toda a informação pertinente sobre o sensor em questão. Com esta informação é possível criar um histórico de cada cata-vento em relação à característica da sua resposta.

A utilização de um *encoder* com uma resolução de $0,36^\circ$ permitiu obter um padrão de referência com uma exactidão elevada contribuindo para a valorização dos testes realizados nesta bancada. Os resultados obtidos na análise de incerteza, maioritariamente afectada por erros devidos ao posicionamento do “Norte” do cata-vento e da resolução do *encoder*, mostraram-se adequados e contribuem para a validação do teste. Contudo, um *encoder* de melhor qualidade foi seleccionado para um eventual uso futuro.

No desenvolvimento do trabalho cumpriram-se as diversas etapas do projecto, concepção, desenho, construção, montagem e ensaios preliminares, tendo sido diversos os domínios de conhecimento envolvidos, nomeadamente a metrologia, a instrumentação e controlo, a mecânica dos fluidos, o projecto mecânico e a programação em LabVIEWTM.

O resultado foi uma bancada que permite substituir um processo manual, fastidioso, por um processo automático quase sem interferência humana no resultado, com elevada exactidão,

com a possibilidade de documentar os resultados obtidos sob a forma gráfica, tornando o teste de verificação bastante mais credível.

Trabalhos futuros

Como foi referido no capítulo 2 - estado da arte, existem mecanismos que conseguem aferir se os rolamentos do cata-vento estão de certa forma danificados ao ponto de ser necessário incrementar o binário para o leme conseguir rodar. Este aumento do binário pode levar a que a baixas velocidade o vento não exerça força suficiente para o leme posicionar-se em direcção à origem do vento. Assim, como trabalhos futuros sugere-se o desenvolvimento de um mecanismo capaz de medir o binário necessário para rodar o leme durante uma volta completa, e comparar os valores obtidos, com os mesmos modelos quando estes são entregues pelo fabricante.

Capítulo 7

Referências e bibliografia

MATHEW, Sathyajith, 2006, *Wind Energy: Fundamentals, Resource Analysis and Economics*, Springer Berlin Heidelberg, Holanda, ISBN 3-540-30905-5

MANWELL, J. F., MCGOWAN, J. G., ROGERS, A. L., 2009, *Wind Energy Explained: Theory, Design and Application – 2^a edição*, Riley, Reino Unido, ISBN 978-0-470-01500-1

NELSON, Vaughn, 2009, *Wind Energy: Renewable Energy and the Environment*, CRC Press, Estados Unidos da América, ISBN 978-1-4200-7568-7

WMO, 2008, *Guide to Meteorological Instruments and Methods of Observation*, Chairperson, Publications Board, Genève, Suíça, ISBN 978-92-63-10008-5

Deutsche WindGuard Wind Tunnel Services, 03/2010, 10/1741 DKD-K-36801, certificado de calibração do modelo “Compact” do fabricante “Thies Klima”.

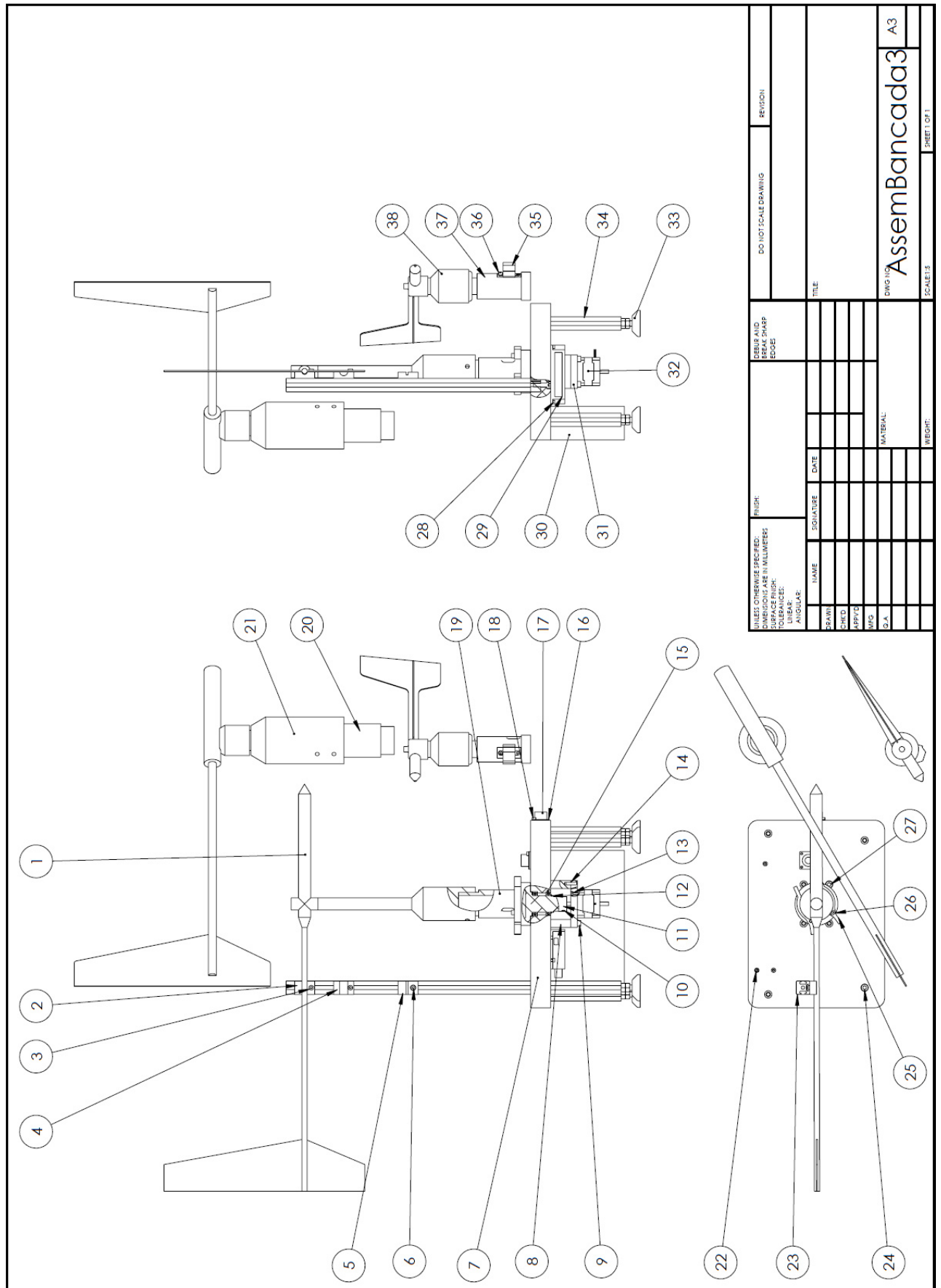
R. M. YOUNG COMPANY, *WIND SYSTEM CALIBRATION RECOMMENDED CALIBRATION INTERVAL, PROCEDURE, AND TEST EQUIPMENT, MODEL 18860-90*, Manual de Instruções cedido pela R. M. YOUNG COMPANY

PRESSMAN, Abraham; KEITH, Billings; MOREY, Taylor; 2009, *Switching Power Supply Design – 3 edição*, McGraw-Hill, Estados Unidos da América, ISBN 978-0-07-148272-1

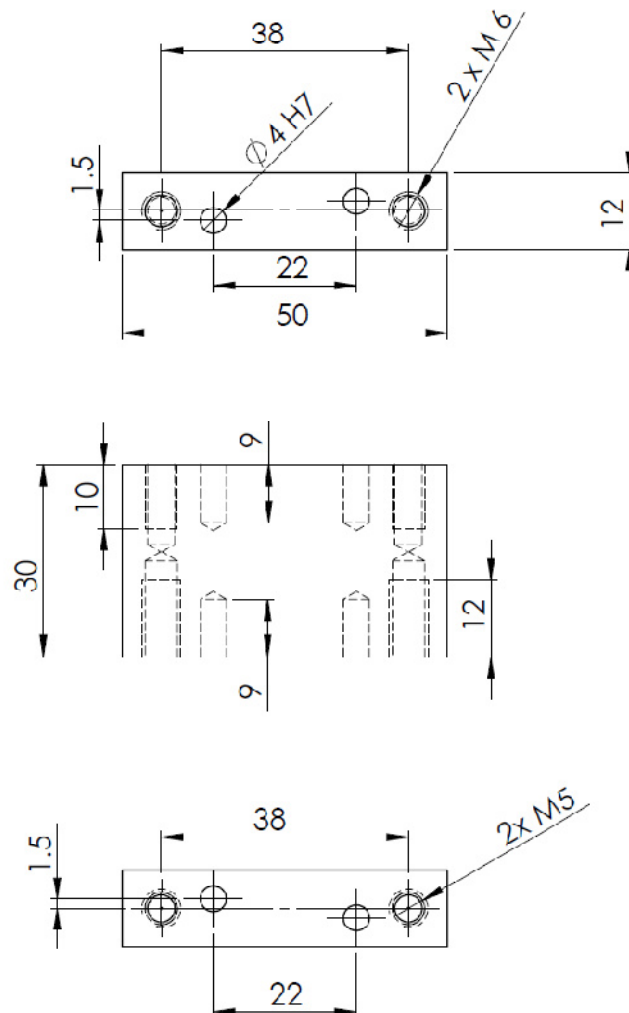
SANTOS, A. M. S., 2010, *Análise de Incerteza e Planeamento experimental*, apontamentos teóricos da disciplina “Métodos Experimentais em Energia Térmica” da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.

ANEXOS

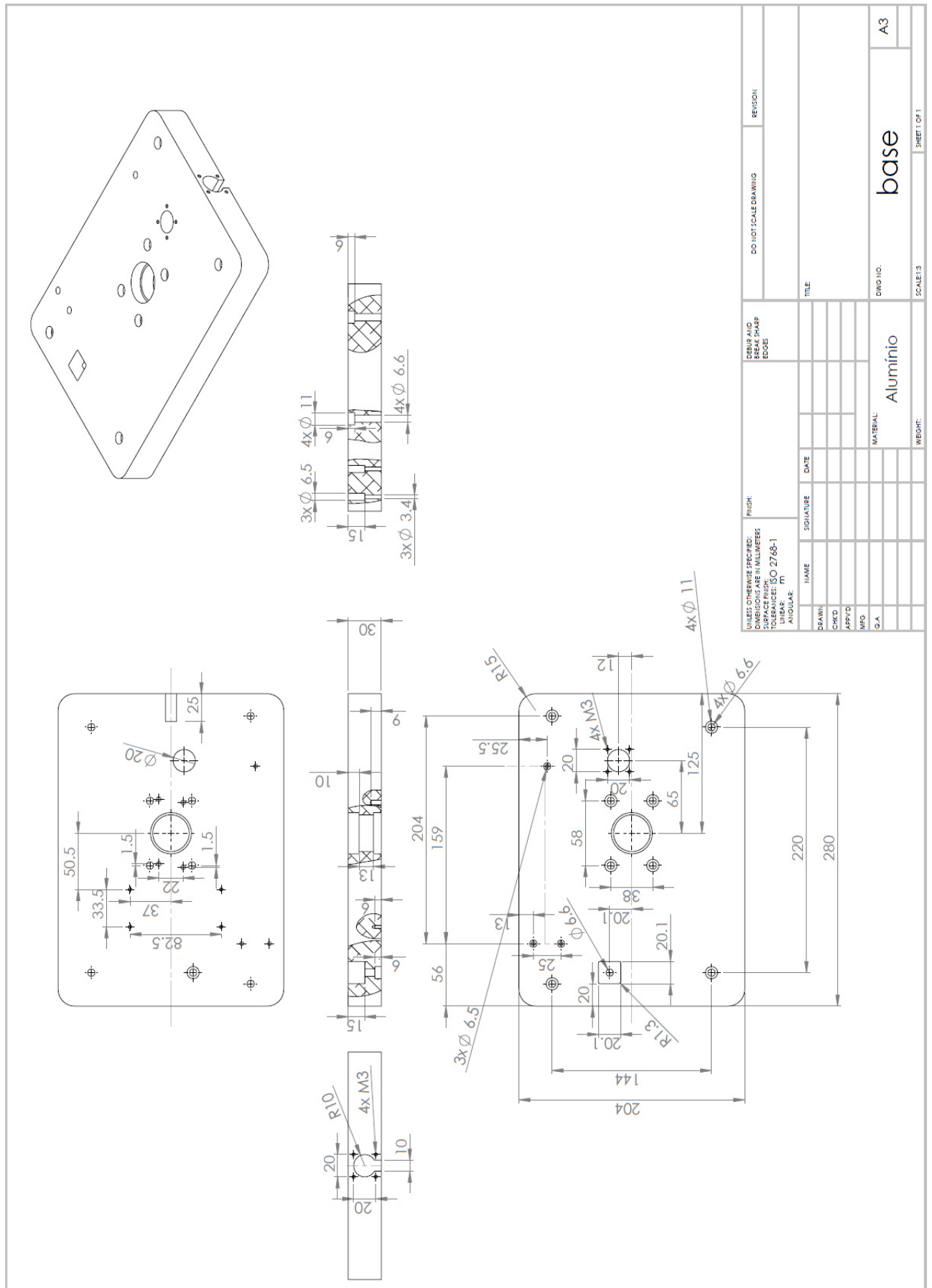
Anexo A: Desenhos de definição e conjunto

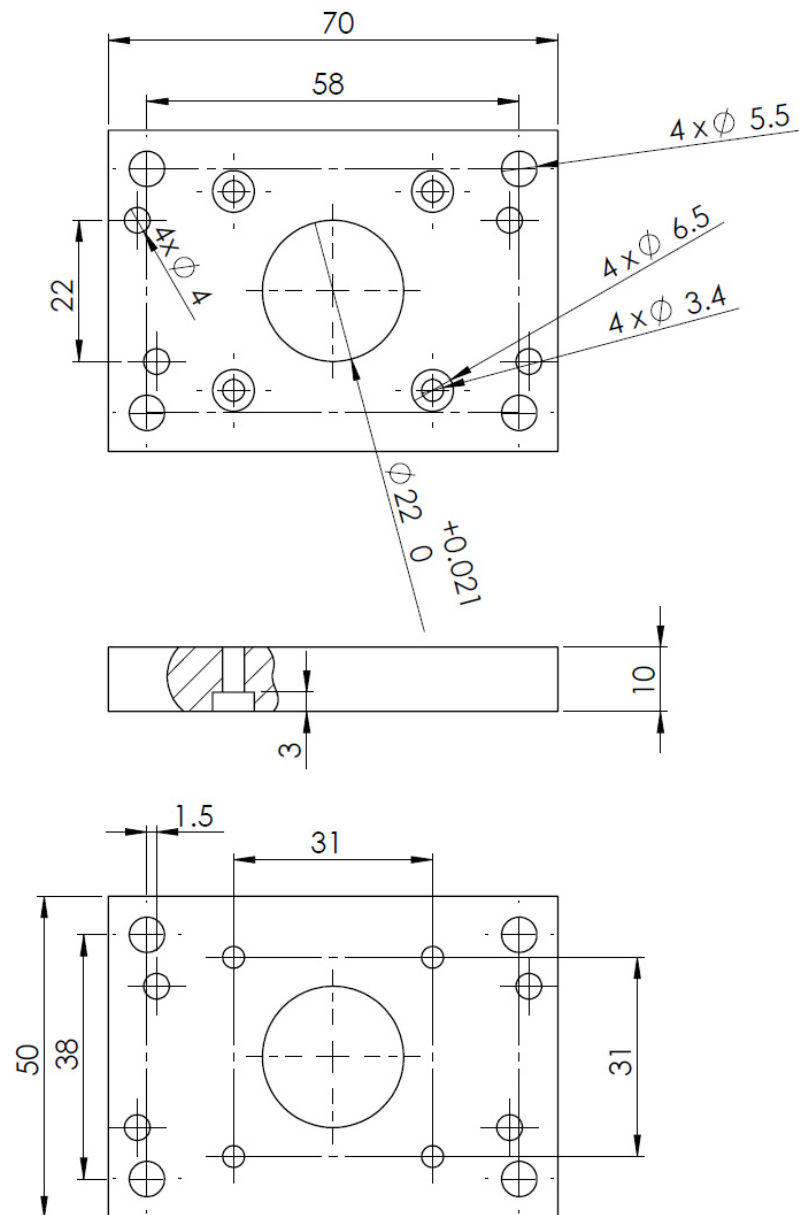


38	Cata-vento compact	1
37	Suporte compact	1
36	Parafuso CHC M3x5	2
35	Conector rápido	1
34	Pernas perfil alumínio	4
33	Pés	4
32	Motor	1
31	Chapa motor	1
30	Fonte energia 24V	1
29	Drive motor	1
28	Parafuso CHC M3x8	4
27	Parafuso CHC M6x30	4
26	Parafuso CHC M4x16	2
25	Garra	2
24	Parafuso CHC M6x35	4
23	Braço em perfil alumínio	1
22	Parafuso CHC M3x20	3
21	Cata-vento classic	1
20	Suporte classic	1
19	Suporte first class	1
18	Parafuso CHC M3x5	8
17	Conector base	2
16	Chapa conector	2
15	Rolamento 61805	2
14	Pino 4x16	8
13	Parafuso CHC M3x10	4
12	Anel elástico 25	1
11	Suporte	1
10	Set screw M4x8	1
9	Parafuso CHC M5x16	4
8	Barra suporte motor	2
7	Base	1
6	Parafuso CHC M4x10	1
5	Agarra compact	1
4	Agarra first class	1
3	Parafuso CHC M4x12	2
2	Agarra classic	1
1	Cata-vento classic	1
Numero	Nome	Quantidade

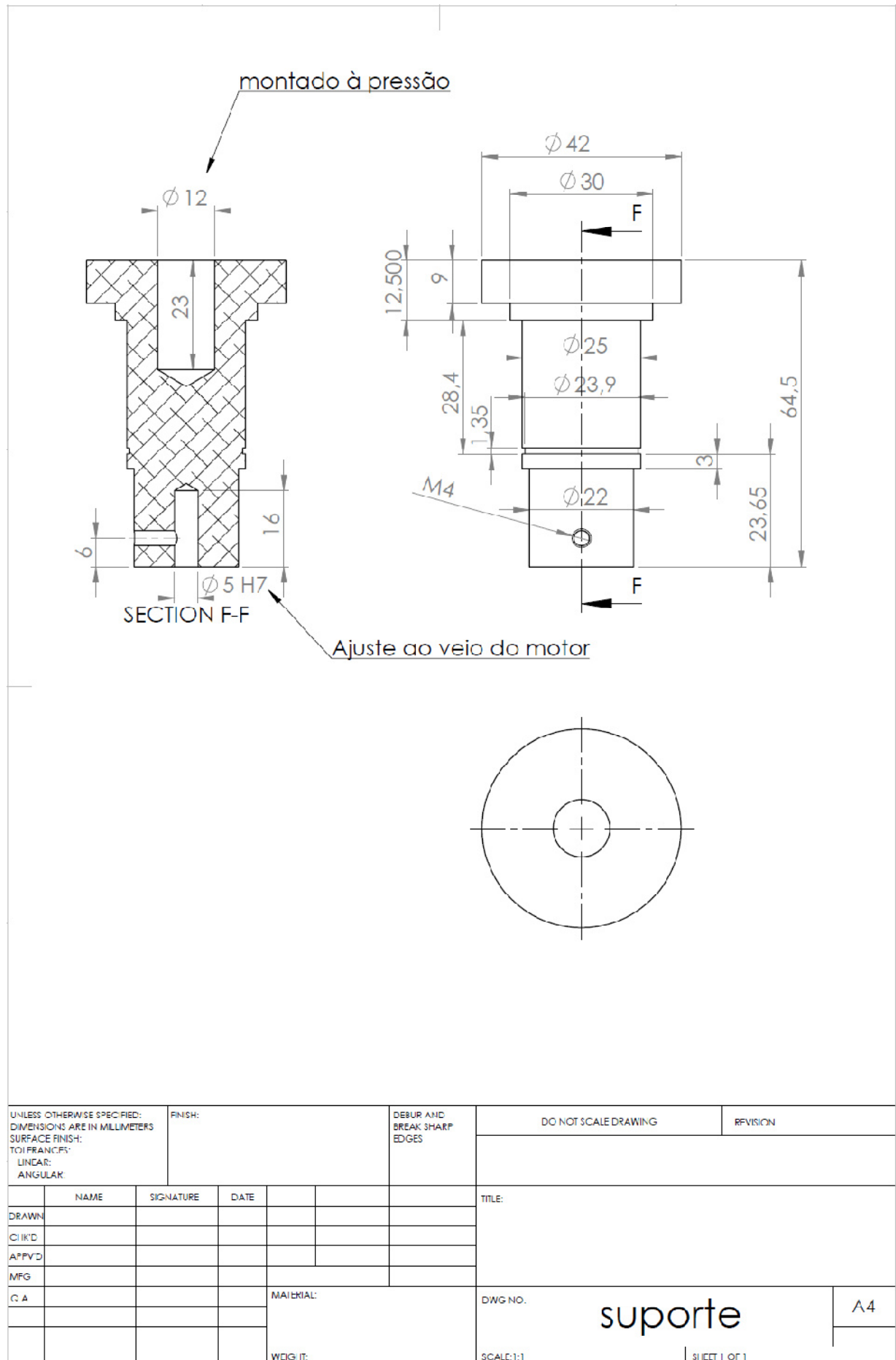


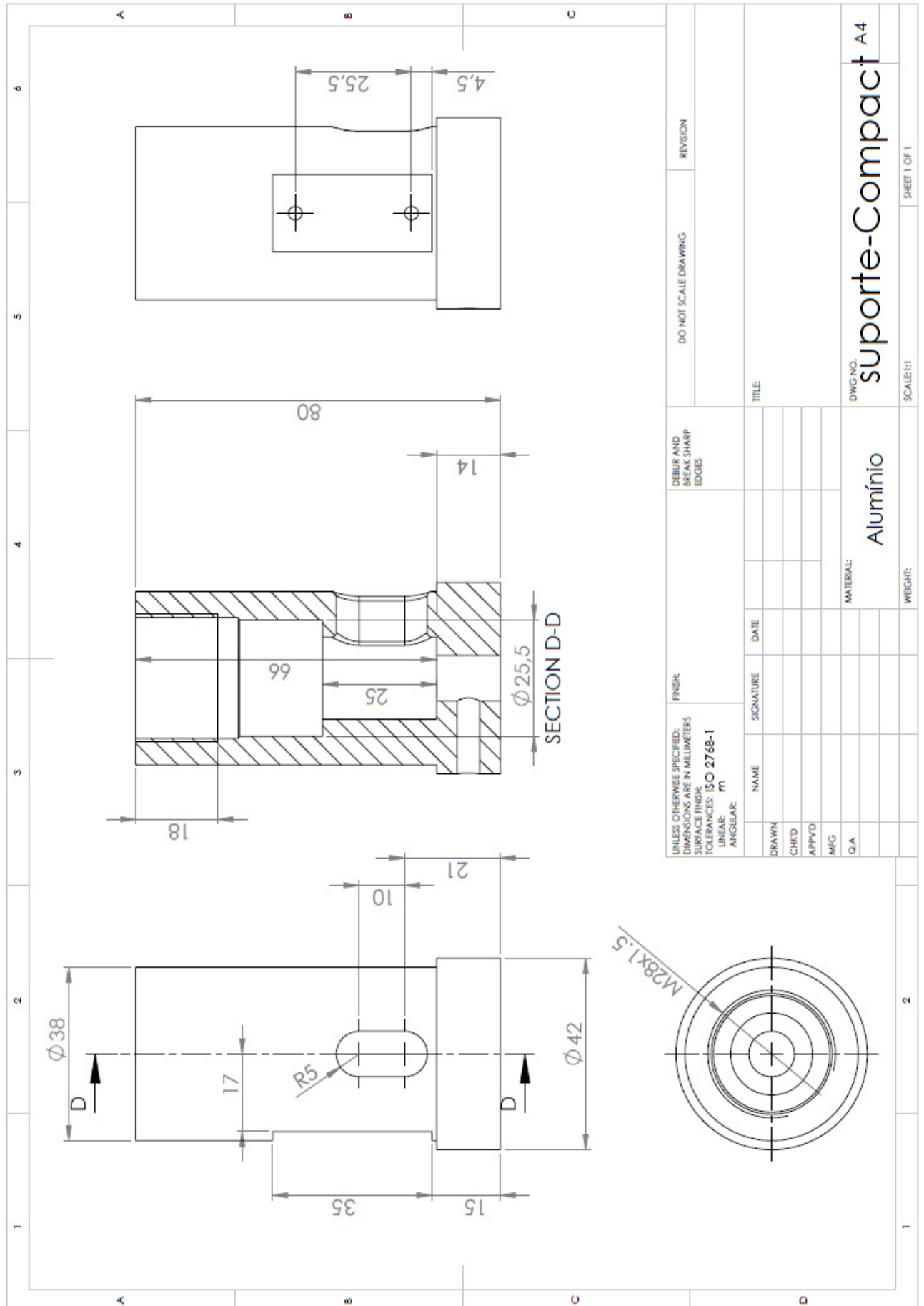
UNLESS OTHERWISE SPECIFIED: DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS SURFACE FINISH: TOLERANCES: LINEAR: ANGULAR:				Qtd. x 2		DEBUR AND BREAK SHARP EDGES		DO NOT SCALE DRAWING		REVISION		
		NAME		SIGNATURE		DATE				TITLE:		
DRAWN												
CHK'D												
APP'D												
MFG												
Q.A.						MATERIAL: Aluminio		DWG NO.		barra-motor		A4
						WEIGHT:		SCALE 1:1		SHEET 1 OF 1		

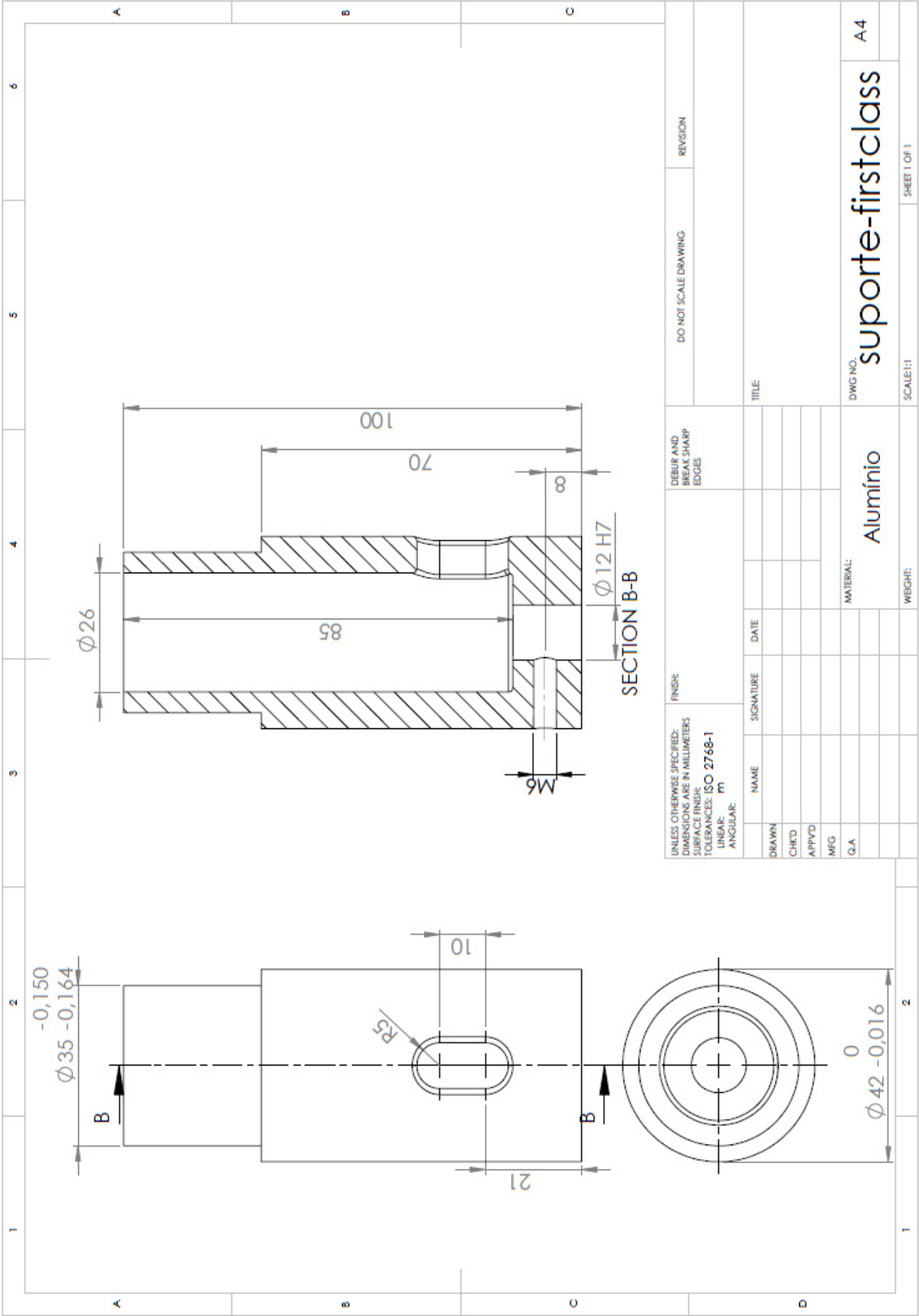


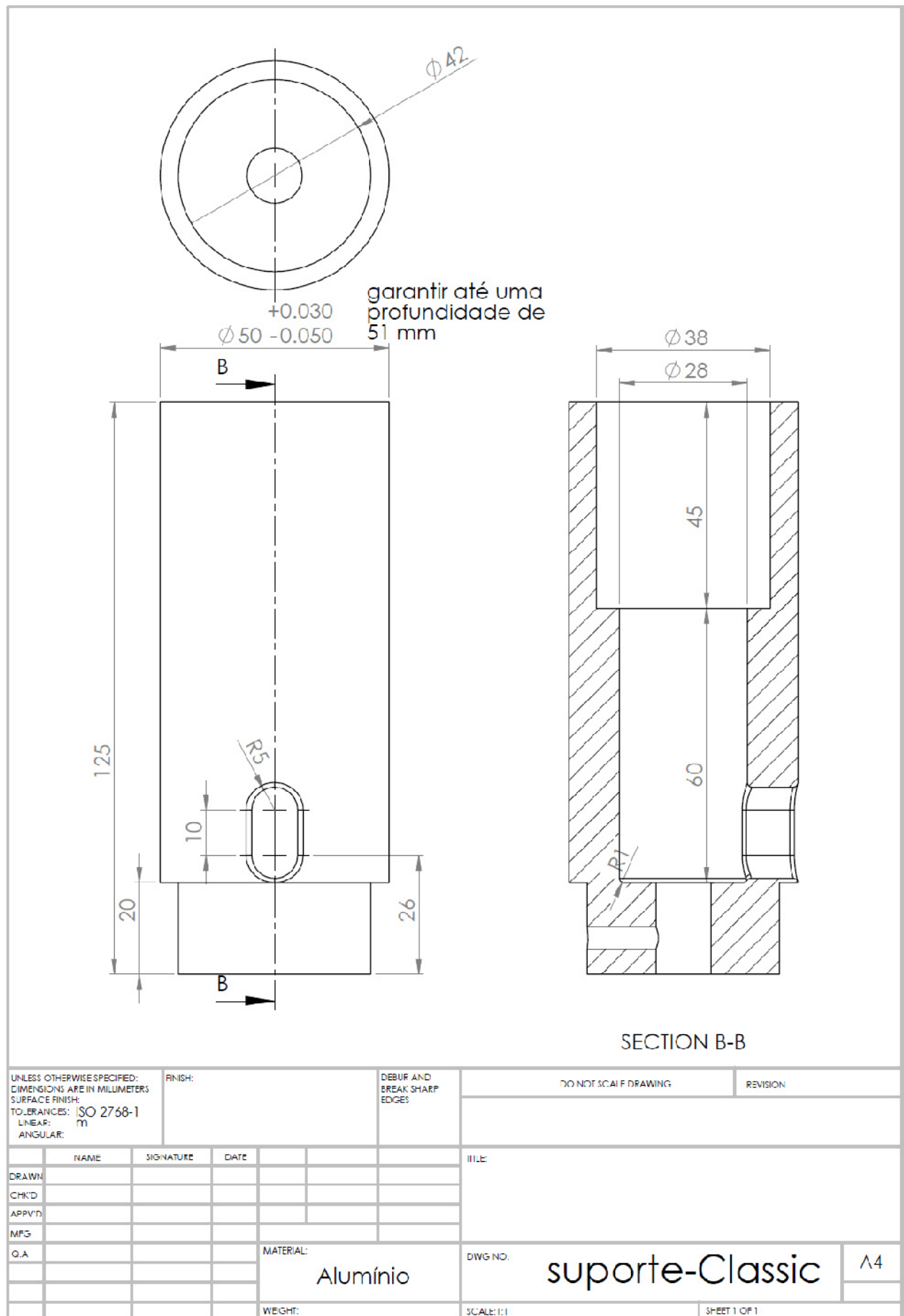


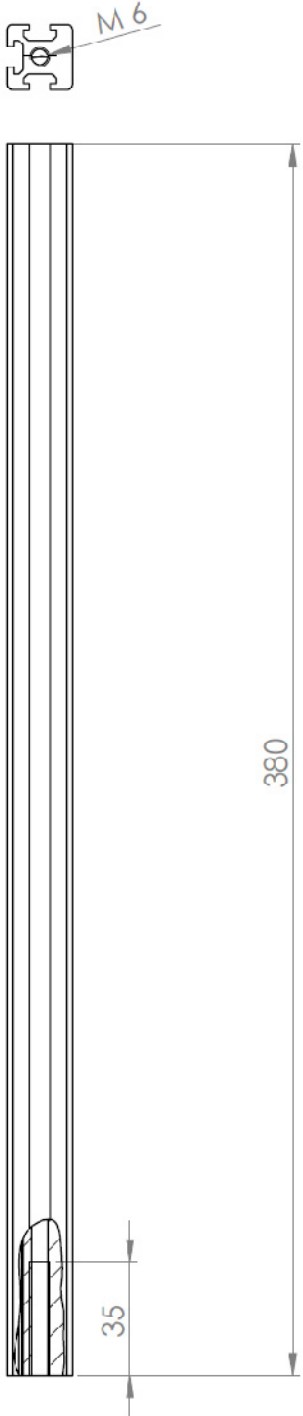
UNLESS OTHERWISE SPECIFIED: DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS SURFACE FINISH: TOLERANCES: LINEAR: ANGULAR:				FINISH:		DEBUR AND BREAK SHARP EDGES		DO NOT SCALE DRAWING		REVISION	
								TITLE:			
DRAWN				SIGNATURE		DATE					
CHK'D											
APPV'D											
MFG											
Q.A.								DWG NO. chapa			
						MATERIAL: Alumínio		A4			
						WEIGHT:		SCALE: 1:1			
								SHEET 1 OF 1			





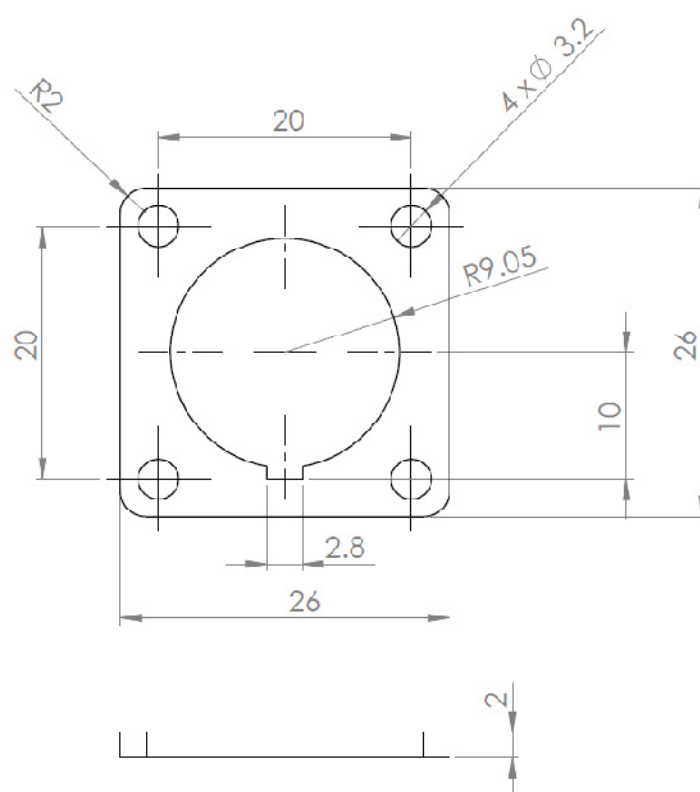




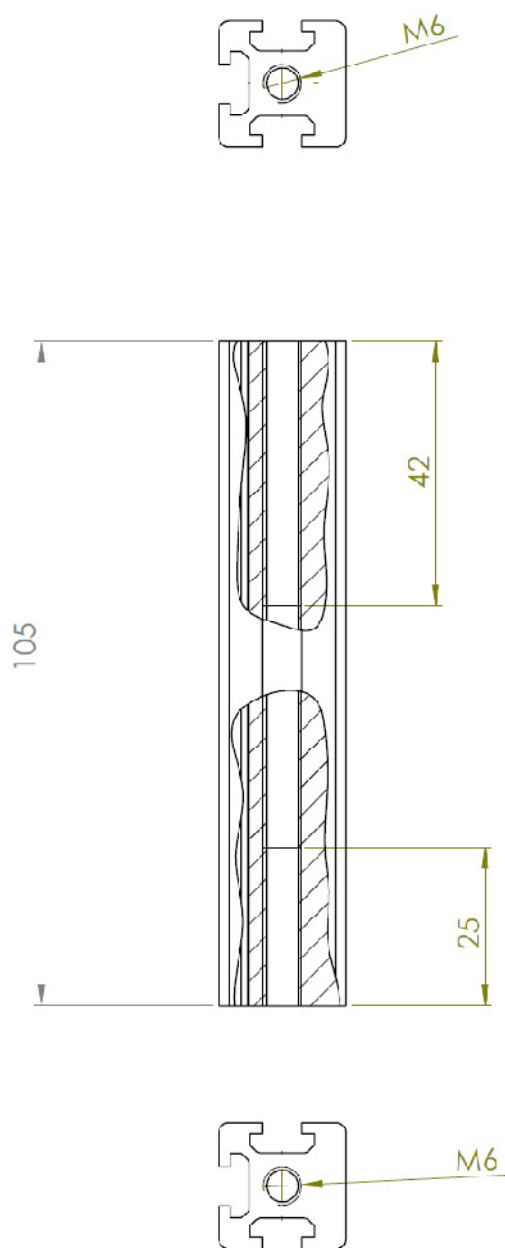


Technical drawing of a vertical arm (Braço) with dimensions 380 and 35, and a bolt labeled M6.

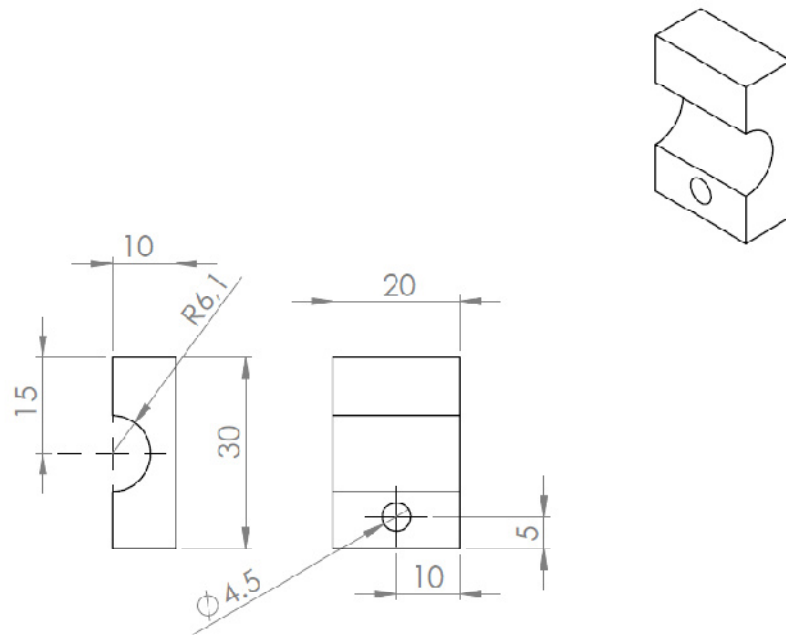
UNLESS OTHERWISE SPECIFIED: DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS SURFACE FINISH: TOLERANCES: LINEAR: ANGULAR:				FINISH:		DEBUR AND BREAK SHARP EDGES		DO NOT SCALE DRAWING		REVISION	
NAME		SIGNATURE		DATE				TITLE:			
DRAWN											
CHECK'D											
APP'D											
MFG											
Q.A						MATERIAL: Perfil Alumínio RS		DWG NO.		Braço	
										A1	
						WEIGHT:		SCALE: 1:2		SHEET 1 OF 1	



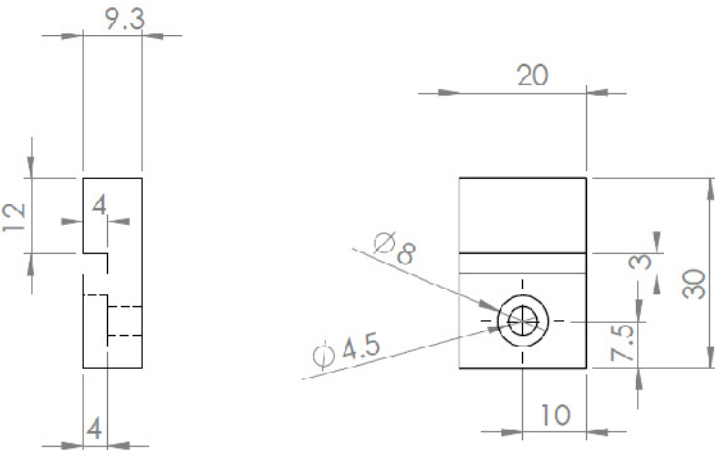
UNLESS OTHERWISE SPECIFIED: DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS SURFACE FINISH: TOLERANCES: LINEAR: ANGULAR:				Qtd. x 2		DFAIR AND BREAK SHARP EDGES		DO NOT SCALE DRAWING		REVISION	
NAME		SIGNATURE		DATE				TITLE:			
DRAWN											
CHKD											
APP'D											
MFG											
Q.A						MATERIAL:		DWG NO.		A4	
						Alumínio		chapa conector			
						WEIGHT:		SCALE:2:1		SHEET 1 OF 1	



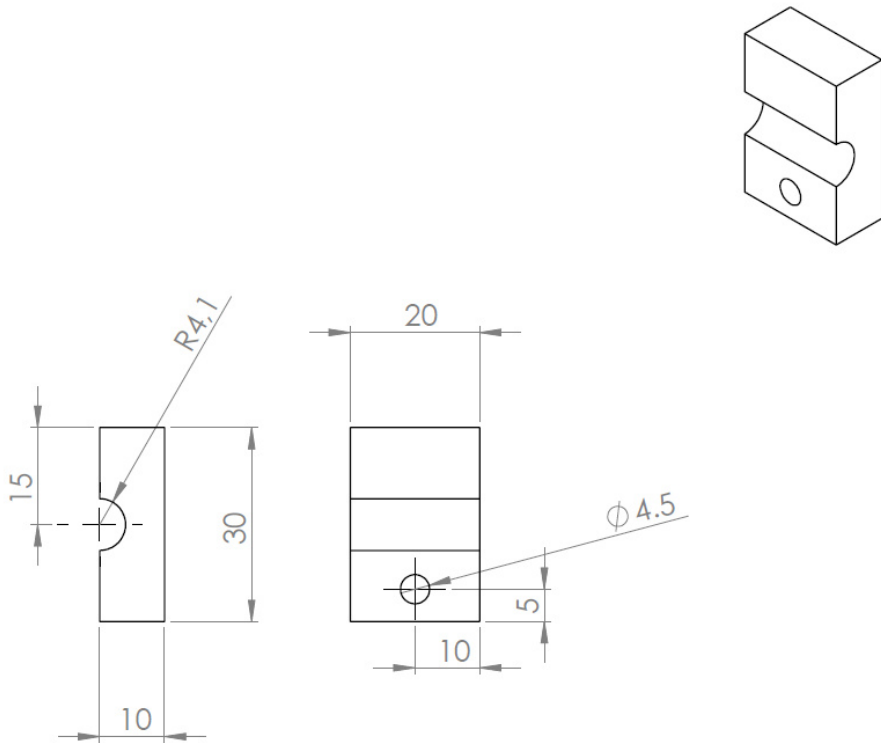
UNLESS OTHERWISE SPECIFIED: DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS SURFACE FINISH: TOLERANCES: LINEAR: ANGULAR:		Qtd X 4		DESUR AND BREAK SHARP EDGES		DO NOT SCALE DRAWING		REVISION	
NAME		SIGNATURE		DATE				TITLE:	
DRAWN									
CHK'D									
APPV'D									
MFG									
Q.A						MATERIAL:		DWG NO.	
						Perfil Alumínio RS		Perna	
								A4	
						WEIGHT:		SCALE 1:1	
								SHEET 1 OF 1	



UNLESS OTHERWISE SPECIFIED: DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS SURFACE FINISH: TOLERANCES: LINEAR: ANGULAR:				FINISH:		DEBUR AND BREAK SHARP EDGES		DO NOT SCALE DRAWING		REVISION	
NAME		SIGNATURE		DATE				TITLE:			
DRAWN											
CHK'D											
APP'D											
MFG											
Q.A.						MATERIAL:		DWG NO.		A4	
								agarra-classic			
						WEIGHT:		SCALE 1:1		SHEET 1 OF 1	



UNLESS OTHERWISE SPECIFIED: DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS SURFACE FINISH: TOLERANCES LINEAR: ANGULAR:				FINISH:		DRAFTER AND BREAK SHARP EDGES		DO NOT SCALE DRAWING		REVISION	
								TITLE:			
DRAWN											
CHK'D											
APP'D											
MFG											
Q.A						MATERIAL: Alumínio		DWG NO. agarra-compact		A4	
						WEIGHT:		SCALE 1:1		SHEET 1 OF 1	



Technical drawing of a mechanical part. The drawing includes an isometric view and two orthographic views (front and side). The front view shows a rectangular part with a width of 10 mm and a height of 30 mm. A semi-circular feature with a radius of R4.1 is located on the left side, with a depth of 15 mm. The side view shows a rectangular part with a width of 20 mm and a height of 10 mm. A circular hole with a diameter of $\phi 4.5$ is located on the side, with a depth of 5 mm.

UNLESS OTHERWISE SPECIFIED: DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS SURFACE FINISH: TOLERANCES: LINEAR: ANGULAR:		FINISH:		DEBUR AND BREAK SHARP EDGES		DO NOT SCALE DRAWING		REVISION	
NAME		SIGNATURE		DATE		TITLE:			
DRAWN									
CHK'D									
APP'D									
MFG									
Q.A.						MATERIAL:		DWG NO.	
						Aluminio		agarra-firstclass	
						WEIGHT:		SCALE:1:1	
								SHEET 1 OF 1	

Anexo B: Relatório de verificação do cata-vento



Procedimento de test / Test procedure

Procedimento interno INEGI
INEGI's internal procedure

O sensor é colocado no casquilho e fixado ao suporte da bancada. Alinha-se o fuso com a direcção do norte e inicia-se o teste automático. O motor roda em sectores definidos pelo operador até completar 360°. Em cada paragem é lida a posição do encoder e do sensor. Os dados são demonstrados em forma tabelar e gráfica, evidenciando o maior erro.

Versão de trabalho

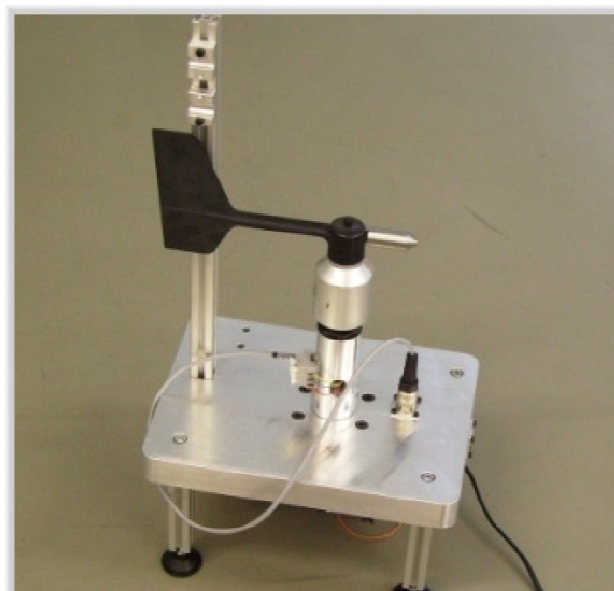
Verificação de cata-vento / Wind vane test

Fabricante e modelo Maker and model	Compact
Número de série Serial number	0103782
Cliente Client	
Data Date	25-06-2010 17:44:42
Número do documento Test number	

Data Date	Técnico responsável pelo teste Test performed by
	Ricardo Gonçalves

**Instalação de teste / Test facility**

Sist. Aquisição de Dados Data acquisition system	NI cDAQ-9172
Número de série SAD Serial number DAS	1468188
Motor (modelo e núm. série) Motor model and SN	Nanotec ST4209S0404
Encoder (modelo e núm. série) Encoder model and SN	WEDL 5541
Versão Software Software version	Teste_v1.1



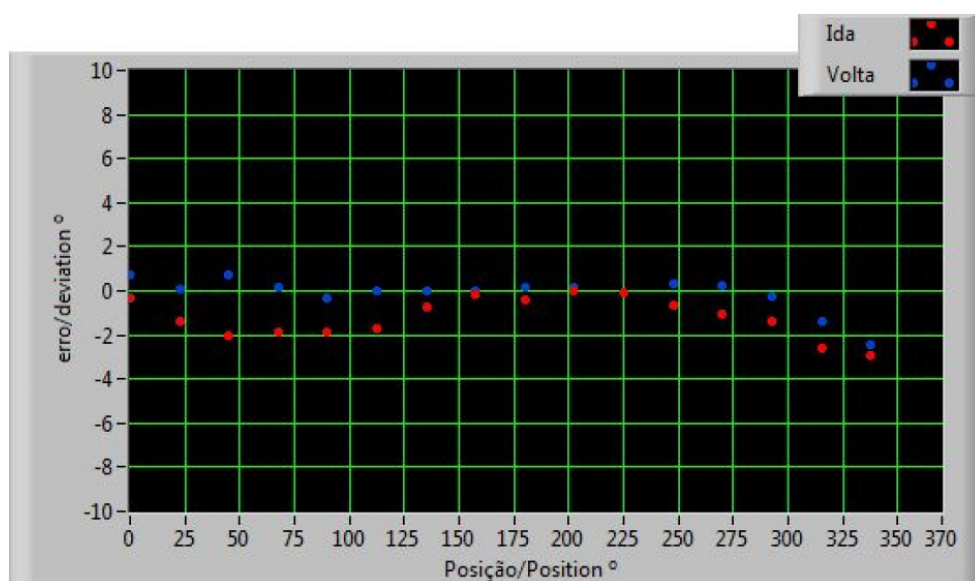


Condições ambientais / Test conditions

Temperatura Temperature	Humidade Rel. Humidity	Pressão atm. Air pressure
0°C	0 %	0 hPa

Resultados do teste / Test results

Encoder	Cata-vento	Erro	Encoder	Cata-vento	Erro
-0.0	-0.4	-0.4	337.5	335.1	-2.4
22.5	21.1	-1.4	315.0	313.7	-1.3
45.0	43.0	-2.0	292.5	292.3	-0.2
67.5	65.6	-1.9	270.0	270.2	0.2
90.0	88.2	-1.8	247.5	247.8	0.3
112.5	110.8	-1.7	225.0	224.9	-0.1
135.0	134.3	-0.7	202.5	202.7	0.2
157.5	157.4	-0.1	180.0	180.1	0.1
180.0	179.6	-0.4	157.5	157.5	-0.0
202.5	202.5	0.0	135.0	135.0	-0.0
225.0	224.9	-0.1	112.5	112.5	-0.0
247.5	246.8	-0.7	90.0	89.7	-0.3
270.0	268.9	-1.1	67.5	67.6	0.1
292.5	291.1	-1.4	45.0	45.7	0.7
315.0	312.4	-2.6	22.5	22.6	0.1
337.5	334.6	-2.9	-0.0	0.8	0.8



Erro máximo Maximum deviation	2.9
Erro médio Mean deviation	1.8

Anexo C: Instruções de funcionamento

Nesta secção é descrito o conjunto de instruções que o técnico responsável pelo teste de verificação do cata-vento necessita de cumprir para garantir que o teste é bem conduzido.

Este teste necessita que o alinhamento do norte do cata-vento seja efectuado manualmente. É importante que o alinhamento seja o mais correcto possível, como se pode compreender, o erro aqui presente vai-se propagar a todas as medições seguintes.

- Ligar a fonte de alimentação;
- Ligar o conector ao cata-vento;
- Acoplar o cata-vento ao casquilho respectivo, usando os meios de fixação existentes;
- Colocar o casquilho com o sensor no suporte da bancada e apertar o perno contra o pino;
- Ligar o conector macho que vem do cata-vento ao conector fêmea da base
- Executar o programa do teste;
- Configurar a porta de comunicação com o *drive* do motor, e o directório do relatório modelo;
- Alinhar manualmente o “Norte” do cata-vento e fixar o leme;
- Inserir as informações do cata-vento e do teste;
- Indicar o número de sectores em que uma volta vai ser dividida;
- Seleccionar se o teste é só de “ida” ou “ida e volta”;
- Iniciar o teste;
- Esperar que o *led* “Teste concluído” ligue, para poder ver os resultados e imprimir o relatório.

Anexo D: Ligações eléctricas

Várias ligações eléctricas tiveram de ser efectuadas entre os vários componentes da bancada. Alguns como o motor e o *encoder* são ligados através de ligações temporárias, isto é podem ser retirados quando o técnico assim o entender. Do motor saem quatro fios que têm de ser ligados ao respectivo *drive*. O *drive* nos seus conectores tem a designação de cada terminal o que ajuda quando se fazem essas ligações. Na imagem seguinte pode-se ver a coloração dos fios do motor que devem ser ligados ao *drive* como também dos fios provenientes da fonte de alimentação de 24 V.



Figura D.1 – Esquema de ligação dos fios do motor e da alimentação do *drive*

O fio amarelo que liga ao terminal “UB 24-48V” é o fio que vem do terminal da fonte de alimentação com o sinal “+”, e o fio verde que liga ao terminal “GND” é o fio que vem do terminal da fonte de alimentação com o sinal “-”.

A ligação do *encoder* faz-se através de um cabo adquirido ao mesmo fabricante, referência ZK-WEDL-8-500-S.A extremidade do cabo que tem o conector é ligado ao *encoder* através de encaixe próprio, os fios soltos da outra extremidade são ligados aos terminais do *drive* reservados para o *encoder*. O cabo na sua extremidade tem nove fios, dos quais apenas cinco vão ser utilizados. O esquema de ligação é apresentado na figura seguinte.



Figura D.2 - Esquema de ligação dos fios do *encoder*

Relativamente aos conectores utilizados nos cata-ventos, estes são ligados de forma permanente pois foram soldados. Os conectores universais de 5 vias que são ligados à base,

são constituídos por cinco fios, dos quais três têm a mesma coloração dos fios dos cata-ventos, castanho, verde e amarelo. Todos os cata-ventos utilizam a mesma coloração para os mesmos terminais de ligação ao potenciômetro.

Para o modelo “Classic”

Castanho - pino número dois do conector

Verde - pino número três do conector

Amarelo – pino numero quatro do conector

Para o modelo “First Class”

Castanho - pino número dois do conector

Verde - pino número um do conector

Amarelo – pino numero três do conector

O modelo “Compact” como não utiliza conector na ligação à sua base, não é necessário soldar fios. É só observar a cor dos fios que saem do corpo do cata-vento e ligá-los no conector rápido que se encontra preso na lateral do casquilho, aos terminais que apresentam a mesma cor.

Na bancada os conectores fêmea também tem de ser soldados. Ao que é ligado o conector universal dos diversos cata-ventos é necessário soldar o fio de alimentação, o fio da massa, e o fio de leitura do indicador do potenciômetro. Destes últimos dois, sai também a ligação para o conector fêmea ao qual é ligado o cabo proveniente da placa de aquisição de dados. O esquema de ligações é o seguinte

Massa (castanho) - pino número dois do conector

Indicador potenciômetro (verde) - pino número três do conector

Alimentação 5V (amarelo) – pino número 6 do conector

A disposição dos pinos do conector visto pelo lado em que se efectua a soldadura dos fios

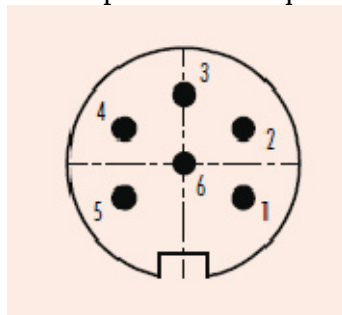


Figura D.3 - Disposição dos terminais dos conectores da base
(Fonte: http://www.binder-usa.com/til.php?_function=catalogdl2&uid=4116)