

Automação da Calibração em Túnel de Vento

João Guilherme de Almeida Pessanha Casimiro da Costa

Dissertação de Mestrado
Especialização em Automação

Orientador na FEUP: Prof. Joaquim Gabriel Magalhães Mendes
Supervisor no INEGI: Eng. Filipe Miguel Moita Marques Rodrigues



Mestrado Integrado em Engenharia Mecânica
Secção de Automação, Instrumentação e Controlo

Junho 2021

Resumo

Cataventos e anemômetros são dispositivos utilizados para medir a direção e velocidade do vento respectivamente. Como qualquer dispositivo de medição, devem ser calibrados regularmente para que mantenham a exatidão que os caracteriza. Estas calibrações podem ser realizadas no Instituto de Ciência e Inovação em Engenharia Mecânica e Engenharia Industrial (INEGI). Neste momento, este procedimento é realizado através de uma bancada de testes que mantém o leme fixo e roda a base do corpo do catavento, comparando o valor lido com um encoder angular. No entanto, pretende-se que este procedimento seja realizado em túnel de vento, mantendo a direção do escoamento fixa (e não diretamente o leme) e rodando a base com um sistema de rotação automático equipado com um encoder angular. Pretende-se, também, que exista um outro sistema que possibilite inclinar o dispositivo em relação ao plano horizontal, avaliar o efeito de ventos ascendentes ou descendentes e incluir esses efeitos no processo de calibração.

Este trabalho foca-se sobretudo na parte do desenvolvimento da estrutura e da solução mecânica que permite estes movimentos de rotação e inclinação, utilizando o software SOLIDWORKS para modelar a estrutura e para posteriormente analisar as deformações pelo método dos elementos finitos. Em termos de seleção de motores e transdutores, o foco principal reside no movimento de rotação, já que é este que, nos processos de calibração, está normalizado e tem maior importância.

No que diz respeito ao sistema de posicionamento, foi também elaborado um modelo dinâmico, onde são considerados dentro do possível os efeitos de todos os componentes, analisando-se em seguida a resposta do sistema no software SIMULINK durante um movimento típico de posicionamento.

No final, realizaram-se alguns programas para o Arduino de forma a simular e testar o funcionamento e controlo dos diversos componentes durante os processos de calibração.

Automation of Calibration in Wind Tunnel

Abstract

Wind vanes and anemometers are devices used to measure the wind direction and speed, respectively. Like any other measuring device, they should be regularly calibrated so that the values measured keep their accuracy and precision. These calibrations are also done in INEGI, “ Instituto de Ciência e Inovação em Engenharia Mecânica e Engenharia Industrial” . Currently, that is accomplished by means of a structure that holds the wind vane rudder fixed and rotates the base, comparing the value read by it and the value read by means of an angular encoder. The objective is to make this testing possible inside of the wind tunnel, by keeping the flow direction constant (and not the rudder directly) and rotating the base with an automatic rotation system equipped with an encoder. It is also desirable to have another system that allows tilting relative to the horizontal plane, to evaluate the effect of ascending and descending winds, and include those in the calibration.

This work focuses primarily on the development of the mechanical solution that allows this rotation and tilting movements to be possible, using the SOLIDWORKS software to model the whole structure and later analyze the deformations by the finite element method. Concerning the motors, reducers and encoders selection, the main focus is the rotation movement, since this is the one that is standardized and also the most important one.

SIMULINK simulations were carried out in order to evaluate the dynamics of this rotation movement, where all the components were considered, and a typical calibration movement was tested.

Finally, simple Arduino programs were created to simulate as good as possible a calibration procedure and attempt to control the motor correctly.

Agradecimentos

Ao Professor Joaquim Gabriel Mendes pela sua orientação e apoio prestados no decorrer de todo o processo que contribuíram para o esclarecimento de muitas das minhas dúvidas.

Ao Engenheiro Miguel Marques pela apoio, paciência e disponibilidade proporcionada ao longo deste projeto no INEGI, ajudando-me a conhecer melhor a área em que este trabalho está inserido.

Finalmente, agradeço também ao Engenheiro Luís Mendes, também pela ajuda prestada no LAC ao longo deste semestre.

Índice

1.	Introdução.....	1
1.1.	Formação do Vento – Breve Explicação	1
1.2.	Medição do Vento.....	2
1.2.1.	Cataventos	3
1.2.2.	Anemómetros	4
1.2.3.	Dispositivos de Medição da Velocidade e Direção	4
1.3.	Energia Eólica.....	4
1.3.1.	Vantagens e Inconvenientes da Energia Eólica	4
1.3.2.	Aerogeradores.....	5
1.4.	Estrutura da Dissertação	7
2.	Estado da Arte: Alguns Laboratórios de Calibração da Atualidade.....	8
2.1.	ETH Zurich	8
2.2.	ECOTECH	8
2.3.	Deutsche WindGuard.....	9
2.4.	SOH wind	10
2.5.	ProfEC Ventus	11
2.6.	ATS labs	11
2.7.	Túnel de Vento do INEGI.....	12
2.8.	Cataventos e Anemómetros Calibrados no LAC (INEGI)	13
2.9.	Cataventos.....	13
2.9.1.	Modelo Compact	13
2.9.2.	Modelo First Class.....	14
2.10.	Anemómetros	14
2.10.1.	Modelo First Class	14
2.11.	Dispositivos de Medição da Velocidade e Direção.....	15
2.11.1.	Modelo sónico.....	15
2.11.2.	Modelo Vantage Vue e Vantage Pro 2	16
2.12.	Fatores que Afetam a Medição.....	17
3.	Métodos de Calibração, Requisitos do Projeto e sua Elaboração	18
3.1.	Requisitos do Processo de Calibração de Anemómetros de Copos.....	19
3.2.	Requisitos do Processo de Calibração de Cataventos em Túnel de Vento	19
3.3.	Requisitos Adicionais	20
3.4.	Elaboração do Projeto	21
3.5.	Escolha dos Mecanismos de Movimento.....	21

3.5.1.	Mecanismo com Articulação Exterior Dupla	21
3.5.2.	Mecanismo com Calha e Atuação Linear	22
3.5.3.	Mecanismo com Quatro Graus de Liberdade	24
3.5.4.	Mecanismo com Articulação Exterior Única e Atuação Direta	26
3.5.5.	Mecanismo com Articulação Exterior Única e Atuação Linear	26
3.6.	Escolha dos perfis e análise de deformações	28
3.7.	Escolha dos Componentes Mecânicos e do Encoder	40
3.7.1.	Análise do motor disponível	40
3.7.2.	Considerações Sobre o Binário	41
3.7.3.	Escolha do Motor e Redutor: Razão de Inércias e Modelo Dinâmico	41
3.7.4.	Acoplamento entre redutor e carga	45
3.7.5.	Análise SIMULINK do modelo dinâmico	45
3.7.6.	Encoder	51
3.8.	Sistema com Apenas Movimento de Rotação	52
3.9.	Mecanismo de Isolamento do Túnel	55
3.10.	Suportes Específicos para cada Modelo	56
3.11.	Programação e Automatização da Rotação	57
3.11.1.	Escolha da Linguagem de Programação	57
3.11.2.	Comunicação entre Arduino e Driver Tic	58
3.11.3.	Comunicação TTL assíncrona	58
3.11.4.	Teste de comunicação entre Arduino e Tic	58
3.11.5.	Teste de Movimento em Malha Aberta	59
3.11.6.	Teste do Funcionamento do Encoder	59
3.11.7.	Leitura do Sinal do Catavento Compact	60
3.11.8.	Teste de Movimento em Malha Fechada com Calibração do Encoder	60
3.11.9.	Programação dos Processo de Calibração	60
3.12.	Execução de Calibrações	64
3.13.	Calibração de cataventos	64
4.	Conclusão e Trabalhos Futuros	66
	Referências	67
	Anexo A: Análises Pelo Método dos Elementos Finitos	1
	Anexo B: Cálculos Auxiliares para a Análise em SIMULINK	8
	Simulação do Modelo do Motor	8
	Cálculos Relacionados com o Redutor	8
	Diagrama SIMULINK Final	14

Anexo C: Peças e Detalhes Construtivos	15
Chapa Móvel.....	15
Suportes Cataventos.....	15
Anexo D: Programas para o Arduino	17
Funções comuns e importantes	17
Movimento em Malha Aberta Com Escolha de Aceleração e Velocidade.....	21
Teste do Funcionamento do Encoder.....	24
Leitura do Sinal do Catavento Compact.....	27
Movimento em Malha Fechada com Calibração do Encoder.....	28
Calibração com Velocidade Angular Constante	39
Calibração Passo a Passo	49

1. Introdução

1.1. Formação do Vento - Breve Explicação

O vento pode ser caracterizado como o movimento do ar de uma região de altas pressões para uma região de baixas pressões. De facto, a atmosfera terrestre contém massas de ar com densidades, pressões, temperaturas e humidades diferentes. O movimento destas massas é responsável pela formação do vento (National Geographic, 2009). Quando duas destas massas adjacentes têm densidades e pressões diferentes, surgem correntes de ar de umas para as outras (University of Hawaii at Manoa).

O ar quente e húmido é menos denso que o ar frio e seco, o que também implica que o primeiro tende a subir e o segundo a descer, causando ventos ascendentes/descendentes. A topografia do terreno pode forçar o vento a subir/descer. Uma massa de ar que se mova em direção a uma montanha irá subir, o que significa que mesmo que o seu movimento fosse apenas horizontal, passaria a ter uma componente vertical (University of Hawaii at Manoa).

Outro fator causador de ventos é a energia solar que incide de forma desigual na superfície terrestre. A região do equador recebe mais energia ao longo do ano que as regiões polares. Logo, o ar próximo do equador, que é quente e húmido (menos denso), sobe e, ao fazê-lo, o ar circundante a temperaturas inferiores passa a ocupar esse volume de onde o primeiro saiu. Já na região polar, o ar é frio e seco e tende a descer, sendo que, ao fazê-lo, o ar mais quente passa a ocupar o volume de onde o primeiro saiu. Este terá depois tendência a dirigir-se ao equador, onde a temperatura é maior e a densidade e pressão menores, iniciando novamente a sua subida, e assim sucessivamente, conforme se vê na Figura 1.1 (University of Hawaii at Manoa).

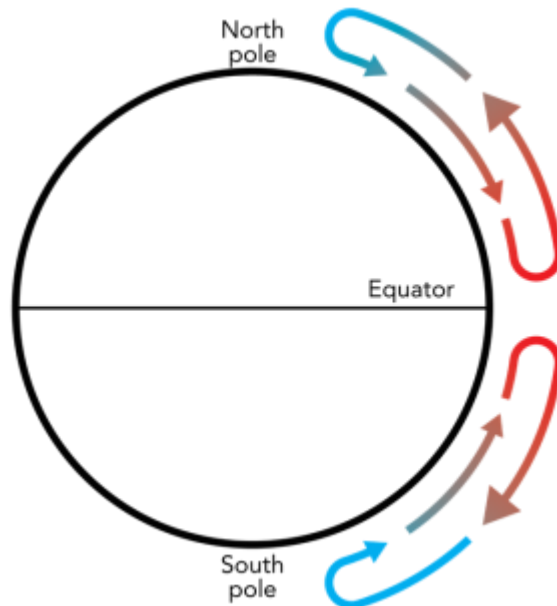


Figura 1.1 – Correntes do vento nos hemisférios Norte e Sul, in

<http://manoa.hawaii.edu/exploringourfluidearth/physical/atmospheric-effects/wind-formation>

Na verdade, deve ser considerado também o efeito de Coriolis. O ar no equador move-se bem mais rapidamente que nos pólos, já que a terra roda segundo um eixo vertical e no equador a circunferência é máxima, isto é, contém os pontos mais distantes do eixo. Uma massa de ar a

vir do polo Norte para o equador terá tendência a desviar-se para a sua direita, sendo em seguida “empurrada” a mover-se a velocidade cada vez maior, resultando em correntes de ar circulares no sentido anti-horário no hemisfério norte. No hemisfério sul essa rotação será no sentido horário (University of Hawaii at Manoa) (National Geographic, 2009) (Tong, 2010). Isto está exemplificado na Figura 1.2.

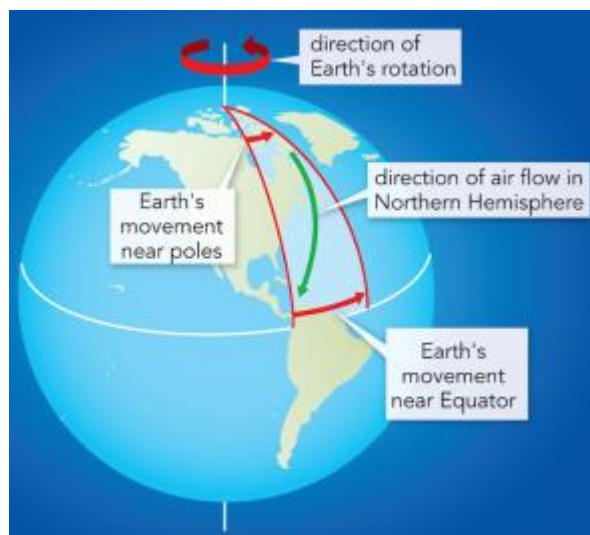


Figura 1.2 – Efeito de Coriolis para o hemisfério Norte, in

<http://manoa.hawaii.edu/exploringourfluidearth/physical/atmospheric-effects/wind-formation>

Existe ainda a influência dos oceanos e mares em zonas litorais. Durante um dia com temperaturas elevadas, o oceano ou mar aquece mais lentamente que o solo, o que significa que o ar por cima do solo irá ter tendência a subir, o que fará com que o ar a temperaturas mais baixas por cima do mar se dirija para o interior para ocupar esse lugar. Originam-se, então, ventos do oceano/mar para o interior.

Por outro lado, durante a noite, o oceano arrefece mais lentamente que a terra, ocorrendo ventos no sentido contrário pela mesma razão. Originam-se, então, ventos da terra para o oceano/mar (National Geographic, 2009).

Ao longo de muitos séculos, a humanidade tem aproveitado o vento como fonte de energia, sendo que, mais recentemente, este passou a ser utilizado para produção de eletricidade através de aerogeradores. Para determinar se o terreno onde serão instalados é viável para a produção de energia, há que fazer medições precisas relativas à direção, frequência e velocidade do vento.

1.2. Medição do Vento

Para medir a direção, sentido, e velocidade do vento, são utilizados dispositivos denominados anemômetros e cataventos, representados na Figura 1.3, respetivamente em baixo e em cima. A direção do vento tem como referência o Norte verdadeiro e não o magnético, sendo o primeiro 0°, Este 90°, Sul 180° e Oeste 270° (ângulo medido no sentido horário).



Figura 1.3 - Catavento montado por cima de um anemómetro de copos

Estes dispositivos são principalmente utilizados em projetos de parques eólicos, em que se torna necessário medir com precisão a velocidade e direção do vento, já que estes parâmetros têm uma enorme influência na capacidade de captação de energia dos aerogeradores. Idealmente, as medições devem ser feitas à altura do aerogerador, sendo os dispositivos de medição colocados num mastro igual ao que vai suportar a turbina, já que ele próprio afeta o escoamento. Deverão efetuar-se medições a alturas diferentes para se obter resultados em função da altura e, idealmente, essas medições devem ocorrer ao longo de todo o ano para ter em consideração o efeito das estações.

Como por vezes é dispendiosa a construção de uma torre igual à dos aerogeradores apenas para criar as condições necessárias a uma medição perfeita, opta-se por uma torre de suporte mais simples no topo da qual se colocam cataventos e anemómetros e, a partir daí, estima-se o valor para a altura pretendida (Wizelius, 2012). Como este procedimento não é o ideal, pretende-se que pelo menos os anemómetros e cataventos não sejam mais um fator de erro significativo e, para isso, estes têm de ser regularmente calibrados em túneis de vento como o *Laboratório de Aerodinâmica e Calibração*, LAC, do INEGI.

Há outras situações em que se torna necessário medir a velocidade do vento, por questões de segurança de máquinas e de trabalhadores, pois este exerce forças indesejáveis e potencialmente perigosas em equipamentos. Essas situações passam normalmente por equipamentos de movimentação de grandes cargas instalados ao ar livre e, portanto, expostos ao vento, como é o caso das gruas móveis, gruas torre e pórticos portuários (INEGI).

1.2.1. Cataventos

Atualmente, os modelos comuns de cataventos contêm um leme preso a uma vara, que por sua vez está rigidamente ligada a um eixo vertical que roda livremente de acordo com a direção do vento. O vento, ao incidir no catavento, irá exercer uma força no leme de tal forma que o centro de pressões irá alinhar com o vento ficando o extremo oposto ao leme a apontar para a direção de onde o vento vem (Nfaoui, 2012). Esta parte móvel deve ter o mínimo de inércia possível para ser sensível a variações de vento rápidas e de duração curta. Os rolamentos devem ter o mínimo de atrito possível, para que mesmo ventos de força reduzida consigam provocar uma rotação. A sua resolução deve ser elevada, pois não é suficiente definir a direção do vento através de pontos cardeais, são necessários valores com uma exatidão de $\pm 1^\circ$ regra geral. O

ângulo é medido com base num sensor angular potenciométrico, magnético baseado no *Tunnel Magnetoresistance Effect (TMR)*, ou com base num encoder angular. Acrescente-se ainda que, para utilização em locais de baixa temperatura, possuem por vezes um sistema de aquecimento, pois a presença de gelo irá impedir ou, pelo menos, dificultar a rotação.

1.2.2. Anemómetros

Os anemómetros medem a velocidade do vento, sendo os modelos mais comuns os anemómetros de copos. Resumindo, possuem geralmente três copos semiesféricos ou cónicos que rodam em torno de um eixo vertical, ao qual estão ligados por varas finas. Quando existe uma componente da velocidade do vento perpendicular ao eixo de rotação, estes irão rodar tanto mais rapidamente quanto maior for o valor desta componente da velocidade. Tal como os cataventos, também os anemómetros possuem por vezes um sistema de aquecimento.

1.2.3. Dispositivos de Medição da Velocidade e Direção

Existem dispositivos que medem simultaneamente a velocidade e direção do vento, para além da óbvia combinação já mostrada na Figura 1.3. Os mais comuns são os chamados anemómetros sónicos que, como o próprio nome indica, medem a velocidade do som, que é afetada pela velocidade e direção do vento. Isto é possível com três pares emissor-recetor, afastados de uma determinada distância, que emitem e recebem pulsos sonoros periodicamente, medindo o intervalo de tempo que estes demoram a percorrer a distância referida. Possuem maior precisão e exatidão que os modelos anteriores.

1.3. Energia Eólica

Os anemómetros e cataventos mencionados, conforme foi referido, são montados no topo das torres dos aerogeradores dos parques eólicos, e utilizados para fornecerem informação sobre a direção e velocidade do vento. Com essa informação, o controlador poderá orientar o aerogerador alinhando-o pela direção do vento e ajustando o ângulo de ataque das pás para aumentar a eficiência.

1.3.1. Vantagens e Inconvenientes da Energia Eólica

A energia eólica tem diversas vantagens, sendo a mais óbvia o facto de ser renovável e sustentável, havendo por isso um crescimento da sua utilização em Portugal e no mundo. Em Portugal, em março de 2020, existiam 2801 torres eólicas operacionais, com uma capacidade de potência de 5437 MW (Ferreira, 2020). Em 22 novembro de 2019, Portugal atingiu um novo recorde de produção de energia eólica diária, produzindo-se, 103,1 GWh de energia (Prado, 2019). Acrescente-se ainda que, segundo a APREN, em 2019, a energia eólica foi o tipo de energia de fonte renovável mais produzida, 13,6 TWh, que correspondeu a 27% da geração elétrica nacional, sendo que 10 anos antes era apenas 15,8%, o que significa que tem havido um crescimento elevado (APREN). Para além disso, como é possível verificar no documento apresentado pela APREN, em colaboração com a Deloitte, o setor da energia eólica é responsável pela criação de inúmeros empregos. Em 2014 existiam 41209 empregos diretos e indiretos relativos ao setor das energias renováveis. Em 2018 esse número era de 46790, tendo o setor da energia eólica contribuído com 52% para esse crescimento (APREN e Deloitte, 2019).

Salienta-se ainda o facto de este tipo de energia apresentar custos mais reduzidos atendendo ao valor dos terrenos utilizados para instalação das torres eólicas e ao “combustível” (vento), que

é gratuito, não se encontrando por isso sujeito à flutuação de preços como acontece com os combustíveis fósseis. De facto, os aerogeradores podem ser construídos em quintas já existentes, sendo que as empresas energéticas pagam o valor de arrendamento do terreno aos agricultores proprietários do mesmo, permitindo a estes últimos um salário adicional (Office of Energy Efficiency & Renewable Energy).

Existem, no entanto, desvantagens. Os aerogeradores têm um impacto negativo na vida selvagem da zona, visto que produzem poluição sonora e visual. Para além disso, muitas vezes localizam-se em zonas remotas e torna-se necessário custos adicionais para construir o sistema de transporte da energia para as cidades através de cabos e postes de alta tensão (Office of Energy Efficiency & Renewable Energy).

Para além disso, uma das principais desvantagens é que a energia eólica está muito dependente da velocidade do vento, já que a energia é proporcional ao cubo da velocidade (Esteoule, 2019)

$$P = \frac{1}{2} \rho S C_p W_s^3 \quad (1.1)$$

Onde:

P, é a potência

ρ , é a densidade do ar

S, é a área varrida pelas pás

W_s , é a velocidade do vento

C_p , é o coeficiente de potência, fração de potência que o aerogerador consegue extrair

1.3.2. Aerogeradores

Qualquer corpo em movimento tem energia cinética e é possível transformar alguma dessa energia em energia elétrica utilizável. É, então, possível fazer essa transformação partindo de uma massa de ar em movimento: o vento. Para isto ser possível, é necessário um equipamento que faça essa conversão, sendo este equipamento um aerogerador.

Um aerogerador é um dispositivo que transforma energia cinética do vento em energia elétrica. Existem, essencialmente, dois tipos de aerogeradores: os de eixo horizontal (HAWT, *Horizontal Axis Wind Turbines*), e os de eixo vertical (VAWT, *Vertical Axis Wind Turbines*), sendo que o primeiro é o mais comum. Ambos os modelos apresentam vantagens e desvantagens, mas os HAWT são os mais utilizados uma vez que são os mais rentáveis em projetos de maiores dimensões. (National Geographic, 2019) (Islam, 2013).

Os aerogeradores HAWT (Figura 1.4) são constituídos por 2 ou 3 pás cujo “plano” (na verdade não são planas) faz um ângulo em relação ao vetor da velocidade do vento, regra geral controlável através do *Pitch System* (National Geographic, 2019) (General Electric) (Fritz Schur Energy) (Office of Energy Efficiency & Renewable Energy).

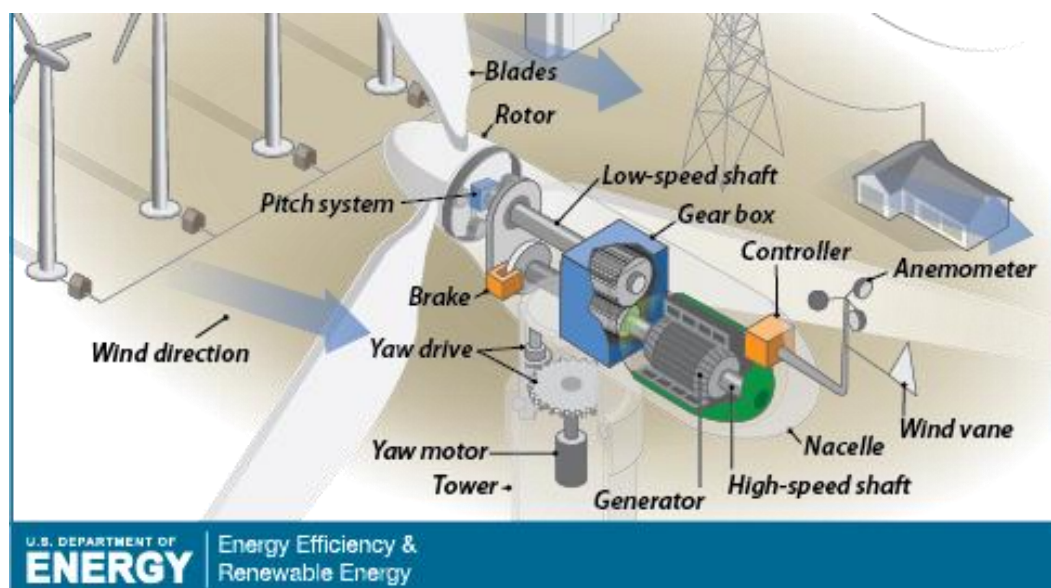


Figura 1.4 – Imagem e legenda de um aerogerador do tipo HAWT, in <https://www.energy.gov/eere/wind/inside-wind-turbine>

Se este ângulo for 0° , o vento não produz qualquer rotação e as pás oferecem a mínima resistência ao vento possível, já que a área frontal vista pelo escoamento é mínima. Se for 90° , também não se produz rotação, sendo que desta vez as pás oferecem a maior resistência ao vento, pois a área frontal vista pelo escoamento é agora máxima. O valor para o qual a rotação é máxima depende da forma das pás, mas está garantidamente entre esses valores.

Este sistema é também possível ser utilizado para se controlar a força que está a ser exercida nas pás, evitando danos caso os ventos sejam fortes (General Electric) (Office of Energy Efficiency & Renewable Energy).

Quando o ângulo das pás se encontra entre 0° e 90° , existe rotação das mesmas em relação ao eixo horizontal que passa pelo cubo (*Hub*), que está ligado ao eixo de transmissão de baixa rotação. Este possui, no lado contrário ao cubo, uma engrenagem que liga a outra no eixo de alta rotação, sendo, portanto, uma caixa de engrenagens multiplicadora, que faz com que se passe de cerca de 30 a 60 rpm para 1500 a 1800 rpm, pois estas são as velocidades necessárias para produzir eletricidade por parte da maioria dos geradores.

O eixo de alta rotação possui um travão que permite parar a rotação do sistema em caso de emergência, estando do lado oposto ligado a um gerador que irá converter esta energia cinética de rotação em energia elétrica. Todo este sistema pode ser rodado segundo um eixo vertical para otimizar o ângulo entre o vetor da velocidade do escoamento e o plano da rotação (definido aproximadamente pelo cubo e pelos pontos extremos das pás), através da variação do ângulo *Yaw* por meio de um motor elétrico. Esta otimização é calculada com base na medição do vento por parte dos cataventos e anemômetros instalados na torre, cuja informação é processada por um controlador e, posteriormente, traduzida numa rotação *Yaw* e numa rotação *Pitch* para a direção ótima do vento, tendo sempre em conta que se devem evitar forças excessivas na estrutura (General Electric) (Office of Energy Efficiency & Renewable Energy).

O controlador permite a iniciação da rotação das pás, através dos sistemas *Pitch* e *Yaw*, quando a velocidade do vento é cerca de 8 a 16 milhas por hora, e impede a rotação, colocando o ângulo *Pitch* em 0° , quando a velocidade atinge cerca de 55 milhas por hora (General Electric) (Office of Energy Efficiency & Renewable Energy).

1.4. Estrutura da Dissertação

Na parte inicial desta dissertação indicam-se os modelos concretos dos dispositivos de medição do vento calibrados no Laboratório de Aerodinâmica e Calibração, no INEGI. Na fase seguinte, é apresentado o estado da arte, mostrando-se o que é realizado atualmente na área das calibrações em túnel de vento por diversos laboratórios semelhantes na Europa, Estados Unidos e Austrália. Feita essa apresentação, explica-se com detalhe o problema que foi necessário resolver no laboratório do INEGI.

No capítulo 5, apresentam-se as soluções pela ordem que foram modeladas e planeadas, explicando-se os diversos obstáculos que foram aparecendo e as medidas tomadas para os resolver. É igualmente abordada a escolha dos componentes mecânicos e do encoder angular a utilizar, referindo-se em seguida a programação.

No capítulo seguinte, explica-se como é realizado um processo de calibração em todas as suas etapas, recorrendo ao que foi concebido no projeto e referindo como deverá ser utilizado o que ainda se encontra por fabricar.

Por fim, foi elaborado um capítulo de conclusões e de sugestões de melhoria futuras.

2. Estado da Arte: Alguns Laboratórios de Calibração da Atualidade

2.1. ETH Zurich

Na Suíça, o *Institute of Fluid Dynamics*, da ETH-Zurich, tem um túnel de vento com uma secção de 3x2 m e com um comprimento de 4 m, onde se realizam calibrações (Figura 2.1). No website da empresa, é dado um exemplo de um processo de calibração, feito a uma frequência de amostragem de 20 Hz e velocidade de rotação constante, e tendo-se usado velocidades de escoamento de 2, 4 e 8 m/s. Isto foi executado para cada uma de onze posições distintas de inclinação, entre os -25° e os $+25^\circ$. Cada rotação numa determinada inclinação durou cerca de 5 minutos. A temperatura e humidade do ar foram sendo amostradas em simultâneo. Para posicionar os dispositivos na posição pretendida foi utilizada uma mesa CNC da Nikken, já que é extremamente robusta e tem excelente exatidão de posicionamento (ETH-Zurich, 2001).



Figura 2.1 – ETH Zurich, in

https://www.mcr.unibas.ch/dolueg2/projects/campaigns/BUBBLE/textpages/ob_instr_windtunnel.en.htm

2.2. ECOTECH

A ECOTECH, situada em Melbourne, Austrália, realiza calibrações de anemómetros e cataventos, não tendo, no entanto, possibilidade de executar movimentos de inclinação. O movimento de rotação é feito com recurso a uma mesa rotativa.

A calibração de anemómetros é feita para velocidades que vão de 0,30 m/s até 30 m/s, com uma incerteza de medição de $\pm 0,05$ m/s ou $\pm 1\%$ (o que for maior).

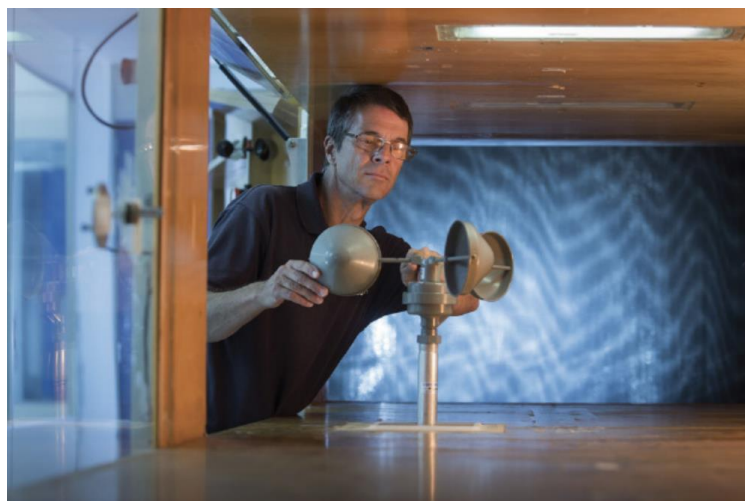


Figura 2.2 – Túnel da ECOTECH, in

<https://www.ecotech.com/wp-content/uploads/2015/03/ECOTECH-Anemometer-Calibration-Services-20200420.pdf>

Quanto aos cataventos, a direção do vento é calibrada com uma incerteza de $\pm 2^\circ$, a 6 m/s, e a cada 30° (ECOTECH)

2.3. Deutsche WindGuard

O laboratório Deutsche WindGuard, com sede em Varel, executa calibrações reconhecidas pela MESANET e pela Deutsche Akkreditierungsstelle GmbH (DAKKS). Um dos túneis tem até sido utilizado pelo instituto nacional de metrologia alemão (Physikalisch-Technische Bundesanstalt – PTB) que o acreditou. Existe ainda um túnel de dimensões mais elevadas em Bremerhaven, por vezes utilizado para servir empresas de construção naval e fabricantes de automóveis.

As características das calibrações estão presentes na Tabela 2.1.

Tabela 2.1 – Normas seguidas na calibração pela Deutsche WindGuard

Quantidade medida e dispositivo utilizado	Intervalo de valores	Normas seguidas	Incerteza expandida	Observações
Velocidade do ar: valor absoluto do vetor escoamento Anemómetro	0,5m/s a 38m/s	ISO 16622:2002 ISO 17713-1:2007	0,4%, mas não inferior a 0,040m/s	Tipo de túnel: Gottingen Secção: 1mx1m para velocidades até 30m/s e 1,2mx1,2m para velocidades superiores Inclinação de 0°
	4m/s a 16m/s	IEC 61400-12-1:2017		
	0,5m/s a 38m/s	ISO 16622:2002 ISO 17713-1:2007	1,3%, mas não inferior a 0,040m/s	Tipo de túnel: Gottingen Secção: 1mx1m para velocidades até 30m/s e 1,2mx1,2m para velocidades superiores Inclinação de -31° a 31°
	4m/s a 16m/s	IEC 61400-12-1:2017		

Para avaliar a direção do vento, as calibrações são feitas no túnel de 1mx1m tipo Gottingen entre 0° e 360° com incerteza de 0,8° segundo as normas abaixo (Deutsche WindGuard)

Tabela 2.2

Quantidade medida e aparelho utilizado	Intervalo de valores	Normas seguidas	Incerteza expandida	Observações
Direção do vetor escoamento Anemómetro, sensores de direção do vento	0° a 360°	ISO 16622:2002 ISO 17713-1:2007 IEC 61400-12-1:2017	0,8°	Tipo de túnel: Gottingen Secção: 1mx1m

2.4. SOH wind

O laboratório SOH wind está acreditado pela ANAB segundo a norma ISO 17025 e realiza calibrações para anemómetros e cataventos, tendo possibilidade de as realizar segundo a MESANET.

A empresa tem, nos Estados Unidos, dois túneis com uma secção de 3x3 m com escoamentos separados, que podem, no entanto, ser unidos para formar um túnel de base 3 m e altura 6 m.



Figura 2.3 – Túnel da SOH wind nos EUA, in <http://sohwind.com/services/calibration/>

Em Copenhaga, a SOH wind tem um túnel de base 1,7 m por altura 1,5 m onde se realizam, entre outras experiências, calibrações conforme referido (SOH Wind Engineering LLC).



Figura 2.4 – Túnel da SOH wind em Copenhaga, in <http://sohwind.com/services/calibration/>

2.5. ProfEC Ventus

Os laboratórios da ProfEC Ventus, em Oldenburg, Alemanha, são acreditados não só como laboratórios de testes, mas também como laboratórios de calibração, sendo realizadas em a anemômetros de copos e cataventos segundo a ISO/IEC 17025, IEC 61400-12-1 e MESANET (ProfEC Ventus).

2.6. ATS labs

A empresa ATS, presente em diversos estados dos EUA, também creditada segundo a norma ISO 17025, realiza calibrações a anemômetros e cataventos para velocidades de 2,5 m/s a 35 m/s em túneis fabricados de forma personalizada. O novo túnel do tipo Eiffel permite exatidão de 0,6% para a velocidade (ATS Labs).



Figura 2.5 – Laboratório da ATS, in <https://atslab.com/calibrations/wind-speed-calibration/>

Os dispositivos possíveis de serem calibrados são: vários tipos de anemômetros portáteis, indicadores de velocidade do vento, e anemômetros de fio quente. Estes são todos calibrados de acordo com o NIST (*National Institute of Standards and Technology*) (ATS Labs).

2.7. Túnel de Vento do INEGI

O INEGI possui um túnel de vento, como se mostra na Figura 2.6, no Laboratório de Aerodinâmica e Calibração (LAC). Este laboratório foi criado em 2012, fazendo parte da Unidade de Energia Eólica do INEGI, tendo como um dos objetivos realizar serviços de calibração e ensaio de equipamentos de caracterização do vento. Estes são necessários em diversas áreas, como meteorologia, segurança de equipamentos de movimentação de cargas expostos ao vento e ventilação e espaços exteriores. Outro dos seus objetivos consiste em realizar ensaios de aerodinâmica industrial para entidades ou empresas que desejem efetuar ensaios experimentais e investigação nesta área.

Na Tabela 2.3 enumera-se as suas características técnicas.

Tabela 2.3 – Características do túnel do INEGI, retirado do LAC

Potência elétrica	37 kW
Área de secção de teste	1 m ²
Comprimento da secção de teste	2 m
Velocidade máxima do escoamento	28 m/s
Intensidade de turbulência para menos de 10Hz	<1%

Os dispositivos calibrados e ensaiados são diversos: Anemómetros de Copos, Termo anemómetros, Tubos de Pitot S e L, Sondas de Velocidade, Anemómetros de Hélice e Anemómetros Sónicos e Cataventos. É de notar que está acreditado pelo Instituto Português de Acreditação (IPAC) para a calibração de anemómetros e tubos de Pitot com velocidades entre 0,125 m/s e 28 m/s. O procedimento essencial da calibração dos anemómetros está descrito na norma IEC61400-12-1 (INEGI).

Contudo, não é possível utilizar o túnel de vento para calibrar cataventos, pois ainda não se dispõe de um mecanismo que faça o movimento de rotação, sendo o projeto deste mecanismo um dos objetivos deste trabalho. Neste momento, essa calibração pode ser feita com recurso a uma bancada de testes que mantém o leme fixo e roda a base, medindo-se a diferença entre a posição angular do encoder e a posição angular que o catavento indica.

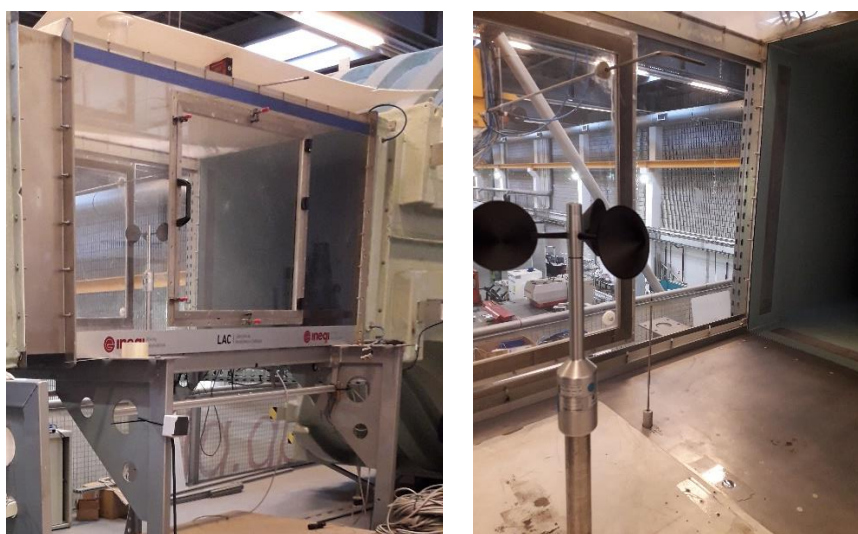


Figura 2.6 – Túnel de vento do INEGI, com o anemómetro de referência no interior

2.8. Cataventos e Anemómetros Calibrados no LAC (INEGI)

Tal como foi mencionado anteriormente, estes dispositivos são essenciais para o controlo dos aerogeradores e para as estações meteorológicas. Abaixo apresentam-se os modelos regularmente calibrados pelo INEGI no LAC.

2.9. Cataventos

2.9.1. Modelo Compact

Um dos modelos calibrados pelo INEGI é o catavento *Compact* da *Thies Clima* (Figura 2.7). Tem capacidade de medir entre 0° e 360° , sendo a resolução máxima $0,35^\circ$ e a exatidão de $\pm 1^\circ$.

Tabela 2.4 – Características do modelo Compact, da Thies Clima, in

<https://www.thiesclima.com/en/Products/Wind-Compact/>

Gama	Resolução (*)	Exatidão (*)	Saída (*)
0° a 360°	De $0,35^\circ$ a $22,5^\circ$	De $\pm 1^\circ$ a $\pm 5^\circ$	Digital: Paralela (Código gray, 4 bits) Série, síncrona, 5 bits Série, síncrona, 8 bits Analógica: 0 a 2 V 0 a 5 V 0 a 10 V 0 a 20 mA 4 a 20 mA 0 a 2 k Ω

(*) Depende do modelo



Figura 2.7 – Catavento modelo Compact, da Thies Clima, in

<https://www.thiesclima.com/en/Products/Wind-Compact/>

2.9.2. Modelo First Class

Este modelo mede numa gama de 0° a 360°, tem uma resolução máxima de 0,1° e uma exatidão máxima de $\pm 0,75^\circ$ (Figura 2.8). Para que o vento consiga iniciar a sua rotação, este modelo deverá ter uma velocidade de 0,5 m/s se estiver desalinhado 10° com o escoamento, ou 0,2 m/s se estiver desalinhado 90° com o escoamento. A razão de amortecimento é pelo menos 0,28.

Tabela 2.5 – Características do modelo First Class, da Thies Clima, in

<https://www.thiesclima.com/en/Products/Wind-First-Class/>

Gama	Resolução (*)	Exatidão (*)	Saída (*)
0° a 360°	De 0,1° a 2,5°	De $\pm 0,75^\circ$ a $\pm 1,5^\circ$	Digital: Paralela (Código gray, 4 bits) Série, síncrona, 8 bits Série, síncrona, 10 bits Analógica: 0 a 5 V 0 a 10 V 0 a 20 mA 4 a 20 mA 0 a 2 k Ω

(*) Depende do modelo



Figura 2.8 – Catavento modelo First Class da Thies Clima, in

<https://www.thiesclima.com/en/Products/Wind-First-Class/>

2.10. Anemómetros

2.10.1. Modelo First Class

A versão 4.3350.00.000 deste modelo é usada no INEGI como anemómetro de referência para a calibração do túnel. Dependendo das versões, a Tabela 2.6 tem as características do modelo.

Tabela 2.6 – Características do anemômetro First Class da Thies Clima, in

<https://www.thiesclima.com/en/Products/Wind-First-Class/>

Gama	Exatidão	Saída (*)
0 a 75 m/s	1% para 0,3 a 50 m/s ou $\pm 0,2$ m/s	0 a 5 V 0 a 10 V 0 a 20 mA 4 a 20 mA Frequência (1082 Hz para 50 m/s)

(*) Depende do modelo



Figura 2.9 – Anemômetro modelo First Class da Thies Clima, in

<https://www.thiesclima.com/en/Products/Wind-First-Class/>

2.11. Dispositivos de Medição da Velocidade e Direção

2.11.1. Modelo sónico

O anemômetro sónico que será também calibrado pelo INEGI é o modelo *uSonic-3 Scientific*, da METEK, apresentado na Figura 2.10. Segundo o fabricante (METEK), é capaz de medir diretamente as componentes x, y e z da velocidade do vento, obtendo-se simultaneamente a direção e velocidade com o mesmo dispositivo. Consegue medir numa gama de 0 a 60 m/s, 0 a 360° e -40 a 70°C, com uma resolução de 0,01 m/s, 0,1° e 0,01°C, sendo a exatidão de 0,1 m/s ou 2% para a velocidade, ou 2° a 5 m/s para a posição. Este sensor tem um sistema de aquecimento para utilização a baixas temperaturas, evitando formação de gelo.

Tabela 2.7 – Características do modelo uSonic-3 Scientific da METEK, in

<https://metek.de/wp-content/uploads/2014/05/Metek-Ultrasonic-Anemometer-uSonic-3-Scientific-USA-1-Datasheet.pdf>

Gama	Resolução	Exatidão	Saída
Velocidade: 0 a 60 m/s Direção: 0 a 360°	Velocidade: 0,01 m/s Direção: 0,1°	Velocidade: 0,1 m/s ou 2% Direção: 2° a 5 m/s	Digital: Série (interface RS485, RS422, ASCII): Síncrona, 8 bits Síncrona, 10 bits Analógica: 0 a 2,5 V 0 a 5 V 0 a 10 V ±2,5 V ±5 V ±10 V



Figura 2.10 - Anemómetro sónico modelo uSonic-3 Scientific da METEK, in

<https://metek.de/wp-content/uploads/2014/05/Metek-Ultrasonic-Anemometer-uSonic-3-Scientific-USA-1-Datasheet.pdf>

2.11.2. Modelo Vantage Vue e Vantage Pro 2

Existem modelos combinados que contêm um anemómetro de copos e um catavento de leme conforme se pode verificar com os dispositivos da Davis da Figura 2.11 *Vantage Vue* (esquerda) e *Vantage Pro 2* (direita), utilizados em estações meteorológicas.



Figura 2.11 – Modelos Vantage Vue e Vantage Pro 2 da Davis, in <https://www.davisinstruments.com/>

2.12. Fatores que Afetam a Medição

Existem vários fatores que afetam a medição da velocidade e direção do vento.

No caso dos modelos de cataventos potenciométricos, normalmente é o facto de o potenciômetro se ir desgastando de forma desigual, pois como o vento tende a mover-se mais numa direção do que nas outras para um dado local o desgaste verifica-se sobretudo na zona da pista correspondente a esses ângulos. A existência de uma pista desigual ao longo da rotação faz com que as medições não sejam tão exatas.

No caso dos dispositivos de medição sónicos, a própria estrutura irá afetar o escoamento nas zonas dos emissores/recetores de pulsos sonoros, levando a leituras incorretas. Para isso, procede-se a uma calibração para corrigir o efeito desses fatores.

3. Métodos de Calibração, Requisitos do Projeto e sua Elaboração

Como explicado anteriormente, é necessário um sistema mecânico que execute, acima de tudo, a rotação em torno do eixo vertical, dentro do túnel, dos dispositivos que estão a ser calibrados. De facto, a variação de posição em torno deste eixo é uma exigência fundamental do processo de calibração destes dispositivos que se rege pela norma IEC 61400-12-1:2017. Daqui para a frente, este movimento será denominado “movimento principal” ou “movimento de rotação”. Idealmente, deverá também ser possível inclinar em relação ao plano horizontal os cataventos ou anemómetros $\pm 30^\circ$, para se simular efeitos de ventos ascendentes e descendentes. A este movimento, designar-se-á, a partir daqui, como “movimento de inclinação” ou “movimento secundário”. Foi também explicado no início do projeto, que, na verdade, este movimento de inclinação será utilizado raramente pelo LAC no INEGI, já que não é um procedimento descrito na norma IEC 61400-12-1:2017. Foi, portanto, considerada a hipótese de ter um movimento não motorizado, através, por exemplo, de um sistema de manivela, para posicionamento manual. Este sistema deverá incluir um sistema de bloqueio (travão) para garantir que não há movimento indesejado.

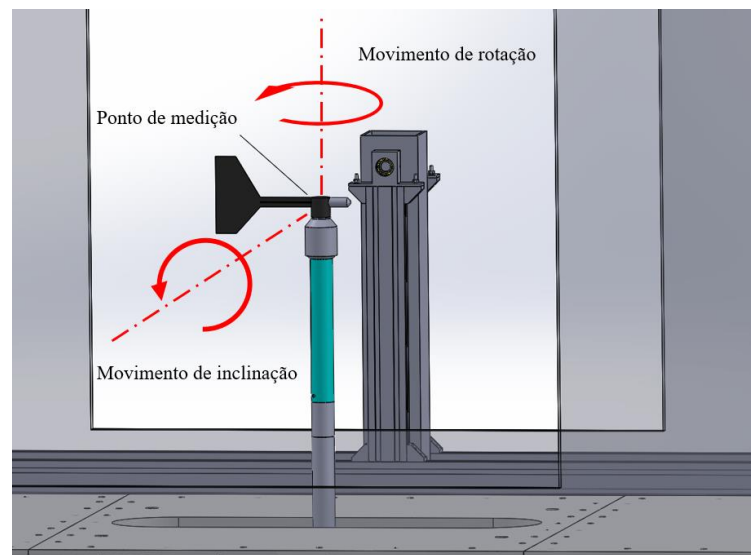


Figura 3.1 – Movimentos que devem ser possíveis após se ter o sistema construído, exemplificado com modelo 3D do catavento *Compact* dentro do modelo 3D do túnel

Com base nas características do túnel do INEGI, o sistema construído terá de conseguir funcionar corretamente mesmo para velocidades de 28 m/s, sem sofrer, naturalmente, quaisquer danos provocados por forças de arrasto do escoamento, e com deformações elásticas compatíveis com os requisitos de exatidão exigidos pela norma de calibração já referida. Foi também imposto que não poderia haver estrutura dentro do túnel de vento, para que o escoamento não fosse afetado. Esta exigência dificulta bastante o suporte da estrutura de forma robusta. A dificuldade de se obterem apoios robustos e próximos da posição do dispositivo a calibrar provoca deformações adicionais desta estrutura de suporte. Isto porque o túnel tem uma secção de 1 m por 1 m, o que significa que, após considerada a sua estrutura envolvente (portas, vigas de suporte, etc), não poderá haver apoios numa distância estimada de, pelo menos, 2,2 m. Como se sabe, a flecha devido à flexão causada pelo peso próprio é proporcional ao comprimento do perfil elevado a 4, e a flecha causada por uma força exterior é proporcional ao cubo do comprimento, o que significa que, provavelmente, terão de ser usados perfis robustos, que por sua vez são, normalmente, mais pesados. Tem de ser possível, ainda, ter acesso à zona

sob o túnel, assim como ao seu interior (através de pelo menos uma das portas existentes) para se poder colocar os dispositivos e eventualmente outros componentes de medição. Tem também de ser garantido o isolamento do túnel, isto é, não deverá haver orifícios para o exterior durante a calibração, para não afetar o escoamento.

Neste momento, no túnel do Laboratório de Aerodinâmica e Calibração (LAC) só é possível executar calibrações em que não seja necessário a rotação do dispositivo, apenas variando a velocidade do escoamento, como é o caso das calibrações dos anemómetros de copos. Para os cataventos, apenas se pode calibrar fora do túnel, pois dispõe-se de uma bancada de testes que segura o leme do catavento e roda a base, comparando o valor lido pelo dispositivo e o valor de um encoder angular. Uma vez concluído este trabalho, abre-se uma vasta gama de possibilidades, pois passa a ser possível calibrar cataventos dentro do túnel através do movimento de rotação. Passa-se, também, a poder calibrar tanto cataventos como anemómetros com inclinações de $\pm 30^\circ$ em relação à horizontal. Veja-se, em seguida, como se processa, de um modo resumido, baseado na norma IEC 61400-12-1:2017, a calibração dos anemómetros e cataventos.

3.1. Requisitos do Processo de Calibração de Anemómetros de Copos

O primeiro passo no processo de calibração destes dispositivos é colocá-los num suporte vertical, com uma exatidão de inclinação de $0,2^\circ$, suporte este que terá de ter uma forma cilíndrica de 34,8 mm de diâmetro. Em seguida, liga-se a ventoinha do túnel e inicia-se um escoamento, que deverá permanecer inalterado durante 1 minuto, de forma que o anemómetro de copos atinja uma temperatura estável, assegurando que esta não influencia os dados obtidos no final. Após estes passos, muda-se a velocidade para 4 m/s e vai-se aumentando, 1 m/s a 1 m/s (ou menos) até à velocidade de 16 m/s, permanecendo-se pelo menos 30 s em cada valor, registando os dados a cada segundo (ou menos), e comparando a leitura do anemómetro com a leitura dos sensores do túnel que dão a velocidade de referência. Este é também o método utilizado pelo INEGI.

Após a realização do sistema proposto neste trabalho, deverá ser possível este processo ser também feito para várias inclinações, não devendo, no entanto, perder-se a qualidade do mesmo para a posição vertical, o que implica que a exatidão do movimento de inclinação deverá ser $\pm 0,2^\circ$, embora no INEGI se tenha decidido que uma exatidão de $\pm 0,5^\circ$ seria aceitável.

3.2. Requisitos do Processo de Calibração de Cataventos em Túnel de Vento

Quando se calibram cataventos num túnel, os requisitos são os mesmos no que toca a posicionamento vertical e ao suporte. Deve, no entanto, alinhar-se também a marca do Norte com a direção de onde vem o escoamento bloqueando o leme, que deverá estar também alinhado dessa forma, por meio de um suporte removível. Uma vez realizadas estas tarefas, ativa-se novamente a ventoinha e espera-se que a temperatura estabilize. A partir deste ponto, existem dois métodos de calibração.

O primeiro consiste em rodar o catavento a uma velocidade constante de cerca de $0,5^\circ/\text{s}$ (valor recomendado) e amostrar os dados a cada segundo (ou mais frequentemente), desde uma posição inicial até uma final e vice-versa, completando-se uma amplitude que deverá ser maior que 360° em cada sentido, aconselhando-se a que haja uma sobreposição de 10° para cada movimento (20° no total).

O segundo método é semelhante em tudo, exceto no facto de se rodar passo a passo em vez de continuamente, devendo o passo ser menor que 3° e devendo ficar-se pelo menos 1 minuto em cada posição para recolha de dados.

Estes posicionamentos devem ter uma exatidão de $\pm 0,1^\circ$, o que significa que esse terá de ser o valor da exatidão do sistema final uma vez construído e posto a funcionar. A resolução terá de ser 1° , pois é este o valor do ângulo correspondente a um passo (para o segundo método explicado) que o INEGI utiliza. Pelo facto de haver rotações superiores a 360° , foi imposto que o sistema a construir teria de permitir uma amplitude de movimento de $\pm 360^\circ$ em relação à direção de onde vem o escoamento, para haver alguma margem de manobra.

3.3. Requisitos Adicionais

Embora não haja limites impostos diretamente pela norma IEC 61400-12-1:2017 relativamente ao máximo deslocamento permitido no ponto de medição e em cada uma das três direções. Daqui em diante, as direções serão referidas como longitudinal (na direção do escoamento), transversal (horizontal e perpendicular ao escoamento), e vertical (vertical e perpendicular ao escoamento). De qualquer modo, assumiu-se, com aprovação do INEGI, que não deveria haver translações do ponto de medição de mais de 2 mm em qualquer direção referida. A ideia surgiu baseada no exemplo em N.9.2.2 da norma, em que se assume 2 mm como sendo a exatidão da determinação da linha central do túnel. Tendo em conta este requisito e os anteriores, concluiu-se que teria de ser feita, em certo ponto, uma análise pelo método dos elementos finitos, para avaliar se os deslocamentos e rotações na zona do ponto de medição estariam de acordo com o imposto.

Em termos dinâmicos, existe a vantagem de não ser necessário o sistema mover-se de uma posição de calibração para outra de forma rápida, o que elimina diversas questões complicadas de dinâmica e controlo que pudessem eventualmente surgir. Isto é equivalente a referir que não terá de haver um baixo tempo de acomodação nem um baixo *overshoot*, havendo, no entanto, uma necessidade de um *backlash* muito reduzido e de $\pm 0,1^\circ$ no movimento de rotação, o que significa que, sendo necessário um redutor, este será mais dispendioso que um redutor comum, e que haverá um leque bastante mais limitado de modelos que cumprem esta exigência.

É também imposto que se possam inserir os parâmetros da calibração num programa de comando automático dos motores responsáveis pelos movimentos e posicionamentos dos respetivos eixos. Estes irão rodar de maneira a executar o movimento pretendido da calibração automaticamente. Finalmente, os dados do catavento e dos encoders deverão ser exportados e guardados, para posterior análise do erro do ângulo medido pelo catavento em relação ao ângulo de referência do encoder do movimento principal.

Foi ainda acrescentado, já próximo do final do projeto, que seria necessário poder executar o movimento principal de rotação para uma posição desejada e a uma velocidade escolhida, caso fosse necessário para outra qualquer aplicação.

Todos os requisitos podem ser resumidos na tabela abaixo.

Tabela 3.1

Rotação	Inclinação	Outros requisitos
Gama: $\pm 360^\circ$	Gama: $\pm 30^\circ$	Sem estrutura dentro do túnel
Exatidão: $\pm 0,1^\circ$	Exatidão: $\pm 0,5^\circ$	Translações máximas devido a deformações: 2mm
Resolução: $\pm 1^\circ$	Resolução: $\pm 1^\circ$	Acesso a pelo menos uma porta
Máxima rotação devido a deformações: $\pm 0,1^\circ$	Máxima inclinação devido a deformações: $0,2^\circ$	Acesso à parte inferior do túnel

3.4. Elaboração do Projeto

Conforme já referido, inicialmente foram estudadas soluções para a estrutura que incluíssem os movimentos de rotação e inclinação. Encontram-se, no início desta secção, especificados e explicados os problemas e soluções de cada estrutura planeada. Foram elaborados diversos modelos CAD com recurso ao software SOLIDWORKS.

3.5. Escolha dos Mecanismos de Movimento

3.5.1. Mecanismo com Articulação Exterior Dupla

O primeiro sistema que se imaginou para cumprir os requisitos foi o que está representado abaixo na Figura 3.2 e Figura 3.3 de forma muito simplificada. Este possui uma estrutura reforçada e uma articulação plana em cada lado do túnel para realizar o movimento secundário de inclinação, que é realizado através de um atuador linear motorizado como, por exemplo, um fuso de esferas. Note-se que as articulações estão descentradas em relação às portas, de forma que seja possível abri-las, ainda que de forma limitada.

Como este atuador linear está ligado à peça em forma de *garfo* numa zona longe do eixo em torno do qual se pretende inclinar $\pm 30^\circ$ (eixo “e”), o próprio atuador irá funcionar como uma espécie de redutor de razão variável e não linear, mas de elevada redução. Funciona como redutor pois a redução é mínima para o ângulo 0° (posição vertical) e vai aumentando de modo crescente à medida que nos afastamos deste ângulo.

O movimento de rotação principal foi nesta fase considerado que seria diretamente exercido por um motor passo a passo, assente no *garfo* extensível central que estaria apoiado dos dois lados do túnel.

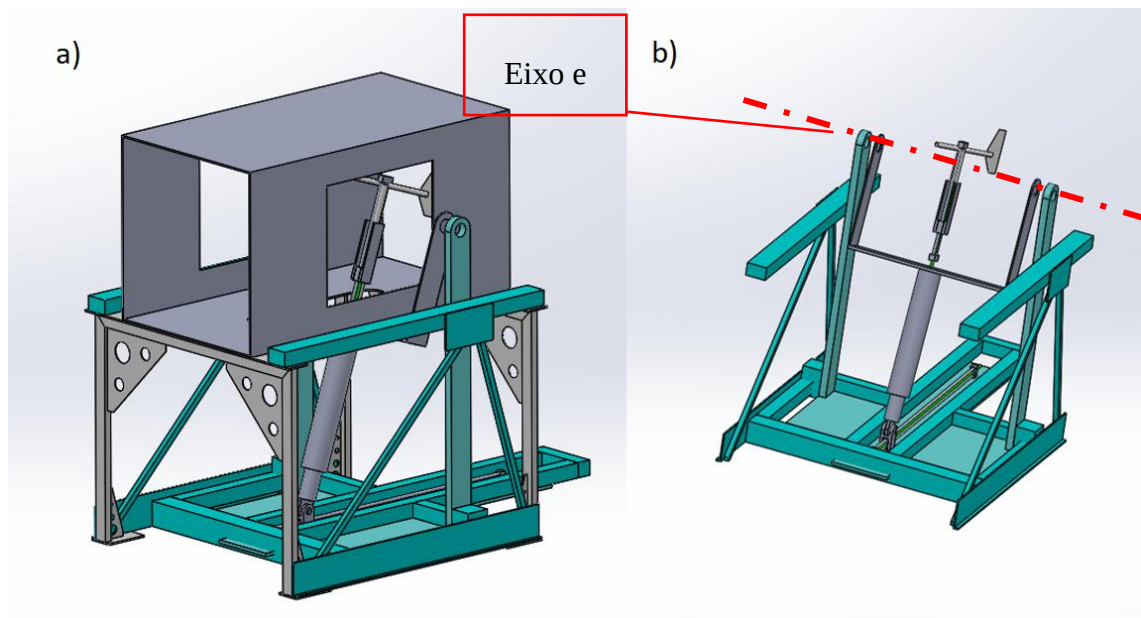


Figura 3.2 – Modelos simples da estrutura com articulação exterior dupla

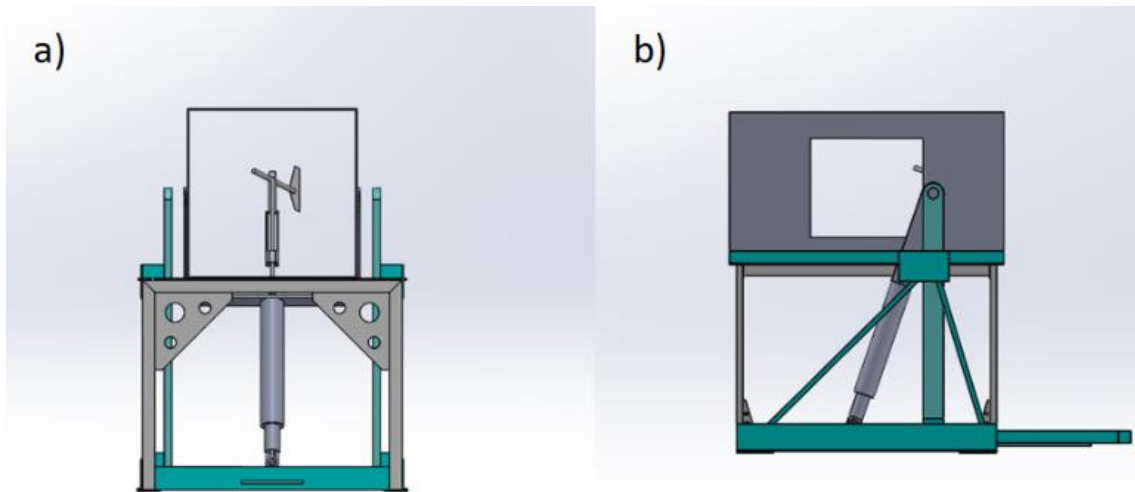


Figura 3.3 – Estrutura com articulação exterior dupla descentarda do centro das portas

Surgiram, no entanto, diversos problemas com este modelo. Em primeiro lugar, sendo o chão irregular por natureza, não é aceitável ter uma estrutura que assente nele diretamente como se vê na Figura 3.3 a) e b). Segundo, o eixo da inclinação está descentrado. Este deve estar 500 mm acima do chão do túnel e alinhado com o centro da porta. Neste caso, como não está, não é cumprido um dos requisitos. De facto, na realização deste primeiro protótipo, ainda não havia informação sobre a necessidade de o eixo do movimento de inclinação ter de ser alinhado com o centro das portas, sabendo-se apenas que teria de estar a 500 mm do chão do túnel, o que justifica a conceção do primeiro mecanismo.

Há ainda a questão do acesso ao interior do túnel. Para que o eixo em torno do qual se inclina coincidir com um eixo que passe pelo centro das portas, a estrutura estaria, em ambos os lados, a impedir a sua abertura. Tal dificulta ou impossibilita a colocação dos cataventos e anemómetros no interior do túnel.

Pode-se ainda referir que esta estrutura e sistemas associados são complexos e pesados e por isso demasiado dispendiosos para a aplicação em questão.

3.5.2. Mecanismo com Calha e Atuação Linear

Outra possibilidade seria realizar um mecanismo baseado numa carruagem a deslocar-se numa calha com a forma de um arco de círculo, cujo centro seria coincidente com o eixo de inclinação. A calha seria constituída por dois carris em arco de círculo: um com secção de extremos triangulares para assegurar o guiamento lateral das rodas de apoio e outro com secção retangular. Seria assim assegurado que a carruagem só se poderia deslocar ao longo da calha tendo os outros graus de liberdade restringidos. A montagem dos carris e, consequentemente, as suas chapas de apoio, teriam de ser montadas com uma ótima exatidão, o que aumenta o custo. Caso contrário, a carruagem teria zonas de maior facilidade de movimento, e zonas em que o movimento seria mais difícil por haver uma maior força de atrito, podendo danificar as rodas e os rolamentos, e levando a incertezas de posicionamento. Por isso mesmo, seria ideal que as chapas de apoio e os carris fossem peças contínuas, o que infelizmente significa que terão de ser fabricadas peças de muito elevada dimensão (1800 mm), que não é possível nas máquinas CNC do INEGI. Para além disto, há neste mecanismo vários componentes de dimensão reduzida e não normalizados, que implica novamente um maior custo.

Como inconvenientes adicionais desta solução refiram-se a construção complicada da carruagem e a difícil ligação entre a estrutura com calhas circulares e o túnel de vento.

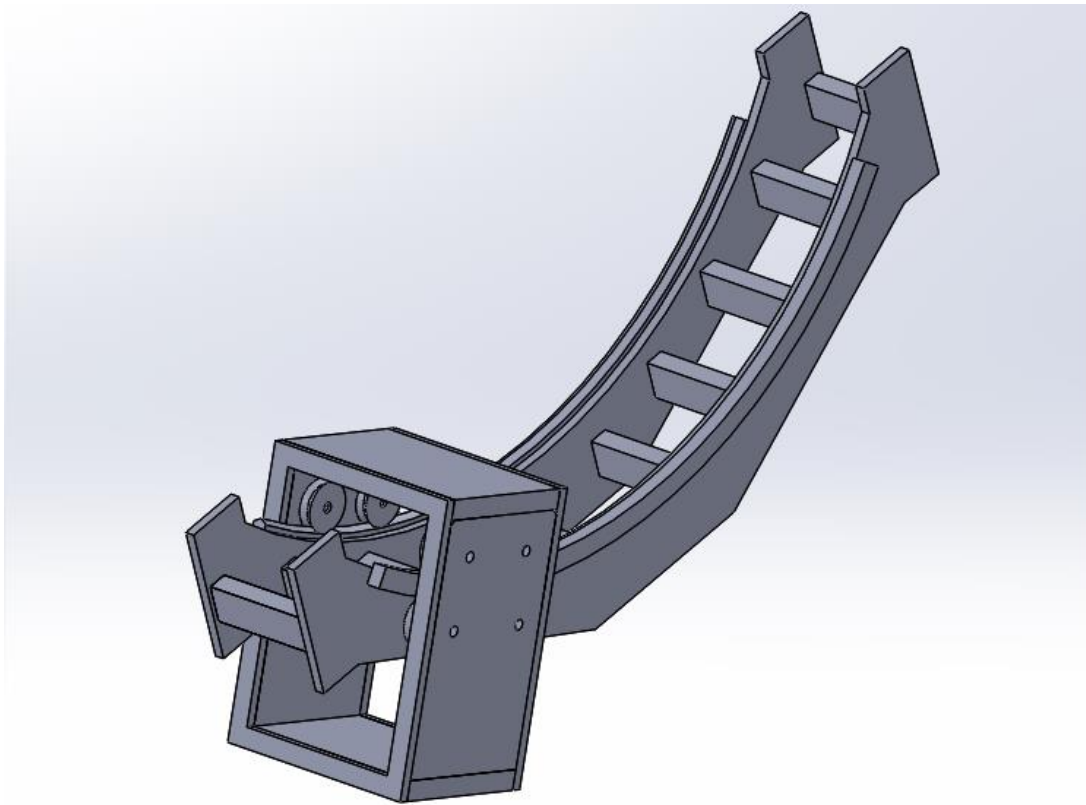


Figura 3.4 – Mecanismo com calha

Para que as peças pudessem ser fabricadas internamente no INEGI, teriam de ser reduzidas ao ponto de a maior dimensão linear não ser superior a 500 mm, de forma a caberem na máquina CNC. Optou-se por não haver peças de dimensões superiores a 400 mm para haver alguma margem para facilidade de colocação na máquina, resultando numa estrutura que está representada na Figura 3.5 e Figura 3.6. Os carris são agora divididos em seis segmentos e as chapas de apoio em sete segmentos, com apenas material na periferia e com menos espessura para reduzir a sua massa. Embora não esteja representado, todos estes seriam unidos por pequenas chapas aparafusadas a dois segmentos adjacentes e ainda ao segmento de carril. A carruagem foi também reduzida em volume e peso, sendo movida por um sistema linear baseado novamente num fuso guiado, desta vez com um veio que se mantém vertical e desliza na carruagem do fuso guiado conforme a Figura 3.6. O movimento principal de rotação (em torno do eixo vertical) teria um motor colocado no interior da carruagem, onde é possível ver um furo (Figura 3.5 b)) para passagem dos suportes dos cataventos.

Continua, no entanto, a haver o problema de ser necessário uma montagem precisa e diversos componentes mecânicos, o que implica ainda um custo elevado. Mantém-se também a dificuldade de fixar toda a estrutura ao túnel.

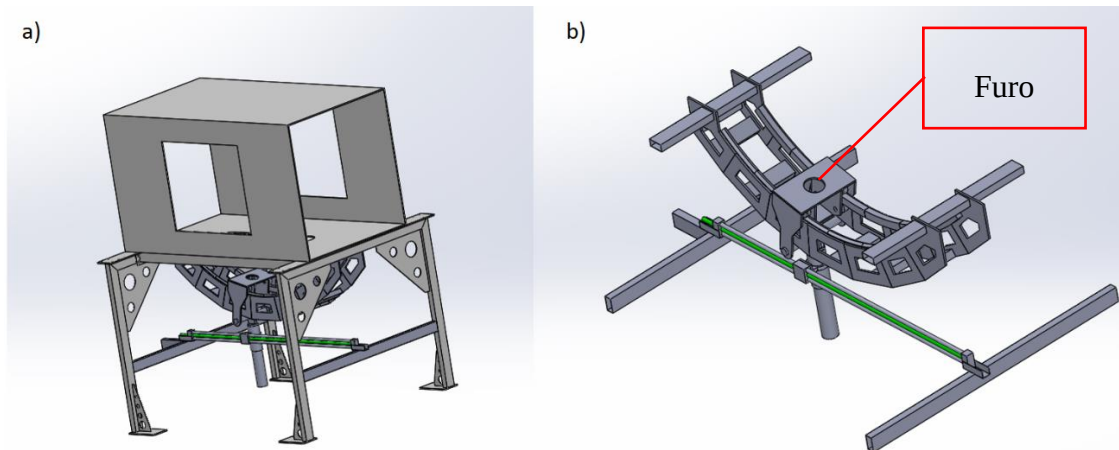


Figura 3.5 – Mecanismo com calha e atuação linear

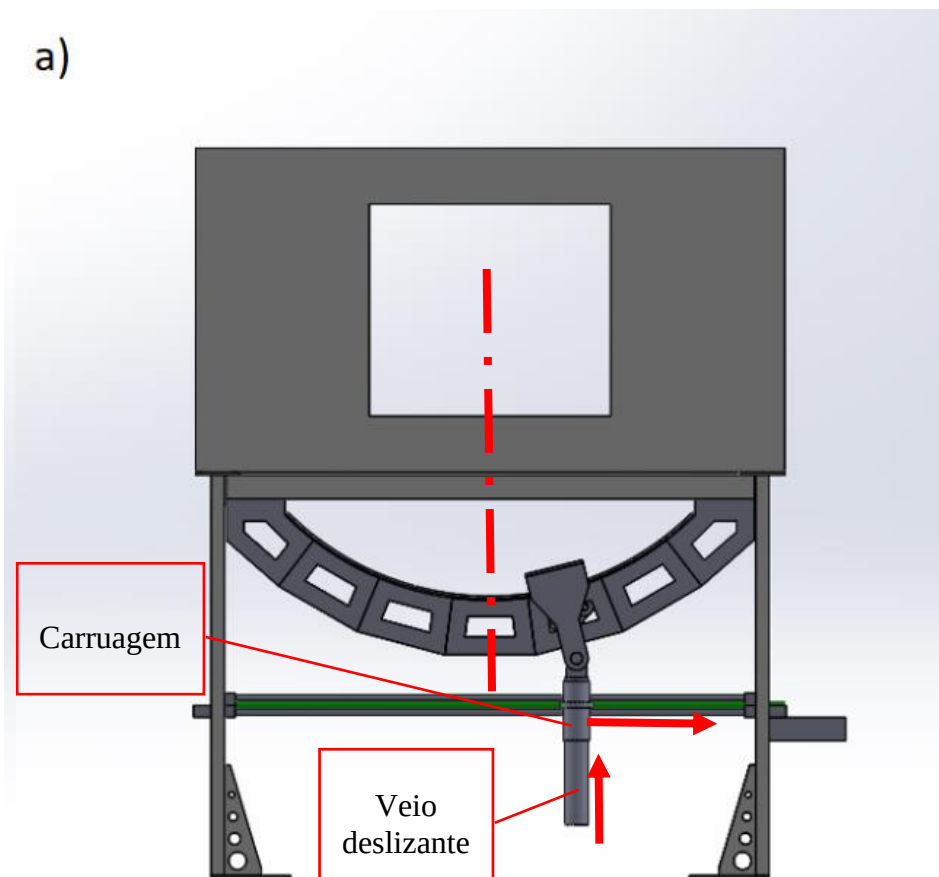


Figura 3.6 – Quando a carruagem do fuso se move afastando-se do centro (linha a traço ponto), o veio desliza verticalmente na carruagem

3.5.3. Mecanismo com Quatro Graus de Liberdade

Uma outra possibilidade seria ter um sistema com quatro graus de liberdade. Dois motores passo a passo (motores M1 e M2), atuando coordenadamente dois fusos de esferas guiados paralelos, controlariam a inclinação da estrutura central (inclinação da direção 3 em relação à horizontal), que tem uma articulação plana de apoio na carruagem C1 e outra na C2, como na

Figura 3.7. Como a distância entre estes dois pontos não é fixa, o fuso central pode deslizar livremente em relação a C3. Um terceiro motor M3 moveria C4 na direção 3 através deste fuso central. Finalmente, nesta carruagem C4, estaria um quarto motor M4 que seria responsável pelo movimento principal de rotação.

Embora a estrutura seja mais simples, o facto de haver quatro graus e liberdade, quatro motores e três fusos guiados, torna esta solução complexa e de custo elevado. Há ainda a necessidade de uma programação cuidada para coordenar todos os movimentos e obter-se o posicionamento desejado com a exatidão desejada.

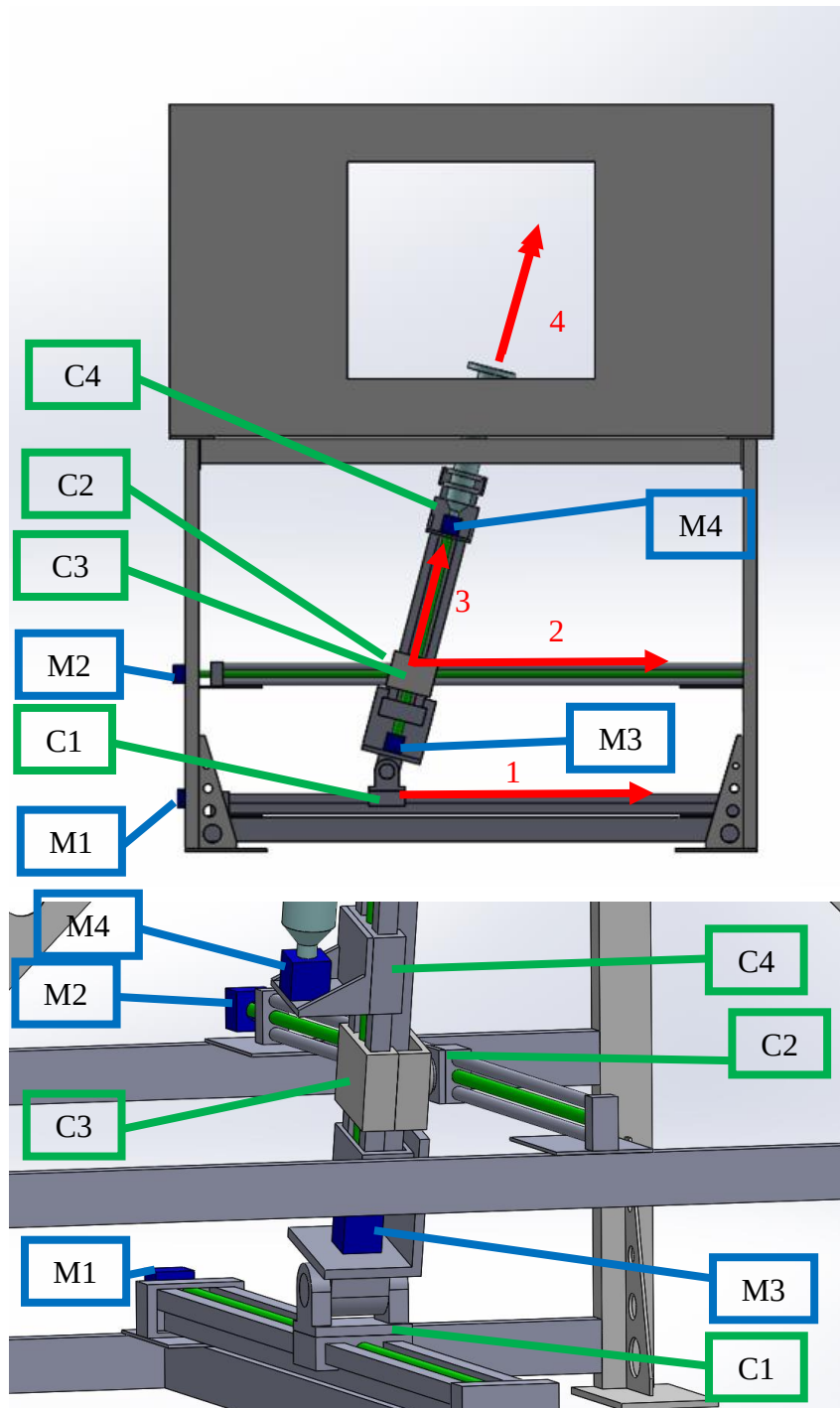


Figura 3.7 – Sistema com 4 graus de liberdade e legenda

3.5.4. Mecanismo com Articulação Exterior Única e Atuação Direta

Foi ainda colocada a hipótese de transmissão coaxial direta para o movimento de inclinação, sem recorrer a fusos de esferas como meio indireto de transmissão e meio de redução. Pensou-se assim em montar um conjunto motor redutor diretamente na articulação junto à porta.

Para que toda a estrutura estivesse apoiada no veio de um redutor exterior, este teria de ser muito robusto, ter *backlash* inferior a 0,5°, e ter binário suficiente para mover facilmente toda a estrutura. Ao ter tudo apoiado no veio de saída do redutor, que seria, conforme mencionado, o veio da articulação exterior, iriam aparecer deformações elevadas, deslocando o ponto de medição mais de 2 mm, inviabilizando a obtenção de calibrações válidas.

De forma a evitar deformações exageradas, a estrutura teria de ser de aço, o que tem o inconveniente de aumentar consideravelmente o seu peso, e consequentemente, a força e binário necessários à saída do redutor. Consultou-se o catálogo de um fabricante de motoredutores (Bonfiglioli) para tentar obter um redutor robusto o suficiente.

Concluiu-se que não seria viável esta opção, pois seria necessário um redutor pesado e de elevadas dimensões e binário.

3.5.5. Mecanismo com Articulação Exterior Única e Atuação Linear

No final, optou-se por utilizar uma estrutura semelhante à de articulação exterior dupla, mas apenas com uma articulação (Figura 3.8). Desta forma, apenas uma das portas do túnel fica inutilizada, podendo a outra ser usada para a colocação dos dispositivos dentro do túnel. A articulação deverá estar em frente à porta de mais difícil acesso (Figura 3.9). Desta forma, a porta disponível é a mais próxima.

O motor M1 é responsável pelo movimento 1 (rotação em torno do eixo vertical). Por outro lado, a carruagem do fuso ao mover-se segundo a horizontal (movimento 2), causará uma inclinação em torno do eixo horizontal (movimento 3). Ao se executar o movimento 2 e 3, o perfil horizontal irá variar a sua altura em relação ao chão, sendo necessário por isso que o apoio na carruagem permita translação (movimento 4).

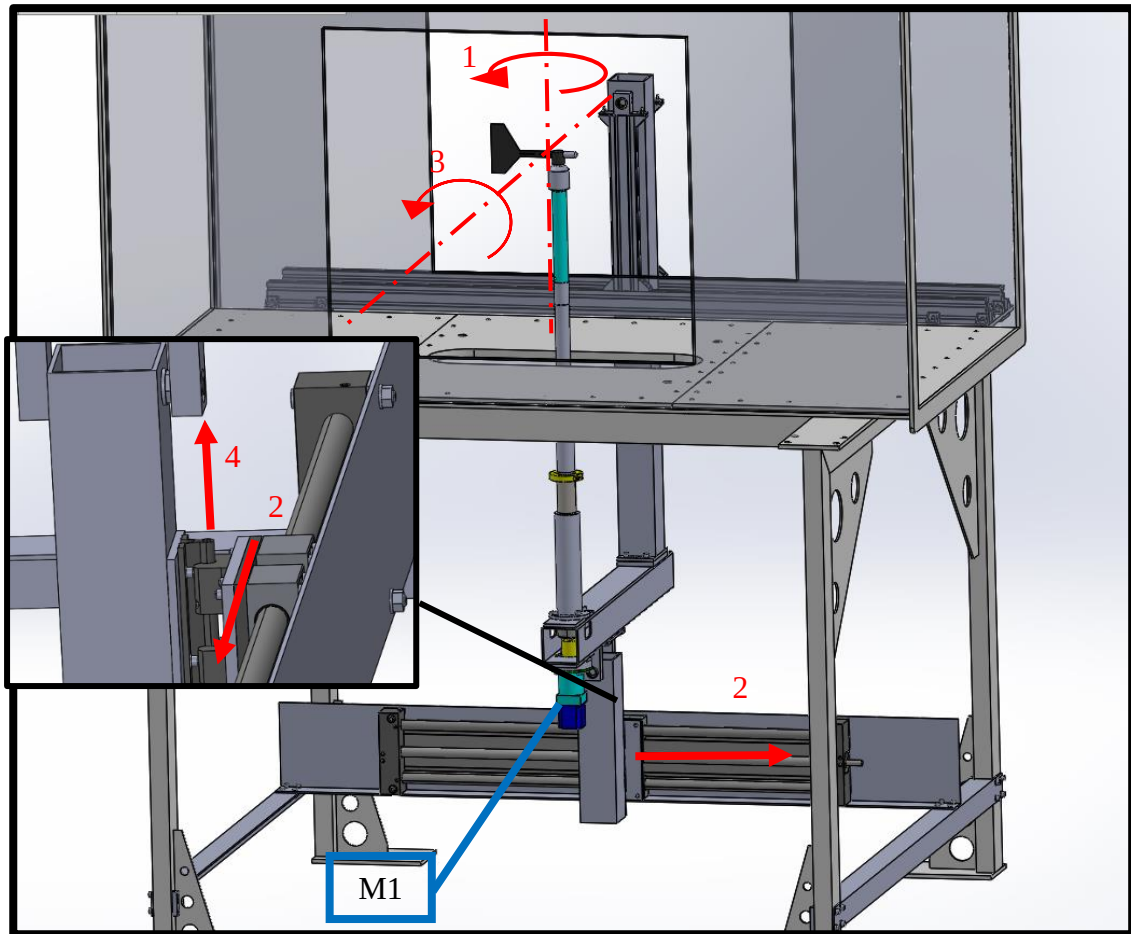


Figura 3.8 – Sistema de articulação exterior única (imagem já da estrutura final)



Figura 3.9 – Disposição do LAC

Este tipo de estrutura, no entanto, terá problemas agravados no que toca a deformações se não for bem dimensionada, pois está a ser utilizada para uma aplicação de precisão e exatidão na ordem das décimas de grau ($\pm 0,1^\circ$). Conforme mencionado anteriormente, a flecha causada

pelo peso próprio de um perfil que esteja na horizontal varia proporcionalmente ao seu comprimento elevado a 4, e a flecha causada por uma força exterior varia proporcionalmente ao cubo do seu comprimento. Isto significa que, qualquer pequena força ou momento aplicado na estrutura, especialmente se for aplicado longe da articulação exterior junto à porta, terá impactos elevados no posicionamento e terá de ser avaliado ao pormenor.

A observação da Figura 3.8 permite perceber que a articulação junto à porta inutilizada terá que suportar todo o peso e binários resultantes do facto de o centro de gravidade e do centro de aplicação das forças estarem fortemente desalinhados deste apoio.

3.6. Escolha dos perfis e análise de deformações

Devido à grande sensibilidade desta estrutura a torções e flexões, pois há poucos apoios e as distâncias destes aos pontos de aplicação são elevadas, é necessário proceder-se a uma análise detalhada para se obter as deformações em todas as direções (flechas e rotações). Segundo a norma IEC 61400-12-1:2017, quando se tem o dispositivo na vertical, este não pode inclinar mais de $0,2^\circ$. Para além disso, é exigida uma precisão e exatidão de $\pm 0,1^\circ$ na rotação do movimento principal (eixo vertical), logo, a rotação do dispositivo em torno deste eixo, causada pela deformação da estrutura não pode ser superior a $0,1^\circ$. É necessário, então, que os modelos SOLIDWORKS dos perfis para verificação pelo método dos elementos finitos sejam o mais realistas possível, quer em termos de dimensão, quer em termos de inércias de flexão e de rigidez torsional. Refira-se que foi utilizado o software SOLIDWORKS para modelar os perfis e o módulo associado de cálculo linear elástico, recorrendo ao método dos elementos finitos, para determinação dos deslocamentos. Existem, no entanto, problemas de computação devido ao facto de os perfis serem complexos demais para o software criar a malha. Criaram-se, por essa razão, modelos dos perfis a testar, de forma que não houvesse estes problemas referidos.

Tendo isto em conta, resta escolher os perfis a serem utilizados para construção da estrutura. Foi sugerido pelo INEGI que se utilizasse os da BOSCH Rexroth 30x60, já que há muitos já disponíveis, devido a sobras de outros projetos da empresa.

Desta forma, poderia reduzir-se consideravelmente o orçamento. Foram então analisadas, para cada perfil, as deformações, através de simulações progressivamente mais “pessimistas”, pois é uma forma célere de filtrar logo à partida perfis que estão longe de cumprirem os objetivos e evitar fazer modelos CAD complexos e demorados para estruturas com perfis que logo à partida se pode constatar que não servirão. Isto significa que, inicialmente, testa-se a deformação de cada um deles, considerando primeiramente como sendo equivalente a uma barra encastrada com comprimento 1000 mm, que é a distância estimada entre a articulação e o centro do túnel na direção transversal. Desta forma, se neste cenário ideal as deformações não estiverem de acordo com os requisitos, nem se passa à fase de teste seguinte. Caso os requisitos sejam cumpridos, passa-se à segunda fase de teste: cria-se uma estrutura semelhante à real, mas considerando as peças perfeitamente ligadas entre si, mesmo quando, na realidade, sejam aparafusadas por exemplo. Se desta fase resultarem deformações aceitáveis, passa-se finalmente a uma simulação realista com peças de ligação semelhantes às reais e verifica-se uma última vez. Este processo está resumido no diagrama da Figura 3.10.

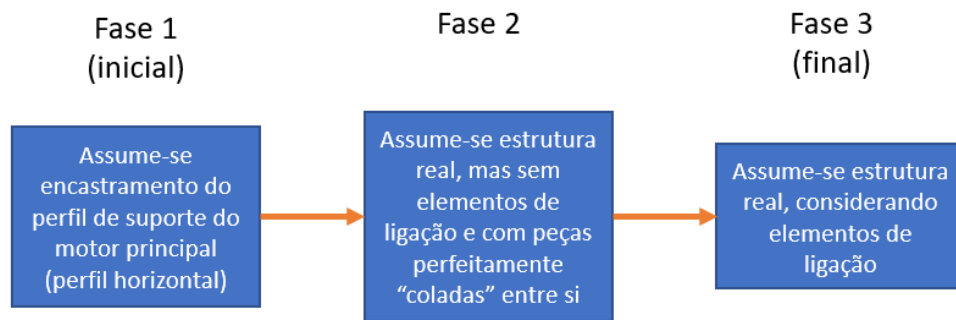


Figura 3.10 – Diagrama do processo de teste dos perfis

É importante notar que o que interessa avaliar não são diretamente as deformações dos perfis, mas sim as translações e rotações na zona do ponto de medição (ponto O da Figura 3.11). Como já se viu, o catavento estará apoiado num suporte de tal forma que o seu ponto de medição estará a 500 mm do chão do túnel, num eixo coincidente com o centro das portas (eixo y) e num eixo coincidente com o centro das secções do túnel (eixo z). Ao serem exercidas forças no catavento e no suporte, vai haver deformação da estrutura, que por sua vez causará translações e rotações na zona do ponto de medição, que é o que interessa avaliar. A forma que se escolheu para averiguar os deslocamentos e rotações no ponto de medição foi a criação do modelo da Figura 3.11.

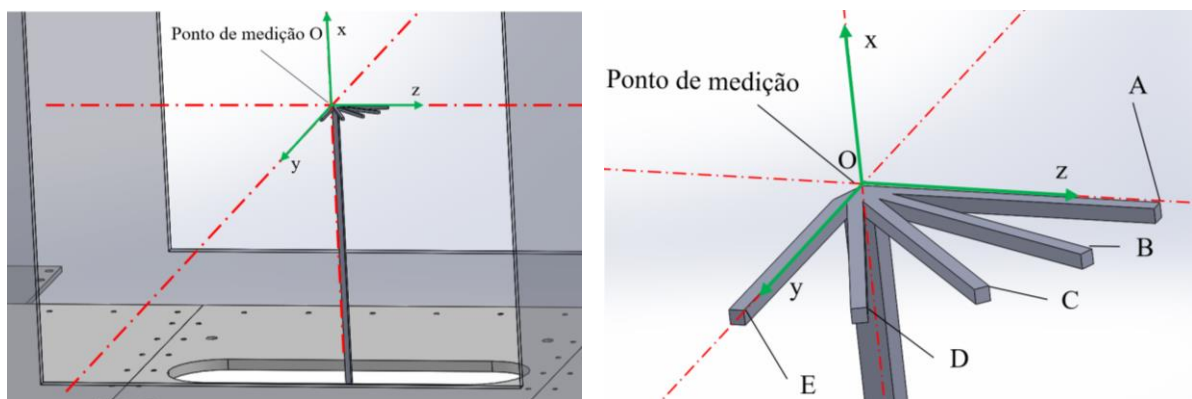


Figura 3.11 – Provetes de teste e referencial para cálculo das rotações e deslocamentos na zona do ponto de medição

Este “provetes de teste”, está dimensionado para que os seis pontos de medição de deslocamentos estejam à altura do ponto de medição, e para que todos os segmentos OA a OE tenham o mesmo comprimento “l”. Ao haver deformação da estrutura, estes irão mover-se para uma nova posição, tal como o catavento e seu suporte numa situação real, e com base nestas novas posições dos seis pontos, é possível calcular com exatidão o valor das rotações e translações na zona do ponto de medição O. Facilmente se obtêm as translações em cada direção dos seis pontos diretamente através do SOLIDWORKS após realizada a análise pelo método dos elementos finitos. As rotações e translações do ponto de medição segundo os eixos x, y e z são, em função dos deslocamentos x y e z desses seis pontos O, A, B, C, D e E, obtidas pelas seguintes fórmulas:

$$\delta_x = |O_x| \quad (3.1)$$

$$\delta_y = |O_y| \quad (3.2)$$

$$\delta_z = |O_z| \quad (3.3)$$

$$\varphi = \left| \operatorname{atan} \left(\frac{A_y - O_y}{1} \right) \right| \approx \left| \frac{A_y - O_y}{1} \right| \quad (3.4)$$

$$\theta_A = \left| \operatorname{atan} \left(\frac{A_x - O_x}{1} \right) \right| \approx \left| \frac{A_x - O_x}{1} \right| \quad (3.5)$$

$$\theta_B = \left| \operatorname{atan} \left(\frac{B_x - O_x}{1} \right) \right| \approx \left| \frac{B_x - O_x}{1} \right| \quad (3.6)$$

$$\theta_C = \left| \operatorname{atan} \left(\frac{C_x - O_x}{1} \right) \right| \approx \left| \frac{C_x - O_x}{1} \right| \quad (3.7)$$

$$\theta_D = \left| \operatorname{atan} \left(\frac{D_x - O_x}{1} \right) \right| \approx \left| \frac{D_x - O_x}{1} \right| \quad (3.8)$$

$$\theta_E = \left| \operatorname{atan} \left(\frac{E_x - O_x}{1} \right) \right| \approx \left| \frac{E_x - O_x}{1} \right| \quad (3.9)$$

$$\theta = \max(\theta_A, \theta_B, \theta_C, \theta_D, \theta_E) \quad (3.10)$$

Onde:

δ_j , é o deslocamento do ponto de medição na direção j, com j=x, y ou z

φ , é rotação do ponto de medição segundo o eixo x

θ_i , é a inclinação do segmento OI em relação ao plano yOz

θ , é a inclinação máxima em relação ao plano yOz

I_j , é a translação do ponto I na direção j, com I=O, A, B, C, D ou E e j=x, y ou z

l , é o comprimento dos segmentos OA a OE

Criando uma tabela no Excel com estas fórmulas verifica-se rapidamente se as rotações e deslocamentos estão ou não dentro dos limites estipulados anteriormente, ou seja, quer-se que $\delta_j < 2 \text{ mm}$, j=x, y ou z, quer-se $\varphi < 0,1^\circ$ e quer-se $\theta < 0,2^\circ$.

As forças aplicadas no perfil de suporte do dispositivo são diversas. Em primeiro lugar, tem que se considerar o peso próprio do perfil, pois esta é uma estrutura para muito baixas cargas, o que significa que o seu peso tem maior impacto do que as forças exteriores restantes, logo, não pode ser de todo desprezado. Este efeito é simulado aplicando uma força distribuída por todas as faces exteriores e cujo total deverá ser o peso total do perfil, como se vê na Figura 3.12, e pode ser calculado a partir da consulta do catálogo Rexroth na coluna que indica a massa por metro. Considerou-se um coeficiente de segurança de 1,3, para o caso de mais tarde se necessitar de colocar mais peças de reforço no perfil, que aumentarão o seu peso ainda mais. O peso está na equação (5.11).

$$F_g = 19,5 \text{ N} \quad (3.11)$$

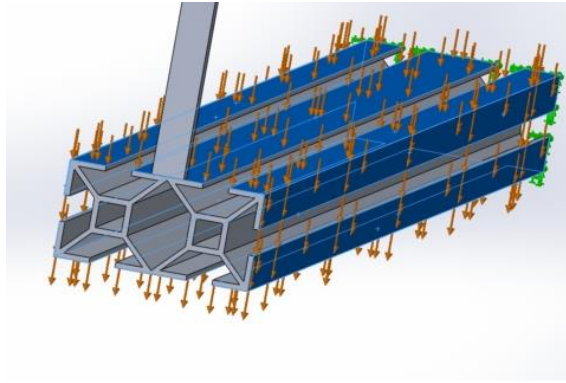


Figura 3.12 – Simulação do peso do próprio perfil

Em seguida, deve-se considerar o peso do catavento ou anemómetro e do seu suporte. Como não é possível prever o peso de novos modelos que vão aparecendo, considerou-se o peso total do anemómetro ultrassónico mais o seu suporte igual a 50 N, aplicando-se um coeficiente de segurança elevado de 1,6 para o caso de existirem no futuro modelos mais pesados, obtendo-se uma força total vertical de 80 N.

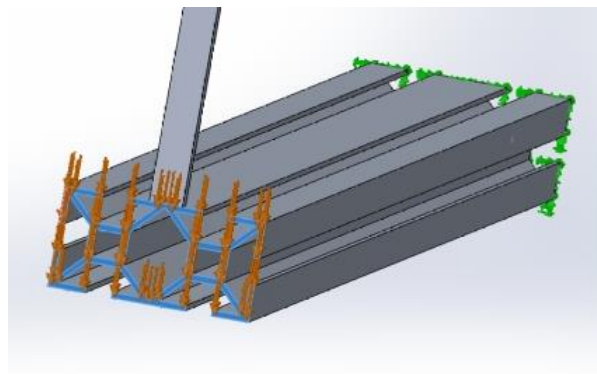


Figura 3.13 – Simulação do efeito do peso do anemómetro sónico e seu suporte

Tem que se incluir também, obviamente, a força do vento, que na verdade pode ser vista como sendo aplicada no ponto de medição, o que significa que, do ponto de vista do perfil de suporte, será equivalente a forças e momentos. Essa força depende da área e da forma do objeto dentro do túnel. Como na norma é referido que a área frontal do dispositivo não pode ser superior a 5% da área de secção do túnel, considerou-se um bloco à altura de 1100 mm (distância estimada desde o perfil horizontal de suporte ao ponto de medição, que coincidirá com o centro do bloco) cuja face virada para o escoamento tivesse essa área ($0,05 \text{ m}^2$). Estas considerações originam no facto de os dispositivos de medição terem formas imprevisíveis (por exemplo, na Figura 2.11). Como tal, assumiu-se a forma que é mais desfavorável, isto é, que oferece mais resistência ao escoamento, para que se obtenha um resultado conservador, visto que este projeto tem como base um processo de calibração de dispositivos que exige exatidão elevada.

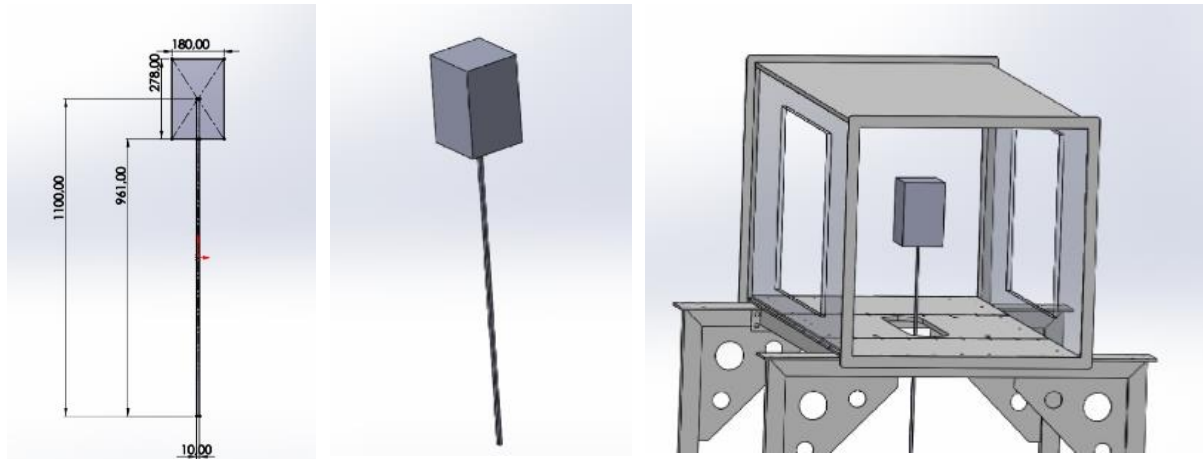


Figura 3.14 – Bloco utilizado para estimativa da força do vento

A força do vento será dada pela Equação (3.12), e sendo o número de Reynolds $Re = \frac{\rho v D}{\mu} = 3,4 \cdot 10^5$, um bloco oferece mais resistência quando uma das faces está perpendicular ao escoamento, logo, considera-se este caso para se obter a componente longitudinal, F_{vL} , da força de arrasto máxima na direção do escoamento que poderá ocorrer nos ensaios dos cataventos ou anemômetros, usando um coeficiente de segurança de 1,3.

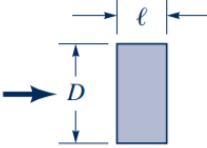
 Rectangle	$A = bD$	l/D	C_D	$Re = 10^5$
		≤ 0.1	1.9	
		0.5	2.5	
		0.65	2.9	
		1.0	2.2	
		2.0	1.6	
		3.0	1.3	

Figura 3.15 – Coeficiente de arrasto, retirado de Munson *et al*, “Fundamentals of Fluid Mechanics” pág 529, sendo b a altura e D a largura. A área frontal será bD conforme se mostra.

$$F_{vL} = 1,3 \frac{1}{2} C_D \rho A v^2 = 69 \text{ N} \quad (3.12)$$

Onde:

F_{vL} , é a força de arrasto longitudinal (direção z)

C_D , é o coeficiente de arrasto

ρ , é a densidade do ar

A, é a área frontal do bloco

v, é a velocidade do escoamento na direção longitudinal z

Para se obter a componente máxima na direção transversal, considera-se agora uma placa com as mesmas dimensões de área frontal, mas rodada um determinado ângulo para o qual a componente transversal da força do vento é máxima.

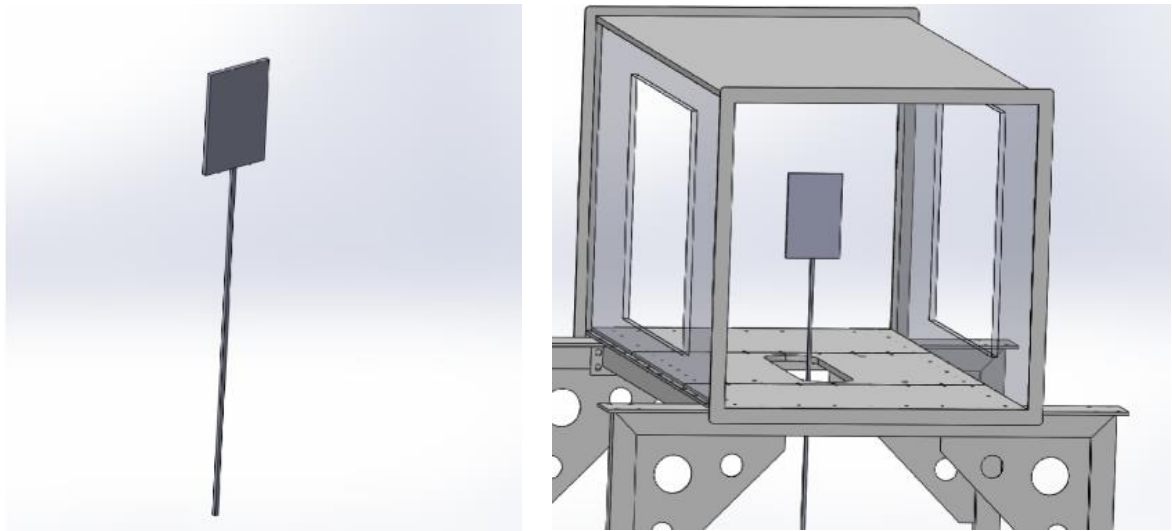


Figura 3.16 – Placa usada para cálculo da força do vento

A força máxima na direção transversal será, conforme se vê pela figura abaixo, calculada pela fórmula (3.14), considerando $\frac{1}{D}$ tal que $C_D=2,0$ e um coeficiente de segurança de 1,3.

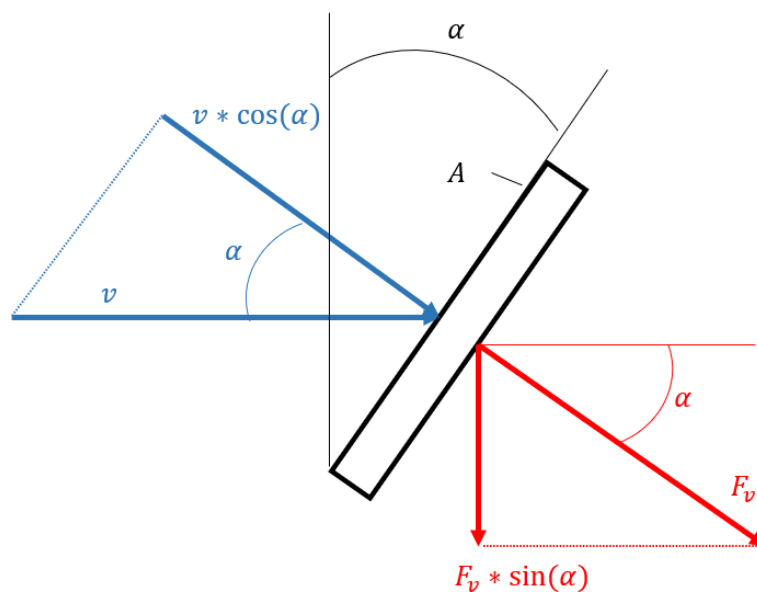


Figura 3.17 – Diagrama de corpo livre da placa

$$F_v = 1,3 \frac{1}{2} C_D \rho A (v \cos(\alpha))^2 \quad (3.13)$$

$$F_{vT} = F_v \sin(\alpha) = 1,3 \frac{1}{2} C_D \rho A (v \cos(\alpha))^2 \sin(\alpha) \quad (3.14)$$

Onde:

F_{vT} , é a força de arrasto transversal (direção y)

C_D , é o coeficiente de arrasto

ρ , é a densidade do ar

A , é a área frontal da placa

v , é a velocidade do escoamento na direção longitudinal z

O máximo ocorre para $\alpha=35,26^\circ$, onde se obtém $F_v=42$ N e $F_{vT}=25$ N. Como o braço é de 1100 mm, isto será equivalente às forças e momentos aplicados na face extrema do perfil de suporte que estão representadas pela equação (5.15) (que inclui também o peso do dispositivo e do próprio perfil).

$$\begin{Bmatrix} F_x \\ F_y \\ F_z \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} -80 \\ 25 \\ -69 \end{Bmatrix} \text{ N} ; \quad \begin{Bmatrix} M_x \\ M_y \\ M_z \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} 0 \\ 75,9 \\ 27,5 \end{Bmatrix} \text{ Nm} \quad (3.15)$$

Onde:

F_x , é a força exercida na direção vertical x no perfil horizontal de suporte do catavento

F_y , é a força exercida na direção transversal y no perfil horizontal de suporte do catavento

F_z , é a força exercida na direção longitudinal z no perfil horizontal de suporte do catavento

M_x , é o momento exercido na direção vertical x no perfil horizontal de suporte do catavento

M_y , é o momento exercido na direção transversal y no perfil horizontal de suporte do catavento

M_z , é o momento exercido na direção longitudinal z no perfil horizontal de suporte do catavento

Infelizmente, como se vê na Figura 3.18, o perfil BOSCH Rexroth 30x60 não serve, pois ultrapassa os requisitos, como é possível observar através da translação total de 124mm no ponto de medição, que permite imediatamente concluir que será um perfil inaceitável para esta aplicação. A Tabela 3.2 e a Tabela 3.3 apresentam as translações de cada ponto e as inclinações de cada segmento, assim como as translações, rotação, e inclinação máxima para ponto de medição, que é o que se pretende averiguar. Estão no anexo A os sucessivos resultados obtidos para encastramentos simples (fase 1) dos perfis BOSCH Rexroth 60x60, 80x80L, 90x90L 4N e para o perfil de aço 90x90x4, assim como para a estrutura sem elementos de ligação (fase 2) com o perfil 90x90x4.

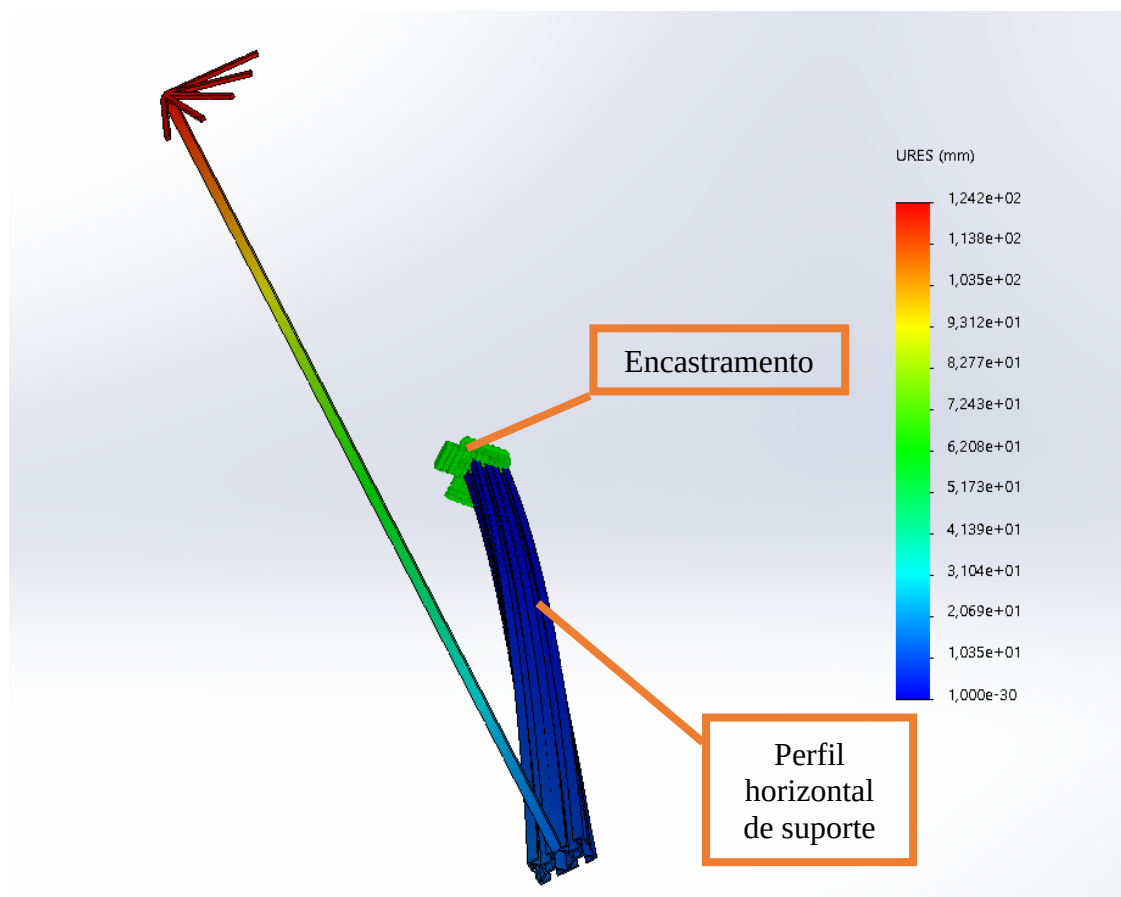


Figura 3.18 – Análise dos deslocamentos totais (URES na figura) para um perfil BOSCH Rexroth 30x60. Foram utilizados 14843 elementos tetraédricos e 87750 graus de liberdade.

Tabela 3.2 – Translações de cada ponto e inclinações de cada segmento

BOSCH Rexroth 30x60	
Encastramento simples	
Translações	[mm]
Ox	-19,45
Ax	-8,35
Bx	-9,99
Cx	-13,08
Dx	-17,13
Ex	-21,54
Oy	21,73
Ay	22,22
Oz	-119,90
Ez	-120,10
Inclinações	[°]
OA	6,36
OB	5,42
OC	3,65
OD	1,33
OE	-1,20

Tabela 3.3 – Translações, rotação e inclinações no ponto de medição

Translações no ponto de medição	[mm]
em x	-19,45
em y	21,73
em z	-119,90
Rotação no ponto de medição	[°]
	-0,40
Inclinação máxima no ponto de medição	[°]
OA	6,36

Utilizando perfis de aço conforme a Figura 3.19, obtêm-se resultados excelentes quando comparados com os anteriores, podendo mesmo manter-se a ligação ao túnel através de perfis de alumínio Rexroth 30x60, havendo, portanto, apesar de tudo, uma certa reutilização destes e uma redução do orçamento da estrutura. Abaixo, na Tabela 3.4 e na Tabela 3.5, estão representados os resultados dos deslocamentos de cada ponto, as inclinações de cada segmento e as translações, rotação e inclinação máxima para o ponto de medição devido às forças e momentos exteriores, considerando os elementos de ligação em vez de peças perfeitamente coladas entre si. Ou seja, considera-se já uma simulação o mais realista possível. Repare-se que as rotações e deslocamentos estão completamente dentro dos requisitos com uma margem considerável.

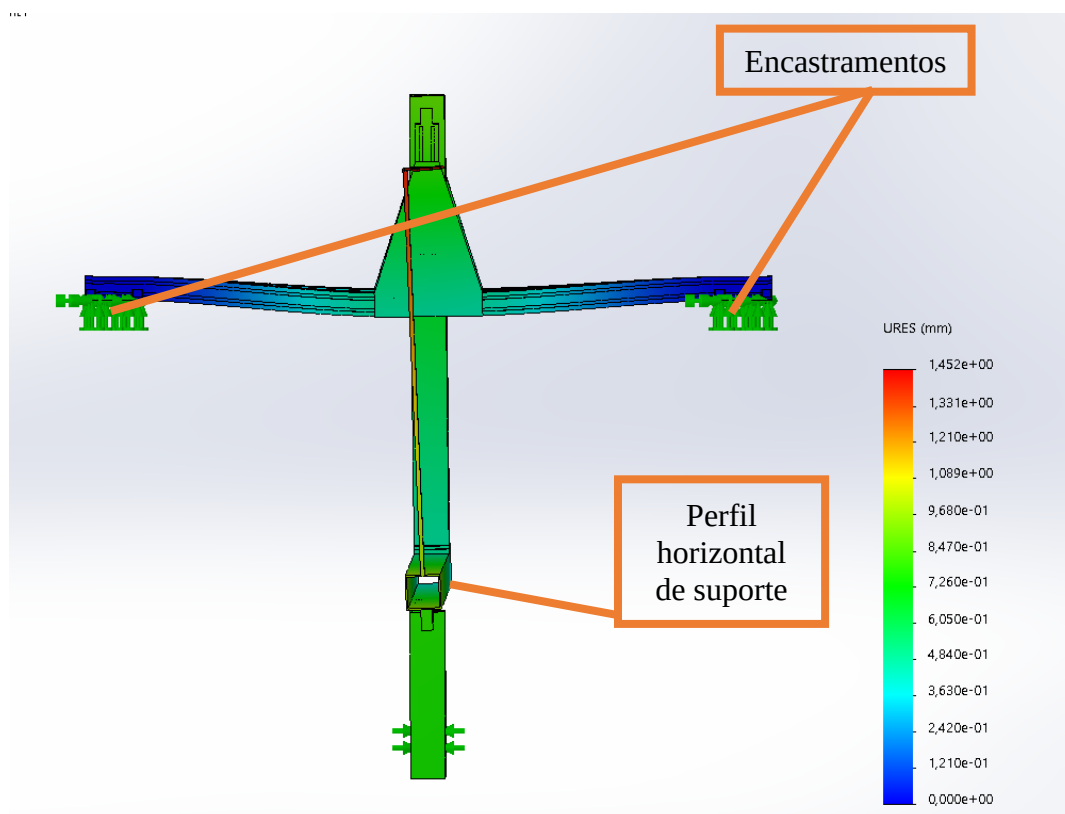


Figura 3.19 – Análise dos deslocamentos totais (URES na figura) da estrutura pelo método dos elementos finitos considerando elementos de ligação. Foram utilizados 206422 elementos tetraédricos e 1184628 graus de liberdade.

Tabela 3.4 – Translações de cada ponto e inclinações de cada segmento

Estrutura sem elementos de ligação	
Translações	[mm]
Ox	-0,95
Ax	-0,91
Bx	-0,94
Cx	-0,96
Dx	-0,99
Ex	-1,01
Oy	0,83
Ay	0,85
Oz	-0,60
Ez	-0,63
Inclinações	[°]
OA	0,02
OB	0,01
OC	-0,01
OD	-0,02
OE	-0,03

Tabela 3.5 – Translações, rotação e inclinações no ponto de medição

Translações no ponto de medição	[mm]
em x	-0,95
em y	0,83
em z	-0,60
Rotação no ponto de medição	[°]
	-0,03
Inclinação máxima no ponto de medição	[°]
OE	0,03

3.7. Escolha dos Componentes Mecânicos e do Encoder

3.7.1. Análise do motor disponível

Na escolha do motor do movimento principal de rotação (em torno do eixo vertical), pensou-se inicialmente em utilizar diretamente um motor passo a passo disponível INEGI, sem utilizar qualquer redutor. Esta decisão surgiu porque os cataventos e anemômetros têm todos aparentemente uma base fixa e uma parte móvel rotativa, e é suposto serem muito sensíveis às variações de vento. Assim, qualquer pequeno motor (como o ST4209 S0404 da Nanotec que o INEGI possui) terá de ser capaz de os rodar, já que a sua inércia é suposto ser muito baixa. Segundo esta linha de pensamento, não haveria problemas relacionados com a inércia. No entanto, a existência de modelos sem partes móveis implica que poderão ter de ser controladas cargas de muito maior inércia, como é o caso dos anemômetros sónicos. Logo, um motor dessa dimensão, como se verá mais à frente, não será suficiente para controlar esses dispositivos, e, portanto, não servirá para ser utilizado neste projeto de calibração. É então necessário verificar toda a dinâmica de posicionamento deste eixo para se proceder à escolha do motor. De qualquer forma, facilmente se conclui que a escolha recairá num motor passo a passo e não outro tipo, já que são tipicamente utilizados para aplicações de posicionamento em que não é necessário movimentar cargas elevadas com velocidades e acelerações consideráveis.

3.7.2. Considerações Sobre o Binário

Na escolha do redutor, não basta escolher um que tenha uma razão de redução o maior possível. É necessário ter em conta que ele próprio tem uma inércia que, regra geral, não é desprezável, assim como um binário máximo e mínimo.

Recorrendo à subdivisão de passos (*microstepping*), é possível não só ter movimentos mais suaves, mas também reduzir o binário exercido pelo motor. Quando é dada uma ordem para iniciar o movimento, imediatamente o *driver* faz passar corrente nas bobinas opostas apropriadas, o que faz o campo magnético rodar. Como este rodou, o rotor está agora numa posição instável, e como a força magnética é aproximadamente proporcional ao desvio angular, e estando o motor a um passo de distância da próxima posição estável, cria-se um binário que força o rotor a dirigir-se a ela. Este binário vai diminuindo à medida que o motor se aproxima da próxima posição, e será zero quando a atingir.

Imagine-se que agora, em vez de um passo, se roda meio passo, ou mesmo um quarto. O binário será respetivamente 70,71% e 38,27% do binário nominal (FAULHABER). Desta forma, rodando frações de passo, como por exemplo metade ou um quarto, pode-se impedir mecanicamente e eletronicamente que o motor exerça no redutor demasiado binário, impedindo possíveis danos. Não se deverá rodar em frações demasiado reduzidas, pois chega-se a um ponto em que o binário à entrada do redutor não será suficiente para vencer as forças de atrito do redutor, e não o conseguirá arrancar até se atingir um determinado número de micropassos suficiente, comprometendo a exatidão e havendo ainda histerese.

3.7.3. Escolha do Motor e Redutor: Razão de Inércias e Modelo Dinâmico

De facto, em aplicações de controlo de cargas inerciais, deve-se seguir certas regras no que toca à *Razão de Inércias* (inércia de todos os componentes que vêm a seguir ao motor sobre inércia do motor). Segundo a *Oriental Motors*, esta não deve ser geralmente maior do que 10 para motores passo a passo, caso contrário poderá haver ressonâncias ou overshoots e tempos de acomodamento elevados (Oriental motor).

Como este mecanismo irá funcionar muito lentamente, não haverá problema de ter uma razão de inércias entre 10 e 20. De facto, na página 6 de *How to Size a Motor*, é dito que para sistemas dinâmicos em que não é necessário ter uma resposta consideravelmente elevada, mesmo razões superiores a 20 funcionam se se utilizar um servomotor como se exemplifica nesse artigo técnico (Plavicheanu). Como um motor passo a passo tem um desempenho inferior, não se aceitaram razões de inércia acima de 15, e mesmo nessa gama de valores, só se aceitou porque o sistema tem uma dinâmica baixíssima (reduzidíssimas acelerações e velocidades), e apenas se quer exatidão na posição final, sem ser necessário preocupações com o *Overshoot* ou com o tempo de acomodação. Isto será provado adiante com a simulação dinâmica SIMULINK.

Com estes requisitos estabelecidos, é possível fazer uma primeira análise que permita escolher o motor e o redutor.

Verifica-se que a razão de inércias, sem qualquer redutor, para o anemómetro sónico e o motor ST4209 S0404 é igual a 3429, superior ao máximo inicialmente estabelecido de 10, que é claramente inaceitável face aos critérios já explicados.

É facilmente demonstrável que, havendo um redutor entre o motor e a saída, este acrescenta uma inércia ao sistema, mas a inércia da carga pós redutor vista pelo motor é dividida pela razão de redução ao quadrado, de onde se conclui que o redutor será o maior responsável por resolver o problema da inércia excessiva deste anemómetro.

Para se obter então valores para as inércias e fazer a análise dinâmica do sistema, foi usado o programa SIMULINK, é necessário escolher um motor (cuja inércia será J_M) e um redutor (cuja inércia será J_R). Para isso, foi feito em SOLIDWORKS um modelo aproximado com o eixo x a ser eixo principal de inércia, cuja massa fosse ligeiramente maior que a indicada no catálogo do produto ($>2,9\text{kg}$), e o próprio software apresenta um valor para a inércia para esse eixo x (Figura 3.20). Selecionou-se para a massa volúmica do modelo um valor semelhante à dos aços inox (8000 kg/m^3) para que a estimativa seja conservadora. De facto, é espectável que qualquer anemómetro desta dimensão tenha massa volúmica inferior a esta, pois certamente incluirá muitos materiais de massa volúmica inferior. Obteve-se o modelo apresentado na Figura 3.20.

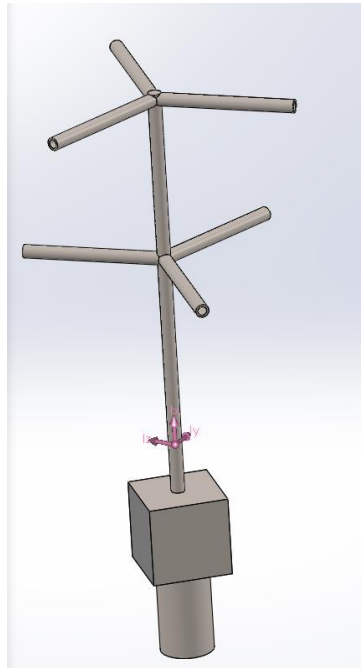


Figura 3.20 – Modelo do anemómetro sónico referido em 2.3.1 para cálculo da inércia

Este modelo simplificado, tem uma massa de $3,82\text{ kg}$ e inércia segundo um eixo vertical de cerca de $0,01\text{ kgm}^2$. Como o anemómetro poderá estar apoiado numa peça com alguma inércia e massa, considerou-se antes uma massa de 5kg e uma inércia 20% superior ($0,012\text{ kgm}^2$).

Está-se agora em condições de calcular a inércia da carga vista pelo motor, que será a do redutor, mais a do anemómetro dividida pela razão de redução ao quadrado.

Calculou-se em seguida, para cada par motor-redutor, a razão de inércias. Como foi acima referido, estabeleceu-se que razões acima de 15 não seriam aceites, tendo-se procurado a melhor solução em termos de preço e impondo um *backlash* menor ou igual a $0,2^\circ$ e ainda uma resolução de $0,025^\circ$ sem considerar *microstepping*. Este valor foi imposto baseado no facto de se querer exatidão de $0,1^\circ$. Embora tenha sido discutido que a resolução necessária para o sistema era de 1° , é preciso ter em conta que, como o movimento será em malha fechada, poderá ser necessário fazer correções de posição da ordem dos $0,1^\circ$. Para essas correções não serem bruscas e feitas num só passo do motor, terá de haver binário mais que suficiente para as executar, e arrancar o redutor e a carga sem problema, assumiu-se que, não usando *microstepping*, a resolução teria de ser $\frac{1}{4}$ de $0,1^\circ$, ou seja, $0,025^\circ$. Procurou-se, também, que a corrente necessária não ultrapassasse $1,5\text{ A}$, de forma a poder-se continuar a utilizar o driver Tic T834 da Pololu que o INEGI tinha já disponível e cujo website informa que, não havendo arrefecimento forçado, a corrente não deverá ser maior que esse valor. Assim, são evitadas aquisições desnecessárias.

Concluiu-se que, a melhor escolha, seria o motor ST5909M2008-B e o redutor GPLE60-2S-40, cujas informações e características estão abaixo expostas. A razão de inércias obtida é de 0,5, que é excelente e proporcionará, potencialmente, um altíssimo desempenho, já que, mesmo em aplicações de muito alta exatidão, é normal exigir apenas razões de 1.

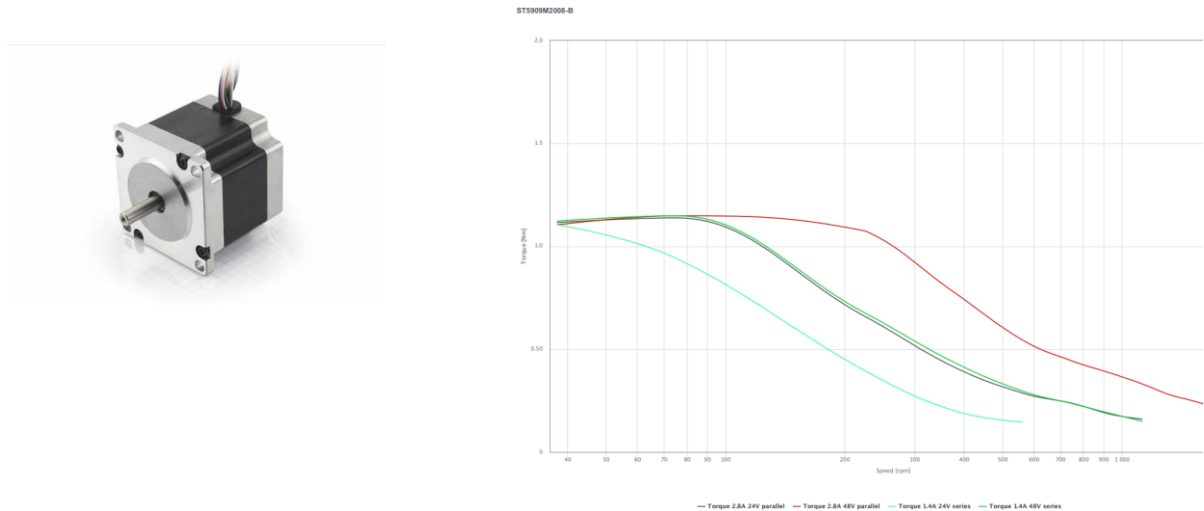


Figura 3.21 – Motor ST5909M2008-B da NANOTEC, in <https://en.nanotec.com/products/487-st5909m2008-b>

Tabela 3.6 – Características do motor ST5909M2008-B

Tensão de alimentação	3,6 V DC		
Corrente/fase	Unipolar	Bipolar Série	Bipolar Paralelo
	2,0 A	1,41 A	2,82 A
Binário Nominal	Unipolar		Bipolar
	0,74 Nm		1,05 Nm
Ângulo/ passo	0,9°		
Exatidão	$\pm 0,045^\circ$ (é dito 5% de 0,9°)		
Inércia	30 kgmm ²		



Figura 3.22 – Redutor GPLE60-2S-40 da NANOTEC, in

<https://en.nanotec.com/products/905-gple60-2s-40>

Tabela 3.7 – Características do redutor GPLE60-2S-40

Binário nominal de saída	40 Nm
Binário máximo de saída	64 Nm
Inércia	6,4 kgmm ²
Rendimento	95%
Backlash máximo	0,2°

Note-se que o motor deverá estar a usar a conexão bipolar série, que está representada na Figura 3.23 para que a corrente por fase seja menos que 1,5 A.

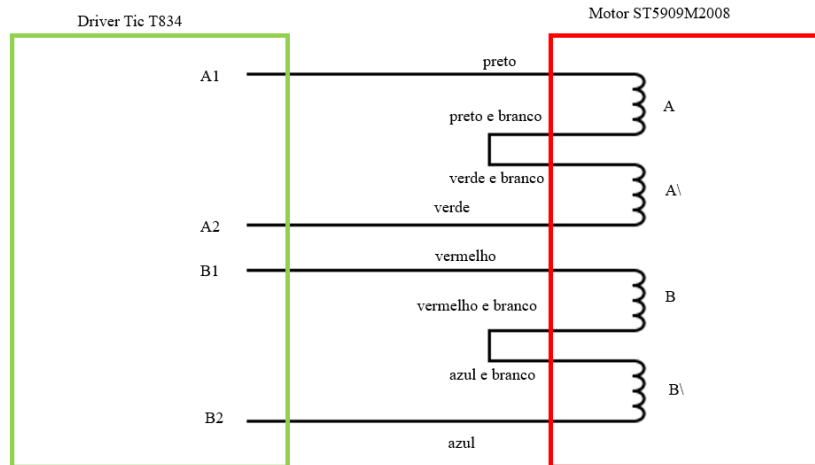


Figura 3.23 – Esquema da ligação do motor ao driver, baseado na página 34 do catálogo do driver (in <https://www.pololu.com/docs/pdf/0J71/tic.pdf>) e na ficha técnica do motor

3.7.4. Acoplamento entre redutor e carga

O acoplamento escolhido, modelo SJCA-40C-RD-14X14 da MISUMI, está representado abaixo. Foi escolhido um modelo com dimensões compatíveis com o espaço disponível e com o binário a suportar. Foi ainda imposto que o acoplamento não tivesse folga angular para não introduzir problemas de *backlash*. Era necessário um modelo que permitisse desalinhamentos axiais, laterais e angulares ligeiros, de forma que apenas os rolamentos absorvessem os esforços todos (exceto a torção naturalmente, já que esta é que é responsável pelo movimento). O modelo escolhido está na Figura 3.24.



Figura 3.24 – Acoplamento SJCA-40C-RD-14X14 da MISUMI, in

<https://uk.misumi-ec.com/vona2/mech/M1000000000/M1001000000/M1001090000/#>

Tabela 3.8 – Características do modelo SJCA-40C-RD-14X14

Desalinhamento máximo	axial	$\pm 1,2$ mm
Desalinhamento máximo	lateral	0,1 mm
Desalinhamento máximo	angular	1°
Binário nominal		17 Nm
Backlash		0°

3.7.5. Análise SIMULINK do modelo dinâmico

Agora, é necessário fazer uma análise dinâmica mais pormenorizada para se provar que o sistema funcionará adequadamente. Começou-se por estabelecer o modelo dinâmico do sistema em causa: o movimento principal de rotação dos anemómetros ou cataventos.

Um motor passo a passo pode ser visto como uma inércia excitada passivamente através de uma mola. De facto, quando se dá ordem ao motor para rodar um passo, a resposta em termos de rotação será aquela característica de um sistema de segundo grau subamortecido (Trinamic). Pode-se, então, considerar que o sistema abaixo é equivalente ao motor passo a passo.

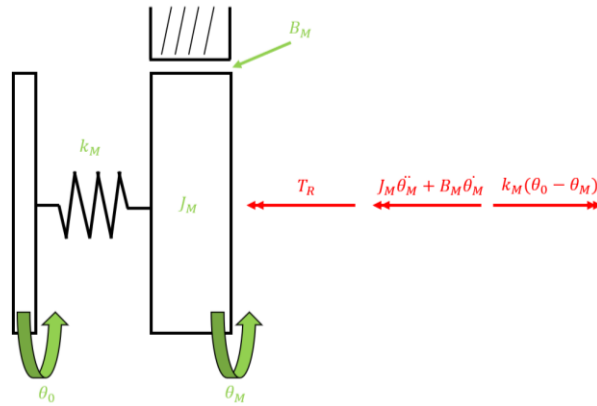


Figura 3.25 – Modelo dinâmico do motor passo a passo

Onde:

k_M , é a rigidez torsional do motor

B_M é o coeficiente de amortecimento viscoso dos rolamentos

J_M é a inércia do rotor do motor

$\theta_M, \dot{\theta}_M, \ddot{\theta}_M$ são o ângulo, a velocidade angular e a aceleração angular do rotor

A este modelo, equivale o diagrama de blocos representado.

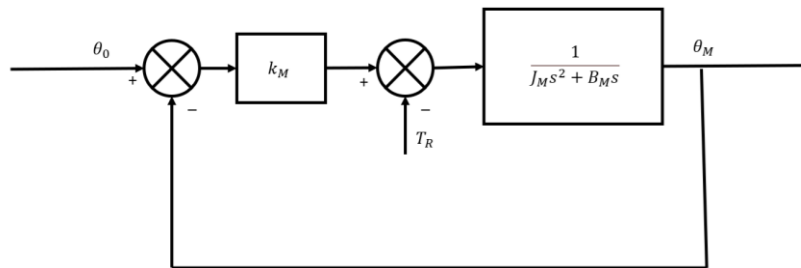


Figura 3.26 – Diagrama de blocos do motor passo a passo

A rigidez do motor pode ser obtida dividindo o binário nominal (*Holding Torque*) pelo ângulo de um passo. O rotor está estável se estiver alinhado de forma correta com o campo magnético. Ao se aplicar um momento neste, começa a surgir um binário igual e de sentido contrário, proporcional ao ângulo deslocado da posição estável, tal como uma mola de torção. Logo a rigidez do motor será:

$$k_m = \frac{1,05 \text{ Nm}}{1 \text{ passo}} = 66,85 \frac{\text{Nm}}{\text{rad}} \quad (3.16)$$

Onde:

k_m , é a rigidez torsional do motor

De facto, a empresa Trinamic mostra que a resposta do motor a cada passo imposto será conforme a Figura 3.27, sendo que, quanto menores estes forem, através da técnica do microstepping explicada mais à frente neste trabalho, menor será o overshoot.

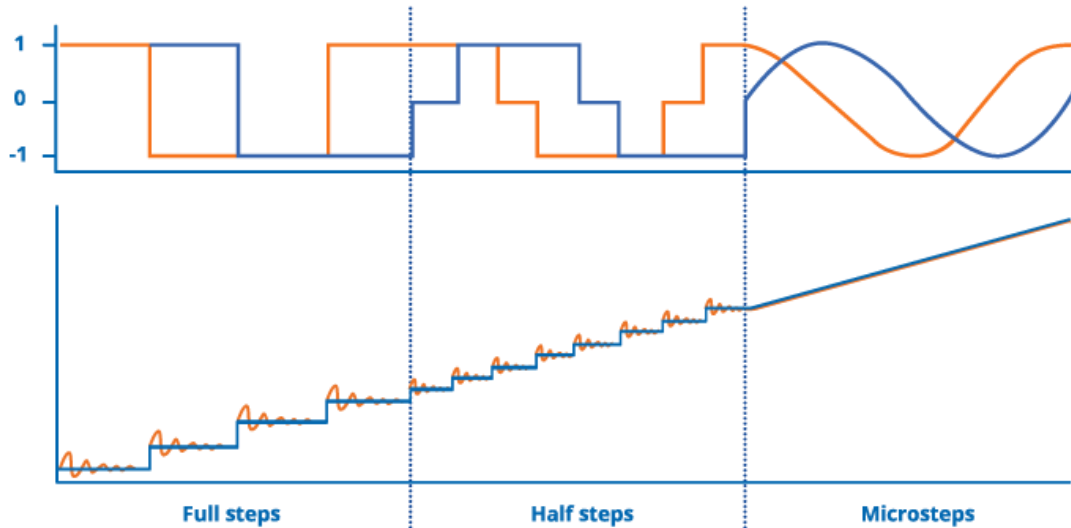


Figura 3.27 – Resposta de um motor a sucessivas divisões em menores micropassos, in

<https://www.trinamic.com/technology/motor-control-technology/microstepping/>

A inércia é obtida do catálogo da NANOTEC diretamente ($J_M=300 \text{ gcm}^2$), sendo que o amortecimento viscoso causado pelos rolamentos de apoio foram obtidos partindo de um artigo que sugeria valores entre 0,15 Ns/mm e 0,4 Ns/mm (Mitsuya, 1998), que significa que, para um rolamento de raio r_r e coeficiente viscoso, em Ns/m, igual a B_{rt} , tem-se um coeficiente viscoso de rotação B_{rr} , em Nms, obtido através da equação abaixo.

$$B_{rr}=B_{rt}*r_r^2 \quad (3.17)$$

Onde:

B_{rr} , é o coeficiente viscoso de rotação
 B_{rt} , é o coeficiente viscoso de translação
 r_r , é o raio do rolamento

O veio do motor tem um raio de 3,175 mm, logo, será esse o valor de r_r . Como há dois rolamentos, conforme visto no catálogo, ter-se-á valores de B_M entre 0,0015 Nms e 0,004 Nms.

Para comparar com outros modelos, verificou-se que no Website *Machine Design*, um motor passo a passo de 5 fases e 0,72 °/passo, tem um tempo de acomodação de 33 ms para ficar a menos de 5% do degrau imposto (Endo, 2001), sendo que o modelo usado neste projeto tem, assumindo o amortecimento explicado acima, 50 ms, o que significa que é aceitável. A simulação está no anexo B.

Em seguida, há que modelar o redutor planetário, que na verdade será equivalente, em termos de modelação, a dois redutores de 1 andar seguidos, já que são dois andares de redução.

Observe-se, primeiro, o modelo de um único andar de redução. Começando pelo diagrama de corpo livre, assumindo 2 planetas (mais tarde serão $N=3$ planetas) e separando os componentes todos, isto é, a engrenagem “sol” (*Sun gear, s*), as engrenagens “planeta” (*Planet gears, p*) e a

peça transportadora dos planetas (*Planet Carrier, t*), obtém-se o que está representado. Todos os planetas engrenam num anel exterior com dentado interior (*Ring gear, a*).

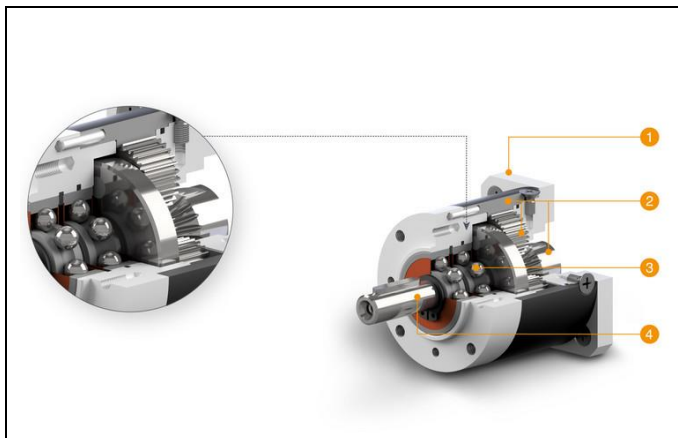


Figura 3.28 – Interior de um redutor planetário e seu modelo SOLIDWORKS simplificado, in <https://en.nanotec.com/products/2703-high-torque-planetary-gearboxes>

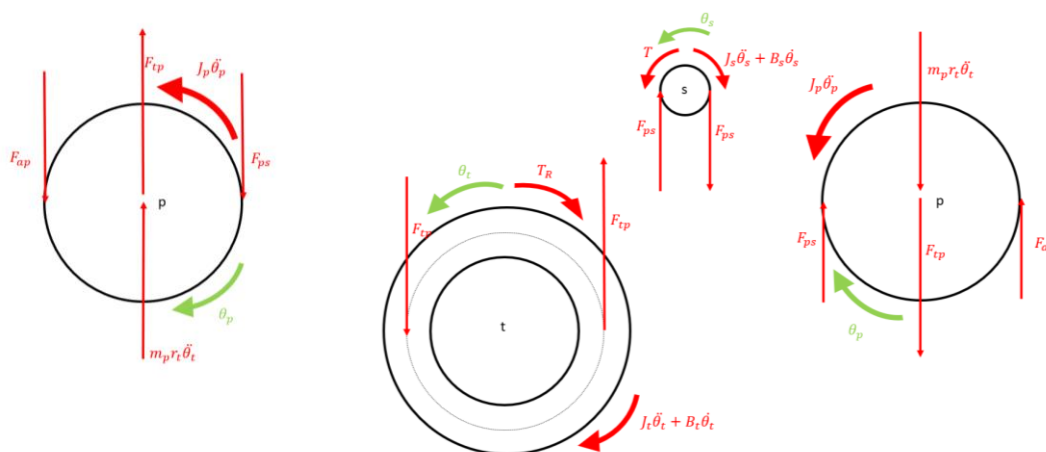


Figura 3.29 – Diagrama de corpo livre do redutor

Obtêm-se as equações abaixo, após simplificação, e prontas a serem convertidas num diagrama de blocos.

$$\theta_s = \frac{1}{J_s s^2 + B_s s} (T - N r_s F_{ps}) \quad (3.18)$$

$$\theta_p = \frac{\theta_s}{i_{ps}} \quad (3.19)$$

$$\theta_t = \frac{\theta_s}{i} \quad (3.20)$$

$$F_{ps} = \frac{1}{2} \left(F_{tp} + \frac{J_p}{r_p} s^2 \theta_p + m_p r_t s^2 \theta_t \right) \quad (3.21)$$

$$F_{tp} = \frac{1}{Nr_t} ((J_t s^2 + B_t s) \theta_t + T_R) \quad (3.22)$$

Onde:

r_s , é o raio da engrenagem sol

J_s , é o momento de inércia da engrenagem sol

B_s , é o coeficiente viscoso de amortecimento da engrenagem sol

θ_s , é o ângulo de rotação da engrenagem sol

T , é o binário aplicado na engrenagem sol (entrada)

F_{ps} , é a força exercida por uma engrenagem planeta na engrenagem sol na zona de engrenamento e vice-versa

i_{ps} , é a razão de redução entre a engrenagem sol e uma engrenagem planeta

r_p , é o raio de uma engrenagem planeta

J_p , é o momento de inércia de uma engrenagem planeta

m_p , é a massa de uma engrenagem planeta

θ_p , é o ângulo de rotação de uma engrenagem planeta

N , é o número de rodas planeta

F_{tp} , é a força exercida por uma engrenagem planeta na peça transportadora de planetas e vice-versa

r_t , é o raio da peça transportadora de planetas

J_t , é o momento de inércia da peça transportadora de planetas

B_t , é o coeficiente viscoso de amortecimento da peça transportadora de planetas

θ_t , é o ângulo de rotação da peça transportadora de planetas (saída do andar de redução)

i , é a razão de redução (entre a engrenagem sol e a peça transportadora de planetas)

T_R , é o binário resistente aplicado na peça transportadora de planetas (saída)

Note-se que i é a razão de redução, isto é, a razão entre número de voltas da engrenagem sol e do transportador de planetas, sendo i_{ps} a razão de redução entre uma engrenagem planeta e a sol, ou seja, a razão entre o número de voltas da engrenagem sol e uma engrenagem planeta. São respetivamente obtidas da forma abaixo.

$$i = \frac{2(r_s + r_p)}{r_s} = \frac{2r_t}{r_s} \quad (3.23)$$

$$i_{ps} = \frac{2r_p}{r_s} \quad (3.24)$$

Obtém-se o diagrama de blocos seguinte, que tem como variáveis de entrada T e T_R e variáveis de saída θ_t e θ_s . Chame-se a este tipo de diagrama, *diagrama de entradas TT_R* . Será, no entanto, útil, mais à frente ter um diagrama em que as variáveis de entrada são antes θ_s e T_R e as de saída θ_t e T , como está representado na Figura 3.31. Chame-se, por sua vez, a este tipo de diagrama, *diagrama de entradas $\theta_s T_R$* .

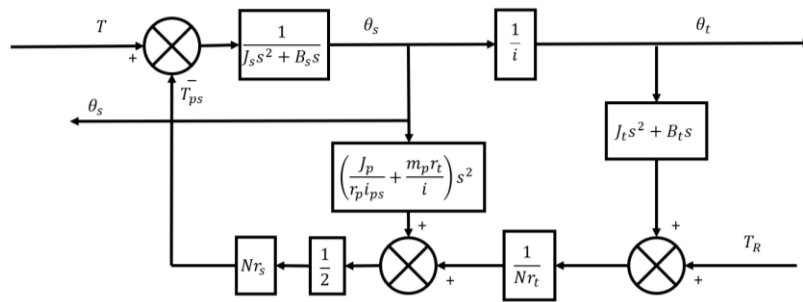


Figura 3.30 – Diagrama de blocos de um andar de redução com variáveis de entrada T e T_R e variáveis de saída θ_s e θ_t

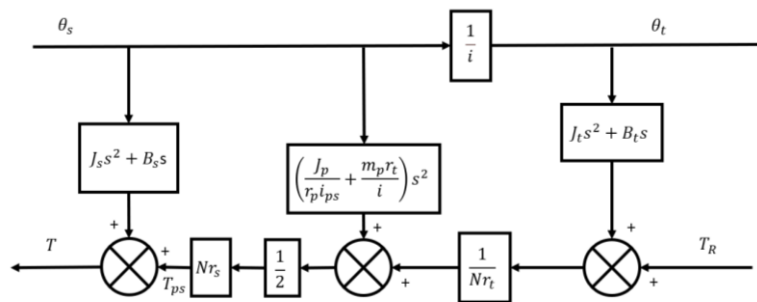


Figura 3.31 - Diagrama de blocos de um andar de redução com variáveis de entrada θ_s e T_R e variáveis de saída T e θ_t

De facto, o redutor tem dois andares de redução, e como tal deverá ter dois diagramas destes seguidos, sendo, no entanto, necessário o segundo ser do tipo $\theta_s T_R$, já que o primeiro tem um como variáveis de saída $\theta_t \theta_s$. Desta forma, os diagramas podem ser unidos perfeitamente num só, disponível no anexo B, já que o ângulo na saída do primeiro andar é o mesmo que o da entrada do segundo.

É necessário, para proceder à análise SIMULINK, ter valores para as inércias e para os coeficientes viscosos dos rolamentos. No entanto, para tal ser possível, torna-se necessário saber as dimensões de todas as engrenagens, que não estão disponíveis no catálogo do fabricante. Foram descobertos, iterativamente, os valores para as dimensões, inércias e massas das engrenagens e peças transportadoras de planetas de cada andar de redução, como mostrado no anexo B. Para os coeficientes viscosos, à falta de uma melhor aproximação, consideraram-se novamente entre 0,0015 Nms e 0,004 Nms por rolamento. Como o redutor na verdade tem maior amortecimento viscoso, pelo facto de estar mergulhado em óleo na zona das engrenagens, considerou-se o valor de 0,004 Nms. Obteve-se, então, os diagramas em SIMULINK, que são, respetivamente, a primeira e a segunda redução, respetivamente na forma de entrada $T T_R$ e entrada $\theta_s T_R$, no anexo B.

Agora, há que observar e modelar a saída, isto é, o anemómetro sónico em rotação. Se se olhar para a peça transportadora de planetas do segundo andar de redução e para a carga, considerando as duas ligadas por uma mola, de forma a considerar uma ligação realista e não perfeitamente rígida, obtém-se o diagrama de corpo livre abaixo, que dá origem ao diagrama de blocos representado.

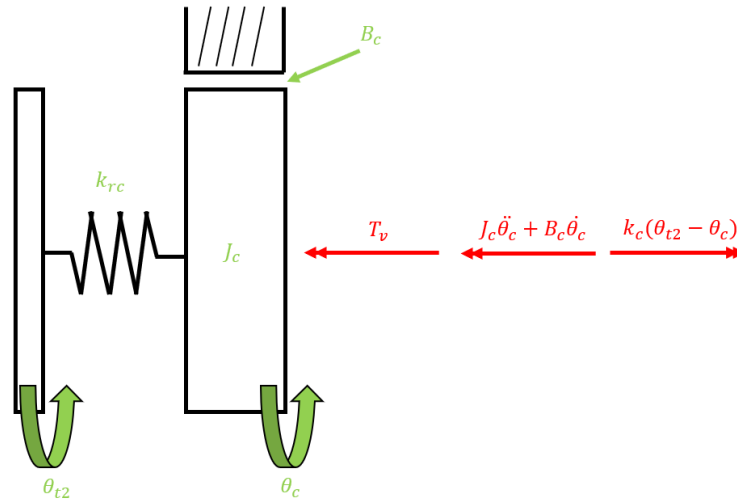


Figura 3.32

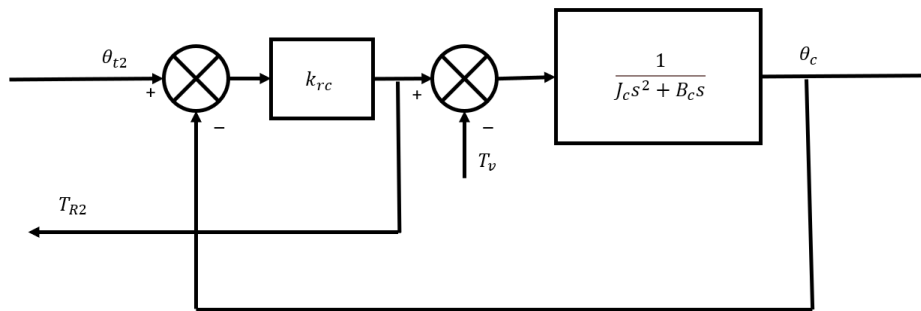


Figura 3.33

Onde:

k_{rc} , é a rigidez do acoplamento

J_c , é o momento de inércia da carga

B_c , é o coeficiente viscoso de amortecimento da carga

θ_c , é o ângulo de rotação da carga

A inércia da carga já foi anteriormente calculada (120% da do anemômetro sônico – 0,012 kgm²), sendo que a rigidez da mola, que está a simular o efeito do acoplamento, considerou-se ser 1200 Nm/rad. Este valor estimado foi obtido partindo de vários acoplamentos encontrados. Como o acoplamento usado neste projeto, da MISUMI, não fornecia este dado, procurou-se produtos semelhantes em termos de dimensões e binário que o fornecessem, e estimou-se com base nestes modelos similares. Esses produtos foram o modelo TX1 da R+W (R+W) e o produto 601 418 00 do catálogo de acoplamentos de elastômero da Maedler North America (Maedler North America) cuja rigidez é 1140 Nm/rad e 1200 Nm/rad respectivamente. Para os rolamentos, estes têm agora um raio de 30 mm, como se verá à frente nas figuras da montagem e legenda dos componentes, logo, terão valores de coeficiente viscoso entre 0,135 Nms e 0,36 Nms. Sendo dois rolamentos, os valores vêm entre 0,27 Nms e 0,72 Nms.

Poderá, agora, passar-se à simulação, pois o diagrama final já pode ser obtido com base em todas as modelações anteriores, e está no anexo B.

Note-se que para uma solicitação em degrau de $0,016 \text{ rad}$ ($0,9^\circ$ - 1 passo do motor) obtém-se um movimento oscilatório em torno da posição esperada de $0,0004 \text{ rad}$ ($0,0225^\circ$), devido à redução de 1:40, com decaimento típico de um sistema de 2° grau subamortecido, com um tempo de acomodação de cerca de $0,4 \text{ s}$ e um overshoot de cerca de 94% , mas que, no entanto, corresponde apenas a $\pm 0,021^\circ$, que é bem menor que a exatidão pretendida de $\pm 0,1^\circ$ e que a resolução desejada de $0,1^\circ$. Tendo em conta que, realisticamente, existem atritos e perdas energéticas que ajudam à atenuação da oscilação, e que os redutores normalmente estão mergulhados em óleo, o que significa que o seu coeficiente viscoso deveria ser consideravelmente maior, este problema será ainda menor. De facto, este valor de amplitude de vibração tem pouca importância por uma outra razão adicional: o *backlash* do redutor é mais elevado, $0,2^\circ$. Pode-se, então, concluir que o sistema obtido é válido para utilização em calibrações.

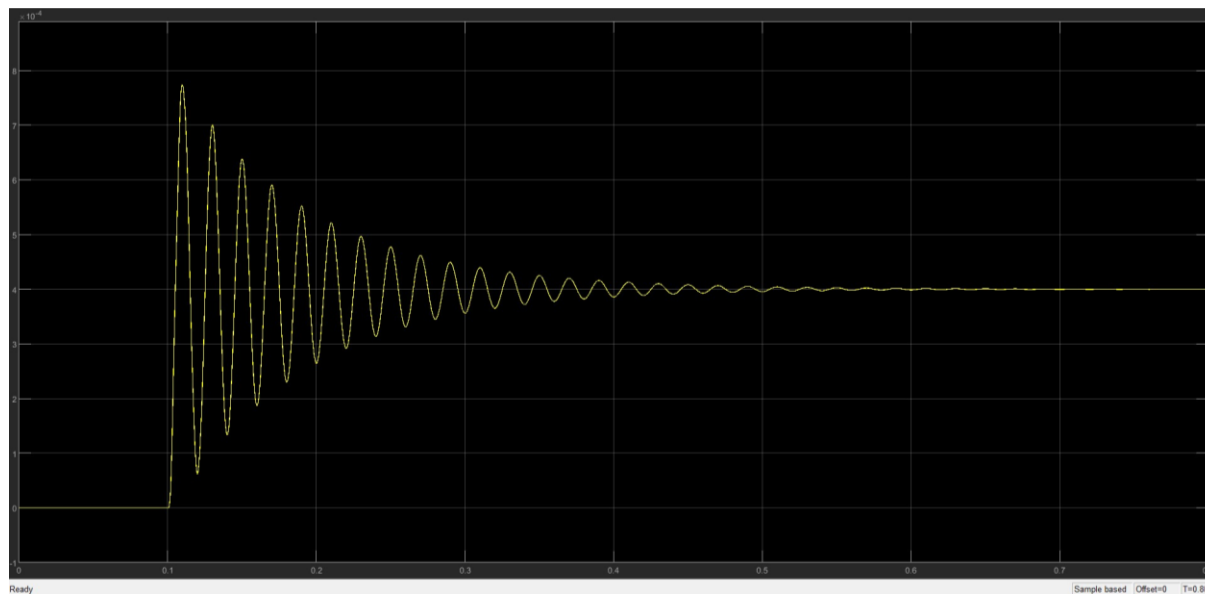


Figura 3.34 – Resposta do sistema a uma solicitação em degrau de $0,016 \text{ rad}$ ($0,9^\circ$ - 1 passo do motor)

3.7.6. Encoder

Para este projeto, quer-se uma exatidão $\pm 0,1^\circ$, logo, é necessário ter um encoder com uma exatidão, e resolução de $0,05^\circ$, quatro vezes inferior, para não influenciar consideravelmente a medição. Isto significa que é necessário um modelo com 2000 pulsos por rotação, já que, sendo um encoder de quadratura, a resolução será quatro vezes mais (8000 por rotação, ou seja, $0,045^\circ$).

Foi adquirido, através da BIBUS, o modelo DBS60E-THFK02000 da SICK, com 2000 pulsos por rotação, comunicação TTL, e com veio oco com diâmetro interior de 15 mm .



Figura 3.35 – Modelo DB60E-THFK02000, in <https://www.sick.com/br/pt/encoders/encoder-incremental/dbs60-core/dbs60e-thfk02000/p/p441365>

A necessidade de se escolher o modelo com veio oco está relacionada com o facto de ser necessário medir a posição angular à saída do redutor, de preferência acima do acoplamento, para, como se verá à frente, se realizar a medição o mais próximo possível do dispositivo a calibrar. Se se utilizasse um modelo não oco, seria necessário fazer uma ligação do veio que roda o dispositivo com o encoder através de uma correia (por exemplo), o que em si já acrescentaria folga (*backlash*) e possibilidades de erros.

Trata-se de um encoder de quadratura com 8 fios, com os canais A e B e os seus complementos para que haja eliminação de eventuais ruídos, já que o encoder poderá necessitar de um cabo longo, que aumenta ainda mais a probabilidade de haver problemas deste tipo. Isto pode ser conseguido conforme se vê na figura abaixo, em que somando A com o simétrico de *não* A, a parte do sinal indesejado é removido com a ajuda de um amplificador operacional.

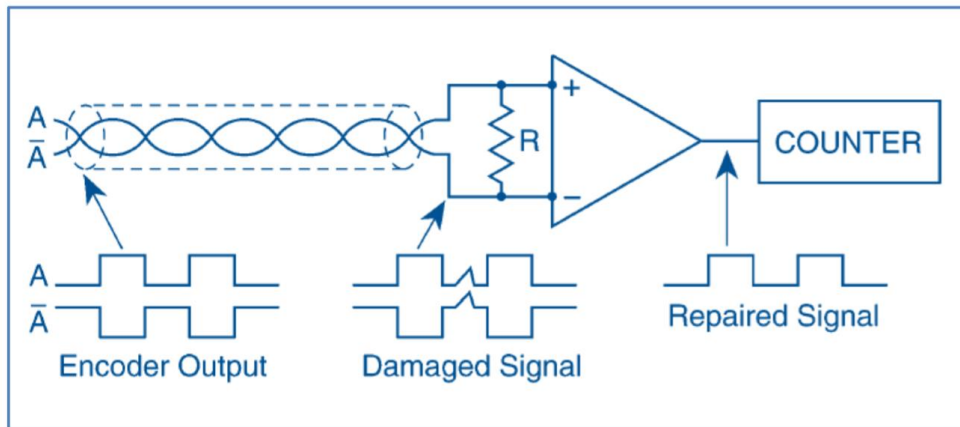


Figura 3.36 – Eliminação de ruído, in https://www.dynapar.com/Technology/Encoder_Basics/Quadrature_Encoder/

3.8. Sistema com Apenas Movimento de Rotação

Ao longo do projeto, constatou-se que certos componentes teriam prazos de entrega longos. Tendo em conta que o movimento principal de rotação era necessário com maior brevidade, não seria possível ter o sistema com os dois movimentos pronto no prazo pretendido pelo INEGI. Foi então sugerido por parte deste construir-se um sistema temporário em que apenas existia o movimento de rotação (em torno do eixo vertical). Isto foi sugerido porque este é o movimento mais importante para a calibração da maior parte dos cataventos e anemómetros, sendo o segundo movimento (inclinação) usado raramente. Por decisão do INEGI, concluiu-se

que possivelmente nem seria necessário automatizá-lo. Apresenta-se uma imagem desse sistema simples. Foi construído com perfis Rexroth de alumínio 30x60 unidos através das peças triangulares de ligação também existentes no INEGI.

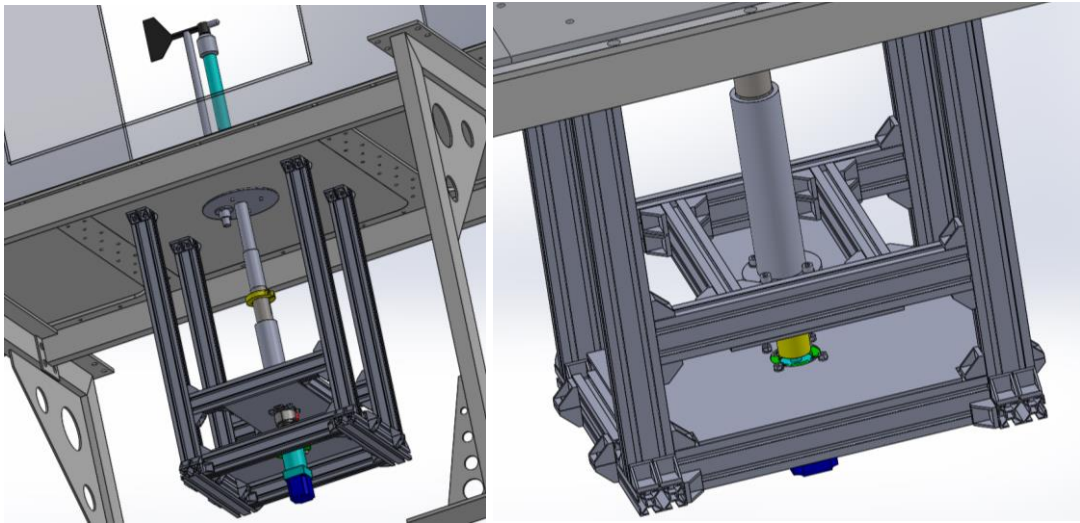


Figura 3.37 – Sistema apenas com rotação em torno do eixo vertical

Nestes perfis assentam duas chapas de aço de 5 mm de espessura, sendo a chapa mais elevada a que irá suportar as cargas exteriores. Resumindo, as cargas são exercidas na parte do tubo de suporte que está dentro do túnel, e são absorvidas totalmente pelos rolamentos, sendo que o de cima absorve as axiais e parte das radiais e o de baixo apenas outra parte das radiais. Estes por sua vez encontram-se montados numa estrutura constituída por um tubo soldado a um disco que são posteriormente maquinados. Estão montados através de anéis elásticos. A estrutura soldada e maquinada referida encontra-se aparafusada à chapa através de porcas e parafusos ISO 4762 CHC M8. Por baixo desta chapa, está montado o encoder através de 2 parafusos M3 também CHC e da mesma norma que aparafusam em roscas abertas na chapa.

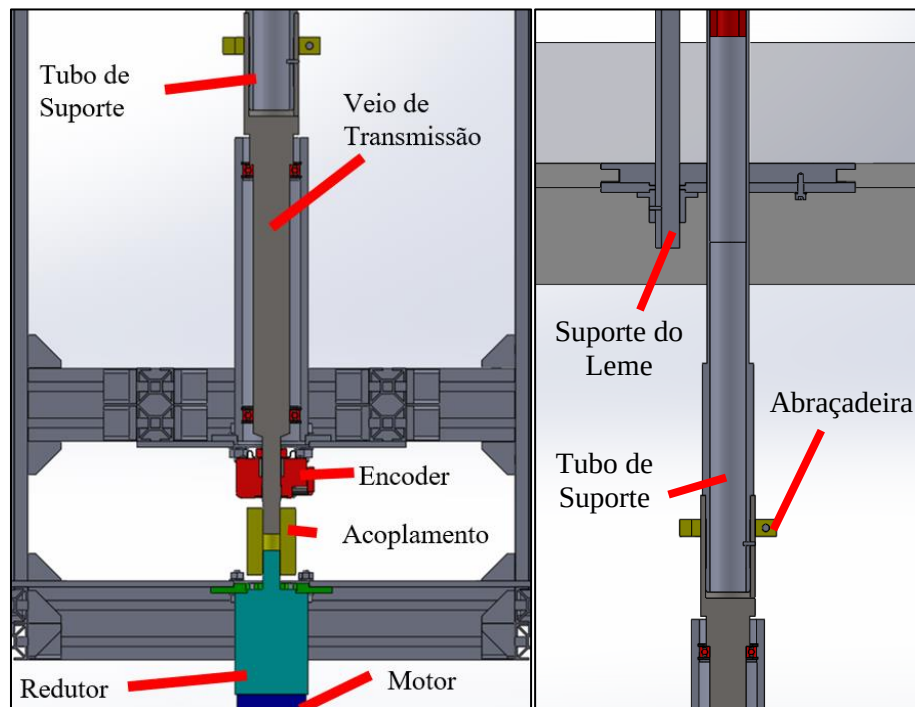


Figura 3.38 – Estrutura da montagem para o movimento de rotação

A chapa de baixo tem alguma distância à de cima, de forma que o encoder seja de relativamente fácil acesso para montagem. Na chapa de baixo está aparafusado o conjunto pré-montado constituído pelo motor e o redutor da Nanotec.

Note-se que em situação alguma os parafusos garantem o guiamento e centragem. Esta é garantida através de superfícies cilíndricas salientes que alinham com furos maquinados com precisão. A chapa está ligada aos perfis novamente por aparafusamento, usando as peças triangulares existentes da Rexroth. O tubo de suporte dos anemômetros e cataventos está ligado ao veio de transmissão através de um sistema de abraçadeira, semelhante ao produto da FABORY da Figura 3.39, que aperta estes dois por atrito.

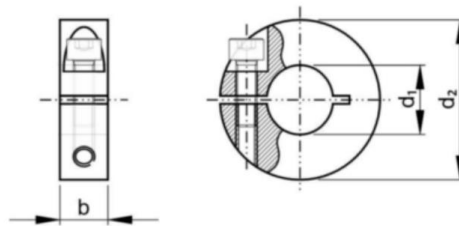


Figura 3.39 – Abraçadeira FABORY, in <https://www.fabory.com/pt/anel-de-ajuste-com-parafuso-sextavado-interior-a%C3%A7o-de-corte/p/37840?q=%3Arelevance&categoryCode=011001&page=1>

Foi feita uma análise das deformações para se entender se a estrutura seria rígida o suficiente para, novamente, não haver inclinações maiores que $0,2^\circ$ e deslocamentos maiores que 2 mm. A previsão era que seria rígida o suficiente, já que, ao contrário da estrutura com os dois movimentos, esta não teria os esforços todos a serem absorvidos pelo mesmo perfil, mas sim divididos pelos vários perfis da estrutura toda.

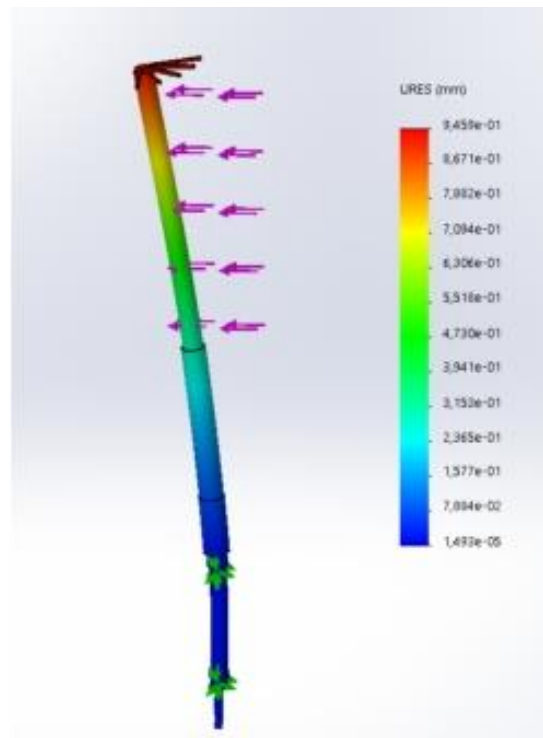


Figura 3.40 – Análise do suporte dos dispositivos

Confirmou-se que as deformações não são problema. De facto, vê-se que as deformações maiores são, sem dúvida alguma, no tubo que entra dentro do túnel e serve de suporte aos dispositivos. Logo, foi posteriormente feita uma análise de deformações apenas ao conjunto do veio de transmissão e tubo de suporte, tendo-se colocado um provete semelhante aos casos anteriores para se medir as inclinações e deslocamentos de 6 pontos. Como se vê acima, as deformações estão bastante dentro dos limites. Note-se que, no entanto, estas rotações e deslocamentos acumulam com os da estrutura exterior no caso da que possui os dois movimentos, encontrando-se, mesmo assim, dentro dos limites estabelecidos.

3.9. Mecanismo de Isolamento do Túnel

Para se ter um movimento de inclinação, é necessário abrir um rasgo na peça central do chão do túnel, o que significa que, caso não haja nenhum sistema adicional a tapar a parte do rasgo não ocupada pelo tubo de suporte, haverá, no fundo, uma grande área de acesso ao exterior por onde o escoamento poderá sair, afetando significativamente as condições de teste e calibração.

Desta forma, embora não se tenha desenvolvido este assunto neste trabalho, foi discutida a necessidade deste sistema, que se sugere ser realizado num trabalho futuro. De facto, foi ainda desenvolvido um protótipo inicial para esta solução, modelando-se novamente em SOLIDWORKS, e que consistia em várias chapas metálicas (a amarelo) ligadas entre si com dobradiças, estando essas chapas apoiadas em carris (a azul). Isto está representado na Figura 3.41. A chapa central tem um rasgo dimensionado para que a zona prismática do anemómetro sónico (Figura 2.10) caiba nele. Para se ter noção do espaço ocupado criou-se o prisma quadrangular representado na Figura 3.41. No anexo C está uma figura com a representação do movimento deste sistema.

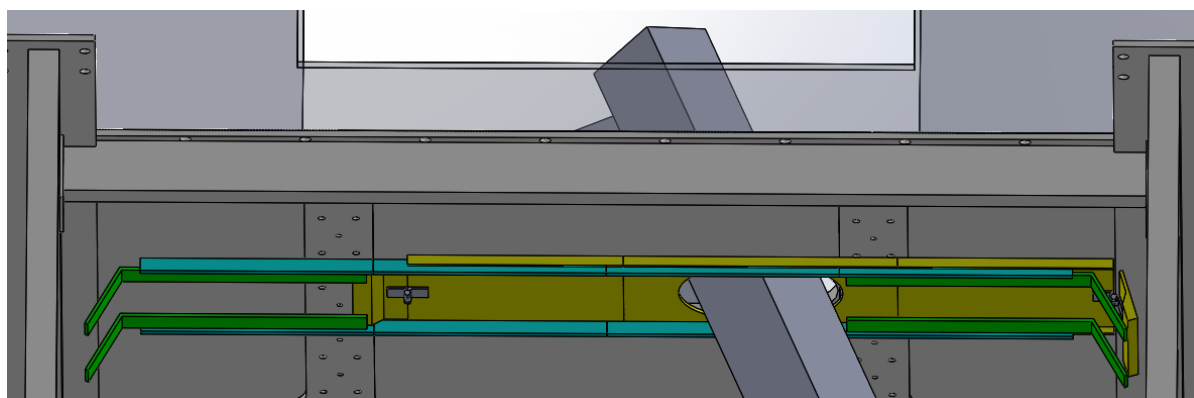


Figura 3.41 – Sistema de isolamento com chapas móveis.

Note-se que, quando o anemómetro sónico (representado pelo prisma que tem as mesmas dimensões que a sua parte de secção quadrada) se move para outro ângulo de inclinação, empurra a chapa central e consequentemente as outras também se movem de forma solidária. Embora não esteja representado, teria de haver um material flexível que cobrisse o pequeno espaço “anelar” entre o rasgo e o anemómetro, como por exemplo uma espuma polimérica (“esponja”). Teria de haver uma “esponja” para o anemómetro sónico, que tem maiores dimensões na zona que “atravessa” o chão do túnel, e outra para os dispositivos que são colocados no tubo de suporte de 34,8 mm de diâmetro (modelo Compact, First Class, etc).

Como a chapa tem de estar totalmente encostada ao túnel, terá de ser fabricada uma nova chapa central para este, para que a superfície onde o novo sistema assenta fique toda nivelada, o que não acontece neste momento. Terão ainda de ser removidos os parafusos que se encontrem a obstruir este movimento, o que significa que será necessário avaliar se esta remoção afetará o

comportamento do escoamento pelo facto de as chapas já não ficarem tão fortemente ligadas à estrutura, podendo ser necessário criar mais furos para parafusos fora da zona de passagem para compensar os que foram removidos. Uma outra opção seria simplesmente substituí-los por parafusos de cabeça de embeber. Note-se que, embora as chapas móveis estejam encostadas ao chão do túnel, pelo facto de a chapa do próprio túnel ter espessura, poderá ainda assim haver uma alteração não desprezável do escoamento, pelo que se sugere futuros testes após ser instalado este sistema no sentido de avaliar esse efeito e medi-lo com exatidão. O mesmo se passa com a esponja, caso esta seja colocada, pois terá possivelmente uma forma irregular.

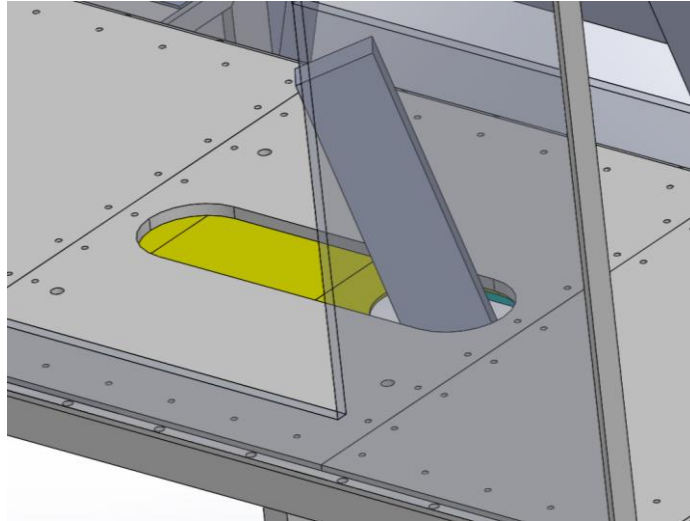


Figura 3.42 – Sistema de chapa móvel visto do interior do túnel. Como se observa, não está nivelado.

Ainda foi ponderada a utilização de um sistema de persianas. Isto é já usado pelo laboratório Deutsche WindGuard já referido, mas não se desenvolveu esse tópico neste trabalho (Westermann D. et al, 2011).

3.10. Suportes Específicos para cada Modelo

Como não faz sentido ter um tubo de suporte para cada modelo de catavento ou anemómetro, fez-se uma pequena peça de suporte para cada modelo de catavento, sendo que todas encaixam no mesmo tubo de 34,8 mm de diâmetro exterior. Como se vê na Figura 3.43, no tubo de 34,8 mm de diâmetro e espessura 2,4 mm (cinzento), será soldada uma pequena peça tubular com o mesmo diâmetro exterior, mas mais espessura (vermelho). Desta forma, os suportes dos modelos (verde) já poderão prender, por atrito, através de 3 pernos M6, nesta peça soldada. Deverá ser desenhada uma linha fina no suporte, alinhada com o perno central, mas do lado oposto, pela qual se deverá alinhar o Norte do catavento, de forma a montar o conjunto, sempre que possível, da mesma forma. De facto, o próprio tubo que liga ao veio de transmissão deverá ter uma marca semelhante pela mesma razão, sendo tudo isto idealmente feito com a ajuda de um laser, como se verá mais adiante.

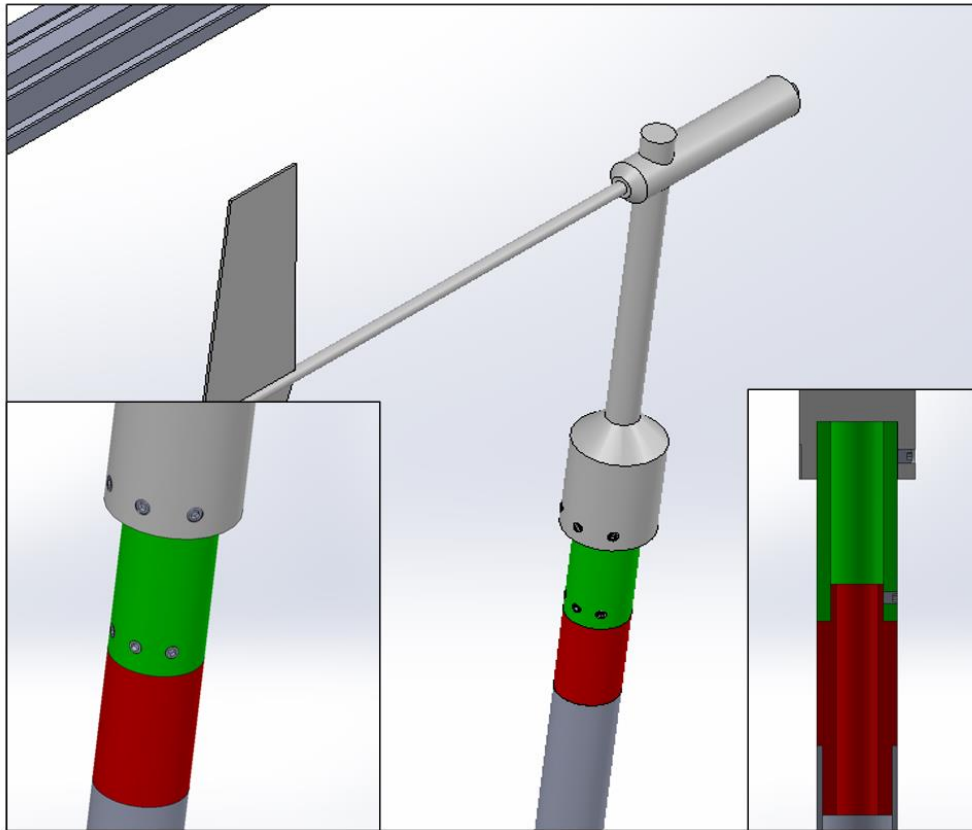


Figura 3.43 – Suporte do modelo First Class (verde) montado no tubo com extensão soldada (a vermelho)

Para o modelo Compact, que tem menos altura, será necessário um suporte maior para compensar. Mais detalhes do suporte desse modelo, assim como detalhes de montagem estão disponíveis no anexo C.

3.11. Programação e Automatização da Rotação

Abaixo estão explicados os diversos programas feitos ao longo do trabalho, estando mais informações disponíveis no anexo D. Os materiais usados para testar os programas daqui em diante não foram os materiais que serão utilizados no projeto final, pois ainda não tinham sido encomendados. Utilizou-se o motor que o INEGI possuía (ST4209S0404), o driver Tic834, um Arduino Uno. O encoder utilizado para testar os programas foi o modelo DFS60B-S4PL10000, da SICK, a mesma empresa do modelo a utilizar no projeto real. Desta forma, testa-se com material o mais parecido possível com o que se adquiriu enquanto não chegam as encomendas. Os programas apenas foram testados e feitos para o modelo Compact, sugerindo-se, como trabalho futuro, fazer outros que permitam ser utilizados para qualquer modelo. Utilizou-se, nos programas, valores para a posição, velocidade e aceleração, que já tivessem em conta os modelos encomendados e não os utilizados para teste.

3.11.1. Escolha da Linguagem de Programação

Inicialmente considerou-se a opção de utilizar um programa em Python. No entanto, devido ao fácil acesso a documentação Arduino através de material da FEUP, e devido ao facto de este componente já ter sido lecionado nas aulas, optou-se por escolher a linguagem de programação usada neste, que tornaria o processo de criação do sistema mais fácil e célere.

3.11.2. Comunicação entre Arduino e Driver Tic

Sendo que o Arduino não é utilizado para controlar o motor, é necessário haver uma comunicação entre o controlador do motor (placa *Tic T834 Pololu*) e este. É possível fazê-lo através de comunicação série TTL assíncrona ou I2C síncrona. O encoder por sua vez também possui este tipo de comunicação.

3.11.3. Comunicação TTL assíncrona

A comunicação TTL (*Transistor-Transistor logic*) é uma comunicação séria assíncrona, o que significa que o emissor e recetor têm de estar programados para enviar e ler bits à mesma velocidade (*baudrate*).

É possível pôr o Arduino a comunicar com a placa *Tic T834* ligando o pino 10 (RX) do Arduino ao pino TX da placa *Tic* e o pino 11 (TX) do Arduino ao RX da placa, ligando-se também ambos os pinos *ground* dos dois componentes.

3.11.4. Teste de comunicação entre Arduino e Tic

Inicialmente, foi testada a comunicação entre a placa *Tic* e o Arduino, para garantir que não havia problemas. Foi estudada a biblioteca e as funções básicas, começando com um programa que vem já com esta, e que simplesmente roda o motor para a posição 100, espera que lá chegue e em seguida roda-o para a posição 0 novamente, esperando 1 segundo após lá chegar. Note-se que a posição zero é a posição do motor quando este é ligado. Não existe um encoder incorporado, o programa apenas considera a posição zero como a posição em que o rotor está no instante em que é lida a primeira vez. O código para esse programa está representado abaixo, sendo que as funções não comentadas estão explicadas no anexo B: programas para Arduino.

```
void setup() {
  Serial.begin(9600);

  ticSerialPort.begin(9600);

  //Dá-se à placa tic tempo para iniciar
  delay(200);

  //Põe-se a posição da placa tic a 0, assim,
  //quando mais tarde se comandar o movimento, sabe-se o ponto de partida
  tic.haltAndSetPosition(0);

  //Sai-se do modo safe start da placa tic, que impede movimentos
  //acidentais indesejados
  tic.exitSafeStart();
}
```

```
//-----
void loop() {
  tic.setTargetPosition(100);
  waitForPosition(100);
  tic.setTargetPosition(0);
  waitForPosition(0);
  delayWhileResettingCommandTimeout(1000);

}
```

Figura 3.44 – Programa para teste de comunicação entre o driver Tic834 e o Arduino

3.11.5. Teste de Movimento em Malha Aberta

O passo seguinte foi elaborar um programa que lia o que era escrito no monitor série do editor do Arduino e com base nisso podia escolher-se a velocidade, aceleração, e posição de destino, sem ter ainda em conta o encoder. Este programa, disponível no anexo D, vai mover o motor para a posição pretendida, iniciando o movimento com uma aceleração constante de acordo com o inserido pelo utilizador no monitor série até atingir a velocidade também escolhida pelo mesmo. Quando estiver próximo da posição, inicia-se uma desaceleração de valor constante igual ao anterior até se atingir o repouso na posição pretendida. Note-se que o monitor série, se não receber comandos em 1s, assume o valor zero, que poderá não ser verdade. Apesar de várias pesquisas feitas para remover esta assunção feita pelo Arduino, não foi possível resolver esse problema de forma correta, apenas se conseguiu mudar esse tempo limite de 1s para um valor absurdamente elevado que não causasse problemas. No caso mostrado na figura em anexo, 10 dias (10x86400x1000 ms). A aceleração, quase sempre, não é escolhida manualmente. Simplesmente, com base na inércia da carga, sabe-se que não deve ser superior a um determinado valor. Como se verá abaixo em “Programação dos Processo de Calibração”, a aceleração máxima deverá ser $\ddot{\alpha}=0,42^\circ/\text{s}^2$.

3.11.6. Teste do Funcionamento do Encoder

Para testar o encoder e verificar que tudo está a funcionar como é suposto, testou-se com um osciloscópio e uma fonte de tensão, observando-se que, quando o veio era rodado, eram produzidas, em cada canal A, não A, B, não B, Z e não Z, uma onda quadrada. Testou-se para tensões de alimentação de 5V, 12V e 24V, tendo, em todas as situações, resultado num valor lógico 1 de saída de 5V e valor lógico 0 de 0 V. Verificou-se que, embora uma fonte de tensão de 5V fosse suficiente para alimentar o encoder, quando se utilizava os 5V do Arduino para alimentação, a onda quadrada ficava um pouco mais irregular, sendo que mais tarde se constatou que tal problema não influenciava o desempenho dos programas.

Criou-se então, um programa muito simples que apenas escreve na monitor série o valor da posição relativa quando esta muda (tendo essa posição relativa como referência, para já, e pelo facto de o encoder ser incremental, a posição em que começa quando o programa é iniciado). Inicialmente, o Arduino não executava a contagem corretamente, saltando incrementos. Para resolver esse problema, foram feitos testes usando um gerador de funções na entrada do Arduino, concluindo-se que o problema estava no facto das funções Interrupt terem demasiadas instruções.

De facto, no monitor série, quando se roda a uma velocidade superior a 3º por segundo, a contagem começa a saltar valores, não sendo possível saber se os valores não foram contados

pelo Arduino ou se simplesmente não foram impressos e mostrados no monitor série. É de notar também que, como não era possível com o material disponível ligar o encoder usado para teste e o motor, essa velocidade limite de 3° por segundo foi obtida muito grosseiramente rodando o encoder manualmente e cronometrando.

O código está disponível no anexo D, já usando a referência Z do encoder para fazer o zero da contagem do encoder.

3.11.7. Leitura do Sinal do Catavento Compact

Segundo a norma, são necessários 12 bits de resolução do sistema de aquisição de dados, logo, terá de haver um conversor A/D com essa resolução. No entanto, neste trabalho não foi utilizado, e ligou-se o catavento Compact para testar o funcionamento diretamente ao Arduino, segundo um esquema elétrico representado no anexo D, onde também se encontra o código do programa feito.

3.11.8. Teste de Movimento em Malha Fechada com Calibração do Encoder

Para se ter um movimento em malha fechada usando o encoder angular, estabeleceu-se que, em primeiro lugar, o motor mover-se-ia para a posição desejada a menos de 3 meios passos (corresponde a $0,03375^\circ$), já que, em qualquer processo de calibração em que o sistema é usado, estabeleceu-se que nunca será necessário executar um movimento menor que $0,05^\circ$. Deverão ser usados, no driver do motor, e em qualquer situação, meios passos, de forma a ter-se acelerações mais contínuas e menos bruscas, mas ter-se binário suficiente para vencer os atritos de arranque como foi referido anteriormente, havendo, portanto, melhor controlo do movimento, evitando-se, mesmo quando aparentemente possível, velocidades elevadas para dispositivos de inércia elevada. No anexo D representa-se o programa escrito para executar essa tarefa, utilizando o encoder para verificação da posição, assim como o correspondente fluxograma. Note-se que existe a possibilidade de executar um movimento que passe garantidamente na referência do encoder e em seguida igualar as posições “Univolta” e “Multivolta”. A primeira toma o valor zero sempre que passa na referência, podendo, portanto estar no intervalo $] -360^\circ ; 360^\circ [$ e a segunda não, podendo também ser maior que 360° ou menor que -360° .

3.11.9. Programação dos Processo de Calibração

Criou-se um programa que simulasse de forma simples o movimento típico de uma calibração. Como é indicado na norma IEC 61400-12-1:2017, tal pode ser realizado rodando o catavento a uma velocidade angular constante de $0,5^\circ/\text{s}$ ou rodando passo a passo (com passos menores que 3°) e parando em cada passo durante um minuto, sendo, para qualquer caso, a frequência de amostragem igual ou superior a 1Hz.

Para o primeiro caso, apenas haverá uma rampa de aceleração e outra de desaceleração, sendo que a velocidade deverá ser constante durante um varrimento de 380° (sobreposição de 20°), logo, seja o varrimento entre -190° e 190° . Isto significa que se tem no máximo 170° para acelerar e outros 170° para desacelerar, já que se estabeleceu que o sistema não rodará mais de 360° para cada sentido. Para se ter alguma margem, seja então o espaço para aceleração e desaceleração 120° em vez de 170° .

Pode-se resumir este problema da seguinte forma: para um movimento uniformemente acelerado, quer-se que ao fim de um ângulo percorrido α a velocidade seja $\dot{\alpha}$. Partindo das primeiras 2 equações de um movimento angular uniformemente acelerado, obtêm-se as 2

últimas equações, que dão o tempo t_α até se atingir essa velocidade e $\ddot{\alpha}$, a aceleração constante do sistema até se atingir essa velocidade.

$$\theta(t_\alpha) = 0.5 * \ddot{\alpha} * t_\alpha^2 = \alpha$$

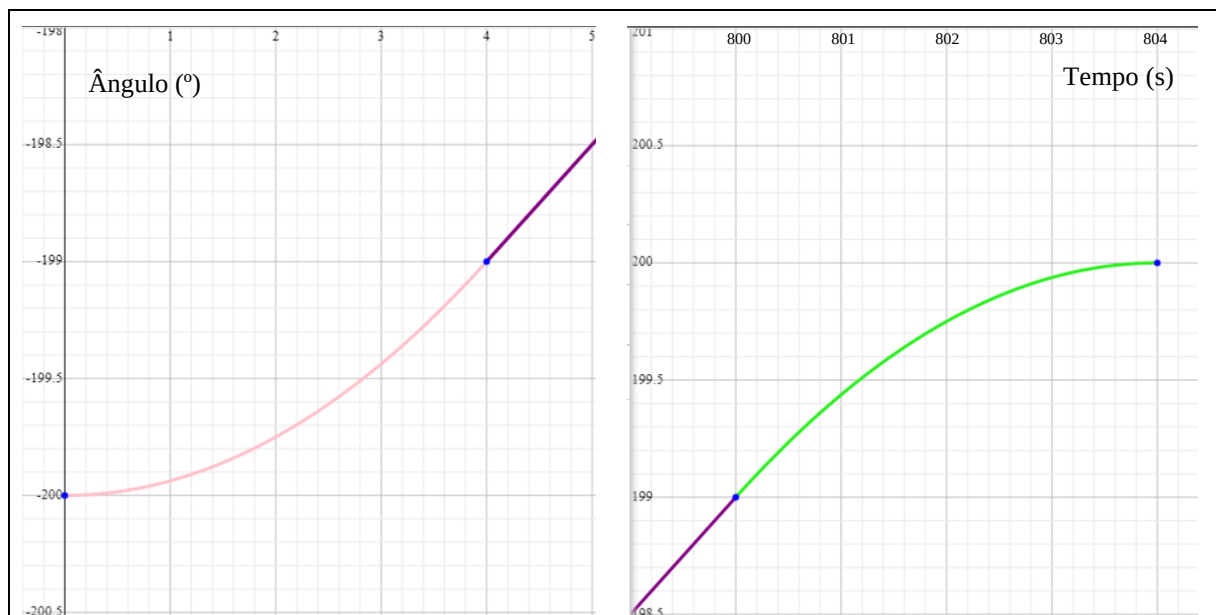
$$\dot{\theta}(t_\alpha) = \ddot{\alpha} * t_\alpha = \dot{\alpha}$$

$$t_\alpha = \frac{2\alpha}{\dot{\alpha}}$$

$$\ddot{\alpha} = \frac{(\dot{\alpha})^2}{2\alpha}$$

Para $\alpha = 120^\circ$ e $\dot{\alpha} = 0,5^\circ/\text{s}$ obtém-se $t_\alpha = 480\text{s}$ e $\ddot{\alpha} = 0,00625^\circ/\text{s}^2$. É óbvio que este tempo não é aceitável, logo, seja antes $\alpha = 1^\circ$ e $\dot{\alpha} = 0,5^\circ/\text{s}$, o que dá $t_\alpha = 4\text{s}$ e $\ddot{\alpha} = 0,125^\circ/\text{s}^2$. Como o motor terá de rodar 40 vezes mais rápido, terá de provocar uma aceleração de $5^\circ/\text{s}^2$ ou seja $0.0873\text{rad}/\text{s}^2$, que é perfeitamente aceitável.

Logo, para a calibração deste tipo, basta começar o sistema na posição -200° , acelerar até à velocidade constante de $0,5^\circ/\text{s}$, que será atingida na posição -199° , e mal o sistema passe na posição -190° , inicia-se a amostragem do sinal do dispositivo e do encoder a, por exemplo, cada meio segundo (2Hz). Ao passar na posição 190° , para-se a amostragem, inicia-se a desaceleração na posição 199° e para-se na posição 200° , terminando assim a parte ascendente da calibração (Figura 3.45), iniciando-se um processo semelhante ao anterior, mas de sentido inverso (parte descendente da calibração). Quando se para novamente, que será na posição -200° , acaba a calibração, e volta-se à posição inicial, fazendo-se em seguida a análise dos dados. O fluxograma e código para este processo está no anexo D.



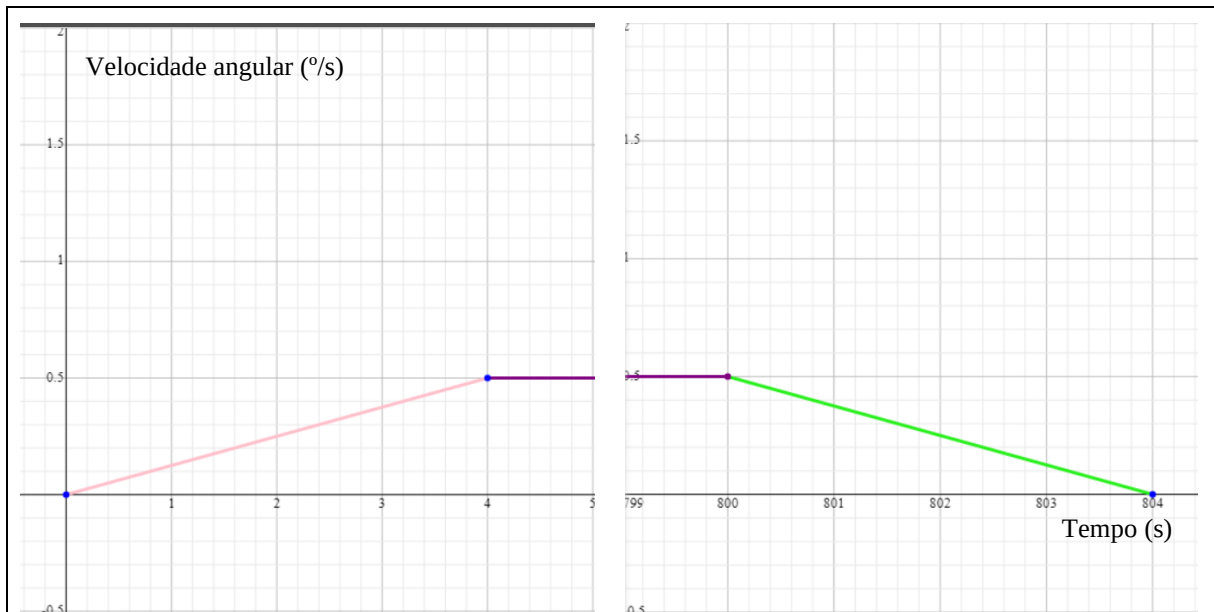
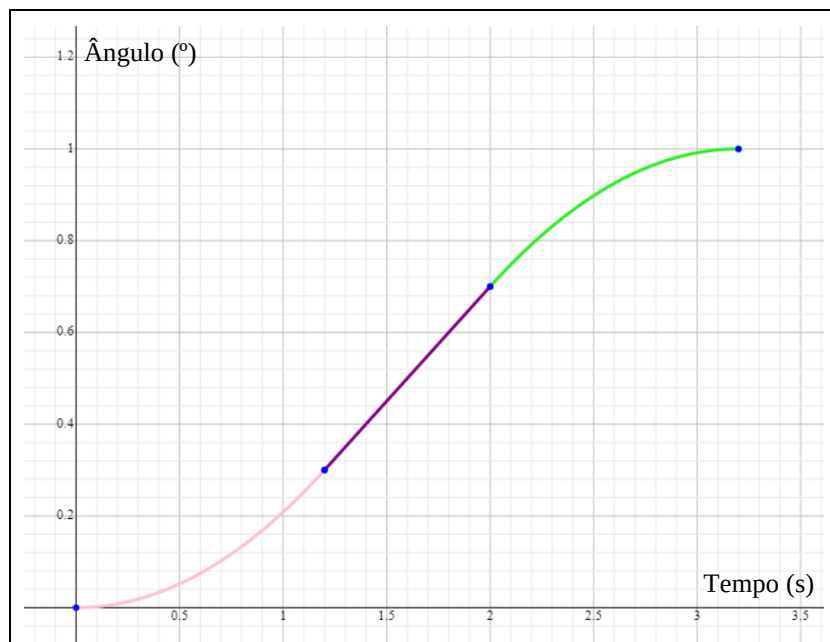


Figura 3.45 – Gráfico do ângulo (°) em função do tempo (s), em cima, e da velocidade angular (°/s) em função do tempo (s), em baixo, para a parte ascendente deste método de calibração.

Para o segundo caso, haverá uma rampa de aceleração seguida de uma de desaceleração entre cada passo (Figura 3.46). Este tipo de calibração é a mais realizada no INEGI, com um passo de 1° , ficando 1 minuto parado para amostragem, e assim sucessivamente. Logo, partindo das mesmas equações, quer-se agora um movimento, por exemplo, que atinja a velocidade desejada em $0,3^\circ$, mantenha-a durante $0,4$ e desacelere em $0,3$. Impondo $\alpha=0,3^\circ$ e $\dot{\alpha}=0,5^\circ/\text{s}$ vem $t_\alpha=1,2\text{s}$ e $\ddot{\alpha}=0,42^\circ/\text{s}^2$, que significa que o motor terá de acelerar a $16,8^\circ/\text{s}^2$, ou seja, $0,2932\text{ rad/s}^2$.



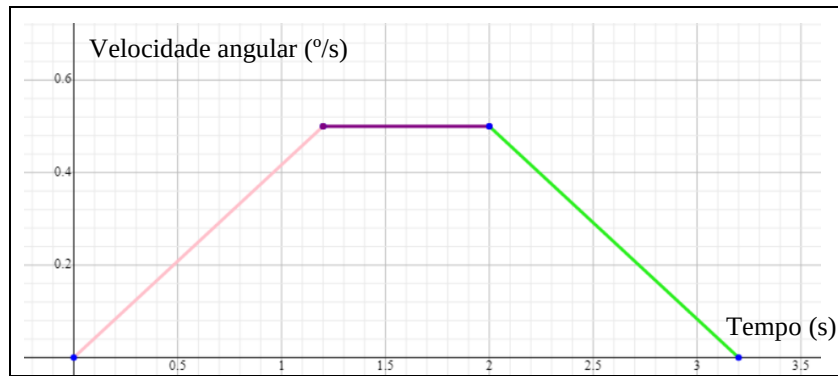


Figura 3.46 - Gráfico do ângulo ($^{\circ}$) em função do tempo (s), em cima, e da velocidade angular ($^{\circ}/s$) em função do tempo (s), em baixo, para o movimento de um passo (1°).

Logo, pode-se resumir o processo da seguinte forma: inicia-se a calibração com o sistema parado na posição -190° , retirando-se amostras durante 1 minuto. Acabado este tempo, inicia-se uma aceleração até à velocidade de $0,5^{\circ}/s$, que é atingida quando o sistema rodou $0,3^{\circ}$. Esta velocidade é mantida durante um percurso de $0,4^{\circ}$, iniciando-se uma desaceleração quando se está a $0,3^{\circ}$ da posição de amostragem seguinte. Uma vez estando o sistema parado, inicia-se novamente a amostragem durante 1 minuto, e assim sucessivamente. Isto está, novamente, disponível no anexo D.

3.12. Execução de Calibrações

Passa-se agora a explicar as etapas que se vão realizar desde o início ao fim de uma calibração.

3.13. Calibração de cataventos

Inicialmente, o catavento deve ser colocado com a marca do Norte alinhado com a direção do escoamento. Poderá utilizar-se um sistema laser vindo do chão ou do teto do túnel, que permite posicioná-lo o mais perfeitamente possível, como se vê na Figura 3.47, obtida do *Website* da WindGuard.

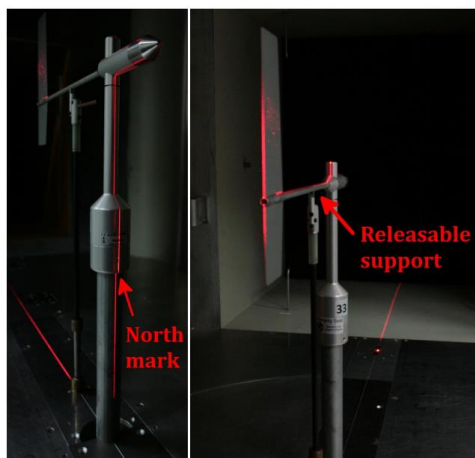


Figura 3.47 – Posicionamento utilizando um laser

Após ter-se alinhado o Norte corretamente, realiza-se a leitura do ângulo atual através do encoder e toma-se esse valor como referência (zero). Inicia-se a ventoinha do túnel e deixa-se estar à velocidade a que se vai calibrar, durante pelo menos um minuto, para remover eventuais efeitos de arrefecimento ou aquecimento por parte do escoamento que possam eventualmente afetar medições. Passado este tempo, inicia-se o programa que fará a calibração, que poderá ser a uma velocidade contínua ou passo a passo, conforme previamente explicado. No final, irão obter-se os valores medidos pelo encoder e pelo catavento para cada valor do ângulo dos instantes em que foram amostrados, podendo utilizar-se as amostras dos erros para cálculo da sua média e desvio padrão. Se a calibração tiver sido feita a uma velocidade constante em vez de passo a passo, deve-se agrupar os valores lidos em “bins” de resolução de pelo menos 10° centrados a cada 5° . Ou seja, se os erros obtidos para os ângulos amostrados em instantes consecutivos forem os das duas colunas à esquerda da Tabela 3.9, agrupa-se para o intervalo (20° a 29°), centrado em 25° , e estabelece-se que para o ângulo 25° o erro é $0,16^\circ$ (média dos erros obtidos para cada ângulo). Repete-se para os intervalos restantes até se ter completado a amplitude varrida no processo de calibração.

Pode-se resumir o processo todo de calibração de cataventos com o fluxograma da Figura 3.48 abaixo. Para o caso dos anemómetros, a única diferença é que os anemómetros não têm o leme e, portanto, não necessitam de ser alinhados no início da calibração.

Tabela 3.9 – Agrupamento dos dados em bins, de resolução 10° ou melhor e centrados a cada 5°

Ângulo	Erro	Ângulo (bin)	Erro (bin)
20°	0,1°	25°	0,16°
21°	0,2°		
22°	0,2°		
23°	0,1°		
24°	0,2°		
25°	0,1°		
26°	0,2°		
27°	0,2°		
28°	0,1°		
29°	0,2°		

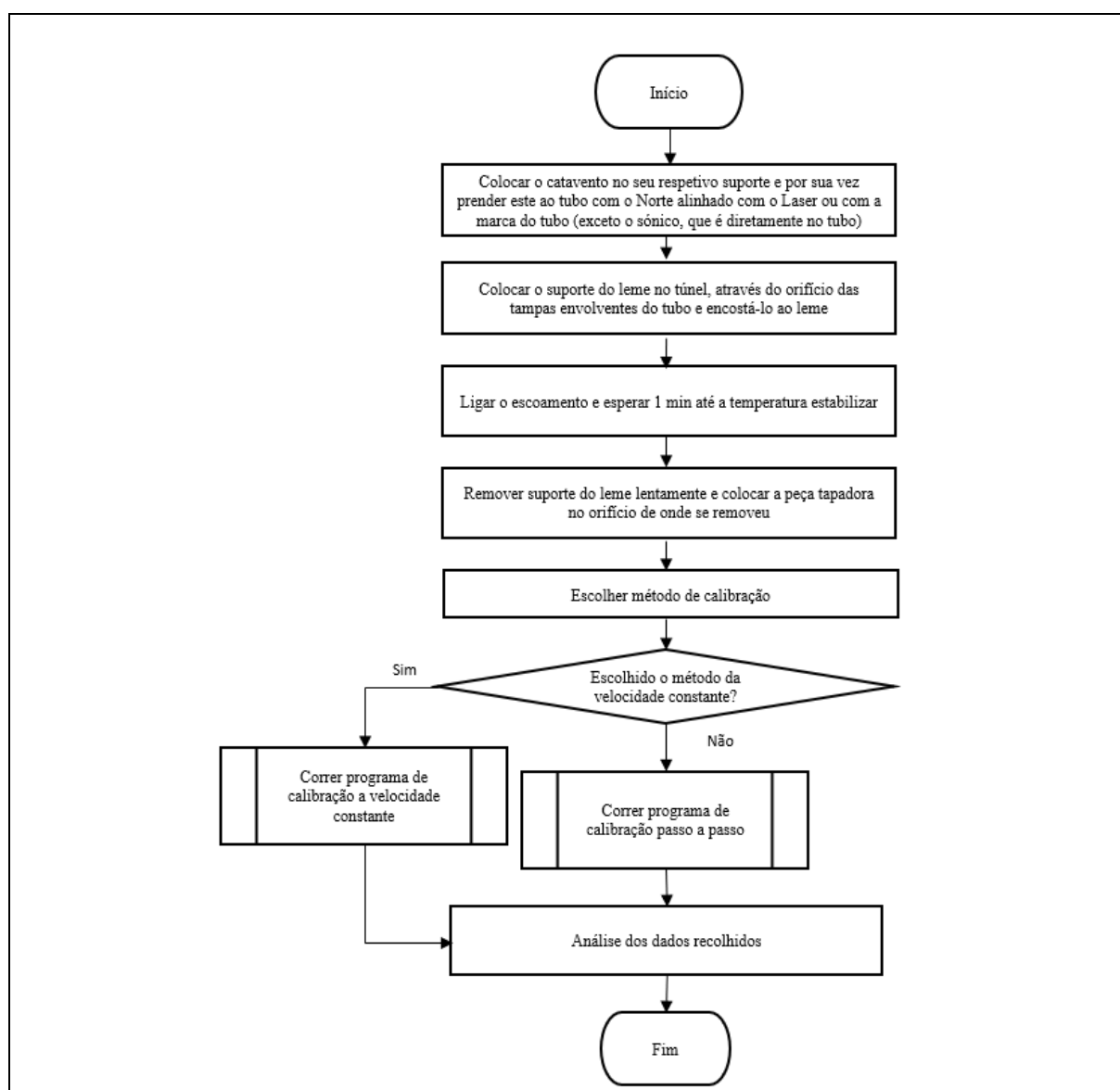


Figura 3.48 – Fluxograma do todo processo de calibração

4. Conclusão e Trabalhos Futuros

Como ainda não se dispõe dos componentes mecânicos nem da estrutura, não é possível ter conclusões concretas sobre a performance final. A estrutura deverá ser cuidadosamente montada, assim como todos os outros componentes mecânicos, para se obter a exatidão planeada. De acordo com as análises realizadas pelo método dos elementos finitos, as deformações não deverão afetar significativamente a posição do ponto de medição. Apesar disso, é, no entanto, possível apresentar diversas sugestões de tarefas e trabalhos a serem realizados futuramente, de forma a melhor compreender ou melhorar a performance de todos os sistemas.

Após este trabalho concluiu-se que para se ter uma estrutura para este tipo de aplicações de calibração com a exatidão desejada deverá ter-se especial atenção às deformações da estrutura, pois como foi analisado e apresentado no anexo A, afetam consideravelmente o posicionamento do ponto de medição se não forem corretamente dimensionadas. Quanto ao *backlash* do redutor, que corresponde exatamente ao máximo permitido pelos requisitos do projeto ($0,2^\circ$), poderá ser feito um sistema adicional através de molas que exerçam um binário constante sempre no mesmo sentido, de forma a forçar as engrenagens a estarem sempre em contacto, removendo-se assim, teoricamente, toda a folga. Caso haja possibilidade, poderia até optar-se por um sistema sem *backlash* como é o caso dos *harmonic drives*, embora seja bem mais dispendioso.

Conforme referido, será necessário executar testes para saber de que forma é que o sistema de chapa móvel (Capítulo 3.9) que isola o túnel poderá afetar negativamente o escoamento, avaliando formas de diminuir ao máximo esse efeito. Uma possibilidade é partir de uma comparação entre o resultado de uma calibração feita no sistema de dois movimentos (3.5.5) e outra feita no sistema de um só movimento (3.8).

Foi também considerada a hipótese de, no futuro, colocar uma célula de carga e modificar o sistema. Desta forma, seria possível usar o novo sistema para calibrações com medição simultânea das forças de arrasto. Seria ainda possível utilizá-lo para ensaios aerodinâmicos mais complexos que necessitem de dois movimentos de rotação para posicionamento do objeto em teste. Com a informação obtida através da célula, poderia também estimar-se a deformação da estrutura e, consequentemente, conforme mencionado anteriormente, a posição real do ponto de medição.

Quanto à programação, neste trabalho apenas se utilizou um Arduino UNO que tem um conversor A/D de 10 bits, e não 12, o que é insuficiente. É aconselhável utilizar, portanto, outro, de preferência com maior capacidade de memória e processamento, já que este tem o problema de não contar corretamente os impulsos do encoder se a velocidade for maior que $3^\circ/\text{s}$. Mais ainda se sugere a criação de uma interface no software LabVIEW, de forma que seja mais facilitado para o utilizador todo o processo de inserção de dados e parâmetros e sua monitorização, assim como as análises dos dados obtidos no final. Idealmente, após inserção dos parâmetros no programa, a única tarefa que o utilizador teria de realizar a seguir seria imprimir o relatório da calibração do modelo testado.

Outra possibilidade futura seria ainda a implementação de uma câmara que, através de um programa que tirasse proveito da visão artificial, detetasse o movimento das hélices dos modelos que as possuam (embora tais modelos não sejam neste trabalho contemplados, eles existem). Desta forma, seria possível avaliar com maior exatidão o seu comportamento e obter melhores calibrações.

Referências

Munson, B. *et al*, "Fundamentals of Fluid Mechanics." , Wiley.

APREN, "Anuário 2020", obtido de APREN:

<https://www.apren.pt/contents/documents/aprenebook2020-2.pdf>

APREN e Deloitte 2019, "Decisions that matter: The impact of renewable energy", obtido de APREN: <https://www.apren.pt/contents/documents/brochura-digital-apren.pdf>

ATSLabs, Anemometer Calibration, obtido de ATS Labs:

<https://atslab.com/calibrations/anemometer-calibration/>

ATS Labs, Wind Speed Calibration, obtido de ATS Labs:

<https://atslab.com/calibrations/wind-speed-calibration/>

CAS University of Manchester, "Sonic Anemometers", obtido de Center for Atmospheric Science: <http://www.cas.manchester.ac.uk/restools/instruments/meteorology/sonic/>

Danish Wind Industry Association, 2003, "Wind Turbines: Upwind or Downwind Machines?", obtido de Danish Wind Industry Association: <http://xn--drmmstre-64ad.dk/wp-content/wind/miller/windpower%20web/en/tour/design/updown.htm>

Deutsche WindGuard, Wind Tunnel Center, obtido de Deutsche WindGuard Web Site: <https://www.windguard.com/wind-tunnel-centre.html>

ECOTECH, "Anemometer Calibrations", obtido de ECOTECH ACOEM Group:

<https://www.ecotech.com/wp-content/uploads/2015/03/ECOTECH-Anemometer-Calibration-Services-20200420.pdf>

Endo, K. 2001, "Quick Stop", obtido de Machine Design:

<https://www.machinedesign.com/motors-drives/article/21828035/quick-stop>

ETH-Zurich 2001, "Wind Tunnel Calibration of Ultrasonic Anemometers", obtido de University of Basel Web Site.

FAULHABER, "Stepper Motor Technical Note: Microstepping Myths and Realities", obtido de FAULHABER: <https://www.faulhaber.com/en/support/technical-support/motors/tutorials/stepper-motor-tutorial-microstepping-myths-and-realities/>

Ferreira, A. P. 2020, Produção eólica em Portugal atinge novo máximo histórico a 22 de novembro. *Expresso*.

Fritz Schur Energy, "Pitch control in wind turbines", obtido de Fritz Schur Energy:

<https://www.fsenergy.com/technology/pitch-control-wind-turbines/>

General Electric, "What is wind power", obtido de General Electric Renewable Energy:

<https://www.ge.com/renewableenergy/wind-energy/what-is-wind-energy>

Plavicheanu, P. "How to Size a Motor", obtido de Hegwood Automation and Controls:

<https://hegwoodautomationandcontrols.com/news-and-resources/>

INEGI, "Aerodinâmica e Calibração", obtido de <http://www.inegi.pt/pt/servicos-laboratoriais/aerodinamica-e-calibracao/>

Lewotsky, K. 2015, "Understanding the Mysteries of Inertia Mismatch", obtido de Association for Advancing Automation: <https://www.automate.org/industry-insights/understanding-the-mysteries-of-inertia-mismatch>

- Esteban, M. Dolores *et al* 2011, "Why Offshore Wind Energy?", em "Renewable Energy", 36(2), (pp. 444-450), obtido de <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0960148110003332>
- Islam, M. R. *et al* 2013, "Progress and recent trends of wind energy technology", em "Renewable and Sustainable Energy Reviews, 21", (pp. 456-468), obtido de <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032113000312>
- Maedler North America, obtido de http://smarthost.maedler.de/datenblaetter/K42_352_EN.pdf
- Met Office, "How we measure wind", obtido de [metoffice.gov.uk](http://www.metoffice.gov.uk): <https://www.metoffice.gov.uk/weather/guides/observations/how-we-measure-wind>
- National Geographic 2009, "Wind", obtido de National Geographic: <https://www.nationalgeographic.com/science/article/wind>
- National Geographic 2009, "Wind Power Information and Facts", obtido de National Geographic: <https://www.nationalgeographic.com/environment/article/wind-power>
- National Geographic 2019, "Wind Energy", Obtido de National Geographic Society: <https://www.nationalgeographic.org/encyclopedia/wind-energy/>
- Nfaoui, H. 2012, "Wind Energy Potential", em H. Ármannsson, "Comprehensive Renewable Energy" (pp. 73-92), Elsevier, obtido de <https://www.sciencedirect.com/topics/earth-and-planetary-sciences/wind-vanes>
- Office of Energy Efficiency & Renewable Energy, "Advantages and Challenges of Wind Energy", obtido de Office of Energy Efficiency & Renewable Energy: <https://www.energy.gov/eere/wind/advantages-and-challenges-wind-energy>
- Office of Energy Efficiency & Renewable Energy, "The Inside of a Wind Turbine", obtido de Office of Energy Efficiency & Renewable Energy: <https://www.energy.gov/eere/wind/inside-wind-turbine>
- Oriental Motor, "Engineering Notes", obtido de Oriental Motor: <https://blog.orientalmotor.com/motor-sizing-basics-part-3-acceleration-torque-and-rms-torque>
- Prado, M. 2019, Produção Eólica em Portugal atingiu novo máximo histórico a 22 de novembro. *Expresso*.
- ProfEC Ventus, obtido de ProfEC Ventus: <https://profec-ventus.com/calibration-services.html>
- R+W, obtido de <https://www.rw-couplings.com>
- SOH Wind Engineering LLC, "Calibration of Anemometers and Wind Vanes", obtido de SOH Wind Engineering LLC: <http://sohwind.com/services/calibration/>
- Esteoule, T. *et al* 2019, "Improving Wind Power Forecasting through Cooperation: A Case-Study On Operating Farms", em "AAMAS '19: Proceedings of the 18th International Conference on Autonomous Agents and MultiAgent Systems" (pp. 1940-1942). Montréal: International Foundation for Autonomous Agents and Multiagent Systems, Richland, SC. Obtido de <https://dl.acm.org/doi/10.5555/3306127.3331970>
- TDK, "TMR Angle Sensors", obtido de TDK website: <https://www.micronas.tdk.com/en/products/tmr-angle-sensors>
- Tong, W. 2010, "Chapter 1 Fundamentals of Wind Energy", em W. Tong, "Wind Power Generation and Wind Turbine Design", WIT press, ISBN 978-1-84564-205-1, obtido

- de
<https://www.witpress.com/Secure/elibrary/papers/9781845642051/9781845642051001FU1.pdf>
- Trinamic, "Optimize Stepper Motors With Microstepping", obtido de
<https://www.trinamic.com/technology/motor-control-technology/microstepping/>
- University of Hawaii at Manoa. "Wind Formation", obtido de
<http://manoa.hawaii.edu/exploringourfluidearth/physical/atmospheric-effects/wind-formation>
- Westermann D. *et al* 2011, "Systematic Deviation in Anemometer Calibration due to Geometric Interference"
- Wizelius, T. 2012, "Wind Energy", em A. Sayigh, "Comprehensive Renewable Energy", Elsevier.
- Mitsuya, Y. *et al* 1998, "Damping in Vibration Transfer Through Deep-Groove Ball Bearings", em "Journal of Tribology", (pp. 413-420), Obtido de
<https://asmedigitalcollection.asme.org/tribology/article-abstract/120/3/413/436860/Damping-in-Vibration-Transfer-Through-Deep-Groove?redirectedFrom=fulltext>

Anexo A: Análises Pelo Método dos Elementos Finitos

Abaixo apresentam-se os resultados da análise das deformações pelo método dos elementos finitos que não foram mostrados anteriormente.

O segundo perfil a ser testado para possível utilização na estrutura foi o BOSCH Rexroth 60x60, sendo que, para este caso, as deformações para um encastramento conforme referido acima não estão novamente dentro dos requisitos.

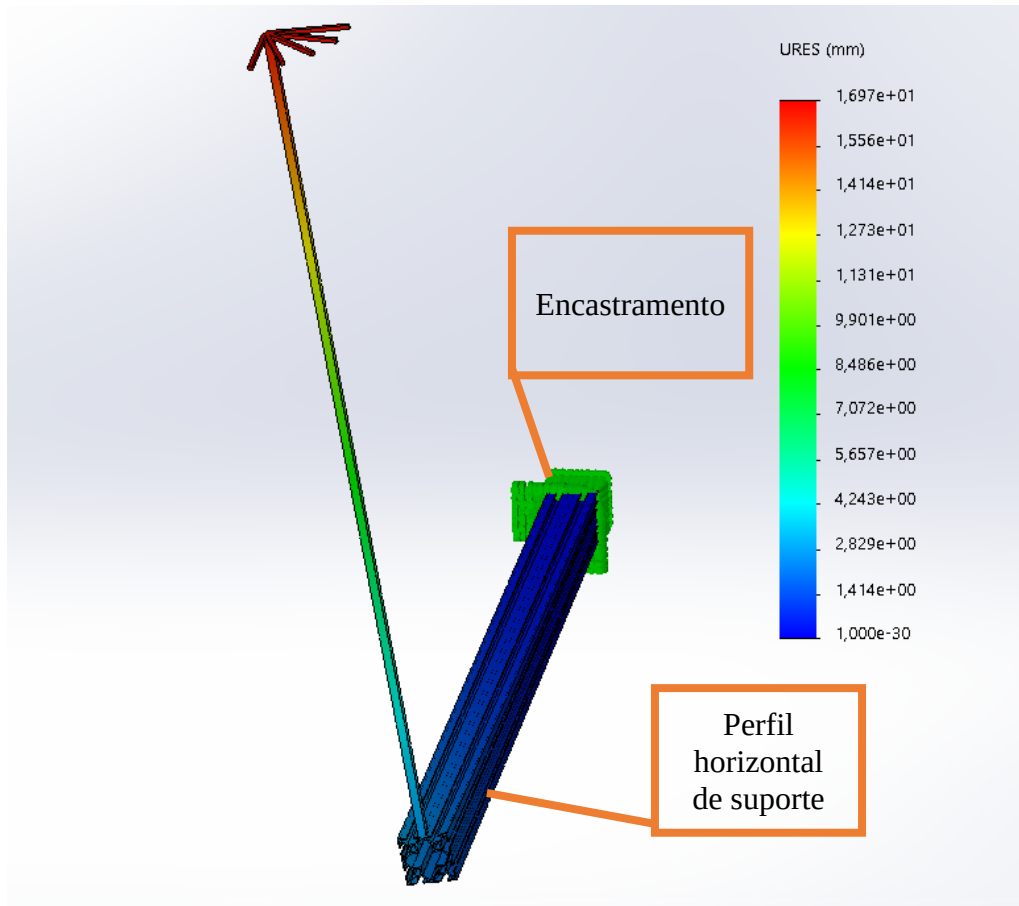


Figura A.1 – Análise dos deslocamentos totais (URES na figura) para o perfil Rexroth 60x60 pelo método dos elementos finitos. Foram utilizados 22325 elementos tetraédricos e 130755 graus de liberdade.

Anexo A: Análises Pelo Método dos Elementos Finitos

Tabela A.0.1 – Translações de cada ponto e inclinações de cada segmento

BOSCH Rexroth 60x60	
Encastramento simples	
Translações	[mm]
Ox	-2,24
Ax	-0,84
Bx	-1,09
Cx	-1,51
Dx	-2,03
Ex	-2,60
Oy	3,92
Ay	4,10
Oz	-16,11
Ez	-16,30
Inclinações	[°]
OA	0,80
OB	0,66
OC	0,42
OD	0,12
OE	-0,21

Tabela A.0.2 – Translações, rotação e inclinações no ponto de medição

Translações no ponto de medição	[mm]
em x	-2,24
em y	3,92
em z	-16,11
Rotação no ponto de medição	[°]
	-0,21
Inclinação máxima no ponto de medição	[°]
OA	0,80

Prosseguiu-se para o perfil 80x80L, obtendo-se os resultados mostrados na figura. Quase se cumprem os requisitos de inclinação, mas é possível constatar que o deslocamento em z é mais de 4 mm sendo 2 mm o limite. A inclinação máxima é de 0,24°, que é maior que 0,2° imposto. Estas duas informações demonstram que, o maior problema, é a falta de resistência à torção do perfil, já que esta é a principal responsável pelo deslocamento em z e a inclinação OA.

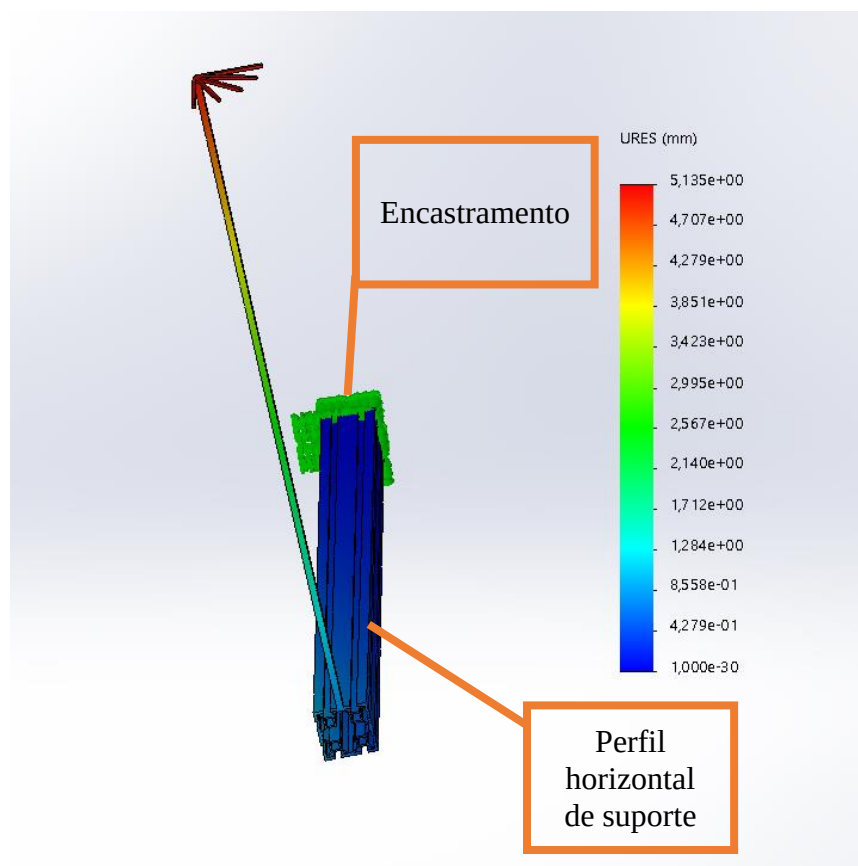


Figura A.2 – Análise dos deslocamentos totais (URES na figura) para o perfil Rexroth 80x80L pelo método dos elementos finitos. Foram utilizados 19653 elementos tetraédricos e 120987 graus de liberdade.

Tabela A.0.3 – Translações de cada ponto e inclinações de cada segmento

BOSCH Rexroth 80x80L	
Encastramento simples	
Translações	[mm]
Ox	-0,64
Ax	-0,22
Bx	-0,29
Cx	-0,41
Dx	-0,57
Ex	-0,74
Oy	1,10
Ay	1,15
Oz	-4,89
Ez	-4,95
Inclinações	[°]
OA	0,24
OB	0,20
OC	0,13
OD	0,04
OE	-0,06

Tabela A.0.4 – Translações, rotação e inclinações no ponto de medição

Translações no ponto de medição	[mm]
em x	-0,64
em y	1,10
em z	-4,89
Rotação no ponto de medição	[°]
	-0,06
Inclinação máxima no ponto de medição	[°]
OA	0,24

Mesmo para o perfil 90x90L 4N, conforme se mostra abaixo, a translação em z ultrapassa ligeiramente os 2 mm, embora os requisitos angulares sejam cumpridos.

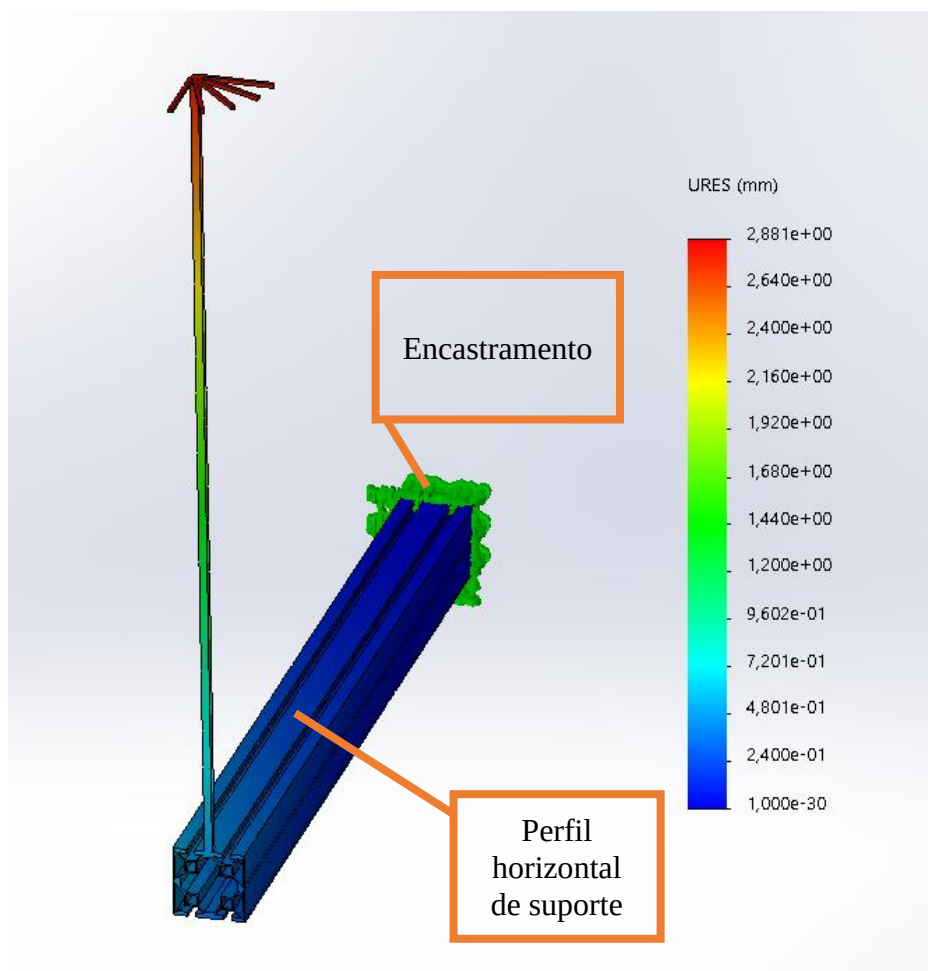


Figura A.3 – Análise dos deslocamentos totais (URES na figura) para o perfil Rexroth 90x90L 4N pelo método dos elementos finitos. Foram utilizados 23515 elementos tetraédricos e 133116 graus de liberdade.

Tabela A.0.5 – Translações de cada ponto e inclinações de cada segmento

BOSCH Rexroth 90x90L 4N	
Encastramento simples	
Translações	[mm]
Ox	-0,37
Ax	-0,14
Bx	-0,18
Cx	-0,25
Dx	-0,34
Ex	-0,43
Oy	0,64
Ay	0,68
Oz	-2,71
Ez	-2,75
Inclinações	[°]
OA	0,13
OB	0,11
OC	0,07
OD	0,02
OE	-0,03

Tabela A.0.6 – Translações, rotação e inclinações no ponto de medição

Translações no ponto de medição	[mm]
em x	-0,37
em y	0,64
em z	-2,71
Rotação no ponto de medição	[°]
	-0,05
Inclinação máxima no ponto de medição	[°]
OA	0,13

Após todos estes resultados, chegou-se à conclusão que, como só havia sobras de perfis 30x60, não faria sentido impor a utilização de apenas perfis Rexroth para a estrutura, podendo utilizar-se perfis fechados standard, mesmo que fossem em aço em vez de alumínio. Isto traz grandes vantagens, já que a rigidez específica do aço (módulo de Young a dividir pela densidade) é maior que a do alumínio, ou seja, para um perfil com as mesmas dimensões, o de alumínio é mais leve, mas, embora o de aço seja 2,8 vezes mais pesado, é 3 vezes mais resistente.

Faça-se então a análise de um perfil quadrado de aço de 90x90mm e espessura 4 mm para um encastramento simples (fase 1 do diagrama da Figura 3.10). Obtém-se o seguinte resultado, que claramente cumpre os requisitos para esta primeira fase: máximo deslocamento 2 mm, máxima inclinação 0,2° e máxima rotação 0,1°.

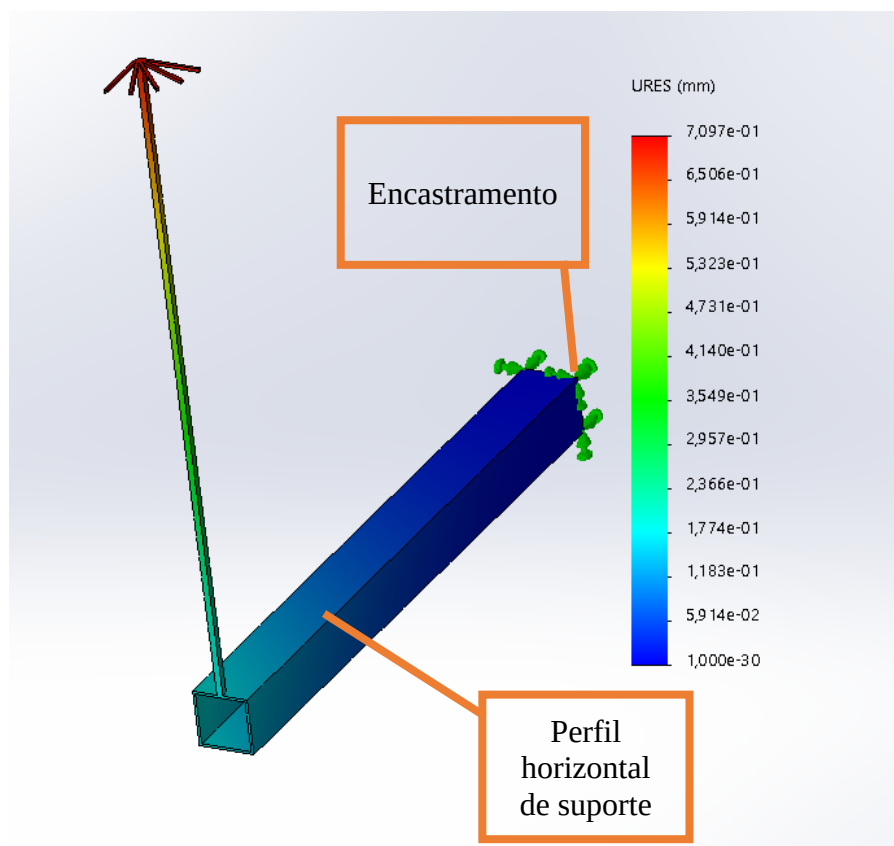


Figura A.4 – Análise dos deslocamentos totais (URES na figura) para o perfil Rexroth 90x90x4 da Chagas pelo método dos elementos finitos. Foram utilizados 8875 elementos tetraédricos e 54546 graus de liberdade.

Tabela A.0.7 – Translações de cada ponto e inclinações de cada segmento

Aço 90x90x4	
Encastramento simples	
Translações	[mm]
Ox	-0,16
Ax	-0,11
Bx	-0,12
Cx	-0,14
Dx	-0,17
Ex	-0,19
Oy	0,31
Ay	0,32
Oz	-0,60
Ez	-0,61
Inclinações	[°]
OA	0,03
OB	0,02
OC	0,01
OD	-0,01
OE	-0,02

Tabela A.0.8 – Translações, rotação e inclinações no ponto de medição

Translações no ponto de medição	[mm]
em x	-0,16
em y	0,31
em z	-0,60
Rotação no ponto de medição	[°]
	-0,01
Inclinação máxima no ponto de medição	[°]
OA	0,03

Passa-se então à fase 2; com este perfil de aço, analisa-se o comportamento de uma estrutura semelhante à final, mas sem considerar os elementos de ligação (parafusos, etc), isto é, assume-se que as peças estão perfeitamente coladas entre si.

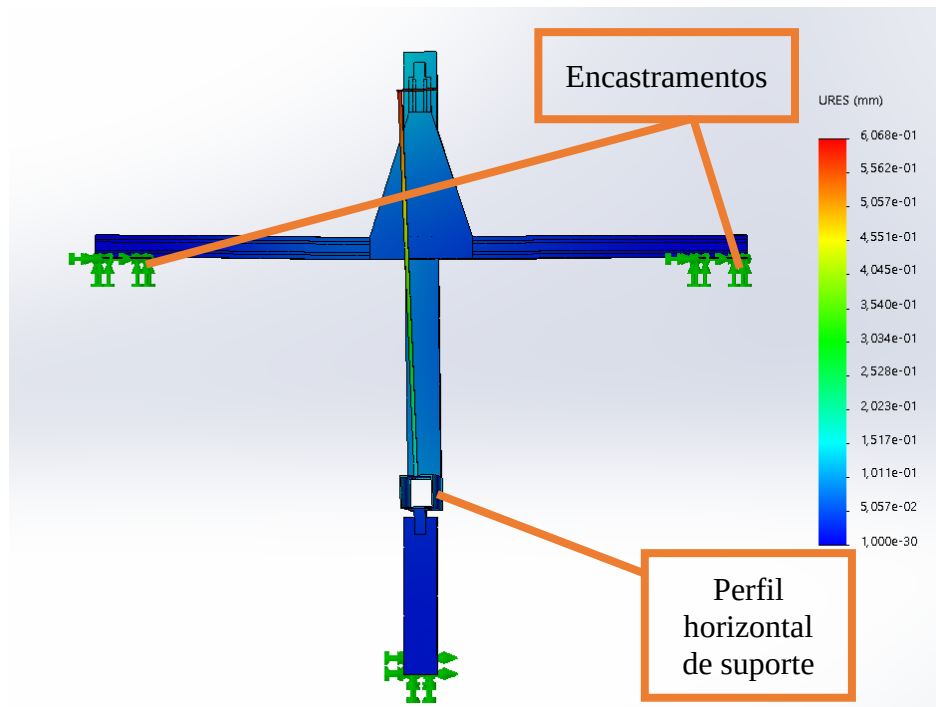


Figura A.5 – Análise dos deslocamentos totais (URES na figura) da estrutura pelo método dos elementos finitos não considerando elementos de ligação. Foram utilizados 215905 elementos tetraédricos e 1221312 graus de liberdade.

Tabela A.0.9 – Translações de cada ponto e inclinações de cada segmento

Aço 90x90x4	
Estrutura sem elementos de ligação	
Translações	[mm]
Ox	0,00
Ax	0,04
Bx	0,04
Cx	0,03
Dx	0,02
Ex	0,00
Oy	0,01
Ay	0,03
Oz	-0,58
Ez	-0,61
Inclinações	[°]
OA	0,02
OB	0,02
OC	0,02
OD	0,01
OE	0,00

Tabela A.0.10 – Translações, rotação e inclinações no ponto de medição

Translações no ponto de medição	[mm]
em x	0,00
em y	0,01
em z	-0,58
Rotação no ponto de medição	[°]
	-0,03
Inclinação máxima no ponto de medição	[°]
OA	0,02

Anexo B: Cálculos Auxiliares para a Análise em SIMULINK

Simulação do Modelo do Motor

Realizou-se uma simulação SIMULINK para avaliar o comportamento e a validade do modelo dinâmico do motor, conforme se mostra na Figura B.1. O tempo de acomodação para se atingir um valor de 95% de uma solicitação degrau foi de 50 ms, como é possível observar.

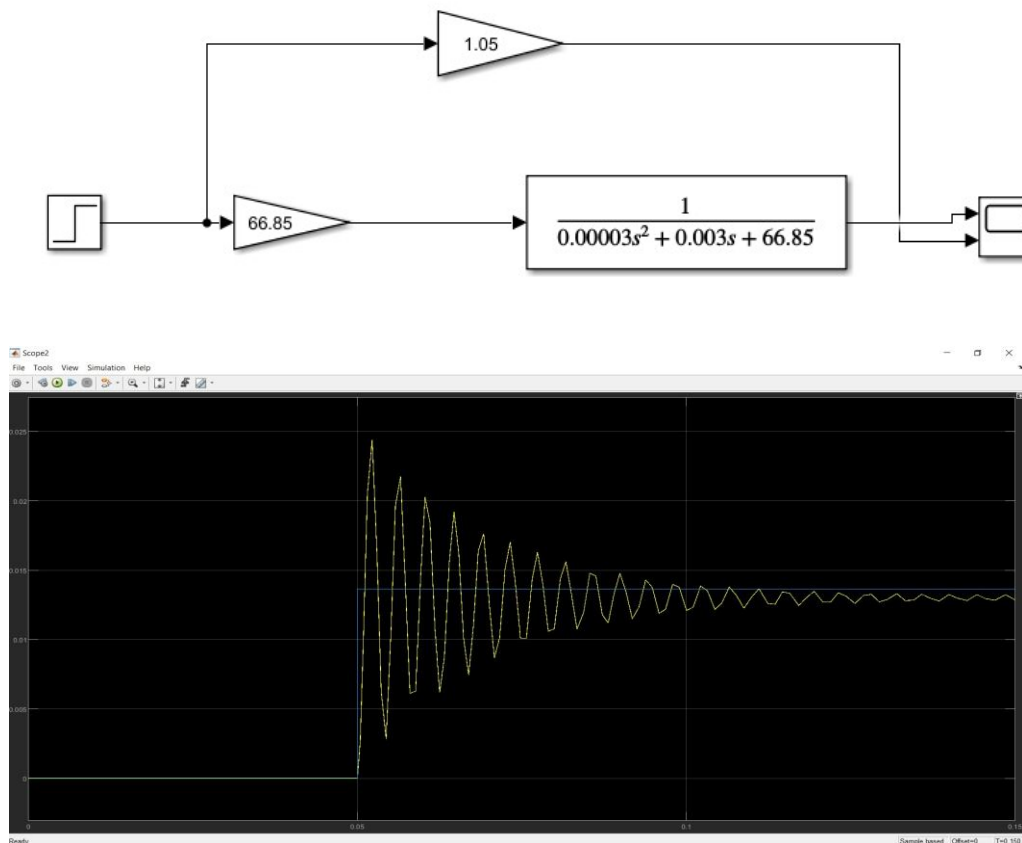
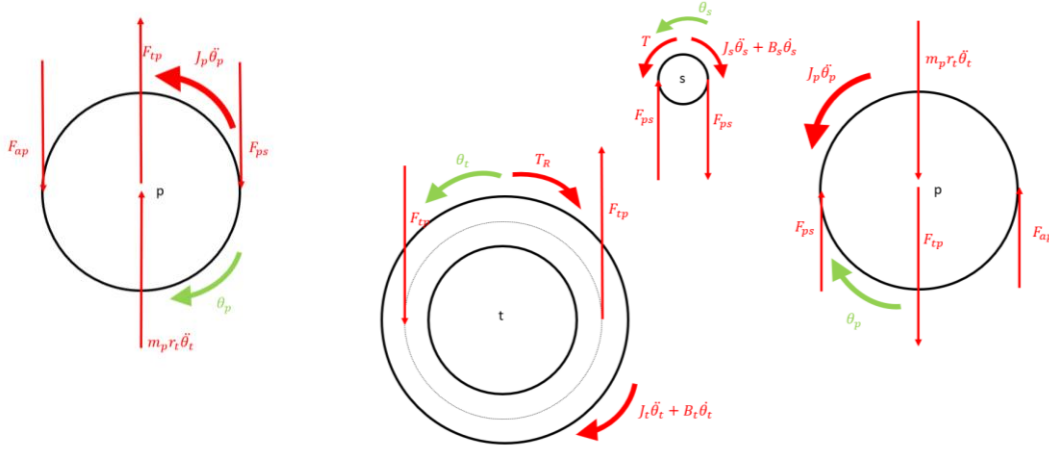


Figura B.1 – Simulação SIMULINK da resposta do motor a uma solicitação degrau. Utilizando o bloco de ganho 1,05 é fácil entender quando é que o modelo atinge uma posição a menos de 5% da pretendida

Cálculos Relacionados com o Redutor

Simplificação das equações dinâmicas



$$(J_s s^2 + B_s s) \theta_s = T - N r_s F_{ps} \quad (B.1)$$

$$\theta_p = \frac{\theta_s}{i_{ps}} \quad (B.2)$$

$$\theta_t = \frac{\theta_s}{i} \quad (B.3)$$

$$F_{ps} - F_{tp} + F_{ap} - m_p r_t s^2 \theta_t = 0 \quad (B.4)$$

$$-r_p F_{ps} + r_p F_{ap} = J_p s^2 \theta_p \quad (B.5)$$

$$N r_t F_{tp} - T_R = (J_t s^2 + B_t s) \theta_t \quad (B.6)$$

Onde:

r_s , é o raio da engrenagem sol

J_s , é o momento de inércia da engrenagem sol

B_s , é o coeficiente viscoso de amortecimento da engrenagem sol

θ_s , é o ângulo de rotação da engrenagem sol

T , é o binário aplicado na engrenagem sol (entrada)

F_{ps} , é a força exercida por uma engrenagem planeta na engrenagem sol na zona de engrenamento e vice-versa

F_{ap} , é a força exercida pelo anel dentado numa engrenagem planeta

i_{ps} , é a razão de redução entre a engrenagem sol e uma engrenagem planeta

r_p , é o raio de uma engrenagem planeta

J_p , é o momento de inércia de uma engrenagem planeta

m_p , é a massa de uma engrenagem planeta

θ_p , é o ângulo de rotação de uma engrenagem planeta

N , é o número de rodas planeta

F_{tp} , é a força exercida por uma engrenagem planeta na peça transportadora de planetas e vice-versa

r_t , é o raio da peça transportadora de planetas

J_t , é o momento de inércia da peça transportadora de planetas

B_t , é o coeficiente viscoso de amortecimento da peça transportadora de planetas

θ_t , é o ângulo de rotação da peça transportadora de planetas (saída do andar de redução)

i , é a razão de redução (entre a engrenagem sol e a peça transportadora de planetas)

T_R , é o binário resistente aplicado na peça transportadora de planetas (saída)

Juntando as equações B.4 e B.5 obtém-se a (3.21) representada novamente abaixo.

$$F_{ps} = \frac{1}{2} \left(F_{tp} + \frac{J_p}{r_p} s^2 \theta_p + m_p r_t s^2 \theta_t \right)$$

Cálculo das Dimensões e Inércias dos Componentes do Redutor

Para obter as dimensões, massas e inércias dos componentes do redutor, há que notar que, tendo dois andares e redução de 1:40, poderá ser constituído por uma redução de 1:10 seguida de uma de 1:4, ou então por uma de 1:8 seguida de uma de 1:5. Assumiu-se esta última hipótese. É possível ver no website da NANOTEC as inércias e dimensões dos redutores GPLE60-1S-8 e GPLE60-1S-5. Em seguida, basta, para cada um deles, chegar às dimensões, massas e inércias das engrenagens, partindo de diversas equações representadas abaixo: a equação (0.7), que dá a inércia total equivalente de um redutor com um andar de redução; as equações (0.8), (0.9) e (0.10), que dão a inércia das engrenagens sol, planeta e da peça transportadora de planetas (assumindo que esta última tem uma forma de anel com altura igual às engrenagens, raio exterior igual ao do anel dentado e raio interior igual ao da engrenagem sol) e as equações (3.23) e (3.24), que dão a razão de redução total e a razão de redução entre a engrenagem sol e uma engrenagem planeta.

$$J_{eq} = J_s + N \left(\frac{J_p}{i_{ps}^2} + \frac{m_p r_t^2}{i} \right) + \frac{J_t}{i^2} \quad (0.7)$$

$$J_s = \frac{\pi}{2} \rho b r_s^4 \quad (0.8)$$

$$J_p = \frac{\pi}{2} \rho b r_p^4 \quad (0.9)$$

$$J_t = \frac{\pi}{2} \rho b (r_a^2 - r_s^2)^2 \quad (0.10)$$

Onde:

J_{eq} , é o momento de inércia total equivalente do redutor com um andar de redução

r_s , é o raio da engrenagem sol

J_s , é o momento de inércia da engrenagem sol

i_{ps} , é a razão de redução entre a engrenagem sol e uma engrenagem planeta

r_p , é o raio de uma engrenagem planeta

J_p , é o momento de inércia de uma engrenagem planeta

m_p , é a massa de uma engrenagem planeta

N , é o número de rodas planeta

r_a , é o raio do anel dentado, que é igual a $r_s + 2r_p$

J_p , é o momento de inércia da peça transportadora de planetas

i , é a razão de redução (entre a engrenagem sol e a peça transportadora de planetas)

ρ , é a densidade do material das engrenagens. Assumiu-se que é um aço de 8050 kg/m³

b , é a espessura das engrenagens

Sabe-se ainda que o diâmetro exterior do redutor é dado e conhecido (60 mm), e, assumindo que o exterior do redutor é o anel dentado onde engrenam os planetas, conforma a figura, assume-se que tem de ter uma espessura de 3 mm, de onde resulta a condição descrita na equação (0.11).

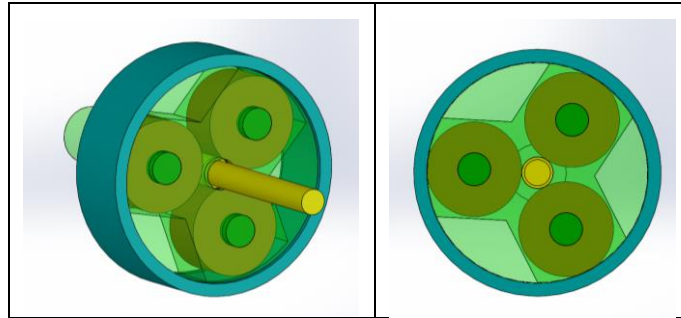


Figura B.2 – Modelo simples de um redutor planetário de 3 planetas

$$r_a \leq 27 \text{ mm} \quad (0.11)$$

Obteve-se os resultados mostrados na Tabela B.0.1.

Tabela B.0.1 – Dimensões, massas e inércias dos componentes de cada andar de redução, para utilizar no diagrama de blocos

1º andar 1:8					
Sol		Planeta		Anel dentado	
r_{s1}	3,84 mm	r_{p1}	11,52 mm	r_{a1}	26,88 mm
J_{s1}	0,0412 kgmm ²	J_{p1}	3,341 kgmm ²	Transportador de planetas	
		m_{p1}	0,05 kg	J_{t1}	114,02 kgmm ²
2º andar 1:5					
Sol		Planeta		Anel dentado	
r_{s2}	5,7 mm	r_{p2}	8,55 mm	r_{a2}	22,8 mm
J_{s2}	0,2536 kgmm ²	J_{p2}	1,284 kgmm ²	Transportador de planetas	
		m_{p2}	0,035 kg	J_{t2}	68,48 kgmm ²

Com base no obtido, os diagramas em SIMULINK para os andares de redução estão representados nas páginas a seguir. Ao utilizar blocos de derivação ocorreram erros, logo, utilizou-se blocos PID com os parâmetros indicados abaixo, que seriam equivalentes.

Anexo B: Cálculos Auxiliares para a Análise em SIMULINK

Block Parameters: PID Controller7

☒ Continuous-time
☐ Discrete-time

Sample time (-1 for inherited): -1

▼ Compensator formula

$$P + I \frac{1}{s} + D \frac{N}{1 + N \frac{1}{s}}$$

Main Initialization Output Saturation Data Types State Attributes

Controller parameters

Source: internal

Proportional (P): 0

Integral (I): 0

Derivative (D): 1

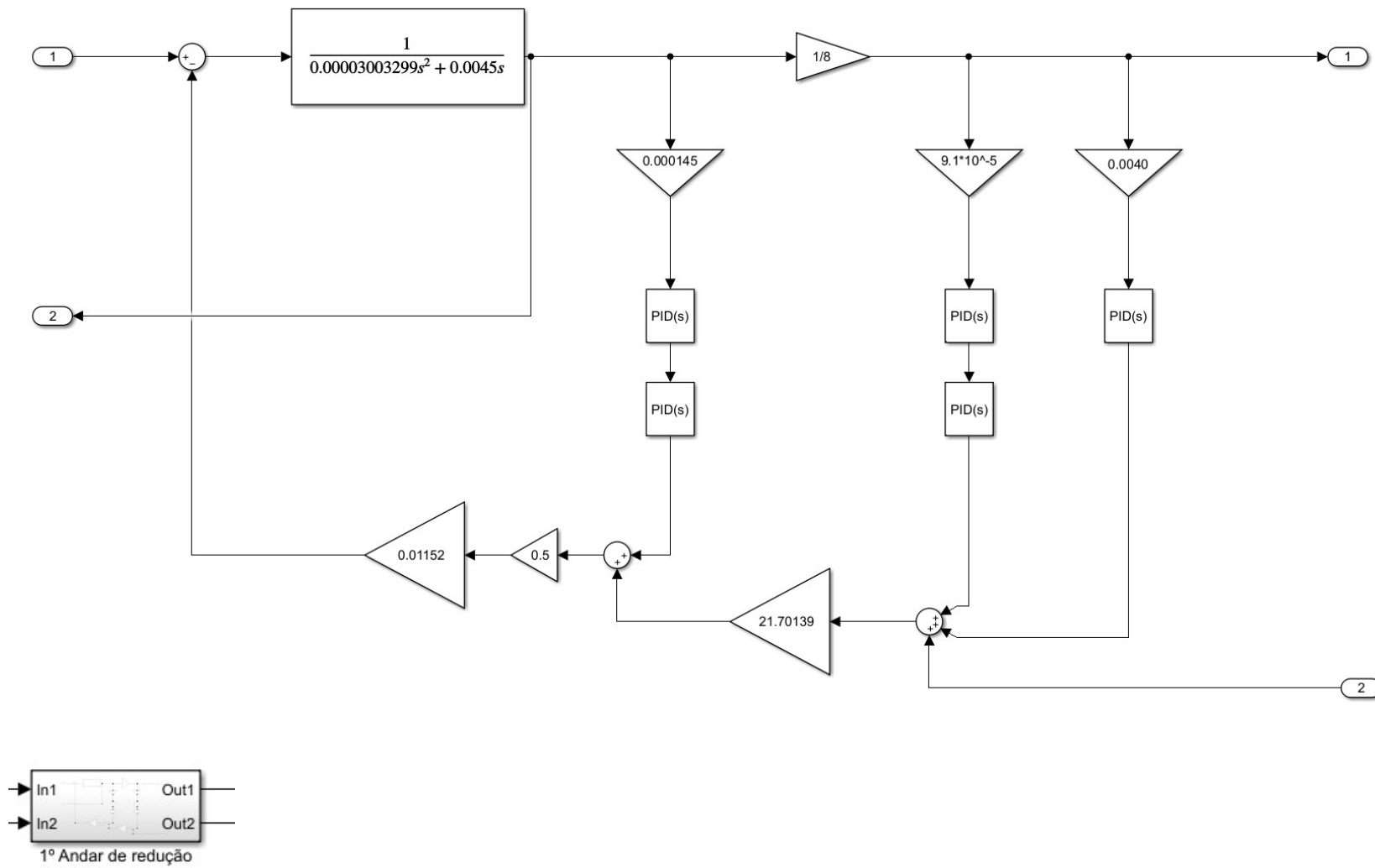
☒ Use filtered derivative

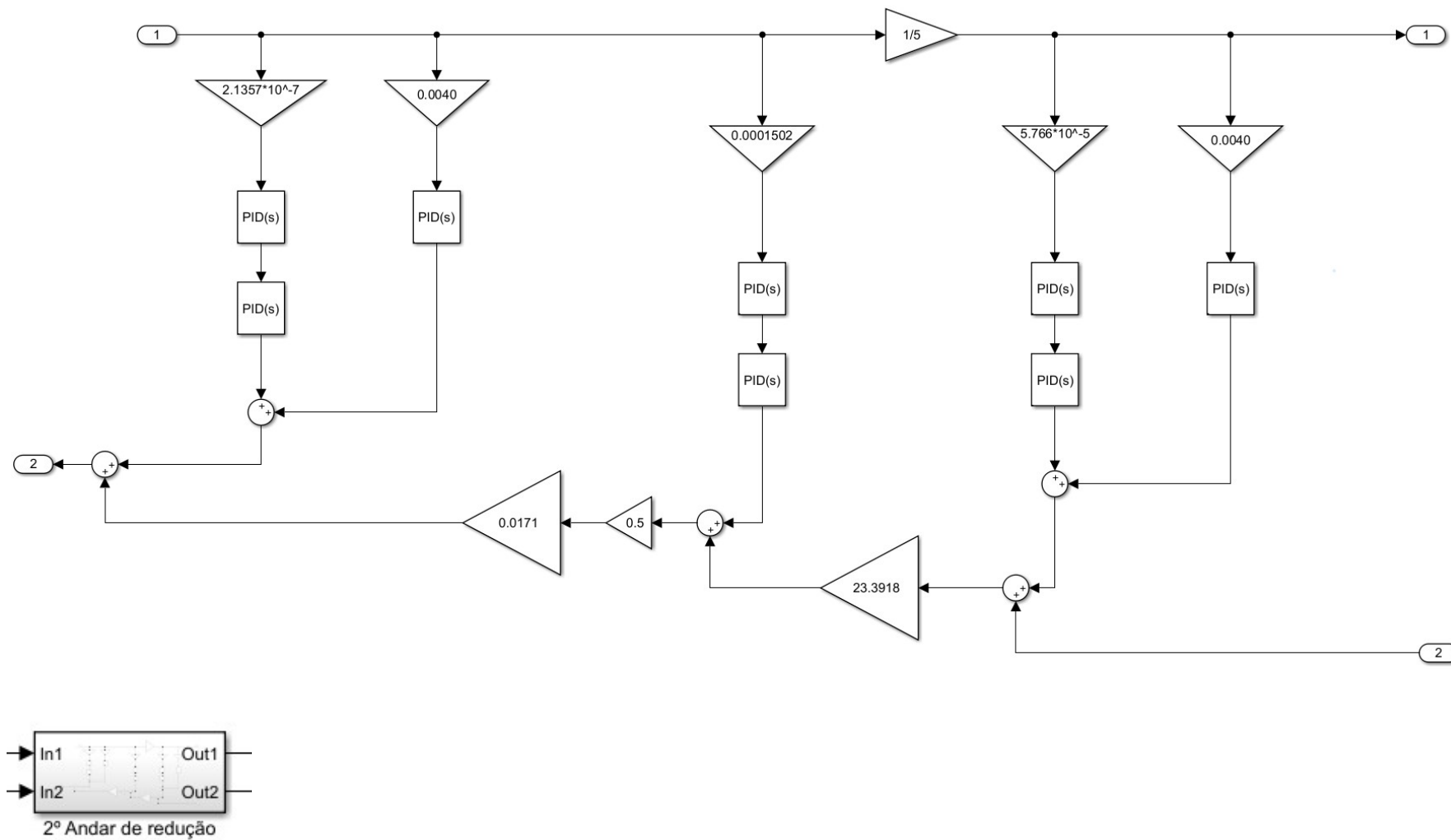
Filter coefficient (N): 10000

Automated tuning

Select tuning method: Transfer Function Based (PID Tuner App) Tune...

☒ Enable zero-crossing detection





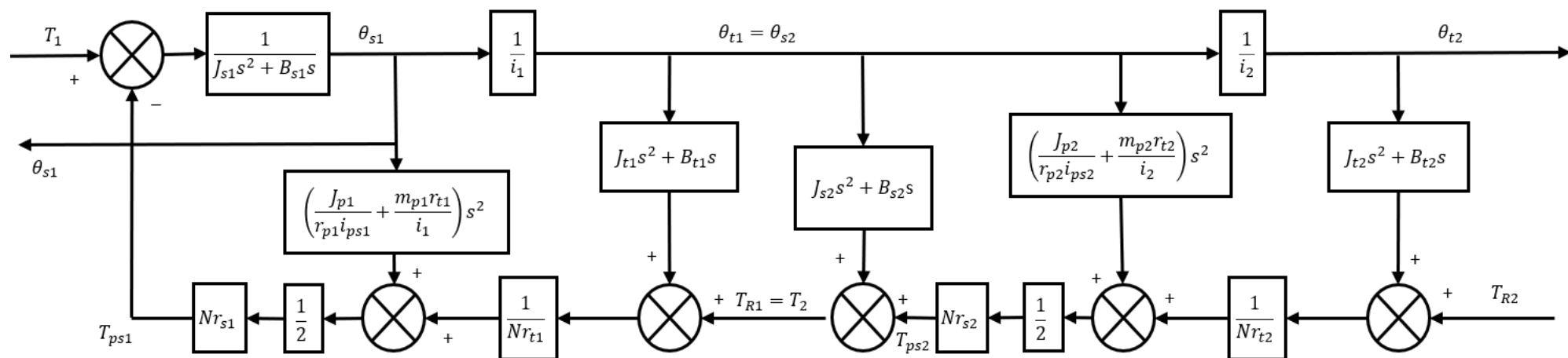
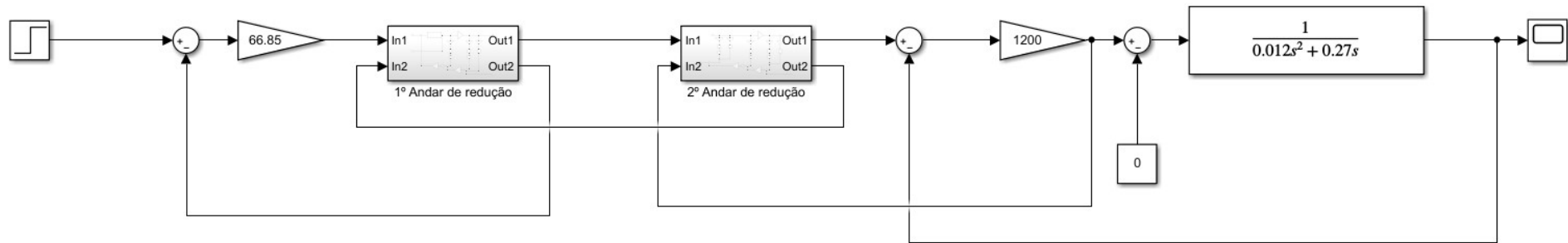


Diagrama SIMULINK Final



Anexo C: Peças e Detalhes Construtivos

Chapa Móvel

A estrutura de isolamento do túnel move-se da forma indicada abaixo na Figura C.1.

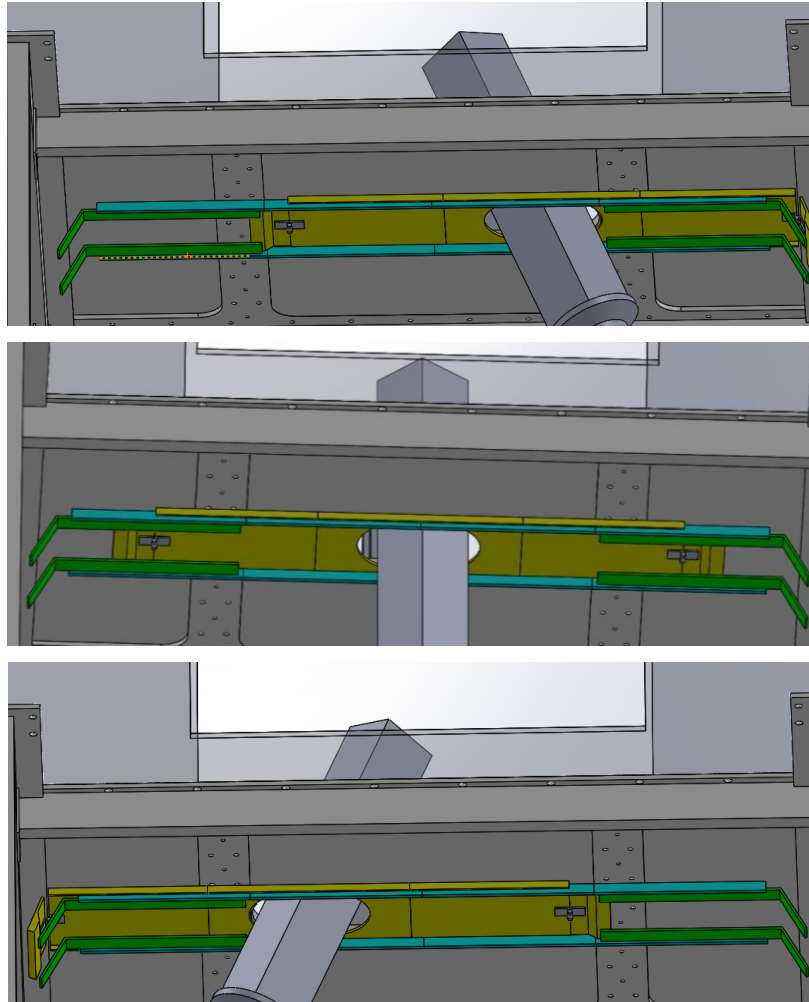


Figura C.1 – Movimento do sistema de chapa móvel para isolamento do túnel

Suportes Cataventos

O suporte (azul) prende da mesma forma que o do modelo First Class à peça soldada ao tubo (vermelho), mas possui uma rosca PG21, como mostra a Figura C.2. Desta forma, rosca-se o modelo ao suporte procurando que fique com uma orientação próxima da desejada: com o perno central alinhado com o Norte do suporte. Em seguida monta-se o suporte de forma que o Norte fique corretamente alinhado com a linha central do túnel.

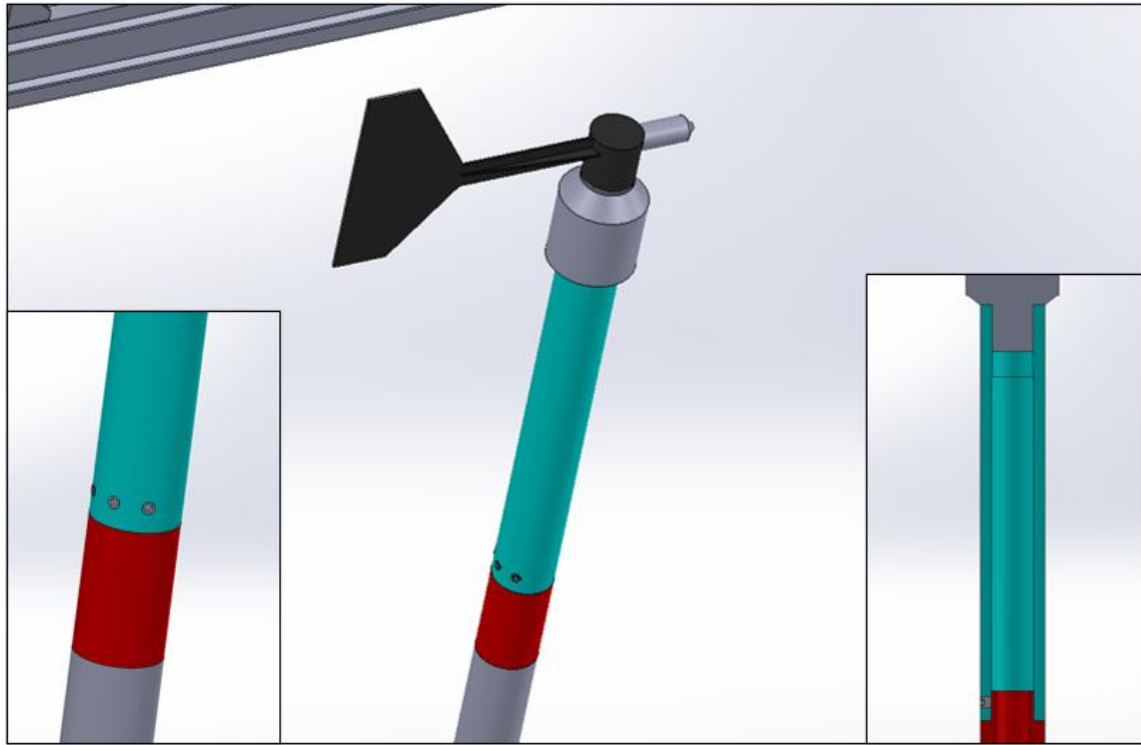


Figura C.2 – Suporte do modelo Compact montado

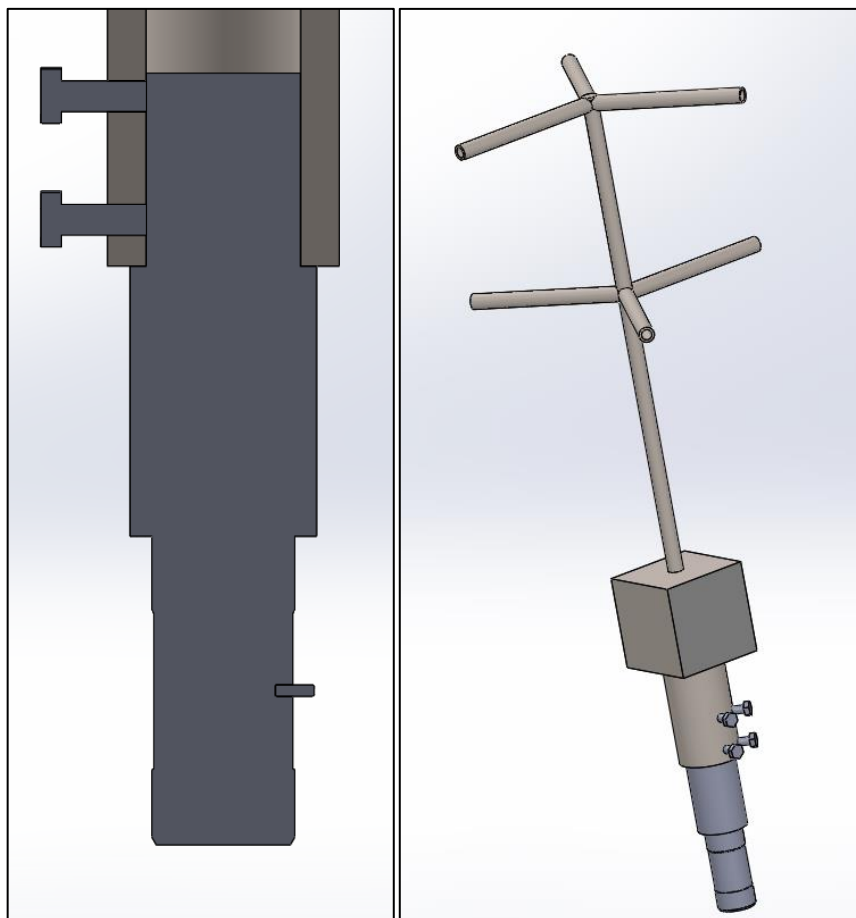


Figura C.3 – O modelo uSonic-3 Scientific deverá ser montado num tubo de suporte diferente, feito a partir de um varão maciço torneado, apertando através de parafusos conforme se mostra. Este por sua vez encaixa no veio de transmissão através da abraçadeira, tal como os tubos de suporte dos outros modelos referidos.

Anexo D: Programas para o Arduino

Funções comuns e importantes

É importante notar que existem linhas de código comuns a todos os programas feitos, linhas estas responsáveis pelo bom funcionamento entre o Arduino e o driver Tic, que vêm quase todas incluídas na biblioteca, e que não serão representadas nas figuras dos programas seguintes para se evitar repetir linhas de código iguais neste documento. Em primeiro lugar, é necessário escrever no programa que se quer incluir as bibliotecas Tic. Em seguida, é também necessário incluir as bibliotecas de comunicação série assíncrona TTL, pois é desta forma que se torna possível enviar e receber informação do Arduino para a placa Tic e vice-versa, indicando quais os pinos do Arduino que são usados para enviar e receber informação respetivamente.

Existe também uma função do tipo void que se deve criar, que irá reiniciar o temporizador de erro de falta de tempo (Command Timeout), que acontece sempre que a placa Tic não recebe comandos por mais de 1 segundo. É possível perceber que isto será um problema, logo, será interessante criar esta função para que possa ser chamada várias vezes, nomeadamente por outras funções como se verá abaixo.

Uma outra função que usa a anterior, é a função de delay mas com uma particularidade. Como referido acima, ao usar simplesmente a função delay, caso este seja mais que 1000 ms (1s), irá ocorrer um erro de command timeout. Logo, é necessário criar uma função que faça um delay escolhido, mas sem causar esse problema. Isto é feito da forma representada abaixo na mesma figura.

Finalmente, torna-se necessário criar uma função que, dada uma posição que se pretende atingir, espere que esta seja atingida tendo em conta os problemas anteriores. Isto pode ser conseguido como se vê abaixo.

```

//Incluir bibliotecas Tic
#include <Tic.h>

//Se houver uma porta de comunicação série usá-la e seja ticSerialPort=SERIAL_PORT_HARDWARE_OPEN

/*#ifdef SERIAL_PORT_HARDWARE_OPEN
    #define ticSerialPort SERIAL_PORT_HARDWARE_OPEN
#else */

//Se não houver, como é o caso do UNO,
//Incluir bibliotecas de comunicação série TTL (assíncrona).
//Para a comunicação usar o pino 10 para receber e 11 para transmitir

#include <SoftwareSerial.h>
SoftwareSerial ticSerialPort(10,11);

//#endif

//Declara-se ao Arduino que existe um controlador tic que vai usar a comunicação
//conforme definida pelo objeto ticSerialPort, ou seja, usando RX 10 e TX 11, para comandar a placa tic
//Como só há um controlador (placa tic), para um motor, não é necessário por o device number no 2º argumento.
//A isto chama-se "compact protocol"
TicSerial tic(ticSerialPort);

```

```
//Cria-se uma função que recomeça o temporizador de erro de falta de comando.  
//Quando não há comandos para a placa tic por mais de 1s (1000ms) dá-se um erro.  
//A função abaixo deve portanto ser chamada no mínimo 1 vez por segundo  
void resetCommandTimeout()  
{  
    tic.resetCommandTimeout();  
}  
  
//Se se usasse a função delay, poderia haver um erro de timeout.  
//Assim, esta função faz um delay enquanto vai fazendo reset ao temporizador de erro timeout  
void delayWhileResettingCommandTimeout(uint32_t delayTime)  
{  
    uint32_t startTime=millis();  
    do  
    {  
        resetCommandTimeout();  
    }  
    while ((uint32_t) (millis() -startTime) <=delayTime);  
}
```

```
//Esta função espera que se atinja a posição desejada e entretanto vai evitando
//o erro de timeout da mesma forma que na função anterior

void waitForPosition(uint32_t targetPosition)
{
    do
    {
        resetCommandTimeout();
    }
    while((tic.getCurrentPosition() != targetPosition)) ;
}
```

Movimento em Malha Aberta Com Escolha de Aceleração e Velocidade

```

float angFinal=0;
float velocMax=0;
float acelMax=0;

//-----
void setup() {

  Serial.setTimeout(10*86400*1000);
  //A porta série assume que se inseriu um zero se tiver passado mais de 1 segundo sem inputs
  //Assim, muda-se o tempo de Timeout para uma valor elevado para isto não ser um problema

  Serial.begin(9600);
  //Na comunicação assíncrona, tem de se definir a velocidade de transmissão (baud rate)
  ticSerialPort.begin(9600);

  //Dá-se à placa tic tempo para iniciar
  delay(200);

  //Põe-se a posição da placa tic a 0, assim, quando mais tarde se comandar o movimento,
  //sabe-se o ponto de partida
  tic.haltAndSetPosition(0);

  //Sai-se do modo safe start da placa tic, que impede movimentos acidentais indesejados
  tic.exitSafeStart();

  tic.setStepMode(TicStepMode::Microstep2); // Muda-se o modo de controlo do Driver para
  tic.setDecayMode(TicDecayMode::Mixed50); // microstepping, dizendo que se pretende que
                                           // o motor seja movido "meio passo" de cada vez,
                                           // em vez do normal "passo "inteiro" de cada vez.
}

```

```
//-----
void loop() {

  Serial.println("posição atual");           // Dá a posição atual em graus
  Serial.print(tic.getCurrentPosition()*0.45);
  //Dá a posição atual em graus
  Serial.println(" graus");

  Serial.println("Insira a posição desejada em graus.");
  do {

    } while(!Serial.available()); // Espera que se insira um valor para a posição
                                // e mostra-se o valor escolhido
  angFinal=Serial.parseFloat();
  Serial.println(angFinal);
  Serial.println();

  Serial.println("Insira a aceleração máxima desejada em graus/s^2.");
  do {

    } while(!Serial.available()); // Espera que se insira um valor para a aceleração
  acelMax=Serial.parseFloat();      // e mostra-se o valor escolhido
  Serial.println(acelMax);
  Serial.println();
  tic.setMaxAccel(40*acelMax*100/0.45); // Manda o Driver limitar a aceleração para
  tic.setMaxDecel(40*acelMax*100/0.45); // o valor escolhido
}
```

```

Serial.println("Insira a velocidade máxima desejada em graus/s.");
do {

    } while(!Serial.available()); // Espera que se insira um valor para a velocidade
velocMax=Serial.parseFloat();    // e mostra-se o valor escolhido
Serial.println(velocMax);
Serial.println();
tic.setMaxSpeed(40*velocMax*10000/0.45); // Manda o Driver limitar a aceleração para
                                         // o valor escolhido

tic.setTargetPosition(round(40*angFinal/0.45)); // Manda-se o Driver rodar o motor
waitForPosition(round(40*angFinal/0.45));      // até à posição escolhida e espera-se
                                              // que esta seja atingida.

Serial.println("-----");
}

```

Teste do Funcionamento do Encoder

```
//variável que contará os incrementos do encoder
float counter=0;
float counterLast=0;
float angenc=0;

void setup() {
    Serial.begin(9600);
    pinMode(2, INPUT);
    pinMode(3, INPUT);

    /*Os pinos 2 e 3 respetivamente, serão utilizados para as interrupções de software.
    Estas são iniciadas quando se deteta uma transição ascendente no respetivo pino,
    sendo o Pino 2 correspondente à fase A do encoder e o 3 à fase B
    Fase A: fio branco
    Fase B: fio rosa
    Fase Z: fio violeta
    Power: fio vermelho
    GND: fio azul*/

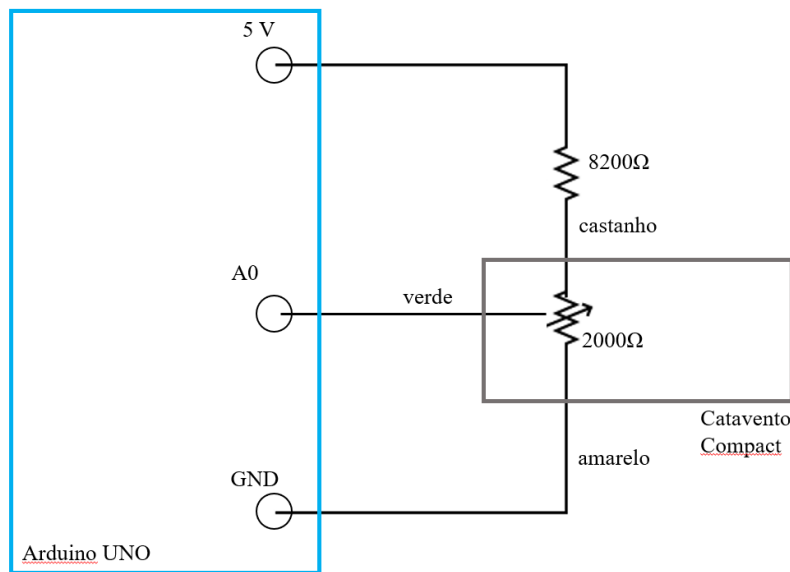
    attachInterrupt(digitalPinToInterrupt(2), incA, CHANGE);
    attachInterrupt(digitalPinToInterrupt(3), incB, CHANGE);
```

```
void incA() {  
  if(digitalRead(2)==HIGH) {  
    if (digitalRead(3)==LOW) {  
      counter++;  
    }else{  
      counter--;  
    }  
  }else{  
    if (digitalRead(3)==HIGH) {  
      counter++;  
    }else{  
      counter--;  
    }  
  }  
  if(digitalRead(4)==HIGH) {  
    counter=0;  
  }  
}
```

```
void incB() {
  if(digitalRead(3)==HIGH) {
    if (digitalRead(2)==HIGH) {
      counter++;
    }else{
      counter--;
    }
  }else{
    if (digitalRead(2)==LOW) {
      counter++;
    }else{
      counter--;
    }
  }
  if(digitalRead(4)==HIGH) {
    counter=0;
  }
}

void loop() {
  /*Se o contador tiver um valor diferente do anterior, então mostrar na porta série.
  Caso contrário, não há necessidade de mostrar milhares de linhas com o mesmo valor
  quando o encoder está parado*/
  if(counter!=counterLast){
    Serial.println(counter);
    counterLast=counter;
  }
}
```

Leitura do Sinal do Catavento Compact



```

int val=0;
int lastval=0;

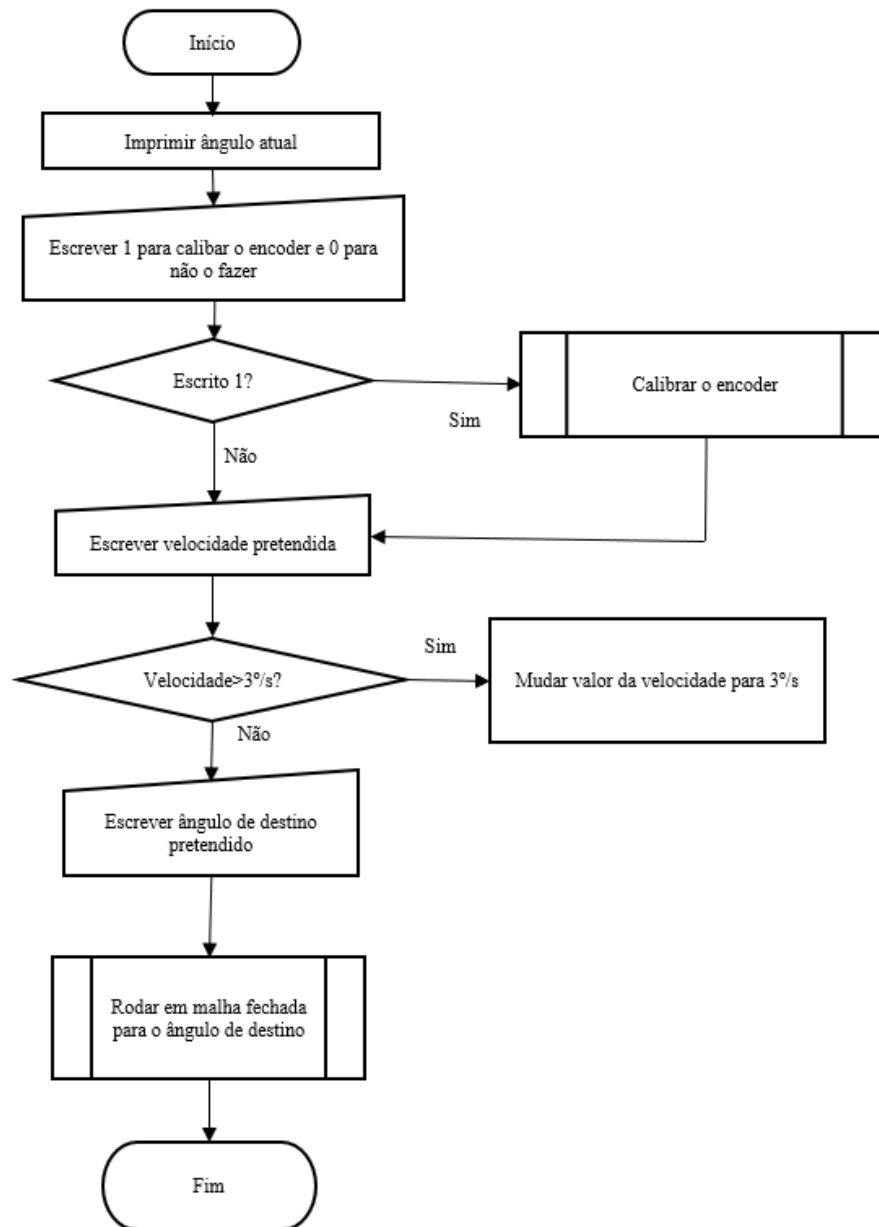
void setup() {
  pinMode(A0, INPUT);
  Serial.begin(9600);
  analogReference(INTERNAL);
}

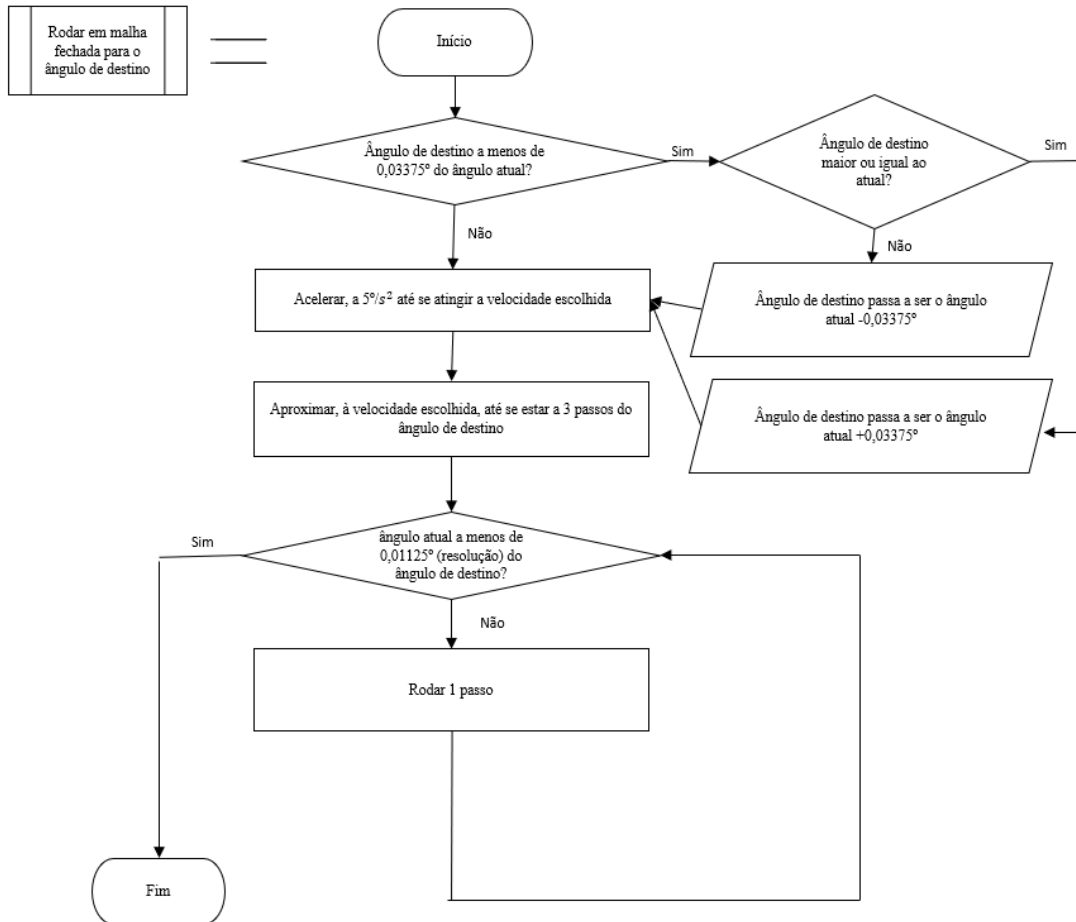
void loop() {
  val=0.385*analogRead(A0);
  //if(val!=lastval){
  Serial.println(val);
  //}
  lastval=val;
  delay(500);
}

```

Figura 0.1 – programa para leitura do sinal do catavento Compact

Movimento em Malha Fechada com Calibração do Encoder





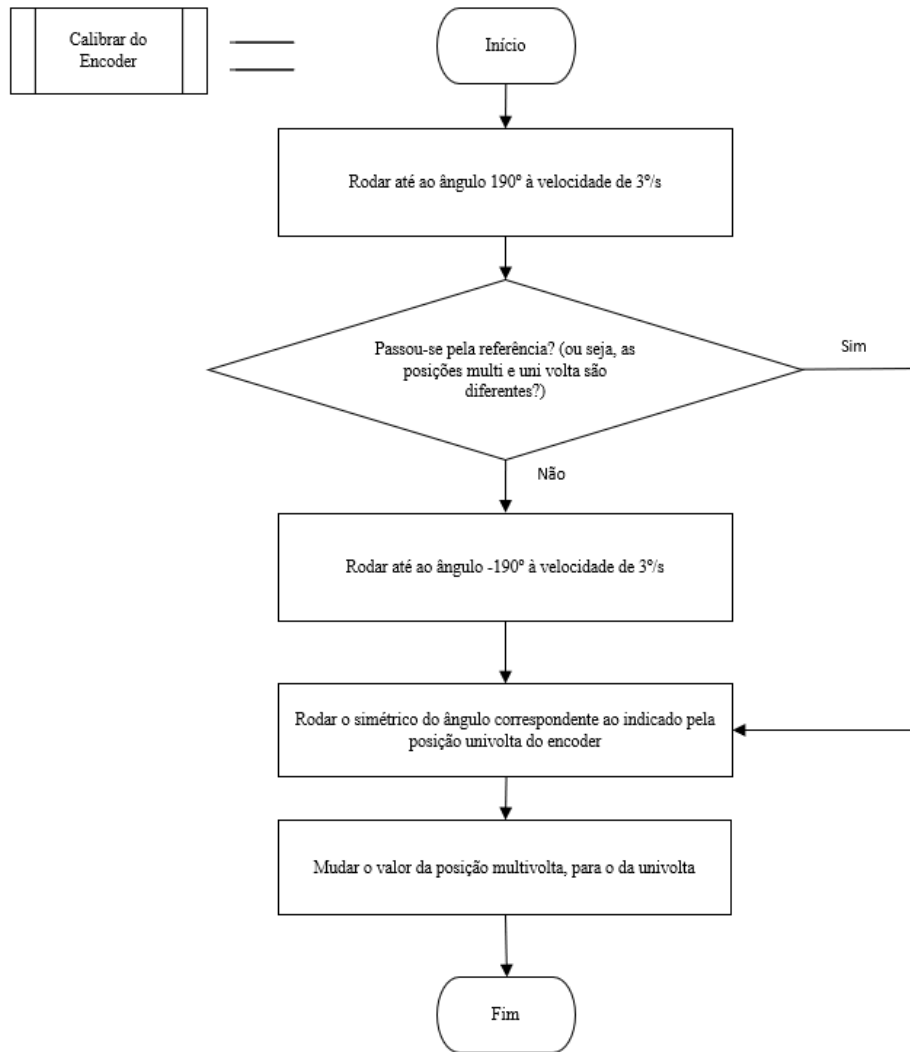


Figura D.0.2 – Fluxograma do movimento em malha fechada com calibração do encoder

```
float angEsc=0;    // O ângulo escolhido como posição de destino
float angmotpEsc=0; // Os passos que o motor terá de percorrer para lá chegar
float velocMax=0;  // A velocidade máxima escolhida
float acelMax=0.42; // A aceleração máxima

//variáveis que contarão os incrementos do encoder
float posEncMultiVolta=0; //posição do encoder, em incrementos, podendo corresponder a um
                        // ângulo maior que 360° ou menor que -360°

float posEncUniVolta=0; // Posição do encoder, em incrementos convertida para estar no
                        // intervalo ]-360°;360°[

float posDesvioZero=0; // Posição em que o encoder se encontra depois de passar na referência
                        // no seu processo de calibração ("zerar" encoder)

bool zerarEnc=0;      //Variável auxiliar para iniciar calibração do encoder
```

```
//-----
void setup() {
  Serial.setTimeout(10*86400*1000);
  //A porta série assume que se inseriu um zero se tiver passado mais de 1 segundo sem inputs.
  //Assim, muda-se o tempo de Timeout para uma valor elevado para isto não ser um problema

  Serial.begin(9600);
  pinMode(2, INPUT);
  pinMode(3, INPUT);
  pinMode(4, INPUT);

  ticSerialPort.begin(9600);    // Na comunicação assíncrona, tem de se definir a velocidade de transmissão (baud rate)

  delay(200);                  //Dá-se à placa tic tempo para iniciar

  tic.haltAndSetPosition(0);    // Põe-se a posição da placa tic a 0, assim, quando mais tarde se comandar o movimento,
                               // sabe-se o ponto de partida

  tic.exitSafeStart();         //Sai-se do modo safe start da placa tic, que impede movimentos acidentais indesejados

  tic.setStepMode(TicStepMode::Microstep2); //o motor irá andar meio passo a meio passo
  tic.setDecayMode(TicDecayMode::Mixed50);

  /*Os pinos 2 e 3 respetivamente, serão utilizados para as interrupções de software.
  Estas são iniciadas quando se deteta uma transição ascendente no respetivo pino,
  sendo o Pino 2 correspondente à fase A do encoder e o 3 à fase B
  fase A: fio branco
  fase B: fio rosa*/

  attachInterrupt(digitalPinToInterrupt(2), incA, CHANGE);
  attachInterrupt(digitalPinToInterrupt(3), incB, CHANGE);
}
```

```
//-----  
// Leitura da posição com o encoder, quer a posição multivolta quer a univolta  
void incA() {  
  if(digitalRead(2)==HIGH) {  
    if (digitalRead(3)==LOW) {  
      posEncMultiVolta++;  
      posEncUniVolta++;  
    }else{  
      posEncMultiVolta--;  
      posEncUniVolta--;  
    }  
  }else{  
    if (digitalRead(3)==HIGH) {  
      posEncMultiVolta++;  
      posEncUniVolta++;  
    }else{  
      posEncMultiVolta--;  
      posEncUniVolta--;  
    }  
  }  
  if(digitalRead(4)==HIGH) {  
    posEncUniVolta=0;  
  }  
}
```

```
//-----
void incB(){
  if(digitalRead(3)==HIGH){
    if (digitalRead(2)==HIGH){
      posEncMultiVolta++;
      posEncUniVolta++;
    }else{
      posEncMultiVolta--;
      posEncUniVolta--;
    }
  }else{
    if (digitalRead(2)==LOW){
      posEncMultiVolta++;
      posEncUniVolta++;
    }else{
      posEncMultiVolta--;
      posEncUniVolta--;
    }
  }
}
if(digitalRead(4)==HIGH){
  posEncUniVolta=0;
}
}
```

```

,
//-----
void loop() {

    Serial.print("Posição atual: ");
    Serial.print(posEncMultiVolta*0.045);           // Dá a posição multivolta atual em graus, isto é, pode ser maior que 360°
    Serial.println(" graus");                       // e pode ser menor que -360°.

    Serial.println("Se deseja calibrar o encoder prima 1, seguido de enter. Caso contrário, prima 0, seguido de enter.");
    Serial.println("");

    // Por vezes o Arduino não conta os incrementos do encoder se a velocidade
    // tiver sido demasiado elevada (>3°/s) em algum instante da rotação.

    do {

    } while(!Serial.available());                    // Espera que se decida ou não calibrar as posições Multi e Univolta
                                                    // do encoder, assim como a do driver Tic, de forma a obter-se medições
    zerarEnc=Serial.parseFloat();                   // corretas.
}

```

```

if(zerarEnc==HIGH){
  tic.setMaxAccel(40*acelMax*100/0.45);
  tic.setMaxDecel(40*acelMax*100/0.45);
  tic.setMaxSpeed( 40*3*10000/0.45 );
  tic.setTargetPosition(420*40);           // O motor vai para a posição 190° em relação à referência errada que tiver,
  waitForPosition(420*40);                 // e em seguida, se não tiver passado pela referência, vai para posição
                                           // -190°. Nesta altura, é garantido que passou por lá, marcando-se
                                           // a anterior posição -190° como sendo agora o ângulo Univolta "alfa" que se
                                           // tenha lido com o encoder. Agora, há apenas que rodar "alfa" graus no sentido
                                           // oposto e para-se , marcando-se esse novo ângulo como sendo zero no driver Tic.

  if(posEncUnivolta==posEncMultiVolta){
    tic.setTargetPosition(-420*40);
    waitForPosition(-420*40);
  }

  tic.haltAndSetPosition(0);
  posDesvioZero=posEncUnivolta;
  tic.setTargetPosition( (-round(posDesvioZero*0.045/0.45))*40 );
  waitForPosition( (-round(posDesvioZero*0.045/0.45))*40 );
  tic.haltAndSetPosition(0);
  posEncMultiVolta=posEncUnivolta;

  Serial.println("");
  Serial.println("As posições relativa e univolta deverão ser iguais se o encoder tiver sido calibrado corretamente.");
  Serial.print("Posição multivolta do encoder=");
  Serial.print(posEncMultiVolta);
  Serial.print(" | Posição univolta do encoder=");
  Serial.println(posEncUnivolta);
  Serial.println("");
}

```

```

Serial.println("Insira a posição desejada, em graus.");
do {

} while(!Serial.available());           // Espera que se insira um valor para a posição

angEsc=Serial.parseFloat();
if(abs(angEsc-(posEncMultiVolta*0.045))<0.03375){
    if(angEsc>=posEncMultiVolta){
        angEsc=posEncMultiVolta+0.03375;           // Não se pode, e não será necessário, rodar menos
    }else{                                         // do que 0,03375° (3 passos). Caso se ponha, por engano,
        angEsc=posEncMultiVolta-0.03375;           // um valor que não esteja de acordo com isso,
    }                                              // corrige-se para o valor mais próximo que esteja.
}
angmotpEsc=round(40*angEsc/0.45);
Serial.println(angEsc);
Serial.println();

tic.setMaxAccel((acelMax*100/0.45)*40);           // A aceleração máxima é a imposta
tic.setMaxDecel((acelMax*100/0.45)*40);

Serial.println("Insira a velocidade máxima desejada, em graus/s.");
do {

} while(!Serial.available());           // Espera que se insira um valor para a velocidade
velocMax=Serial.parseFloat();

tic.setMaxSpeed((velocMax*10000/0.45)*40);

Serial.println();

if( (angEsc-(posEncMultiVolta*0.045))>0){           // Movimento em malha aberta até se estar a 3 passos
    tic.setTargetPosition(angmotpEsc-3);           // da posição final escolhida
    waitForPosition(angmotpEsc-3);
}else{
    tic.setTargetPosition(angmotpEsc+3);
    waitForPosition(angmotpEsc+3);
}

```

```

if( (angEsc-(posEncMultiVolta*0.045))>0){

    do {
        tic.setTargetPosition(tic.getCurrentPosition()+1);
        waitForPosition(tic.getCurrentPosition()+1);           // Enquanto a diferença entre a posição atual dada
        Serial.println(posEncMultiVolta*0.045);                // pelo encoder e a pretendida for maior que a
    }while( abs(posEncMultiVolta*0.045-angEsc) > 0.01125 );    // resolução do sistema motor+reductor (0.01125°),
                                                                // continuar a avançar, micropasso a micropasso
                                                                // (movimento em malha fechada).
    }else{

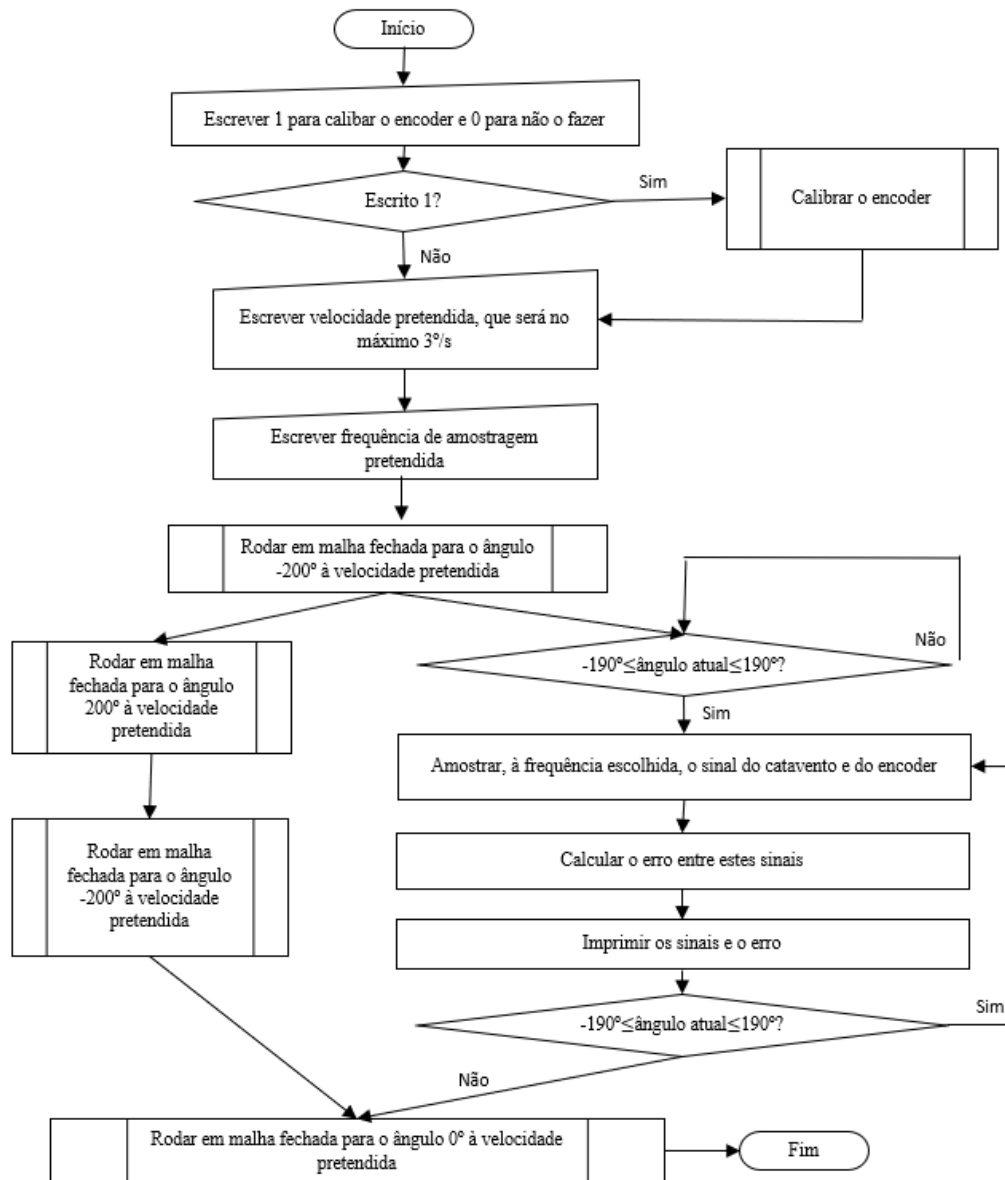
        do {
            tic.setTargetPosition(tic.getCurrentPosition()-1);
            waitForPosition(tic.getCurrentPosition()-1);
            Serial.println(posEncMultiVolta*0.045);
        }while( abs(posEncMultiVolta*0.045-angEsc) > 0.01125 );

    }

    Serial.println("-----");
}

```

Calibração com Velocidade Angular Constante



```

float angArranque=200;    // O sistema vai arrancar de -angArranque, rodar até angArranque, e vice-versa.
float angCal=190;        // Amostra-se entre -angCal e angCal.
float freqAm=2;          // Frequência de Amostragem.

float velocMax=3;        // Velocidade máxima da saída
float acelMax=0.125;

float posEncMultiVolta=0; //variável que contará os incrementos do encoder
float posEncUniVolta=0;   // variável que contará os incrementos do encoder, regressando ao valor zero
                        // sempre que se passa na referência.

bool zerarEnc=0;         // variável para iniciação da calibração do encoder.
float posDesvioZero=0;    // posição em relação à referência quando se está no fim da calibração.

```

```
//-----
void setup() {
  Serial.setTimeout(10*86400*1000);

  Serial.begin(9600);
  pinMode(2, INPUT);
  pinMode(3, INPUT);
  pinMode(4, INPUT);

  pinMode(A0, INPUT);
  analogReference(INTERNAL);

  ticSerialPort.begin(9600);

  delay(200);

  tic.haltAndSetPosition(0);

  tic.exitSafeStart();

  tic.setStepMode(TicStepMode::Microstep2);
  tic.setDecayMode(TicDecayMode::Mixed50);

  attachInterrupt(digitalPinToInterrupt(2), incA, CHANGE);
  attachInterrupt(digitalPinToInterrupt(3), incB, CHANGE);
}

// A porta série assume que se inseriu um zero se tiver passado
// mais de 1 segundo sem inputs. Assim, muda-se o tempo de Timeout
// para uma valor elevado para isto não ser um problema.

// Desta forma o Arduino lê na gama 0 V a 1,1 V.

// Na comunicação assíncrona, tem de se definir a velocidade de
// transmissão (baud rate).

// Dá-se à placa tic tempo para iniciar

// Põe-se a posição da placa tic a 0, assim, quando mais tarde se
// comandar o movimento, sabe-se o ponto de partida

// Sai-se do modo safe start da placa tic, que impede movimentos
// acidentais indesejados

// O motor irá andar meio passo a meio passo (0.45°).

// Os pinos 2 e 3 respetivamente, serão utilizados para
// as interrupções de software. Estas são iniciadas
// quando se deteta uma transição ascendente ou descendente
// no respetivo pino, sendo o Pino 2 correspondente ao canal A
// do encoder e o Pino 3 ao canal B.
```

```

,
//-----
void incA() {
  if(digitalRead(2)==HIGH) {
    if (digitalRead(3)==LOW) {
      posEncMultiVolta++;
      posEncUniVolta++;
    }else{
      posEncMultiVolta--;
      posEncUniVolta--;
    }
  }else{
    if (digitalRead(3)==HIGH) {
      posEncMultiVolta++;
      posEncUniVolta++;
    }else{
      posEncMultiVolta--;
      posEncUniVolta--;
    }
  }
  if(digitalRead(4)==HIGH) {
    posEncUniVolta=0;
  }
}

```

```
void incB() {  
  if(digitalRead(3)==HIGH) {  
    if (digitalRead(2)==HIGH) {  
      posEncMultiVolta++;  
      posEncUniVolta++;  
    }else{  
      posEncMultiVolta--;  
      posEncUniVolta--;  
    }  
  }else{  
    if (digitalRead(2)==LOW) {  
      posEncMultiVolta++;  
      posEncUniVolta++;  
    }else{  
      posEncMultiVolta--;  
      posEncUniVolta--;  
    }  
  }  
  if(digitalRead(4)==HIGH) {  
    posEncUniVolta=0;  
  }  
}  
  
//-----
```

```
//-----
void loop() {

    Serial.print("Posição atual: ");
    Serial.print(posEncMultiVolta*0.045);           // Dá a posição multivolta atual em graus, isto é, pode ser maior que 360°
    Serial.println(" graus");                       // e pode ser menor que -360°.

    Serial.println("Se deseja calibrar o encoder prima 1, seguido de enter. Caso contrário, prima 0, seguido de enter.");
    Serial.println("");

    do {                                             // Por vezes o Arduino não conta os incrementos do encoder se a velocidade
    resetCommandTimeout();                          // tiver sido demasiado elevada (>0.6°/s) em algum instante da rotação.
    }while(!Serial.available());                   // Espera que se decida ou não calibrar as posições Multi e Univolta
    zerarEnc=Serial.parseFloat();                  // do encoder, assim como a do driver Tic.
}
```

```

if(zerarEnc==HIGH){
  tic.setMaxAccel(40*acelMax*100/0.45);
  tic.setMaxDecel(40*acelMax*100/0.45);
  tic.setMaxSpeed( 40*velocMax*10000/0.45 );
  tic.setTargetPosition(40*190/0.45);           // O motor vai para a posição 190° em relação à referência errada que tiver,
  waitForPosition(40*190/0.45);                 // e em seguida, se não tiver passado pela referência, vai para posição
  if(posEncUniVolta==posEncMultiVolta){         // -190°. Nesta altura, é garantido que passou por lá, marcando-se
    tic.setTargetPosition(-40*190/0.45);        // a anterior posição -190° como sendo agora o ângulo Univolta "alfa" que se
    waitForPosition(-40*190/0.45);              // tenha lido com o encoder. Agora, há apenas que rodar "alfa" graus no sentido
  }                                              // oposto e para-se , marcando-se esse novo ângulo como sendo zero no driver Tic.
  tic.haltAndSetPosition(0);
  posDesvioZero=posEncUniVolta;
  tic.setTargetPosition(-round(posDesvioZero*0.045/0.45));
  waitForPosition(-round(posDesvioZero*0.045/0.45));
  tic.haltAndSetPosition(0);
  posEncMultiVolta=posEncUniVolta;

  Serial.println("");
  Serial.println("As posições relativa e univolta deverão ser iguais se o encoder tiver sido calibrado corretamente.");
  Serial.print("Posição relativa do encoder=");
  Serial.print(posEncMultiVolta);
  Serial.print(" | Posição univolta do encoder=");
  Serial.println(posEncUniVolta);
  Serial.println("");
}

```

```

Serial.println("Insira a frequência de amostragem pretendida, em Hz");

do{
    resetCommandTimeout();
}while(!Serial.available());
freqAm=Serial.parseFloat();
freqAm=max(freqAm,1);
Serial.println(freqAm);
delay(200);

tic.setMaxAccel(40*acelMax*100/0.45);
tic.setMaxDecel(40*acelMax*100/0.45);

Serial.println("Insira a velocidade de rotação da calibração graus por segundo");

do{
    resetCommandTimeout();
}while(!Serial.available());

velocMax=Serial.parseFloat();
velocMax=abs(velocMax);
if(velocMax>3){
    velocMax=3;
    Serial.println("A velocidade não pode ser maior que 3°/s");
    Serial.println(velocMax);
}else{
    Serial.println(velocMax);
}

tic.setMaxSpeed( (velocMax*10000/0.45)*40);

tic.setTargetPosition(40*round(-angArranque/0.45)+3);
waitForPosition(40*round(-angArranque/0.45)+3);
do {
    tic.setTargetPosition(tic.getCurrentPosition()-1);
    waitForPosition(tic.getCurrentPosition()-1);
}while( abs(posEncMultiVolta*0.045-(-angArranque)) >0.01125);

```

// Espera que se insira a frequência de amostragem, cujo mínimo é 1 Hz.

// Espera que se insira a velocidade

// O Arduino não consegue contar os impulsos do encoder se a velocidade for superior a 3°/s, logo, se o valor inserido for maior, muda-se para 3°/s e informa-se o utilizador

// Começa-se por ir para o ângulo a partir do qual se vai iniciar o movimento de rotação para a calibração. Movimento am malha fechada.

```
//-----Calibrações: parte ascendente, rotação desde -angArranque até angArranque com registo de dados entre -angCal e angCal-----
//-----
tic.setTargetPosition(40*round(angArranque/0.45)-3);
do{
    resetCommandTimeout();

    if((posEncMultiVolta*0.045>=-angCal)&&(posEncMultiVolta*0.045<=angCal))

        Serial.print(analogRead(A0)*(360*1.1/1024));
        Serial.print("  ");
        Serial.print(posEncMultiVolta*0.045);
        Serial.print("  ");
        Serial.println(analogRead(A0)*(360*1.1/1024)-posEncMultiVolta*0.045);
        delay(1000/freqAm); // Mostra-se a comparação entre o ângulo medido pelo catavento e pelo
                           // encoder, bem como o erro entre estes, à frequência de amostragem,
                           // sempre que se estiver na amplitude de calibração.

}while((tic.getCurrentPosition()!=round(angArranque/0.45)-3)) ;

do {
    tic.setTargetPosition(tic.getCurrentPosition()+1); // Enquanto a diferença entre a posição atual dada pelo encoder
    waitForPosition(tic.getCurrentPosition()+1);      // e a pretendida for maior que a resolução do sistema motor+reductor,
}while( abs(posEncMultiVolta*0.045-(angArranque)) >0.01125); // continuar a avançar micropasso a micropasso
```

```

//-----Calibrações: parte descendente, rotação desde angArranque até -angArranque com registo de dados entre angCal e -angCal-----
//-----
tic.setTargetPosition(round(-angArranque/0.45)-6);
do{
    resetCommandTimeout();

    if((posEncMultiVolta*0.045>=-angCal)&&(posEncMultiVolta*0.045<=angCal)){

        Serial.print(analogRead(A0)*(360*1.1/1024));
        Serial.print("  ");
        Serial.print(posEncMultiVolta*0.045);
        Serial.print("  ");
        Serial.println(analogRead(A0)*(360*1.1/1024)-posEncMultiVolta*0.045);
        delay(1000/freqAm);          // Mostra-se a comparação entre o ângulo medido pelo catavento e pelo
    }                               // encoder, bem como o erro entre estes, à frequência de amostragem,
    // sempre que se estiver na amplitude de calibração.

}while((tic.getCurrentPosition()!=round(angArranque/0.45)+6)) ;

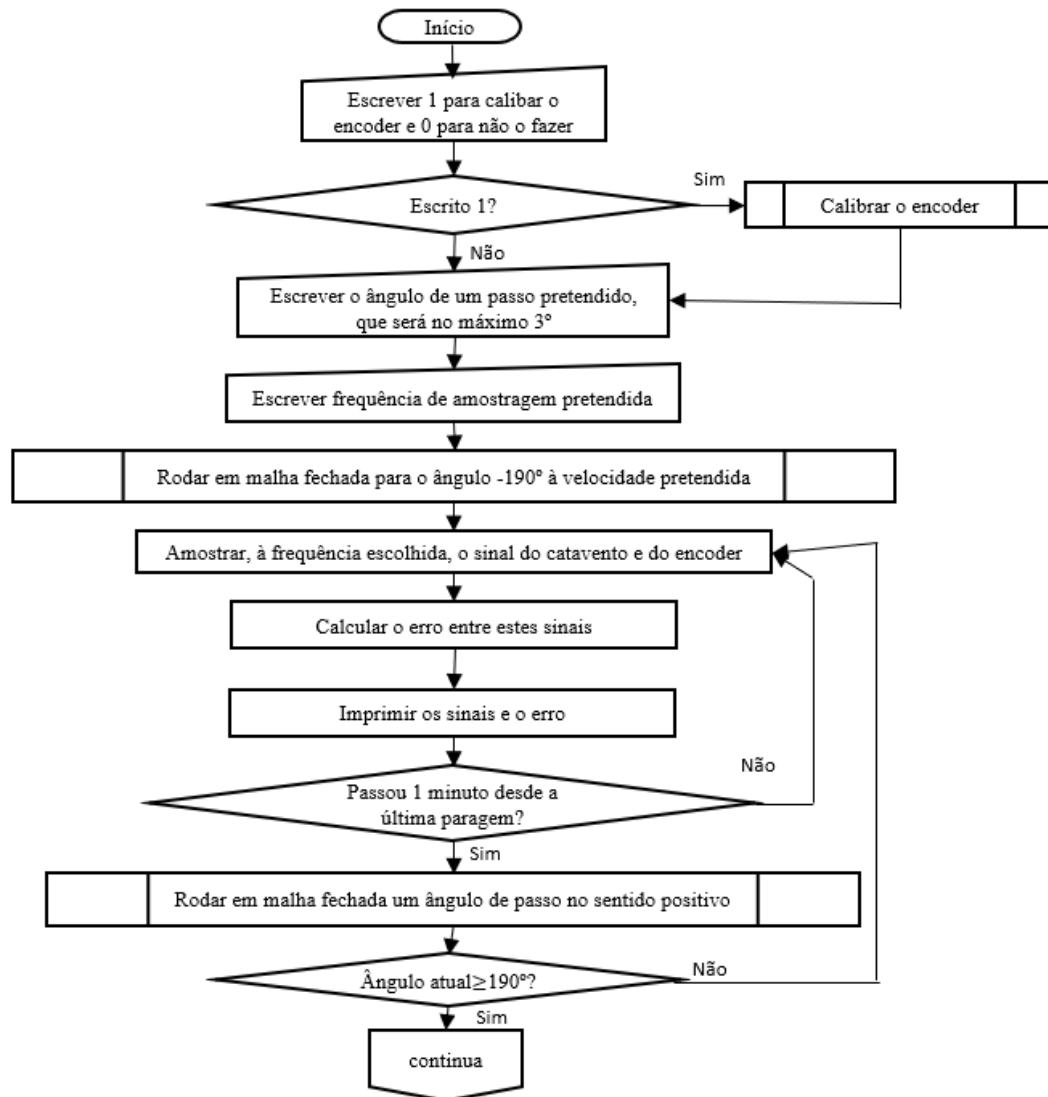
do {
    tic.setTargetPosition(tic.getCurrentPosition()-1);    // Enquanto a diferença entre a posição atual dada pelo encoder
    waitForPosition(tic.getCurrentPosition()-1);          // e a pretendida for maior que a resolução do sistema motor+reductor,
}while( abs(posEncMultiVolta*0.045-(-angArranque)) >0.01125); // continuar a avançar micropasso a micropasso

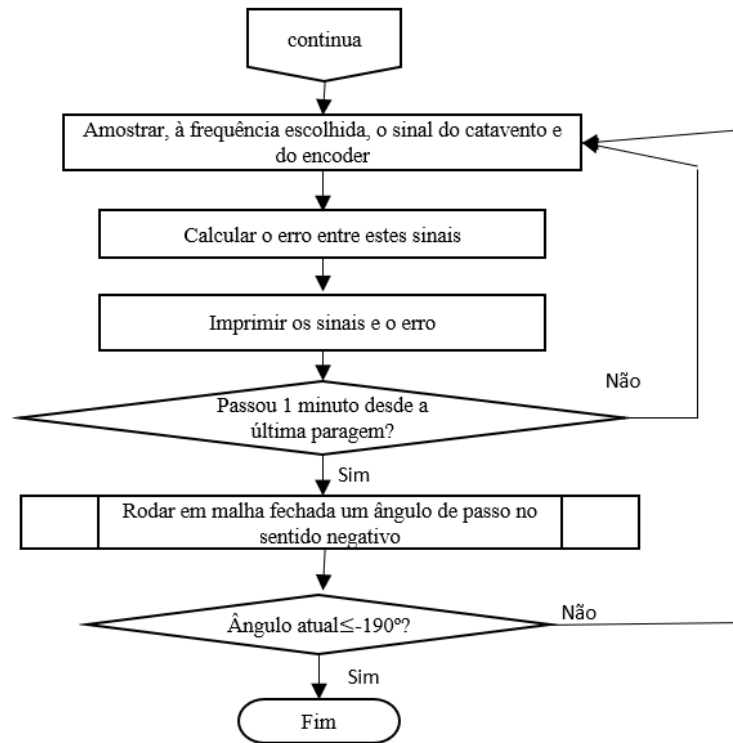
//-----
//-----Fim das Calibrações-----
tic.setTargetPosition(3);
waitForPosition(3);
do {
    tic.setTargetPosition(tic.getCurrentPosition()-1);    // Enquanto a diferença entre a posição atual dada pelo encoder
    waitForPosition(tic.getCurrentPosition()-1);          // e a pretendida for maior que a resolução do sistema motor+reductor,
}while( abs(posEncMultiVolta*0.045) >0.01125);           // continuar a avançar micropasso a micropasso

    Serial.println("-----");
}

```

Calibração Passo a Passo





```

float angArranque=200;    // O sistema vai arrancar de -angArranque, rodar até angArranque, e vice-versa.
float angCal=190;        // Amostra-se entre -angCal e angCal.
float freqAm=2;          // Frequência de Amostragem.
float nAmPasso=0;
float angPassoAm=2;      // ângulo de cada passo de amostragem. Ou seja, amostra-se de angPassoAm em angPassoAm.
float angAm=0;           // Variável auxiliar

float velocMax=3;
float acelMax=0.125;

float posEncMultiVolta=0; // posição multivolta do encoder, isto é, pode corresponder a ângulos <-360° ou >360°
float posEncUniVolta=0;   // posição univolta do encoder, isto é, corresponderá sempre a ângulos entre 0° e 360° (não incluindo este último).
                        // sempre que se passa na referência volta a zero.

bool zerarEnc=0;          // variável para iniciação da calibração do encoder.
float posDesvioZero=0;    // posição em relação à referência quando se está no fim da calibração do encoder.

```

```
//-----
void setup() {
  Serial.setTimeout(10*86400*1000);

  Serial.begin(9600);
  pinMode(2, INPUT);
  pinMode(3, INPUT);
  pinMode(4, INPUT);

  pinMode(A0, INPUT);
  analogReference(INTERNAL);

  ticSerialPort.begin(9600);

  delay(200);

  tic.haltAndSetPosition(0);

  tic.exitSafeStart();

  tic.setStepMode(TicStepMode::Microstep2);
  tic.setDecayMode(TicDecayMode::Mixed50);

  attachInterrupt(digitalPinToInterrupt(2), incA, CHANGE);
  attachInterrupt(digitalPinToInterrupt(3), incB, CHANGE);

}

// A porta série assume que se inseriu um zero se tiver passado
// mais de 1 segundo sem inputs. Assim, muda-se o tempo de Timeout
// para uma valor elevado para isto não ser um problema.

// Desta forma o Arduino lê na gama 0 V a 1,1 V.

// Na comunicação assíncrona, tem de se definir a velocidade de
// transmissão (baud rate).

// Dá-se à placa tic tempo para iniciar

// Põe-se a posição da placa tic a 0, assim, quando mais tarde se
// comandar o movimento, sabe-se o ponto de partida

// Sai-se do modo safe start da placa tic, que impede movimentos
// acidentais indesejados

// O motor irá andar meio passo a meio passo (0.45°).

// Os pinos 2 e 3 respetivamente, serão utilizados para
// as interrupções de software. Estas são iniciadas
// quando se deteta uma transição ascendente ou descendente
// no respetivo pino, sendo o Pino 2 correspondente ao canal A
// do encoder e o Pino 3 ao canal B.
```

```
//-----
void incA() {
  if(digitalRead(2)==HIGH) {
    if (digitalRead(3)==LOW) {
      posEncMultiVolta++;
      posEncUniVolta++;
    }else{
      posEncMultiVolta--;
      posEncUniVolta--;
    }
  }else{
    if (digitalRead(3)==HIGH) {
      posEncMultiVolta++;
      posEncUniVolta++;
    }else{
      posEncMultiVolta--;
      posEncUniVolta--;
    }
  }
}

if(digitalRead(4)==HIGH) {
  posEncUniVolta=0;
}
}

void incB() {
  if(digitalRead(3)==HIGH) {
    if (digitalRead(2)==HIGH) {
      posEncMultiVolta++;
      posEncUniVolta++;
    }else{
      posEncMultiVolta--;
      posEncUniVolta--;
    }
  }else{
    if (digitalRead(2)==LOW) {
      posEncMultiVolta++;
      posEncUniVolta++;
    }else{
      posEncMultiVolta--;
      posEncUniVolta--;
    }
  }
}

if(digitalRead(4)==HIGH) {
  posEncUniVolta=0;
}
}
```

```
//-----
void loop() {

    Serial.print("Posição atual: ");
    Serial.print(posEncMultiVolta*0.045);          // Dá a posição multivolta atual em graus, isto é, pode ser maior que 360°
    Serial.println(" graus");                     // e pode ser menor que -360°.

    Serial.println("Se deseja calibrar o encoder prima 1, seguido de enter. Caso contrário, prima 0, seguido de enter.");
    Serial.println("");

    do {
        resetCommandTimeout();
    }while(!Serial.available());

    zerarEnc=Serial.parseFloat();

    if(zerarEnc==HIGH){
        tic.setMaxAccel(40*acelMax*100/0.45);
        tic.setMaxDecel(40*acelMax*100/0.45);
        tic.setMaxSpeed( 40*velocMax*10000/0.45 );
        tic.setTargetPosition(40*190/0.45);        // O motor vai para a posição 190° em relação à referência errada que tiver,
        waitForPosition(40*190/0.45);              // e em seguida, se não tiver passado pela referência, vai para posição
        if(posEncUniVolta==posEncMultiVolta){      // -190°. Nesta altura, é garantido que passou por lá, marcando-se
            tic.setTargetPosition(-40*190/0.45);    // a anterior posição -190° como sendo agora o ângulo Univolta "alfa" que se
            waitForPosition(-40*190/0.45);          // tenha lido com o encoder. Agora, há apenas que rodar "alfa" graus no sentido
        }                                           // oposto e para-se , marcando-se esse novo ângulo como sendo zero no driver Tic.
        tic.haltAndSetPosition(0);
        posDesvioZero=posEncUniVolta;
        tic.setTargetPosition(-round(posDesvioZero*0.045/0.45));
        waitForPosition(-round(posDesvioZero*0.045/0.45));
        tic.haltAndSetPosition(0);
        posEncMultiVolta=posEncUniVolta;

        Serial.println("");
        Serial.println("As posições relativa e univolta deverão ser iguais se o encoder tiver sido calibrado corretamente.");
        Serial.print("Posição relativa do encoder=");
        Serial.print(posEncMultiVolta);
        Serial.print(" | Posição univolta do encoder=");
        Serial.println(posEncUniVolta);
        Serial.println("");
    }
}
```

```

Serial.println("Insira a frequência de amostragem pretendida, em Hz");

do{
    resetCommandTimeout(); // Espera que se insira a frequência de amostragem, cujo mínimo
}while(!Serial.available()); // é 1 Hz.
freqAm=Serial.parseFloat();
freqAm=max(freqAm,1);
Serial.println(freqAm);
delay(200);

tic.setMaxAccel(40*acelMax*100/0.45);
tic.setMaxDecel(40*acelMax*100/0.45);

Serial.println("Insira o passo de amostragem em graus");

do{
    resetCommandTimeout(); // Espera que se insira a velocidade
}while(!Serial.available());

angPassoAm=Serial.parseFloat();
angPassoAm=abs(angPassoAm);
if(angPassoAm>3){
    angPassoAm=3; // O Arduino não consegue contar os impulsos do
    Serial.println("Deve-se amostrar pelo menos a cada 3°"); // encoder se a velocidade for superior a 3°/s,
    Serial.println(angPassoAm); // logo, se o valor inserido for maior, muda-se
}else{ // para 3°/s e informa-se o utilizador
    Serial.println(angPassoAm);
}

tic.setMaxSpeed( (3*10000/0.45)*40);

angAm=-angCal;
tic.setTargetPosition(40*round(-angCal/0.45)+3); // Começa-se por ir para o ângulo a partir do qual se vai iniciar
waitForPosition(40*round(-angCal/0.45)+3); // o movimento de rotação para a calibração. Movimento am malha fechada.
do {
    tic.setTargetPosition(tic.getCurrentPosition()-1);
    waitForPosition(tic.getCurrentPosition()-1);
}while( abs(posEncMultiVolta*0.045-(-angCal)) >0.01125);

```

```
//-----Calibrações: parte ascendente, rotação desde -angCal até angCal com registo de dados-----
//-----

do{
  do{
    Serial.print(angAm);
    Serial.println(" °");
    Serial.print(analogRead(A0) * (360*1.1/1024));
    Serial.print(" ");
    Serial.print(posEncMultiVolta*0.045);
    Serial.print(" ");
    Serial.println(analogRead(A0) * (360*1.1/1024) - posEncMultiVolta*0.045);
    delayWhileResettingCommandTimeout(1000/freqAm);
    nAmPasso++;
  }while (nAmPasso<=60*freqAm);

  angAm=angAm+angAmPasso;

  tic.setTargetPosition((40*angAm/0.45)-3);
  waitForPosition((40*angAm/0.45)-3);

  do {
    tic.setTargetPosition(tic.getCurrentPosition()+1);
    waitForPosition(tic.getCurrentPosition()+1);
  }while( abs(posEncMultiVolta*0.045-(angAm)) >0.01125);

}while(posEncMultiVolta*0.045<angCal);
```

```
//-----Calibrações: parte descendente, rotação desde angCal até -angCal com registo de dados-----
//-----

do{
    do{
        Serial.print(angAm);
        Serial.println(" °");
        Serial.print(analogRead(A0)*(360*1.1/1024));
        Serial.print(" ");
        Serial.print(posEncMultiVolta*0.045);
        Serial.print(" ");
        Serial.println(analogRead(A0)*(360*1.1/1024)-posEncMultiVolta*0.045);
        delayWhileResettingCommandTimeout(1000/freqAm);
        nAmPasso++;
    }while (nAmPasso<=60*freqAm);

    angAm=angAm-angAmPasso;

    tic.setTargetPosition((40*angAm/0.45)+3);
    waitForPosition((40*angAm/0.45)+3);

    do {
        tic.setTargetPosition(tic.getCurrentPosition()-1);
        waitForPosition(tic.getCurrentPosition()-1);
    }while( abs(posEncMultiVolta*0.045-(angAm)) >0.01125);

}while(posEncMultiVolta*0.045>=-angCal);

//-----
//-----Fim das Calibrações-----
tic.setTargetPosition(-3); // Aproximação em malha aberta até se estar a 3 passos da posição desejada
waitForPosition(-3);
do {
    tic.setTargetPosition(tic.getCurrentPosition()+1); // Movimento em malha fechada: enquanto a diferença entre a posição atual
    waitForPosition(tic.getCurrentPosition()+1); // dada pelo encoder e a pretendida for maior que a resolução do sistema
}while( abs(posEncMultiVolta*0.045) >0.01125); // motor+reductor, continuar a avançar micropasso a micropasso

Serial.println("-----");
}
```

