

EDUARDO AOUN TANNURI

PAULO CESAR DEBENEST

PROJETO DE UM SENSOR DE ORIENTAÇÃO ANGULAR
INERCIAL DE BAIXO CUSTO

APLICAÇÃO: CONTROLE DE CADEIRA DE RODAS
MOTORIZADA

Dissertação apresentada à Escola Politécnica
da Universidade de São Paulo para obtenção
do título de graduação em Engenharia

SÃO PAULO

1998

10,0 (dez)
hsm

EDUARDO AOUN TANNURI

PAULO CESAR DEBENEST

PROJETO DE UM SENSOR DE ORIENTAÇÃO ANGULAR

INERCIAL DE BAIXO CUSTO

APLICAÇÃO: CONTROLE DE CADEIRA DE RODAS

MOTORIZADA

Dissertação apresentada à Escola Politécnica da
Universidade de São Paulo para obtenção do
título de graduação em Engenharia

Área de Concentração:

Engenharia Mecânica – habilitação em
Automação e Sistemas

Orientador:

Prof. Dr. Nicola Getschko

São Paulo

1998

AGRADECIMENTOS

Os autores desejam expressar seus mais sinceros agradecimentos:

Ao Prof. Nicola Getschko, pela orientação precisa, constante e eficiente;

Ao Prof. Walter Alves, cuja ajuda foi fundamental para a realização do trabalho;

Ao Prof. Gilberto Francisco Martha de Souza, por estar sempre disposto a ajudar no que fosse preciso;

Aos Professores Agenor de Toledo Fleury e Linilson Padovese pelas sugestões e ajuda;

Ao colega Reynaldo Penharrubia Fagundes, pela sugestão precisa ao final do trabalho.

Ao pessoal da oficina do Departamento pelos inúmeros conhecimentos práticos transmitidos;

À NSK Rolamentos do Brasil e Murata Amazônia do Brasil pela doação de componentes importantes na construção do protótipo.

ÍNDICE

1. Introdução	1
2. Estudo de Viabilidade	3
2.1. Estabelecimento da necessidade	3
2.2. Aplicação do sensor inercial de orientação angular para controle de cadeira de rodas motorizada	4
2.3. Formulação do Projeto	5
2.3.1. Características Funcionais	5
2.3.2. Características Operacionais	6
2.3.3. Características Construtivas	8
2.4. Síntese de soluções	8
2.4.1. Solução 1	8
2.4.2. Solução 2	9
2.4.3. Solução 3	10
2.4.4. Solução 4	11
2.4.5. Solução 5	12

3. Modelagem das soluções propostas.....	14
3.1. Modelagem do sensor 1.....	15
3.1.1. Resultados.....	17
3.2. Modelagem do sensor 2.....	18
3.2.1. Resultados.....	20
3.3. Modelagem do sensor 3.....	22
3.3.1. Resultados.....	23
3.4. Modelagem do sensor 4.....	25
3.4.1. Resultados.....	26
3.5. Modelagem do sensor 5.....	27
3.5.1. Resultados.....	29
3.6. Conclusões da fase de modelagem.....	31
4. Projeto básico	34
4.1. Matriz de Decisão	34
4.1.1. Segurança.....	35
4.1.2. Utilização de Componentes Padronizados.....	35

4.1.3. Sensibilidade	36
4.1.4. Durabilidade.....	37
4.1.5. Estética.....	37
4.1.6. Nível de Ruído	38
4.1.7. Preço de Venda	39
4.1.8. Facilidade de Fabricação	39
4.1.9. Robustez e confiabilidade.....	40
4.1.10. Espaço ocupado.....	41
4.1.11. Necessidade de processamento	42
4.1.12. Conclusão.....	44
4.2. Análise de sensibilidade	44
4.2.1. Modelagem do sensor 2 – cálculo das frequências naturais	44
4.2.2. Análise de sensibilidade das frequências naturais quanto às dimensões dos lastros utilizados.....	47
4.2.3. Análise de sensibilidade das frequências naturais quanto ao material do anel.....	50
4.3. Compatibilidade dimensional	51

4.3.1. Disco interno – pitch	51
4.3.2. Disco externo – roll	52
4.3.3. Invólucro	53
5. Projeto Executivo do Sensor	55
5.1. Projeto Mecânico	55
5.1.1. Substema 1 – Disco interno.....	56
5.1.2. Substema 2 – Eixo	61
5.1.3. Substema 3 – Invólucro	66
5.1.4. Substema 4 – Módulo eletrônico	69
5.2. Projeto Eletrônico	71
5.2.1. Circuitos associados ao sensor piezoelétrico	72
5.2.2. Circuitos associados aos encoders	75
5.2.3. Observação: fios utilizados no protótipo	76
5.3. Projeto do Software.....	77
5.3.1. Estrutura do programa	78
5.3.2. Variáveis.....	79
5.3.3. Blocos funcionais	82

5.4. Resultados.....	93
5.4.1. Movimentos resultantes.....	94
5.4.2. Possíveis melhorias	97
5.4.3. Fotos do protótipo	98
6. Aplicação.....	100
6.1. Introdução – cadeira de rodas motorizada controlada pelo movimento da cabeça	100
6.2. Projeto Mecânico	102
6.2.1. Capacete.....	103
6.2.2. Base	104
6.2.3. Rodas	104
6.2.4. Motores.....	105
6.2.5. Transmissão	107
6.2.6. Cadeira.....	109
6.2.7. Outros detalhes.....	109
6.3. Projeto Eletrônico	110
6.3.1. Placa de relés.....	110

6.3.2. Painel de comando	117
6.4. Projeto do software	122
6.4.1. Movimentos do carro.....	123
6.4.2. Relação entre variáveis medidas e posição da cabeça.....	124
6.4.3. Implementação do sistema de acionamento	126
6.4.4. Acessórios do programa de acionamento: filtros, modo de operação, segurança de operação e de chaveamento	130
6.5. Resultados.....	135
6.5.1. Fotos.....	137
7. Conclusões	138
Anexo 1. - Fotos.....	141
Anexo 2. Relação entre ângulos medidos pelo sensor 2 e ângulos de atitude do corpo	146
Bibliografia.....	150
Apêndice 2 Listagens.....	158

Apêndice 3 Cálculo das posições dos vértices do sensor para programa visual.pas

..... 170

Índice de Figuras

Figura 2.1	Limites dos ângulos registrados	7
Figura 2.2	Sensor 1	9
Figura 2.3	Sensor 2	10
Figura 2.4	Sensor 3	11
Figura 2.5	Sensor 4	12
Figura 2.6	Sensor 5	13
Figura 2.7	Sistema giroscópico do sensor 5	13
Figura 3.1	Desenho da seção angular de acrílico	16
Figura 3.2	yaw ($\delta(t) = 30^\circ \cdot \text{sen}(1,5t)$) ; pitch ($\beta(t) = 30^\circ \cdot \text{sen}(1,5t)$) ; roll($\gamma(t) = 30^\circ \cdot \text{sen}(1,5t)$) a(t) = $30^\circ \cdot \text{sen}(1,5t) (i+j+k)$	18
Figura 3.3	Esquema do sensor	19
Figura 3.4	Configuração do sensor 2	19
Figura 3.5	Resposta do sensor a um impulso translacional (θ medida de roll; α medida de pitch)	21
Figura 3.6	Sensor modificado	21

Figura 3.7 Resposta a uma rotação em Oz lentamente variável e nova distribuição de massas variável (Vermelho – Valores reais; Preto – Leitura do sensor).....	22
Figura 3.8 Componentes principais do sensor.....	23
Figura 3.9 Corpo inclinado de 30° em Ox; rotação do motor = 12000rpm;.....	24
Figura 3.10 Evolução temporal do comportamento do sensor obtida no Working Model 3D	25
Figura 3.11 Componentes principais do sensor 4.....	26
Figura 3.12 Simulação para corpo com inclinação em pitch de 30° e rotação de yaw de 30°/s ; rotação do motor = 12000 rpm.....	27
Figura 3.13 Componentes do sensor 5 – parte giroscópica.....	28
Figura 3.14 Diagrama de entradas e saídas do processamento necessário.....	28
Figura 3.15 Caso 7. $\delta(t) = 30^\circ \cdot \text{sen}(1,5t)$ e $\beta(t) = 30^\circ \cdot \text{sen}(1,5t)$ e $\gamma(t) = 30^\circ \cdot \text{sen}(1,5t)$	30
Figura 3.16 Caso 11 $\delta(t) = 30^\circ \cdot \text{sen}(1,5t)$; $\beta(t) = 30^\circ \cdot \text{sen}(1,5t)$; $\gamma(t) = 30^\circ \cdot \text{sen}(1,5t)$; $a_x = 1,0 \cdot \text{cos}(1,5t)$; $a_y = 1,0 \cdot \text{cos}(1,5t)$; $a_z = 1,0 \cdot \text{cos}(1,5t)$	31
Figura 4.1 Definições.....	45
Figura 4.2 Frequências naturais em função da massa do lastro frontal do anel..	49
Figura 4.3 Espessuras dos lastros em função da massa do lastro frontal	49

Figura 4.4	Diâmetros do disco interno	52
Figura 4.5	Espaço ocupado pelo disco interno.....	52
Figura 4.6	Espaço ocupado pelos discos interno e externo no eixo	53
Figura 4.7	Dimensões mínimas do invólucro	53
Figura 5.1	Componentes do subsistema “disco interno”	56
Figura 5.2	Componentes do subsistema “Eixo”	56
Figura 5.3	Disco interno com marcas óticas	57
Figura 5.4	Montagem do disco ótico com o emissor e o receptor de infravermelho (encoder)	57
Figura 5.5	Dimensões do sensor piezoelétrico.....	58
Figura 5.6	Dimensões do disco interno com marcas óticas e sensor piezoelétrico	58
Figura 5.7	Disco interno balanceado, com sensor piezoelétrico e lastro de chumbo	59
Figura 5.8	Parafuso como eixo do rolamento miniatura.....	60
Figura 5.9	Apoio para emissor e receptor de infravermelho do disco interno....	62
Figura 5.10	Rebaixo para fixação do disco externo	63
Figura 5.11	Disco externo – primeira versão	63
Figura 5.12	Dois semi-discos presos no eixo	64

Figura 5.13 Montagem final do disco externo com lastros	64
Figura 5.14 Fixação dos rolamentos no eixo	65
Figura 5.15 Principais dimensões do eixo de latão	66
Figura 5.16 Suportes dos rolamentos – base do primeiro protótipo.....	67
Figura 5.17 Montagem dos fotosensores do disco externo sobre o invólucro.....	69
Figura 5.18 Módulos mecânico (inferior) e eletrônico (superior) unidos	71
Figura 5.19 Tabela extraída do catálogo do sensor ENC—05EA	72
Figura 5.20 Circuito filtro passa baixa e amplificador	73
Figura 5.21 Diagrama de Bode do filtro passa baixa em estudo.....	74
Figura 5.22 Relação entrada-saída para o circuito utilizado (baixas frequências)	74
Figura 5.23 O programa como uma “caixa-preta”	78
Figura 5.24 Programa dividido em blocos.....	78
Figura 5.25 Diagrama NS do bloco dos inclinômetros	84
Figura 5.26 Exemplo do amortecimento de sinais por software.....	84
Figura 5.27 Exemplo de aplicação do filtro detetor de deriva.....	87
Figura 5.28 Diagrama NS do bloco do sensor piezoelétrico	88
Figura 5.29 Diagrama NS do bloco de verificação de tecla pressionada	90
Figura 5.30 Diagrama NS do bloco de desenho do paralelepípedo	92

Figura 5.31 Diagrama NS do programa principal	93
Figura 5.32 Oscilações do pêndulo interno	95
Figura 5.33 Oscilações do pêndulo externo.....	96
Figura 5.34 Ângulo de yaw medido	97
Figura 6.1 Esquema funcional do sistema de controle da cadeira de rodas	101
Figura 6.2 Movimentos da cabeça para controlar a cadeira.....	102
Figura 6.3 Apoios do sensor inercial no capacete	103
Figura 6.4 Posicionamento das rodas na base de madeira da cadeira de rodas ..	104
Figura 6.5 Detalhes da fixação dos motores na parte inferior da base de madeira	106
Figura 6.6 Detalhes da transmissão por correia sincronizadora.....	108
Figura 6.7 Vista superior da base de madeira com os espaços ocupados pelos componentes.....	110
Figura 6.8 Circuito de PWM para acionamento de motores elétricos.....	111
Figura 6.9 Circuito de acionamento de um motor com inversão de sentido	113
Figura 6.10 Circuito completo de acionamento dos dois motores elétricos da cadeira de rodas	115
Figura 6.11 Circuito de acionamento do relé.....	116
Figura 6.12 Esquema do painel de comando	118

Figura 6.13 Diagrama de ligações elétricas do botão reset	119
Figura 6.14 Ligações do botão de seleção	120
Figura 6.15 Esquema elétrico das chaves seletoras de sentido	121
Figura 6.16 Esquema elétrico da chave seletora de velocidades.....	121
Figura 6.17 Manche preso às chaves seletoras de velocidade	122
Figura 6.18 Movimentos possíveis dos motores (Vista superior).....	123
Figura 6.19 Região 1 e o acionamento dos motores.....	124
Figura 6.20 Diagrama dos procedimentos em Pascal para acionamento do circuito driver dos motores	128
Figura 6.21 Fluxograma da função trans_ang.....	129
Figura 6.22 Fluxograma simplificado da função aciona	130
Figura A1.1 Protótipo do sensor inercial e seus módulos mecânico e eletrônico	141
Figura A1.2 Módulos eletrônico e mecânico separados	141
Figura A1.3 Detalhes do disco externo montado sobre o eixo de latão.....	142
Figura A1.4 Detalhes do disco interno.....	142
Figura A1.5 Sensor inercial preso em capacete, apoios de madeira e fita de aço	143
Figura A1.6 Fixação do motor elétrico, roda traseira e sistema de transmissão ..	143

Figura A1.7 Protótipo da cadeira de rodas motorizada com capacete e sensor inercial.....	144
Figura A1.8 Placa de acionamento dos motores elétricos da cadeira de rodas	144
Figura A1.9 Detalhes dos componentes sob o assento da cadeira de rodas.....	145
Figura A1.10 Painel de controle da cadeira de rodas motorizada	145
Figura A2.1 Rotações do corpo	146

RESUMO

Os sensores inerciais existentes atualmente são compostos por giroscópios, com rotores com alto grau de balanceamento ou baseados em laser. Tais sistemas são muito caros, devido à necessidade de precisão em suas medidas, e devido ao alto grau de confiabilidade exigido deles. A proposta deste trabalho é projetar e construir um protótipo de um sensor inercial de orientação angular (ou seja, que indica a orientação angular de um corpo no espaço sem a necessidade de vínculos com o exterior) de baixo custo. Para se obter um sensor deste tipo, os limites de precisão e repetibilidade não serão tão estreitos quanto em sistemas já existentes de aeronavegação e guiagem de mísseis. Inicialmente, o problema foi bem definido e diversas aplicações foram propostas. Dentre as aplicações propostas, desenvolveu-se a utilização deste sensor preso a um capacete para controlar uma cadeira de rodas motorizada. O operador, ao inclinar a cabeça para frente ou para os lados, comanda a direção e a velocidade da cadeira de rodas, sem usar as mãos. Tal aplicação pode ser muito útil para tetraplégicos ou paraplégicos que não têm força nos braços para acionar joysticks. Este trabalho apresenta as etapas de projeto deste sensor inercial, desde a geração de alternativas até a construção e testes de um protótipo, incluindo o projeto mecânico do sensor, o projeto eletrônico para aquisição dos sinais e o desenvolvimento de um programa capaz de processar os dados de modo rápido e confiável. Além disso, apresentam-se também as fases de projeto mecânico, eletrônico e de software da cadeira de rodas motorizada como aplicação do sensor inercial, além de fotos do protótipo construído.

ABSTRACT

The inertial sensors available currently are made of gyroscopes with highly balanced rotors or based on laser beams. Such a system is very expensive due to the need of high precision in its measurements, and because of the high level of reliability demanded. The aim of this project is to design and build a prototype of an inertial, low-cost, angular orientation sensor (which means it measures the angular orientation of a body in space without the need of constraints with the environment). In order to build such a sensor, the precision and repeatability limits shall not be as narrow as they are for other inertial systems used for navigation and missile guidance. Firstly, the problem has been well defined and several applications were proposed. Among the proposed applications, the use of this inertial sensor attached to a helmet to control a motorized wheelchair has been developed. As the user moves its head forward or to the sides he controls the heading and the speed of the wheelchair, without using his hands. This application can be very useful for physically disabled people who need wheelchairs and cannot move their arms or do not have the strength to use a joystick. This project presents the design steps for the inertial sensor, since the possible solutions development up to the construction and tests of a prototype, including the sensor's mechanical design, the data-acquisition electronic design and the development of a software that is able to process the data as fast and reliably as possible. Besides, are also shown the mechanical, electronic and software design for the motorized wheelchair as an application for the inertial sensor, as well as pictures of the prototype that has been built.

1. Introdução

O presente trabalho consiste no desenvolvimento de um sensor inercial de orientação angular. Um sensor inercial tem a propriedade de não depender de nenhuma referência artificial externa para obter a referência de posicionamento desejada. Assim, o sensor pode obter informações a respeito de sua orientação no espaço a cada instante, sem a existência de nenhum vínculo com o meio ambiente.

Com tal propriedade, alcança-se uma maior liberdade no projeto de sistemas que necessitam de controle de posicionamento ou orientação, na medida em que se elimina a necessidade do projetista de prover ao sistema algum tipo de referência exterior, como emissões de laser, ultra-som ou infravermelho.

Como exemplo, considera-se o projeto de uma cadeira de rodas motorizada controlada por meio da inclinação da cabeça do usuário. Atualmente existem cadeiras motorizadas controladas por joysticks. A idéia é acoplar o sensor inercial a um capacete, de modo que seja possível monitorar as inclinações em dois eixos da cabeça do usuário. Deseja-se controlar velocidade e orientação da cadeira com tais inclinações, o que pode ser extremamente útil para tetraplégicos que conseguem mover o pescoço ou para paraplégicos com deficiências motoras nos braços (paraparesia dos órgãos superiores).

O projeto a ser desenvolvido foi dividido em Estudo de Viabilidade, Projeto Básico, Projeto Executivo e Construção do Protótipo. No Estudo de Viabilidade realizou-se uma análise do problema a ser resolvido, definindo-o completamente e estabelecendo os requisitos de projeto. Em seguida, desenvolveram-se alternativas para a solução do problema, analisadas em primeira instância quanto à exequibilidade física.

Posteriormente, desenvolveram-se modelos matemáticos completos dos sensores que permitiram análises mais detalhada do comportamento dinâmico dos mesmos. Foram verificados suas capacidades de medir a orientação de um corpo, os movimentos extremos dos corpos que garantem o correto funcionamento do sensor, bem como a capacidade de processamento em tempo real requerida pelas soluções propostas.

No Projeto Básico, inicialmente utilizou-se uma matriz de decisão para a escolha da melhor alternativa, baseada em características ponderadas dos sensores. Em seguida, realizou-se um estudo mais aprofundado da solução adotada, com uma análise de sensibilidade aos principais parâmetros de projeto.

No Projeto Executivo, a solução adotada foi detalhada, para que pudesse ser construído um protótipo. O projeto executivo foi dividido em Projeto Mecânico, Projeto Eletrônico e Projeto de Software. Apresentam-se, também, fotos do protótipo do sensor construído.

Finalmente, foram descritos o projeto e a construção de uma cadeira de rodas motorizada como aplicação do sensor desenvolvido. Ressaltam-se características mecânicas, eletrônicas e de software da aplicação, e apresentam-se fotos do protótipo desta aplicação.

2. Estudo de Viabilidade

2.1. Estabelecimento da necessidade

Sistemas inerciais de navegação são utilizados em aplicações de alta tecnologia e responsabilidade, como em veículos aéreos e espaciais, mísseis de longo alcance, navios, etc.. Para tais aplicações, encontram-se no mercado sistemas de alta precisão, alto custo, complexos sistemas de compensação e controle e de grandes dimensões. Entretanto, nota-se a escassez de sistemas de navegação inerciais voltados para aplicações mais simples, que priorizam a redução de custos, a simplicidade de montagem e utilização e a redução de dimensões e potência consumida em detrimento de uma menor precisão. Como possíveis aplicações de tais sistemas, além da que já foi descrita no capítulo 1, podem-se citar:

- Aparelhos odontológicos, como brocas guiadas que auxiliam o dentista durante a furação de dentes para fixação de próteses;
- Sistemas de realidade virtual, como capacetes que monitoram os movimentos da cabeça do operador informando ao computador a posição e orientação da mesma;
- Veículos autoguiados, como pequenos robôs transportadores de escritório, robôs anti-bomba ou eletrodomésticos “inteligentes” que conseguem mover-se dentro de casa;
- Sistemas de filmagem automático; a posição da cabeça de um operador é monitorada e é transferida para um sistema posicionador de câmera, que apontará a câmera para onde o operador estiver olhando.

Assim, o presente projeto visa desenvolver um sensor de orientação angular inercial de baixo custo e simplicidade construtiva e operacional.

O sensor poderá ser utilizado em alguma das aplicações citadas anteriormente, bem como em outras aplicações que requerem um monitoramento da orientação de um corpo livre no meio em que se encontra de uma maneira barata e com média precisão.

2.2. Aplicação do sensor inercial de orientação angular para controle de cadeira de rodas motorizada

A aplicação para a qual o presente projeto será direcionado consiste em um capacete cuja orientação é monitorada para controlar direção e velocidade de uma cadeira de rodas motorizada.

O objetivo desta aplicação é manter o sensor inercial preso a um capacete cuja orientação espacial é transmitida a um sistema de acionamento dos motores da cadeira de rodas. Desse modo, a velocidade da cadeira será proporcional à inclinação da cabeça do usuário, e a direção em que a cadeira se move poderá ser controlada por meio da orientação do sensor (e, portanto, da cabeça do operador) no espaço.

Essa aplicação pode ser muito útil para tetraplégicos que tenham controle sobre o movimento do pescoço e para paraplégicos que tenham alguma deficiência motora nos membros superiores e, por isso, não consigam controlar uma cadeira de rodas motorizada por meio de joysticks. Além disso, a aplicação proposta pode ser útil para outros deficientes físicos que dependem de cadeiras de rodas e, por algum motivo, desejam ter as mãos livres enquanto se movem.

2.3. Formulação do Projeto

O sistema a ser projetado deverá possuir certas características agrupáveis em três categorias: *funcionais*, *operacionais* e *construtivas*. É importante definir estas características de forma clara e, se possível, quantitativa, para direcionar a fase posterior de geração de alternativas.

2.3.1. Características Funcionais

2.3.1.1. Desempenho

Este sensor deve ser capaz de, para uma determinada orientação no espaço, fornecer dados referentes à sua atitude (ou seja, referente aos ângulos de inclinação do corpo no espaço, em relação aos eixos x , y e z).

2.3.1.2. Segurança

Como espera-se que este sensor tenha peças móveis, é interessante que o mesmo esteja envolvido por um invólucro, com o objetivo de proteger seus componentes e evitar o acúmulo de detritos sobre estes.

2.3.1.3. Nível de ruído

Caso haja peças móveis no sensor, é importante que o ruído gerado por estas esteja abaixo de um limite que não incomode o operador. Assim, recomenda-se que, a uma distância de 10cm do sensor, o ruído registrado seja inferior a 45dB. Um ruído desta intensidade é equivalente a uma música suave, e não perturba o operador.

2.3.2. Características Operacionais

2.3.2.1. Durabilidade

A durabilidade deste sensor pode ser definida como o menor valor entre as vidas úteis dos seguintes grupos: Mancais; Montagem mecânica; Invólucro; Circuitos e sistema eletrônico; Sistema de sensoramento de posição dos componentes móveis do sensor.

Supondo que o sensor não esteja sujeito a impactos, e que o invólucro evite a entrada de detritos no sensor, estima-se que a vida útil do mesmo deve ser de 1000 horas.

2.3.2.2. Confiabilidade

Para que este sensor seja utilizado em aplicações de duração curta ou média, suas saídas devem ter baixos valores de “drift” (deriva). Mas como não se pretende utilizá-lo em aplicações de alta precisão, não é preciso que este drift seja extremamente pequeno. Isso, sem dúvida, encareceria a montagem do sensor. Para aplicações como controle de movimentação de cadeiras de rodas, estima-se que um valor de drift de 2° por minuto é razoável (desde que haja algum sistema externo de reset do sensor).

2.3.2.3. Sensibilidade e acurácia

Para o caso do controle de movimentação de uma cadeira de rodas, dificilmente será exigida uma sensibilidade maior que $0,5^\circ$ na movimentação da mesma, porque sensibilidades muito menores que este valor poderão gerar sinais de controle cujos efeitos sobre os motores não são sentidos pelo usuário (dependendo da precisão de

movimento dos atuadores), além de que o usuário dificilmente consegue sentir deslocamentos angulares da ordem de $0,5^\circ$.

A acurácia do sensor está relacionada ao erro de medição, e dependerá das condições de uso do mesmo. Pode-se dizer que, devido às restrições de custo e simplicidade propostas no projeto, a acurácia requerida deve ser da ordem de 3° para casos extremos (como em acelerações, por exemplo).

2.3.2.4. Campo de ângulos medidos

Enquanto guia uma cadeira de rodas, é interessante que o usuário possa continuar olhando para o caminho que deseja percorrer, ou seja, devem ser evitadas inclinações excessivas na cabeça. Por isso, e pensando também em outras possíveis aplicações baseadas no movimento de cabeça, o campo de ângulos medidos pelo sensor pode ser limitado em:

$\pm 60^\circ$ para pitch;

$\pm 75^\circ$ para yaw;

$\pm 45^\circ$ para roll.

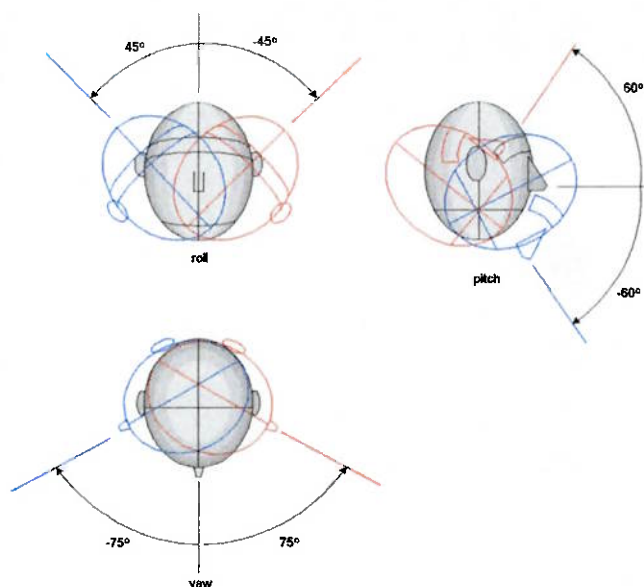


Figura 2.1 Limites dos ângulos registrados

2.3.3. Características Construtivas

2.3.3.1. Espaço físico requerido

Uma das características mais importantes deste sensor deverá ser seu tamanho reduzido. Isto implica uma construção compacta e a utilização de componentes miniaturizados, quando for viável. Como deseja-se que este sensor esteja acoplado a um capacete, é interessante que o mesmo tenha dimensões reduzidas, para não incomodar o operador. Portanto, estimam-se como dimensões limites para este sensor um cubo de aresta igual a 60mm.

2.4. Síntese de soluções

Neste item serão apresentadas as cinco soluções encontradas para suprir a necessidade apresentada. A ordem de apresentação das soluções corresponde à ordem em que as soluções foram desenvolvidas cronologicamente.

2.4.1. Solução 1

As medições dos ângulos de pitch e roll são feitas com dois inclinômetros com eixos de oscilação perpendiculares, como mostra a Figura 2.2. Cada pêndulo contém uma escala graduada impressa na borda (um encoder) e um conjunto foto emissor – foto receptor que registra a movimentação da escala graduada gerando sinais referentes à posição angular do mesmo. Para monitorar a orientação do corpo segundo a direção \vec{k} (yaw), deve ser usado um sensor piezoelétrico vibratório uniaxial montado com seu eixo na vertical.

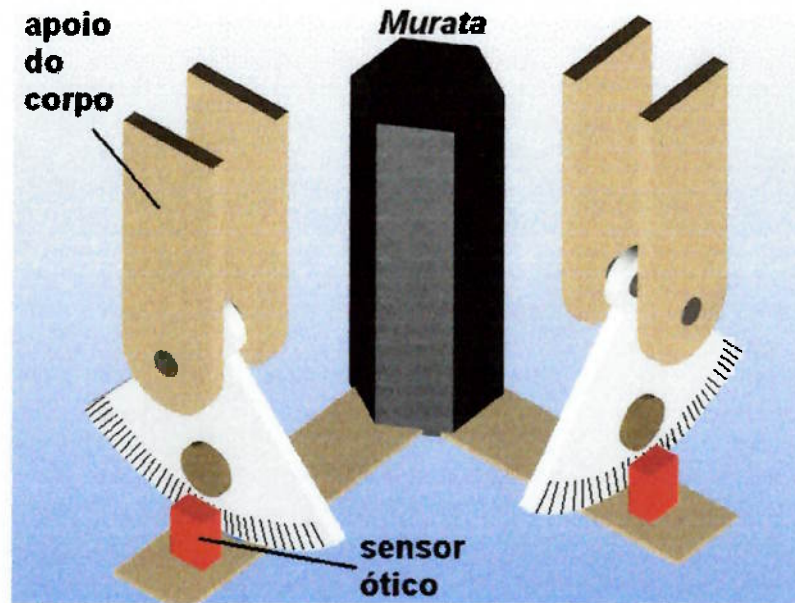


Figura 2.2 Sensor 1

2.4.2. Solução 2

Este sensor é composto por um pêndulo de dois graus de liberdade mostrado na Figura 2.3. O pêndulo é montado em um eixo articulado na direção de *pitch*. O anel que suporta o eixo do pêndulo deverá estar preso ao corpo por meio de outras articulações fornecendo a liberdade de oscilação na direção de *roll*. Monitorando-se através de encoders as rotações nas articulações citadas pode-se obter a orientação em *roll* e *pitch* do corpo.

Um sensor piezoelétrico uniaxial é apoiado sobre o eixo do pêndulo, o que o mantém sempre alinhado com a direção da gravidade, fornecendo uma leitura direta (sem necessidade de processamento de sinal) da rotação de *yaw* do corpo.

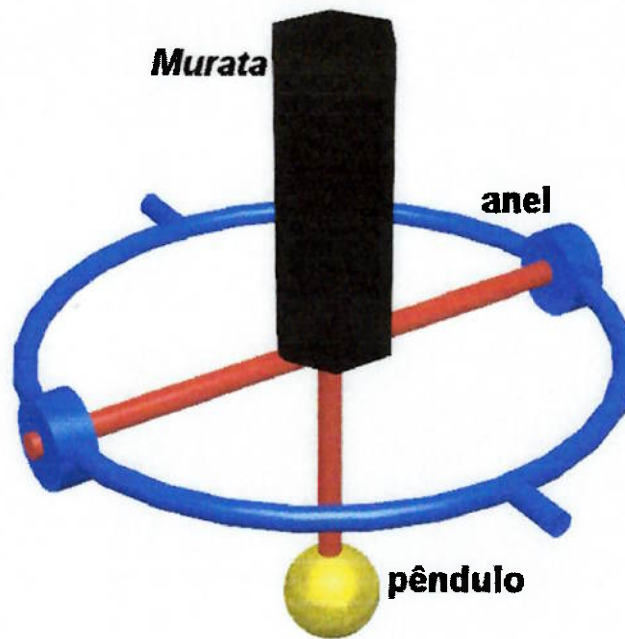


Figura 2.3 Sensor 2

2.4.3. Solução 3

Este sensor é composto por um pequeno motor elétrico de corrente contínua com escovas, que movimentava um volante. Este motor está preso em uma peça (trave) por meio de juntas de revolução, que permitem rotação em apenas uma direção. A trave, por sua vez, está presa a um pino, por meio de uma junta cardã, como mostra a Figura 2.4.

Devido ao efeito giroscópico no volante, o eixo do motor tenderá a manter uma orientação constante enquanto as diversas articulações acompanham o movimento do corpo e registram as inclinações do mesmo segundo os três eixos com auxílio de encoders.

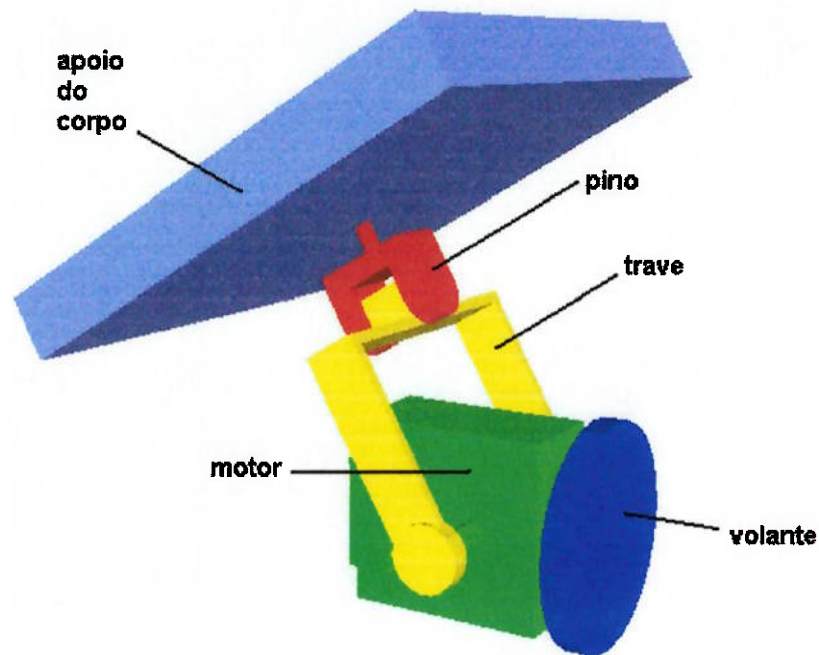


Figura 2.4 Sensor 3

2.4.4. Solução 4

Este sensor é composto por um pequeno motor elétrico de corrente contínua com escovas que movimenta um volante. Este motor está preso a um sistemas de anéis que fornece três graus de liberdade ao mesmo, como mostra a Figura 2.5.

Devido ao efeito giroscópico, monitorando-se as rotações nas articulações do sistema de anéis através de encoders, é teoricamente possível obter a orientação tridimensional do corpo ao qual o sensor está preso.

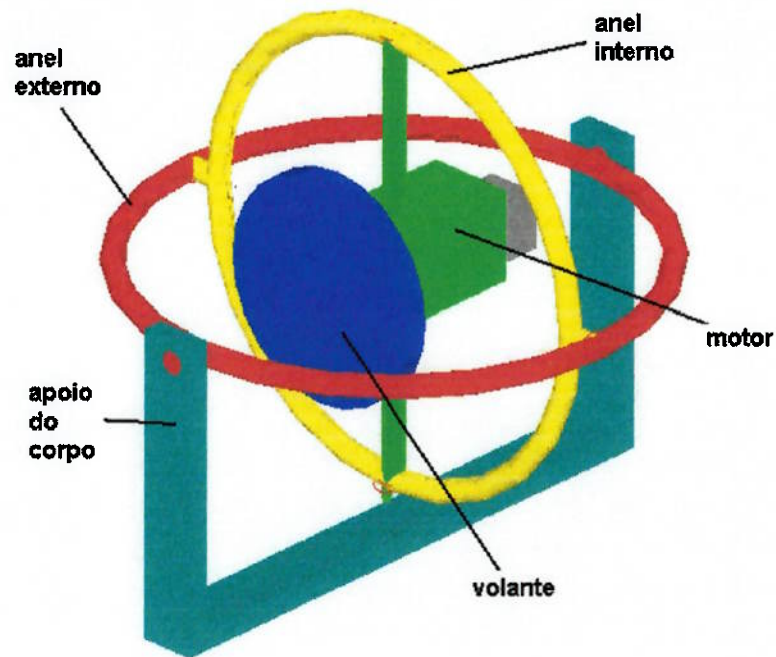


Figura 2.5 Sensor 4

2.4.5. Solução 5

O motor elétrico neste caso está preso a um sistema que lhe fornece dois graus de liberdade (pitch – i – e yaw), como mostra a Figura 2.7. Pelo efeito giroscópico, monitorando-se com encoders as rotações das articulações pode-se recuperar a orientação em pitch e yaw do corpo.

Para obter o ângulo de roll (j) utiliza-se um inclinômetro (como na solução 1). Para gerar uma leitura redundante do ângulo de pitch, pode-se utilizar um outro inclinômetro (com eixo perpendicular ao anterior), o que fornecerá a possibilidade de utilizar algoritmos de tratamento de sinais mais confiáveis.

Esta montagem é mais simples do que a solução 4, residindo aí sua principal vantagem.

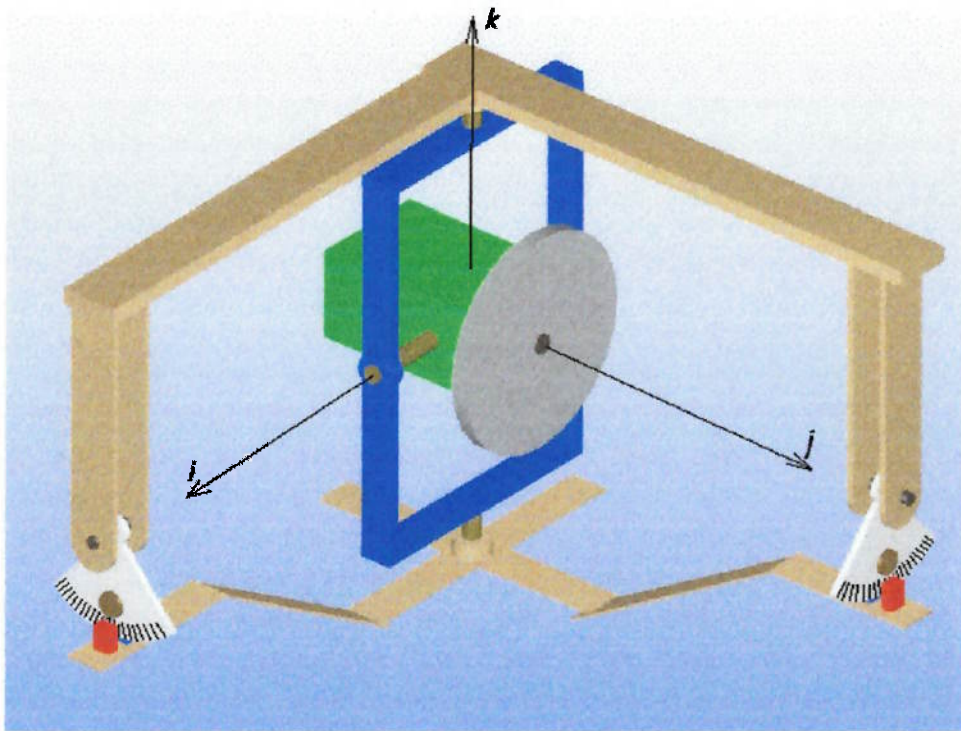


Figura 2.6 Sensor 5

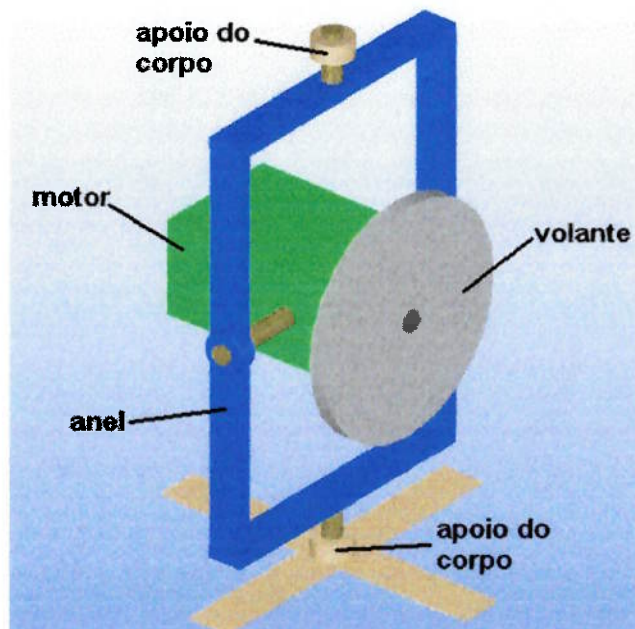


Figura 2.7 Sistema giroscópico do sensor 5

3. Modelagem das soluções propostas

Nesta seção serão apresentados de forma resumida os modelos de cada um dos sensores propostos.

Inicialmente, desenvolveu-se o equacionamento do comportamento dinâmico de cada sensor, baseando-se principalmente na Cinemática dos Corpos Rígidos e na Mecânica Analítica (Equações de Lagrange), com auxílio do programa de manipulação algébrica Mathematica.

Em seguida, para cada sensor foram implementados os principais algoritmos de processamento de sinais, a fim de se obter, a partir das leituras, a orientação real do corpo. Com isso pôde-se avaliar a capacidade de processamento requerida, um ponto fundamental de comparação entre as soluções.

Estes modelos foram implementados computacionalmente (utilizando-se as linguagens de programação Matlab e C), permitindo a solução e previsão do comportamento dos mesmos para diversos movimentos do corpo monitorado. Utilizou-se, em geral, o método Runge Kutta de 4ª ordem para a solução dos sistemas de equações diferenciais resultantes.

Com tais resultados, realizou-se uma comparação fundamentada das soluções propostas, com relação à precisão de estimação, limites de uso (movimentos permissíveis) e capacidade de processamento requerida.

3.1. Modelagem do sensor 1

Desenvolveu-se um modelo para a dinâmica dos dois inclinômetros componentes do presente sensor, baseando-se na equação de Lagrange:

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial T}{\partial \dot{p}} \right) - \frac{\partial (T - V)}{\partial p} = Q \quad (3.1)$$

na qual:

- T : energia cinética
- V : energia potencial
- p: coordenada generalizada do sistema
- Q: forças generalizadas não conservativas (atritos nos mancais e forças não inerciais de aceleração)

Com isso, as equações de movimento foram escritas considerando-se que o corpo ao qual o sensor é preso pudesse sofrer rotações e translações nos três eixos.

Além disso, foi necessário obter estimativas para as características geométricas e de massa dos pêndulos, o que foi feito considerando-se uma configuração conforme a Figura 3.1.

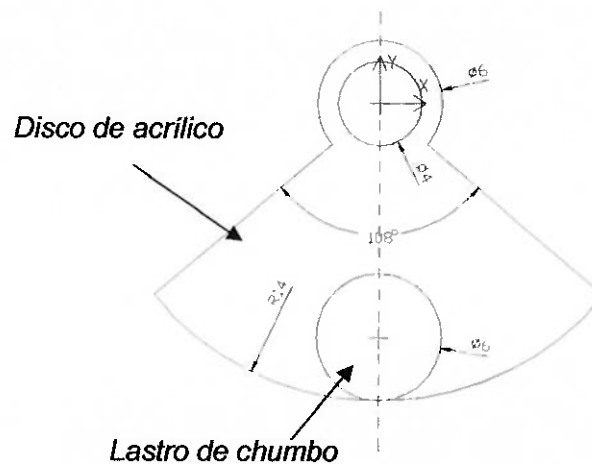


Figura 3.1 Desenho da seção angular de acrílico

Finalmente, analisou-se o algoritmo de tratamento dos sinais provenientes dos inclinômetros, a fim de avaliar sua complexidade e exequibilidade computacional, na medida em que o mesmo deverá ser executado em tempo real.

As leituras dos pêndulos (p_x e p_y) não fornecem diretamente os ângulos e roll (γ) e pitch (β) do corpo. Entretanto, formulações geométricas simples fornecem expressões que relacionam de maneira unívoca tais orientações e as leituras dos dois inclinômetros. Estas relações (dadas abaixo) são implícitas nas orientações, requerendo um algoritmo numérico eficiente para poder obter as mesmas em tempo real.

$$\begin{aligned}
 p_x &= -\beta \\
 p_y &= -\cos^{-1} \left[\frac{2\sqrt{2} \cos \beta \cos \gamma}{\sqrt{6 + 2 \cos(2\beta) \cos(2(\beta - \gamma)) - 2 \cos(2\gamma) \cos(2(\beta + \gamma))}} \right] \cdot \text{sin}(\text{sen } \gamma)
 \end{aligned}
 \tag{3.2}$$

Além disso, a orientação de yaw do corpo também requer um processamento matemático dos sinais dos três sensores. A leitura do sensor piezoelétrico fornece a rotação do corpo em relação a um eixo fixo no mesmo que, embora inicialmente coincidia com o eixo da gravidade, varia de orientação ao longo do movimento do

corpo. Assim, deve-se implementar um algoritmo que atualize a cada iteração a orientação espacial do corpo utilizando-se as informações dos três sensores. Este algoritmo também deverá ser executado em tempo real e pode ser resumido por:

- A cada intervalo T
 - Obter leitura dos inclinômetros p_x e p_y ;
 - Obter leitura do sensor piezoelétrico ω ;
 - Aplicar rotação $\omega \cdot T$ no eixo do mesmo (eixo este estimado no passo anterior), obtendo-se δ_{novo}
 - Calcular os ângulos γ_{novo} e β_{novo} a partir de p_x e p_y ;
 - Rotacionar o corpo para γ_{novo} e β_{novo} de tal forma a manter o ângulo δ constante.
 - Obter o novo eixo do sensor piezoelétrico

Este processo é bastante influenciado pelos erros nos inclinômetros devido a acelerações, na medida em que durante o transitório “errado”, o algoritmo atualizará erroneamente a posição do corpo, erro este que será propagado mesmo depois de tal transitório, diferentemente dos erros de medição de roll e pitch que são “zerados” quando o corpo pára de acelerar.

3.1.1. Resultados

Utilizando a modelagem desenvolvida, realizaram-se diversas simulações supondo movimentos complexos do corpo. Os mancais de suporte dos inclinômetros serão modelados como elementos que fornecem atrito viscoso com coeficiente 10^6 Nm/m.

Pôde-se inferir que os atritos são baixos e que as frequências naturais dos inclinômetros são bastante elevadas (da ordem de 25rad/s), o que permite a aplicação do algoritmo de “amortecimento digital” que será explicado no capítulo 5 e que fornece leitura não influenciada pelo transitório oscilante dos pêndulos.

Considerando um movimento de aceleração linear do corpo, também oscilatória, pode-se ver na Figura 3.2 que o sensor passa a fornecer medidas com erros de até 10° . Estes erros influenciam negativamente a estimativa do ângulo de yaw, na medida em que estes se propagam pelo algoritmo descrito anteriormente.

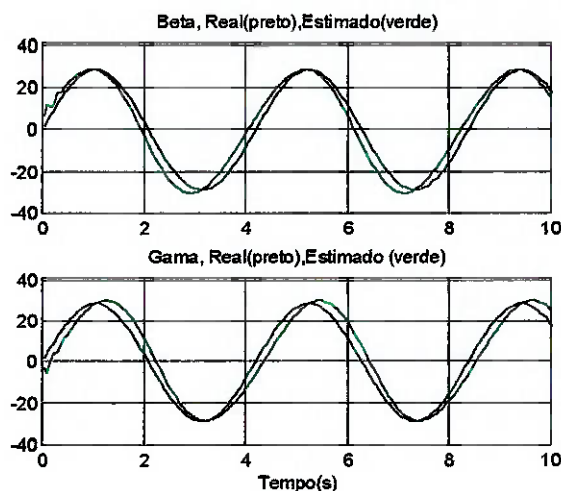


Figura 3.2 yaw ($\delta(t) = 30^\circ \cdot \text{sen}(1,5t)$) ; pitch ($\beta(t) = 30^\circ \cdot \text{sen}(1,5t)$) ; roll ($\gamma(t) = 30^\circ \cdot \text{sen}(1,5t)$) a(t) = $30^\circ \cdot \text{sen}(1,5t) (i+j+k)$

3.2. Modelagem do sensor 2

A Figura 3.3 representa esquematicamente os principais elementos construtivos do sensor 2, já explicado no item 3.

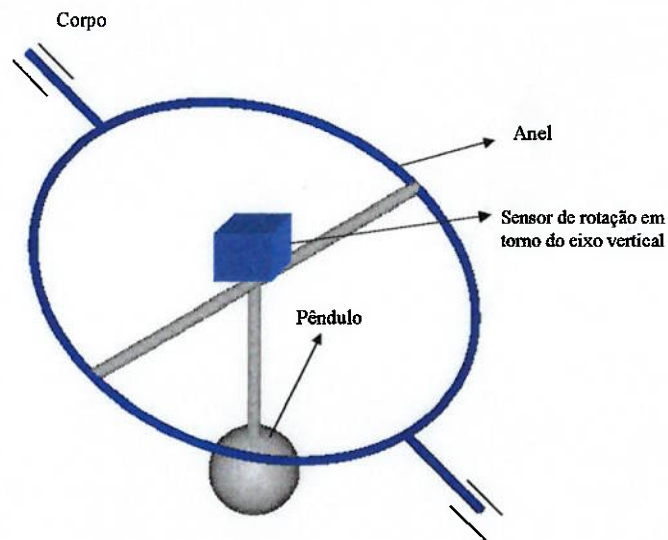


Figura 3.3 Esquema do sensor

Realizou-se a mesma metodologia de modelagem exposta anteriormente, utilizando-se as equações de Lagrange. Neste caso, entretanto, o sistema de equações que representa o comportamento dinâmico do sensor é mais complexo, devido ao acoplamento entre as oscilações nas direções de pitch e roll do pêndulo.

A configuração inicial utilizada para os cálculos das propriedades geométricas e de massa dos componentes é representada na Figura 3.4, sendo o anel feito de aço e os discos de acrílico.

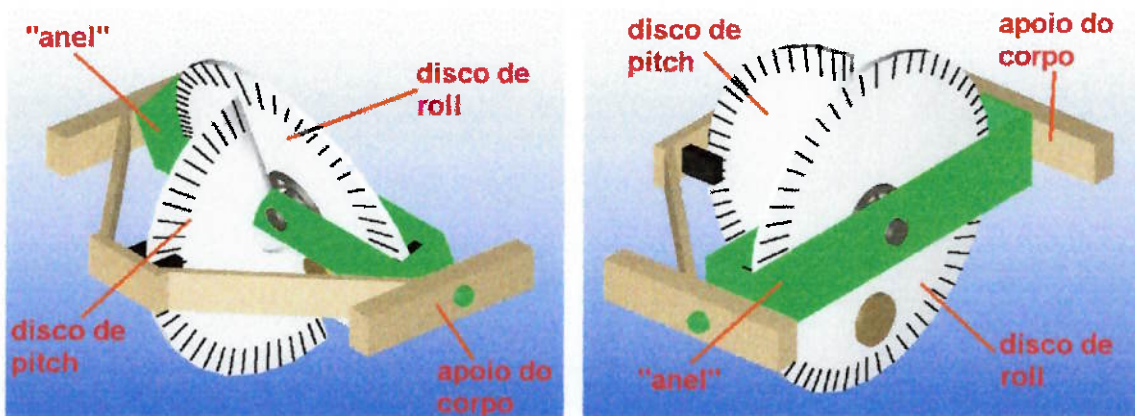


Figura 3.4 Configuração do sensor 2

O presente sensor fornece leituras desacopladas das orientações em roll e pitch do corpo. Além disso, como o sensor piezoelétrico está apoiado sobre o pêndulo, seu eixo sempre coincidirá com o da gravidade (a menos de transitórios), fazendo com que sua leitura forneça diretamente a orientação em yaw do corpo. Assim, este sensor não requer um algoritmo de tratamento de sinais muito complexo, residindo aí uma de suas principais vantagens.

Conclui-se assim que em detrimento de uma maior complexidade na construção mecânica em relação ao sensor 1, obtém-se uma maior simplicidade no tratamento dos sinais, devido ao desacoplamento (mecânico) entre as leituras dos sensores.

3.2.1. Resultados

Partindo-se da configuração indicada na Figura 3.4, obtiveram-se as frequências naturais de 21,99 e 22,66 rad/s, indicando a possibilidade de batimentos nos modos de vibrar. Realmente, aplicando-se um pequeno impulso de aceleração translacional ao sistema, as leituras dos sensores são indicadas na Figura 3.5. Pode-se notar claramente que os batimentos (embora não sejam claros na figura devido ao atrito nos mancais) entre os modos de roll e pitch fazem com que a leitura de yaw seja bastante prejudicada. Esperava-se uma leitura nula em yaw, sendo obtido entretanto 30° ao final do transitório.

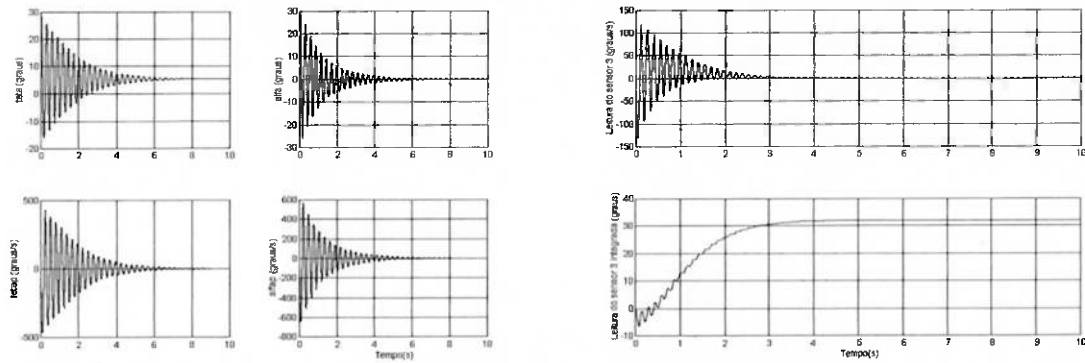


Figura 3.5 Resposta do sensor a um impulso translacional (θ medida de roll; α medida de pitch)

Modificando-se a distribuição de massas do sistema, pode-se melhorar a leitura. A adição de pequenas massas (2x2g) sobre o anel provoca uma redução de quase a metade na segunda frequência, o que evita o batimento que existia na configuração anterior e reduz as oscilações indesejáveis do pêndulo que provocam os erros de leitura do ângulo em torno de Oz. A Figura 3.6 ilustra a resposta do sensor a um impulso translacional, na qual se verifica que o erro de avaliação de yaw foi reduzido para quase 3° .

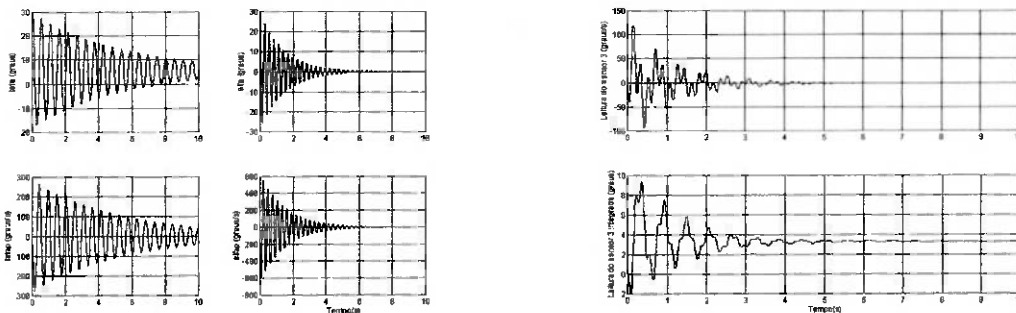


Figura 3.6 Sensor modificado

Simulando-se um caso em que o corpo realiza uma rotação em torno de Oz (yaw) senoidal de período 10s a resposta é indicada na Figura 3.7. Pode-se ver que para $t=5s$, a leitura real deveria ser 182° em yaw, sendo que o sensor mede 178° (erro de 2%).

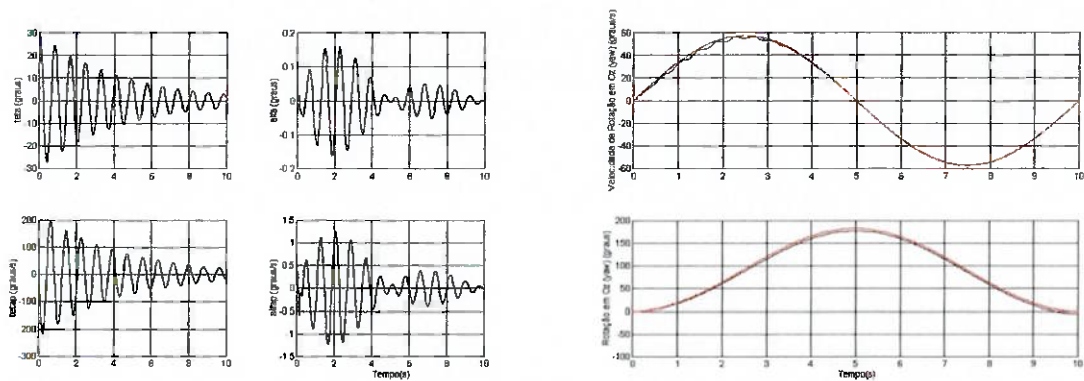


Figura 3.7 Resposta a uma rotação em Oz lentamente variável e nova distribuição de massas variável (Vermelho – Valores reais; Preto – Leitura do sensor)

A modelagem deste sensor permitiu analisar suas principais deficiências, ligadas a seu problema intrínseco de medir a rotação em um eixo diferente do vertical. Os erros de medição puderam ser quantificados em alguns casos de simulação, mostrando que alcançam valores de no máximo 10° nos casos estudados. Verificou-se também que esforços no sentido de **aumentar a diferença entre as frequências naturais do sistema** (reduzindo com isso os batimentos) geram efeitos bastante positivos na resposta do sensor.

3.3. Modelagem do sensor 3

A modelagem deste sensor foi feita calculando-se as energias cinética e potencial dos seus componentes, considerando-se que o motor forneça uma rotação constante ao rotor. Com isso pôde-se aplicar as equações de Lagrange e obtiveram-se as equações de movimento.

A Figura 3.8 mostra os principais componentes do sensor (articulação superior, trave de apoio e motor) e suas dimensões.

Assim, a posição desejada ($\theta_{j3} = 0; \theta_{k2} = 0$) não é a posição de equilíbrio estável do sistema. O sensor tende a girar de 90° em k_2 perdendo-se, assim, a referência necessária para o sensoreamento inercial.

A Figura 3.9 confirma a análise feita acima. Nela, apresenta-se uma simulação na qual o corpo fora inclinado de 30° na direção X. Pode-se ver que as leituras dos encoders realmente indicam que o motor oscila em torno da posição $\theta_{j3} = -30^\circ; \theta_{k2} = -\pi/2$, confirmando a perda de referência (o motor deixou de “olhar” para a direção inicial).

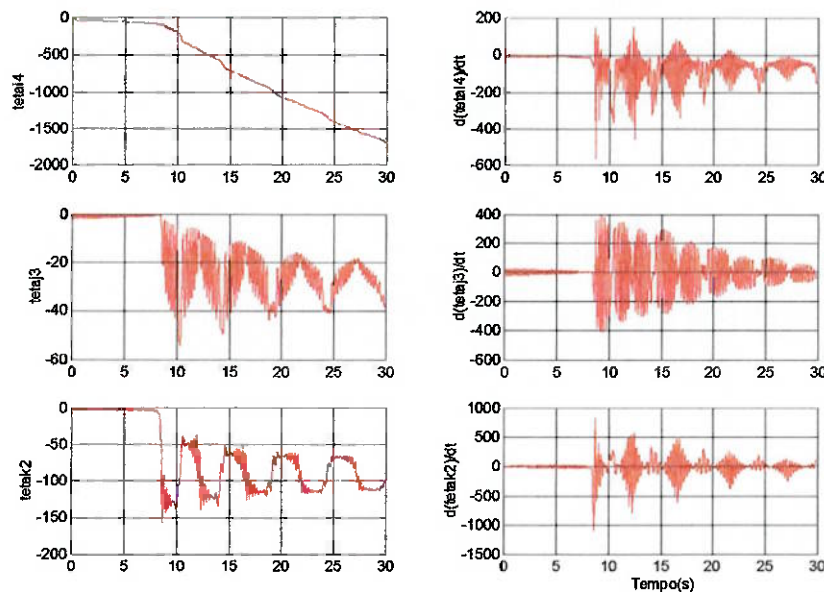


Figura 3.9 Corpo inclinado de 30° em Ox ; rotação do motor = 12000rpm;

Implementou-se o sensor no programa de simulação mecânica Working Model 3D. A sequência de posições abaixo ilustra o comportamento do sensor para o caso acima estudado.

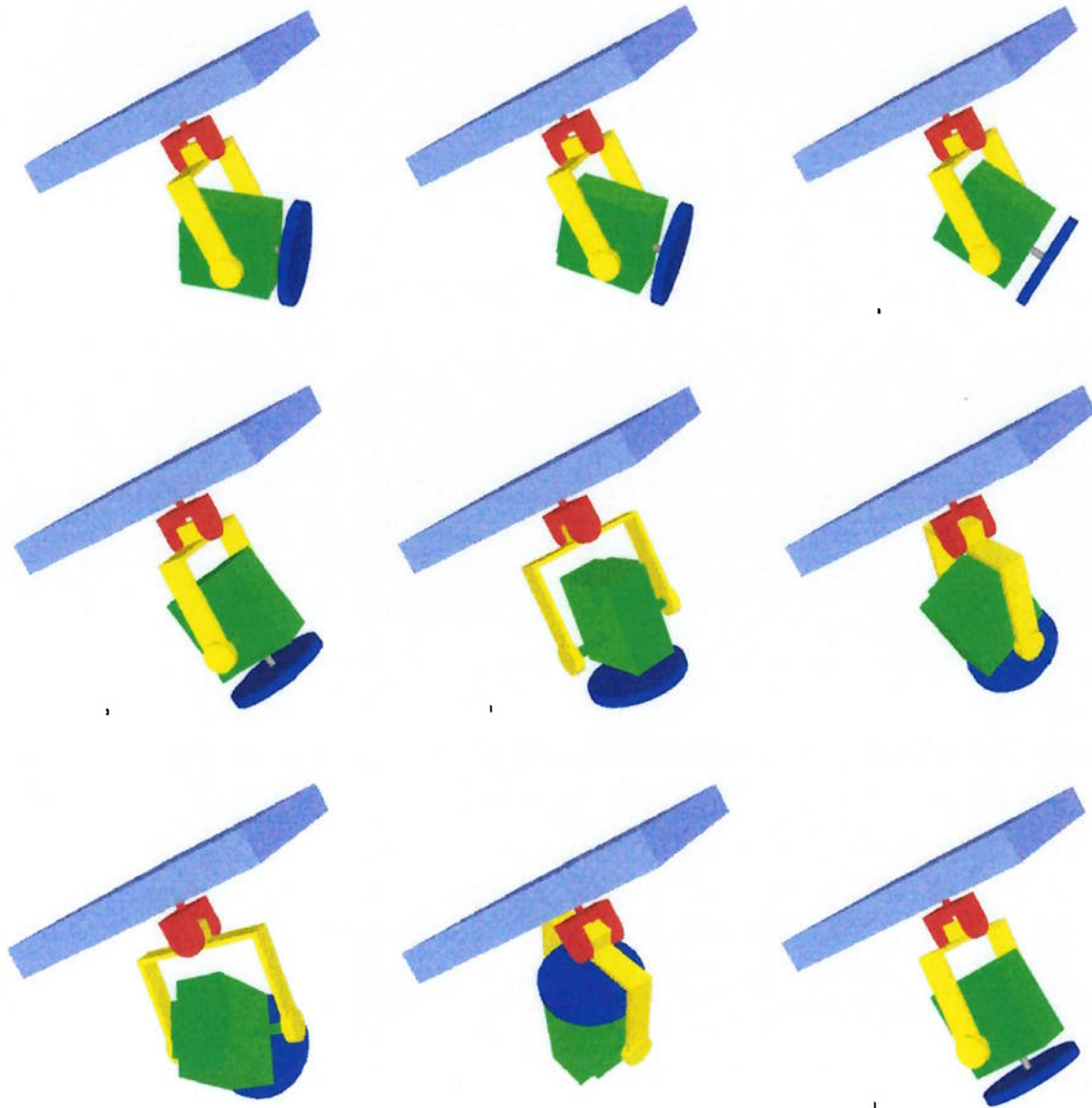


Figura 3.10 Evolução temporal do comportamento do sensor obtida no Working Model 3D
A figura acima confirma o problema do sensor. O sistema tende à posição indesejada de equilíbrio.

3.4. Modelagem do sensor 4

Seguindo o procedimento já descrito, foi desenvolvido o modelo do sensor 4 baseando-se na configuração indicada na Figura 3.11.

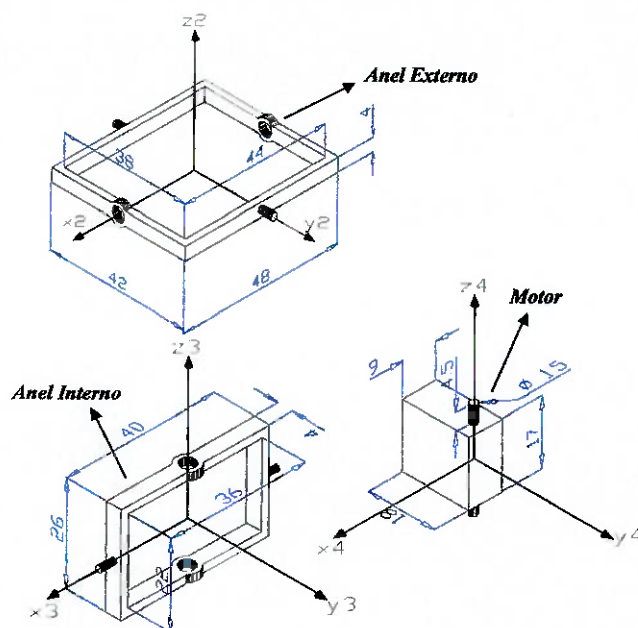


Figura 3.11 Componentes principais do sensor 4

Neste sensor pode-se mostrar que as rotações nas articulações são iguais aos ângulos de inclinação do corpo (pitch, roll e yaw), na medida em que o sistema de anéis desacopla os movimentos. Assim, não é necessário um algoritmo de tratamento de sinais muito complexo a ser executado em tempo real.

3.4.1. Resultados

Simularam-se diversos movimentos do corpo para se avaliar a resposta do sensor. O mesmo se mostrou bastante confiável em uma ampla faixa de utilização, apresentando erros inferiores a 5° .

A Figura 3.12 ilustra um caso em que o corpo possui uma rotação de yaw constante ($30^\circ/s$) e uma inclinação em pitch de 30° . Neste caso, pode-se ver que o sensor consegue uma boa precisão na medição do pitch (α) e yaw (ψ), possuindo erros inferiores a 4° .

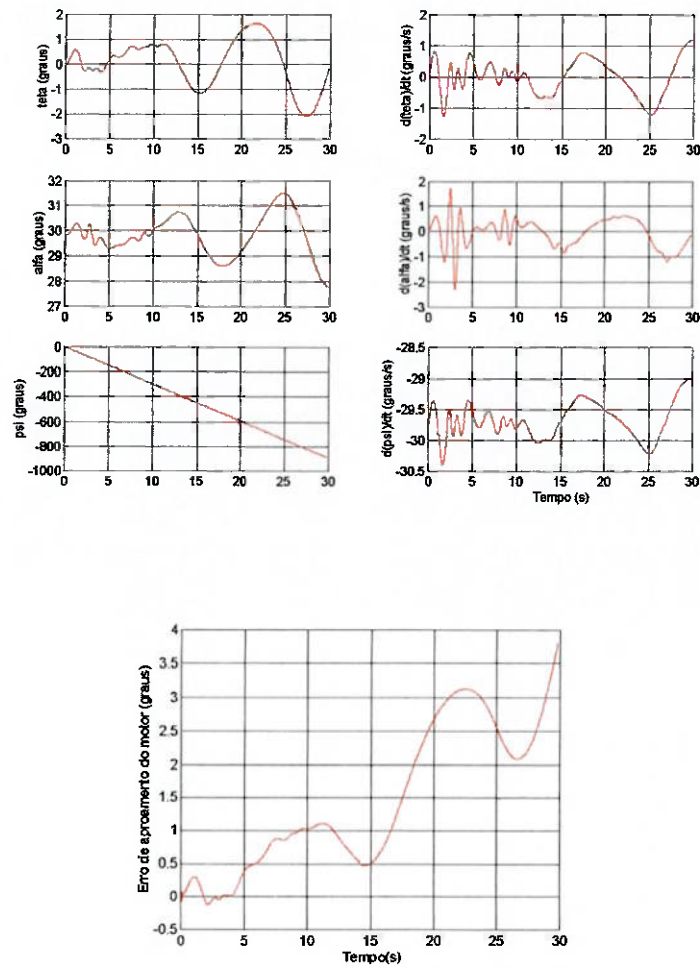


Figura 3.12 Simulação para corpo com inclinação em pitch de 30° e rotação de yaw de $30^\circ/s$; rotação do motor = 12000 rpm

Pode-se concluir, assim, que este sensor, desconsiderando possíveis problemas construtivos (desalinhamentos, desbalanceamentos, atritos indesejáveis, etc...) possui uma resposta bem aceitável.

3.5. Modelagem do sensor 5

Este sensor pode ser dividido em dois conjuntos: um giroscópico, e outro pendular. Aqui será apenas discutida a modelagem do sistema giroscópico., já que o modelo do sistema pendular já foi apresentado. Um esquema dos principais componentes e suas dimensões é apresentado na Figura 3.13.

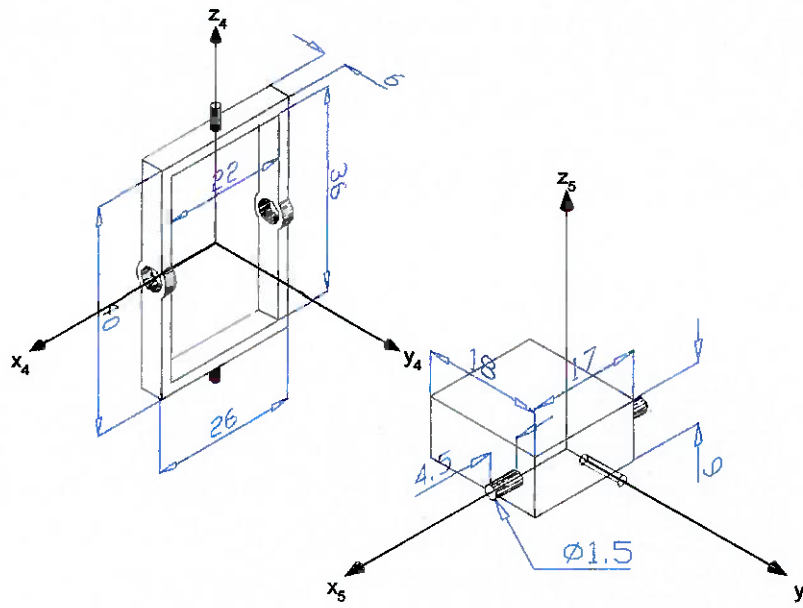


Figura 3.13 Componentes do sensor 5 – parte giroscópica

Neste sensor, as leituras dos sensores óticos presos às articulações não correspondem exatamente aos ângulos que se desejam medir. Por isso, é necessário o desenvolvimento de um método de tratamento dos sinais, que deverá ser executado em tempo real. A Figura 3.14 ilustra as entradas e saídas do algoritmo de processamento necessário no presente sensor.

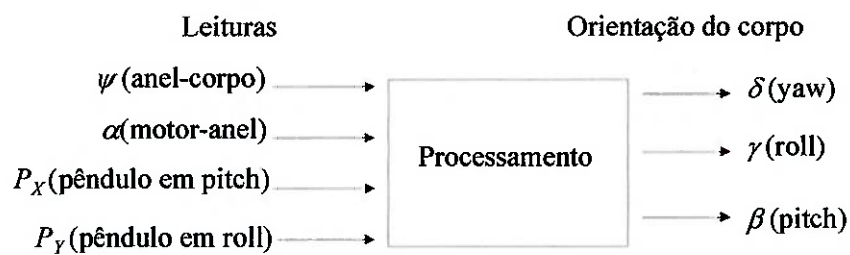


Figura 3.14 Diagrama de entradas e saídas do processamento necessário

O processamento envolve a solução da equação (3.2) (sistema pendular) e das equações (3.3) e (3.4) a seguir. Para isso, propôs-se a utilização do método numérico regula-falsi, que converge em menos de 10 iterações para o presente caso.

$$\begin{aligned} & \text{sen}(\alpha) \cdot [\text{sen}(\beta) \cdot \text{sen}(\delta) + \cos(\beta) \cdot \cos(\delta) \cdot \text{sen}(\gamma)] + \cos(\alpha) \cdot \{ \cos(\psi) \cdot [\cos(\beta) \cdot \cos(\delta) + \\ & + \cos(\delta) \cdot \text{sen}(\beta) \cdot \text{sen}(\gamma)] - \cos(\delta) \cdot \cos(\gamma) \cdot \text{sen}(\psi) \} = 0 \end{aligned} \quad (3.3)$$

$$\cos(\beta) \cdot \cos(\gamma) \cdot \text{sen}(\alpha) + \cos(\alpha) \cdot [\cos(\gamma) \cdot \cos(\psi) \cdot \text{sen}(\beta) + \text{sen}(\gamma) \cdot \text{sen}(\psi)] = 0 \quad (3.4)$$

Embora exija um complexo tratamento de sinais, este sensor tem a vantagem de permitir a avaliação do ângulo β (pitch) por meio do sistema pendular e, alternativamente, pelo sistema giroscópico, o que torna a estimativa do mesmo mais precisa e confiável.

3.5.1. Resultados

Na Figura 3.15 aplica-se um movimento geral ao corpo (yaw, pitch e roll simultâneos). Pode-se ver que o giroscópio falha em prever o ângulo de pitch e mantém erro de aproximadamente 3° na medição do ângulo de yaw. Os inclinômetros fornecem medições precisas.

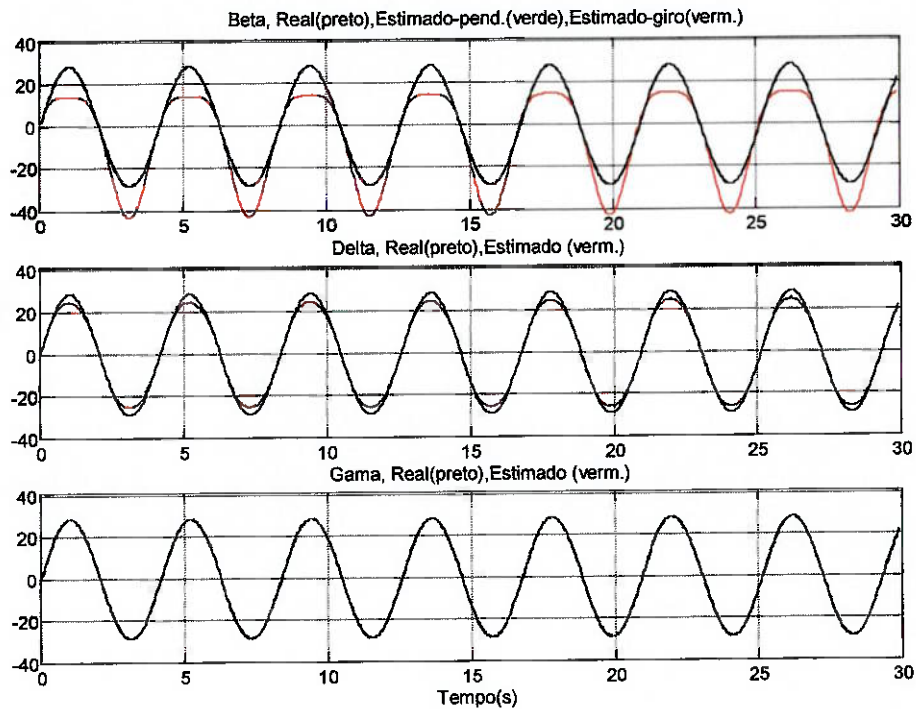


Figura 3.15 Caso 7. $\delta(t) = 30^\circ \cdot \text{sen}(1,5t)$ e $\beta(t) = 30^\circ \cdot \text{sen}(1,5t)$ e $\gamma(t) = 30^\circ \cdot \text{sen}(1,5t)$

Testes exaustivos realizados revelaram que para intervalos de trabalho de ângulos de até 60° e frequências inferiores a $1,5\text{rad/s}$, os erros de estimação são inferiores a 5° , notando que o ângulo que apresenta maior erro é o de yaw).

A Figura 3.16 ilustra o mesmo caso anterior, entretanto considerando agora uma aceleração translacional do corpo. Pode-se inferir que para movimentos acelerados, a resposta dos inclinômetros será bastante afetada, o mesmo não ocorrendo com o giroscópio que, pelo menos idealmente (ou seja, perfeitamente balanceado), será pouco influenciado por tais acelerações já que seu centro de massas está no ponto central do sistema.

Deve-se notar, entretanto, que os erros dos inclinômetros são apenas transitórios, ou seja, cessando a aceleração os mesmos se anulam.

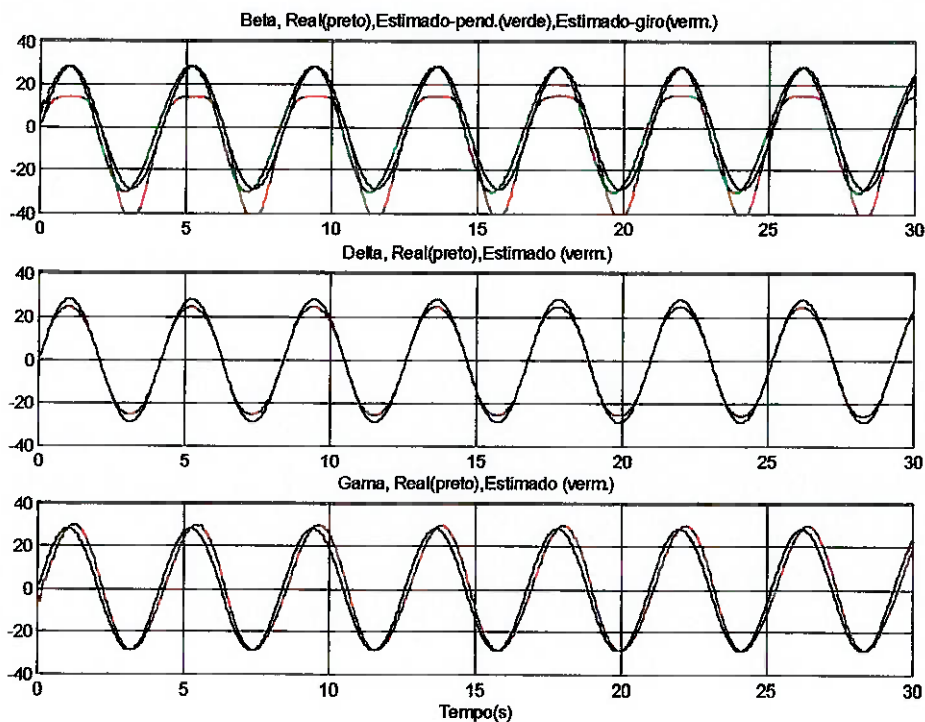


Figura 3.16 Caso 11 $\delta(t) = 30^\circ \cdot \text{sen}(1,5t)$; $\beta(t) = 30^\circ \cdot \text{sen}(1,5t)$; $\gamma(t) = 30^\circ \cdot \text{sen}(1,5t)$; $a_x = 1,0 \cdot \text{cos}(1,5t)$; $a_y = 1,0 \cdot \text{cos}(1,5t)$; $a_z = 1,0 \cdot \text{cos}(1,5t)$

3.6. Conclusões da fase de modelagem

Após a modelagem e análise de simulações das cinco alternativas apresentadas, deve-se realizar a escolha da melhor alternativa por meio de uma matriz de decisão. Entretanto, já podem ser feitas algumas observações sobre o funcionamento de cada uma destas alternativas.

A solução 1, apesar de sua simplicidade construtiva, requer capacidade de processamento muito grande, devido ao fato de o sensor piezoelétrico estar preso ao corpo, e registrar rotações em torno do eixo z relativo à peça. Assim, seria preciso integrar o sinal deste sensor constantemente o que tornaria o processamento dos sinais enviados pelo sensor inercial lento. Respostas em “tempo real” com este sensor podem requerer processadores muito rápidos devido a este problema.

O sensor 2, também de construção simples, é muito sensível a acelerações, e os erros obtidos em simulações, em que o sensor piezoelétrico deixa de estar orientado segundo a direção da gravidade, devem-se principalmente a acelerações. Se for possível garantir que o corpo a ser monitorado realiza movimentos com acelerações de baixa intensidade e pequena duração, talvez as respostas do sensor apresentem erros menores ao limite imposto durante a formulação do projeto (próximo a 4°).

Com o sensor 3, buscou-se obter uma solução que independesse do sensor piezoelétrico. Para isso, foram descartadas hipóteses baseadas em efeito magnético, e utilizou-se o efeito giroscópico para manter a orientação de um motor constante, como um referencial fixo para o sensor inercial. Entretanto, a montagem mecânica do sensor (que se assemelha a um acoplamento Cardan) mostrou ser instável para determinadas posições do corpo monitorado. Chegou-se a essa conclusão por meio de simulações do modelo no software Working Model 3D, de simulação de mecanismos. Comprovou-se a instabilidade deste sensor, também, por meio de um programa desenvolvido em linguagem C.

Para tentar resolver este problema de instabilidade, partiu-se para a configuração do sensor 4. Trata-se de uma montagem semelhante à montagem dos principais giroscópios existentes. Simulações com movimentos simultâneos em apenas dois eixos mostraram erros pequenos, abaixo dos valores limites de projeto. Entretanto, a dificuldade na construção deste sensor possivelmente inviabiliza sua utilização. Existe a necessidade de um alto grau de balanceamento em todos os componentes do sensor. As simulações prevêem balanceamento perfeito, mas sabe-se que isso é impossível, com os recursos disponíveis. Assim, pode-se concluir que, na realidade, os erros registrados por este sensor seriam ainda maiores do que os valores obtidos nas simulações numéricas.

Com o sensor 5, buscou-se uma alternativa de construção mais simples, ainda utilizando o efeito giroscópico para gerar a referência inercial. Assim, este sensor é composto por um sistema giroscópico e outro pendular. Resultados das simulações mostram que o sistema giroscópico apresenta erros reduzidos na leitura do ângulo de yaw (próximo a 4°), enquanto que o sistema pendular apresenta leituras aceitáveis para os ângulos de pitch e roll (com erros também abaixo de 4°). Este sensor também apresenta a vantagem da redundância na medição do ângulo de pitch, que é feita pelos sistemas giroscópico e pendular. Com isso, pode-se medir este ângulo pelo sistema giroscópico (quando o corpo estiver submetido a acelerações) ou pelo sistema pendular (quando não houver acelerações, pois a referência é constante – a direção da gravidade – e não há acúmulo de erros). Deve-se notar, entretanto, que a necessidade de balanceamento no motor pode inviabilizar a construção deste sensor.

É preciso, agora, escolher a melhor alternativa, por meio da matriz de decisão. Vale a pena ressaltar que a solução que parece ter o melhor comportamento, após as simulações, é a do sensor 5. Entretanto, se for comprovada a dificuldade construtiva deste sensor, pode-se analisar com maior profundidade o sensor 2, para casos em que as acelerações são limitadas.

4. Projeto básico

4.1. Matriz de Decisão

As cinco soluções propostas no estudo de viabilidade devem ser avaliadas, para que seja possível determinar qual das soluções resolve o problema proposto da forma mais satisfatória. Dificilmente haverá uma única solução que seja a melhor para todos os critérios de avaliação. Portanto, uma forma relativamente confiável de analisar as possíveis soluções é por meio de uma matriz de decisão, mostrada na Tabela 4.1 .

Tabela 4.1 Matriz de decisão

	Peso	Sensor 1		Sensor 2		Sensor 3		Sensor 4		Sensor 5	
		Nota	Nota × Peso	Nota	Nota × Peso	Nota	Nota × Peso	Nota	Nota × Peso	Nota	Nota × Peso
Segurança	7	10,0	70,0	10,0	70,0	10,0	70,0	10,0	70,0	10,0	70,0
Utilização de componentes padronizados	7	10,0	70,0	8,5	59,5	5,5	38,5	8,0	56,0	8,0	56,0
Sensibilidade	11	10,0	110,0	10,0	110,0	10,0	110,0	10,0	110,0	10,0	110,0
Durabilidade	8	10,0	80,0	10,0	80,0	10,0	80,0	10,0	80,0	10,0	80,0
Estética	4	7,5	30,0	7,5	30,0	7,5	30,0	7,5	30,0	7,5	30,0
Nível de ruído	5	10,0	50,0	10,0	50,0	8,0	40,0	8,0	40,0	8,0	40,0
Preço de venda	11	10,0	110,0	9,0	99,0	6,5	71,5	4,0	44,0	7,0	77,0
Facilidade de fabricação	9	10,0	90,0	8,5	76,5	6,5	58,5	3,0	27,0	6,0	54,0
Robustez e confiabilidade	16	6,0	96,0	7,5	120,0	0,0	0,0	8,0	128,0	9,0	144,0
Espaço ocupado	10	9,0	90,0	8,5	85,0	8,0	80,0	6,0	60,0	7,5	75,0
Necessidade de processamento	12	1,0	12,0	9,0	108,0	8,5	102,0	9,5	114,0	8,0	96,0
TOTAL	100		808,0		888,0		680,5		759,0		832,0

A importância dos critérios de avaliação, seus pesos e as notas (que podem variar entre 0 e 10) de cada uma das soluções propostas nestes critérios serão explicadas brevemente a seguir.

4.1.1. Segurança

Segurança é uma característica importante para o sensor de orientação angular, pois ele poderá ser usado em diversos ambientes, e se estiver montado em um capacete, estará na altura da cabeça do operador ou de outra pessoa que esteja por perto. Além disso, pode haver componentes girando. Uma falha em qualquer um destes componentes pode gerar danos graves ao próprio sensor, ao operador, ou até mesmo a outras pessoas que estejam por perto. Por isso, o peso estimado para segurança foi 7.

Em todas as soluções propostas, o item segurança é satisfeito, pois todas as montagens incluem um invólucro, que deve resistir a impactos externos, e evitar que algum componente defeituoso do sensor possa atingir outras pessoas. Por isso, todas as soluções recebem a mesma nota (10,0).

4.1.2. Utilização de Componentes Padronizados

A utilização de componentes padronizados na fabricação do sensor de orientação angular pode ajudar bastante na redução de custos e na diminuição de tempo de fabricação, visto que tais componentes podem ser encontrados em abundância no mercado. Por isso, utilização de componentes padronizados recebeu peso 7 na matriz de decisão.

Como sensor 1 é composto por poucas peças, que em sua maioria são padronizadas ou de fácil fabricação, recebeu nota 10,0 neste quesito. O sensor 2 pode

ter sua montagem um pouco dificultada devido à disposição dos encoders proposta, e recebeu nota **8,5**. No sensor 3, o motor elétrico utilizado é padronizado e encontrado com certa facilidade no mercado. Entretanto, devido a sua montagem compacta, requer a usinagem de diversos componentes que não são padronizados, e por isso recebe nota **5,5**. Os sensores 4 e 5 também utilizam este tipo de motor elétrico, e possuem montagem baseada em anéis, que podem ser usinados a partir de tubos de seções retangulares de alumínio ou PVC. Estes dois últimos sensores recebem nota **8,0**, já que requerem peças de usinagem mais simples a partir de componentes padronizados.

4.1.3. Sensibilidade

A sensibilidade dos sensores é limitada pela sensibilidade dos sensores óticos (que registram movimentos angulares das peças móveis) e pela sensibilidade do sensor piezoelétrico. Segundo um dos requisitos de projeto, a sensibilidade do sensor deve ser próxima a $0,5^\circ$. Sensibilidades superiores a esse valor podem começar a trazer problemas em determinadas aplicações, em que confiabilidade e precisão sejam necessárias. Por isso, o item sensibilidade recebeu peso 11 na matriz de decisão.

Todas as soluções propostas utilizam encoders e sensores óticos, que são capazes de garantir resolução de $0,5^\circ$. Inclinações são registradas baseadas em efeito pendular, e os encoders devem ser montados sobre discos que oscilam em torno de um rolamento miniatura. Supondo que o atrito nos rolamentos seja próximo de zero (o que é possível e depende da massa dos discos e do tamanho do rolamento), o conjunto pode ter sensibilidade inferior a $0,5^\circ$, respeitando assim a resolução dos encoders.

Para as soluções que dependem também do sensor piezoelétrico, verifica-se que a sensibilidade do mesmo, fornecida pelo fabricante, é de $0,1^\circ$. Desse modo, todas as soluções respeitam o requisito de sensibilidade de $0,5^\circ$, e recebem nota **10,0**.

4.1.4. Durabilidade

Ao utilizar o sensor de orientação angular, o usuário deve verificar qual a estimativa de vida útil do aparelho, sob condições normais de operação, em função do tipo de aplicação. É importante que o dispositivo funcione de forma satisfatória pelo prazo determinado (1000 horas), desde que sejam respeitadas as condições de operação. A durabilidade deve ser bem estimada, pois definirá quando o sensor deve ser substituído por uma unidade nova, sem que ocorram falhas durante operação. Por isso, durabilidade recebeu peso 8 na matriz de decisão.

As quatro alternativas tem como especificação de projeto uma vida útil de 1000 horas, o que forçosamente indica a mesma nota para todas as opções. Pode-se, a partir dessa imposição, concluir que sendo a vida útil um parâmetro de projeto comum para qualquer opção, as implicações incidirão sobre o custo de fabricação, e por consequência, no quesito preço de venda. As 5 soluções receberam nota **10,0**.

4.1.5. Estética

Primeiramente deve-se justificar a inclusão desse quesito na matriz de decisão. O sensor de orientação angular foi idealizado para diversas aplicações possíveis. Como o uso do sensor pode ser doméstico, e pode até ser comercializado com fins de entretenimento, torna-se desejável que se tenha como resultado final um projeto que não seja agressivo do ponto de vista estético, levando-se também em conta as dimensões de

cada alternativa. Mas como pode haver muitas outras aplicações em que a estética não será muito importante, este quesito recebeu peso 4 na matriz de decisão.

A estética do sensor será reflexo do acabamento de seu invólucro, já que os componentes internos não poderão ser vistos. O invólucro será uma pequena caixa, com os objetivos propostos no item 2.3.1.2. A cor, desenhos e possíveis formas arredondadas podem tornar o sensor mais atraente, e visualmente agradável. Estas modificações poderão implicar preços um pouco mais elevados em todos os sensores. Como os invólucros são praticamente iguais para as 5 alternativas propostas, todas as soluções recebem a mesma nota (7,5).

4.1.6. Nível de Ruído

O nível de ruído do sensor está diretamente ligado ao conforto do usuário. Nas aplicações em que o sensor está preso a um capacete, ele estará posicionado perto dos ouvidos do operador, e é importante que o nível de ruído não incomode este último.

Os sensores 1 e 2 utilizam o sensor piezoelétrico (que não produz ruídos audíveis pelo ser humano) e um sistema pendular. O ruído produzido pelos rolamentos miniaturizados é desprezível a uma distância de 10 cm. Por isso, os dois sensores receberam nota **10,0**. Já os sensores 3, 4 e 5 utilizam, além dos rolamentos, um motor elétrico. Existem motores silenciosos disponíveis no mercado, mas o ruído produzido, ainda que suave, pode ser percebido pelo usuário. Portanto, estes sensores receberam nota **8,0**.

4.1.7. Preço de Venda

O sensor de orientação angular deve ser visto como uma forma alternativa de se obter a atitude de um corpo no espaço. Ele não fornece medidas tão precisas, nem com drift tão pequeno como os sistemas inerciais utilizados em aviões e em outras aplicações aeroespaciais. Portanto, características de destaque deste sensor devem ser suas dimensões reduzidas e o baixo custo de fabricação, refletido no preço de venda. Portanto, pelo fato de o preço de venda ser importante, atribuiu-se a este quesito peso 11 na matriz de decisão.

O sensor 1 é o que possui menor estimativa de custo, devido à utilização de componentes padronizados, poucas peças móveis e montagem simples, e recebeu nota 10,0. O sensor 2 também tem montagem simples, mas emprega um número um pouco maior de peças móveis, que exigem certo grau de precisão na fabricação. Por isso, recebeu nota 9,0. Já o sensor 3, por exigir o uso de um motor com alto grau de balanceamento, e por utilizar peças de fabricação um pouco mais demorada, recebeu nota 6,5. O sensor 4 é o que possui maior estimativa de preço, pois muitos componentes exigem um elevado grau de balanceamento (como motor e anéis, por exemplo). Assim, recebeu nota 4,0. Finalmente, o sensor 5 é um caso intermediário entre os sensores 4 e 2, pois requer o uso de um motor balanceado, mas com menos peças móveis, e de usinagem menos complicada. Portanto, recebeu nota 7,0.

4.1.8. Facilidade de Fabricação

Quanto mais simples for a fabricação do sensor, menores serão o tempo de fabricação e montagem e o preço do dispositivo. Se for necessário fabricar muitos componentes com elevada precisão, por exemplo, o preço de venda do sensor pode

crescer, a ponto de inviabilizar a comercialização do mesmo. Portanto, este critério tem peso 9 na matriz de decisão.

O sensor 1 tem fabricação simples, requer a montagem de poucos componentes e não exige grau elevado de balanceamento. Por isso, recebeu nota **10,0**. A fabricação do sensor 2 não é tão simples quanto a do sensor 1, pois há 4 juntas de revolução e existe a necessidade de certo grau de alinhamento e balanceamento de alguns componentes. Ainda assim, pelo fato de sua fabricação não ser muito complexa, ele recebeu nota **8,5**. O sensor 3, além de mancais de rotação, utiliza também peças não padronizadas, de fabricação pouco simples. Além disso, há a necessidade de balanceamento do rotor, o que justifica a nota **7,0**. O sensor 4 requer peças com alto grau de balanceamento, e sua montagem também exige graus muito elevados de alinhamento e balanceamento. Devido a estas complicações na fabricação, o sensor 4 recebeu nota **3,0**. Finalmente, o sensor 5 também exige o balanceamento de um rotor e um grau elevado de alinhamento na parte giroscópica, mas o sistema pendular não apresenta tantos problemas, como descrito para o sensor 1. Portanto, recebeu nota **6,0**.

4.1.9. Robustez e confiabilidade

Este, provavelmente, é o item mais importante da matriz de decisão. Um sensor de orientação angular deve ser capaz de fornecer dados confiáveis referentes à atitude de um corpo no espaço, mesmo que este realize movimentos complexos (como pitch, roll e yaw ao mesmo tempo) e esteja sujeito a acelerações. O bom funcionamento de uma aplicação baseada neste sensor depende da confiabilidade de suas leituras e de sua robustez durante operação. Por isso, este item tem peso 16 na matriz de decisão.

O sensor 1 baseia-se em um sistema pendular, que fornece valores de inclinação incorretos quando sujeito a acelerações. Além disso, tanto os pêndulos como o sensor piezoelétrico monitoram inclinações nos eixos relativos, sem compensação de inclinação dos outros eixos. Isso pode resultar em erros que aumentam à medida que se intensifica a inclinação do sensor em torno de algum dos eixo. Por isso, recebeu nota **6,0**. O sensor 2 também possui um sistema pendular, e apresenta as mesmas limitações referentes a acelerações. Entretanto, são monitoradas as inclinações nos eixos globais, e há um desacoplamento entre as inclinações nos 3 eixos, o que garante maior robustez ao sensor. Recebeu nota **7,5**. Já o sensor 3 apresentou um grave problema de instabilidade, verificado com o auxílio de simulações realizadas no programa Working Model 3D, que inviabiliza sua utilização. Desse modo, recebeu nota **0,0**. O sensor 4 possui uma configuração muito mais robusta, mas também depende de uma pequena massa para manter a referência. Possui as limitações de um sistema pendular, mas em menor escala do que nos sensores 1 e 2. Em simulações numéricas, foram registrados erros consideráveis apenas para movimentos muito complexos, com movimentos oscilatórios simultâneos nos 3 eixos. Por isso, recebeu nota **8,0**. O sensor 5 mistura sistemas giroscópico e pendular, e consegue compensar as deficiências de um sistema com o outro. Após diversas simulações numéricas, verificou-se que o sensor funcionou de maneira satisfatória para movimentos complexos, apresentando erros da ordem de 5° . Assim, recebeu nota **9,0**.

4.1.10. Espaço ocupado

Ao contrário de outros sistemas inerciais existentes, este sensor deve possuir dimensões reduzidas, que compensem a pequena precisão e o elevado drift, se comparado com sistemas utilizados para navegação de aviões, satélites, veículos

espaciais e mísseis. Além disso, como trata-se de um sensor com possíveis aplicações domésticas, dimensões reduzidas têm um papel importante na seleção da melhor alternativa. Por isso, este critério possui peso 10 na matriz de decisão.

O sensor 1 tem suas dimensões limitadas principalmente pelo sensor piezoelétrico (8,5mm x 5,2mm x 21,5mm). Além disso, como há poucas peças móveis (o que possibilita uma montagem bastante compacta), recebeu nota **9,0**. O sensor 2 possui um pêndulo montado sobre outro, e devido às oscilações compostas, exige um espaço um pouco maior. Mas ainda assim sua montagem é compacta e deve respeitar os limites definidos no capítulo 2. Recebeu nota **8,5**. A montagem pouco convencional do sensor 3 deve-se, basicamente, à compacidade procurada. Apesar da presença de diversas peças móveis, o espaço ocupado pelo sensor é reduzido, o que justifica a nota **8,0** neste critério. Já o sensor 4 apresenta peças de dimensões consideráveis girando dentro de anéis. Além disso, para se obter o grau de balanceamento desejado, dificilmente poderão ser utilizadas peças tão pequenas quanto às estimadas na modelagem. Por possuir uma montagem pouco compacta, o sensor 4 recebeu nota **6,0**. Finalmente, o sensor 5 possui uma montagem um pouco mais simples e mais compacta que a do sensor 4, e o sistema pendular deve ocupar um espaço reduzido. Devido ao fato de o espaço ocupado por este sensor se assemelhar ao do sensor 3, recebeu nota **7,5**.

4.1.11. Necessidade de processamento

Os sinais gerados pelo sensor não representam, necessariamente, os ângulos de atitude do corpo medido no espaço. Como os movimentos entre as peças móveis do sensor estão acoplados, será preciso processar matematicamente estes sinais, a fim de se obter o conjunto de ângulos desejados, que descrevem a posição do corpo, na referência escolhida. Este processamento matemático dos sinais deve ocorrer de forma rápida, para

não comprometer a aquisição de dados enviados pelo sensor, e para que seja possível obter a orientação do corpo enquanto ele estiver em movimento, em “tempo real”.

Quanto mais complexa for a análise destes dados, maior será a necessidade de processamento, e isso será refletido tanto no custo do hardware (será preciso usar processadores mais velozes e caros) como no atraso entre movimentação do corpo e a obtenção de seus ângulos de atitude. Por isso, este item recebeu peso 12 na matriz de decisão.

O sensor 1 é o que requer maior capacidade de processamento de dados, já que monitora as inclinações nos eixos relativos a um corpo. Seria preciso integrar os sinais do sensor piezoelétrico considerando as inclinações dos pêndulos continuamente, e isso poderia tornar o processamento de seus sinais muito lento. Portanto, recebeu nota **1,0**. O sensor 2, pelo contrário, consegue monitorar inclinações em torno dos eixos desejados. Uma verificação rápida de transformação de coordenadas mostrou que os valores registrados pelo sensor correspondem, diretamente, aos valores desejados de inclinações do corpo no espaço. O processamento necessário se restringiria a alguma correção de aceleração, que não exigiria grande esforço computacional. Por isso, recebeu nota **9,0**. O sensor 3 não exige integração constante de sinais, mas seria preciso modelar o acoplamento entre seus diversos componentes para se obter o conjunto de informações desejadas a partir das leituras dos encoders. Isso, entretanto, não exigiria muita capacidade computacional, e o sensor recebeu nota **8,5**. A montagem mais complexa do sensor 4 garante maior independência entre leituras dos encoders de diferentes eixos, e a necessidade computacional para processamento dos dados com este sensor é baixa. Por isso, ele recebeu nota **9,5**. No sensor 5, os efeitos de acelerações sobre o sistema pendular podem ser compensados pelas leituras do sistema giroscópico. Entretanto, como o sistema pendular registraria inclinações em torno de eixos relativos, existe uma

necessidade de processamento de dados que não é desprezível. Como não se trata de um processamento muito simples, a nota para este sensor foi **8,0**.

4.1.12. Conclusão

Nota-se na matriz de decisão que a alternativa que obteve maior média foi a número 2 (sensor 2). Este foi o sensor que respeitou os requisitos de projeto da forma mais equilibrada. A seguir, serão realizadas análises de sensibilidade e compatibilidade dimensional, apenas para este sensor selecionado.

4.2. Análise de sensibilidade

4.2.1. Modelagem do sensor 2 – cálculo das frequências naturais

No capítulo 3 foi dada uma visão geral da modelagem do sensor 2, enfocando principalmente a metodologia utilizada e os resultados fundamentais. Neste item será apresentado com mais detalhes a formulação utilizada que leva ao cálculo das frequências naturais do sistema, que, como visto no capítulo 3, têm influência decisiva na acurácia das medições. Deve-se lembrar que frequências naturais elevadas levam a respostas mais rápidas e precisas, além de que devem ser bastante distintas uma da outra para evitar batimentos indesejáveis entre os modos.

A Figura 4.1 mostra os sistemas de coordenadas adotados ao longo da modelagem: $Oxyz$ fixo num referencial inercial e $O'x'y'z'$ fixo no pêndulo. Além disso, definem-se os dois graus de liberdade do sistema como sendo o ângulo de rotação α do pêndulo e θ do anel. O ângulo β define a inclinação de *pitch* do corpo e Ω a velocidade de rotação em yaw do mesmo (não representada na figura).

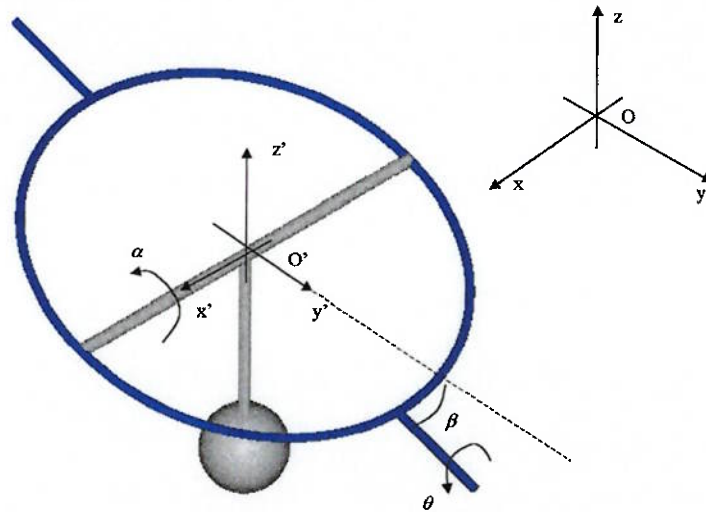


Figura 4.1 Definições

Isso posto, podem-se desenvolver as relações cinemáticas dos componentes, que levam à determinação de suas velocidades lineares e rotacionais em função dos ângulos α , θ , β , suas derivadas e da velocidade Ω .

A energia cinética do anel e do pêndulo (T_{anel} e T_{pend}), bem como suas energias potenciais (V_{anel} , V_{pend}) são :

$$T_{anel} = \frac{1}{2} J_{x_2}^{anel} (-\Omega \cos \beta \sin \theta - \dot{\beta} \cos \theta)^2 + \frac{1}{2} J_{y_2}^{anel} (\dot{\theta} - \Omega \sin \beta)^2 + \frac{1}{2} J_{z_2}^{anel} (\Omega \cos \beta \cos \theta - \dot{\beta} \sin \theta)^2 \quad (4.1)$$

$$T_{pêndulo} = \frac{1}{2} J_{x'}^{pêndulo} (\dot{\alpha} - \Omega \cos \beta \sin \theta - \dot{\beta} \cos \theta)^2 + \frac{1}{2} J_{y'}^{pêndulo} (\dot{\theta} \cos \alpha + \Omega \sin(\alpha - \beta) - \dot{\beta} \sin \theta \sin \alpha)^2 + \frac{1}{2} J_{z'}^{pêndulo} (-\dot{\theta} \sin \alpha + \Omega \cos(\alpha - \beta) - \dot{\beta} \sin \theta \cos \alpha)^2 \quad (4.2)$$

$$V_{pêndulo} = -m_{pêndulo} \cdot g \cdot l_{pêndulo} \cdot (\sin \beta \sin \alpha + \cos \alpha \cos \beta \cos \theta) \quad (4.3)$$

$$V_{anel} = -m_{anel} \cdot g \cdot l_{anel} \cdot \cos \beta \cdot \sin \theta \quad (4.4)$$

Nas expressões acima J se refere ao momento de inércia e l à distância entre o centro de massa do componente e seu eixo de rotação.

O Lagrangeano do sistema será:

$$L = T_{anel} + T_{p\grave{e}ndulo} - V_{anel} - V_{p\grave{e}ndulo} \quad (4.5)$$

Utilizando a formulação de Lagrange para o movimento do sistema obtêm-se as seguintes equações dinâmicas:

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{\theta}} \right) - \frac{\partial L}{\partial \theta} = -c_{anel} \dot{\theta} \quad (4.6)$$

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{\alpha}} \right) - \frac{\partial L}{\partial \alpha} = -c_{p\grave{e}ndulo} \dot{\alpha} \quad (4.7)$$

A solução das equações anteriores possui complicações de caráter algébrico que foram solucionadas utilizando o programa de manipulação algébrica Mathematica.

As equações resultantes são por demais complexas e não fornecem informações adicionais para o entendimento do modelo, sendo, portanto, omitidas do presente trabalho.

Pode-se mostrar que para $\beta=0^\circ$ as frequências naturais do sistema são:

$$\omega_1 = \sqrt{\frac{m_{p\grave{e}ndulo} g l_{p\grave{e}ndulo}}{J_{x'}}} \quad (4.8)$$

$$\omega_2 = \sqrt{\frac{g \sqrt{(m_{p\grave{e}ndulo} l_{p\grave{e}ndulo})^2 + (m_{anel} l_{anel})^2}}{J_{y'}^{p\grave{e}ndulo} + J_{y_2}^{anel}}} \quad (4.9)$$

As relações acima serão utilizadas no item a seguir, no qual se apresenta uma análise de sensibilidade das frequências naturais quanto aos principais parâmetros de projeto, destacando-se as dimensões dos lastros utilizados nos componentes bem como o material utilizado no eixo. Deve-se frisar que se objetiva aumentar as frequências bem como mantê-las bem distintas para evitar batimentos.

4.2.2. Análise de sensibilidade das frequências naturais quanto às dimensões dos lastros utilizados

Como será visto no item de Projeto Mecânico, o sensor a ser desenvolvido possuirá 3 lastros de chumbo para balancear os componentes e permitir que o sistema tenha frequências naturais adequadas.

O primeiro lastro será colocado no pêndulo, servindo unicamente para balanceá-lo em relação ao eixo x' . Logo, dada uma configuração do pêndulo e do sensor piezoelétrico nele montado, tal lastro é prontamente determinado para equilibrar o pêndulo de forma a manter o sensor piezoelétrico orientado na vertical.

Além deste, o anel (que no protótipo real é substituído por um eixo – ver Projeto Mecânico) terá dois lastros nele fixados, cada um de um lado do eixo Oy' . Estes lastros têm a função de equilibrar o sistema anel + pêndulo na direção Oy' (mantendo o sensor com eixo vertical), além de permitir um ajuste das frequências do conjunto.

Foi montada uma tabela dinâmica (utilizando-se o gerenciador de planilhas Microsoft Excel) na qual se colocaram as características¹ de cada componente (posições

¹ Obtidas com a modelagem 3D dos componentes no programa AutoCad.

dos centros de massa, massas e momentos de inércia)². A planilha calcula então o lastro colocado no pêndulo, restando então as dimensões dos dois lastros do anel. Para isso, o usuário deve fornecer a massa de um deles, sendo que a planilha calcula então as dimensões e massa do último lastro, fornecendo ao final as duas frequências naturais do sistema.

Com auxílio desta planilha, pôde-se fazer uma análise paramétrica das frequências naturais do sistema variando-se a massa dos lastros do anel.

A Figura 4.2 mostra como variam as frequências naturais do sistema em função da massa do lastro frontal do anel. Como era de se esperar, a frequência w_1 não depende de tal massa, pois está relacionada à oscilação do pêndulo (mantendo-se o anel fixo). Já a segunda frequência tem seu valor diminuído conforme aumenta-se a massa, o que é devido a um aumento da inércia do anel. Com tal diminuição, as duas frequências tornam-se mais distintas, o que diminui a ocorrência de batimentos e melhora a resposta do sensor.

² Para um maior detalhamento de cada componente, ver item Projeto Mecânico

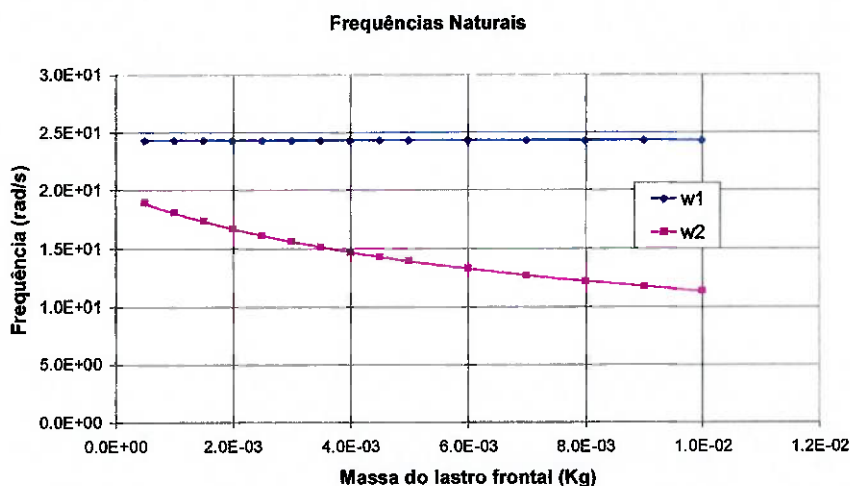


Figura 4.2 Frequências naturais em função da massa do lastro frontal do anel

Entretanto, este aumento de massa leva a um aumento da espessura dos lastros (que são considerados cilindros de 12mm de diâmetro de chumbo encaixados em estruturas de acrílico presas no anel). Este aumento gera problemas de montagem que devem ser levado em conta na escolha da massa dos lastros. A Figura 4.3 ilustra a relação entre as espessuras dos lastros e a massa escolhida do lastro frontal.

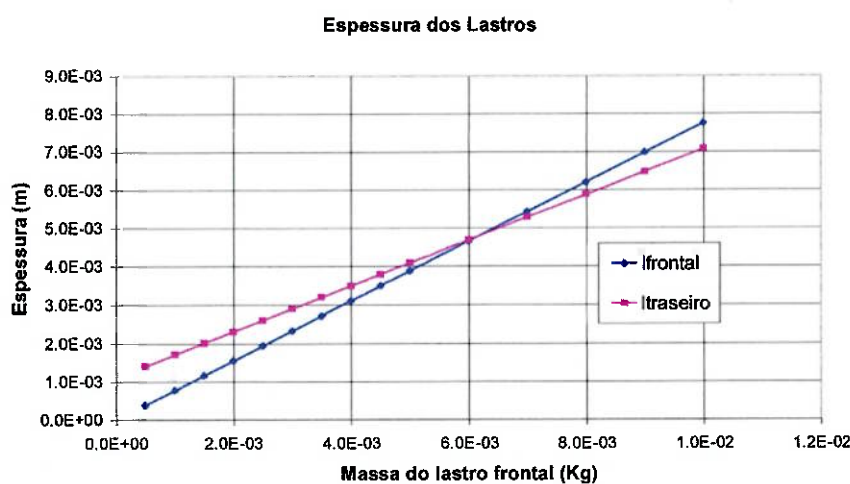


Figura 4.3 Espessuras dos lastros em função da massa do lastro frontal

Pode-se concluir, assim, que a escolha correta das massas dos lastros deve levar em conta tanto as frequências naturais do sistema quanto as dimensões de lastro

necessárias. Esta relação de compromisso foi analisada e chegou-se à conclusão de que uma massa de aproximadamente 3g para o lastro frontal fornece valores razoáveis de espessura (de 2 a 3 mm) e frequências naturais bastante diferentes (2,4 e 1,5 rad/s), sendo esta massa a utilizada na construção do protótipo.

4.2.3. Análise de sensibilidade das frequências naturais quanto ao material do anel

Um outro parâmetro de projeto importante é o material do anel. Alguns requisitos devem ser impostos, tais como resistência à corrosão, usinabilidade, resistência mecânica, etc.. Assim, chegaram-se a alguns materiais possíveis de serem utilizados na confecção do anel. Estes materiais são: aço inoxidável, latão, PVC e alumínio.

Para cada material, foram calculadas as frequências naturais do sistema, considerando uma massa para o lastro frontal do anel de tal forma que a espessura dos lastros não ultrapassassem 3mm. A Tabela 4.2 contém os resultados desta análise.

Tabela 4.2 Frequências naturais do sistema para diferentes massas do anel

	<i>w1(rad/s)</i>	<i>w2(rad/s)</i>
Latão	24,253	15,561
Aço	24,253	16,074
Alumínio	24,253	16,529
PVC	24,253	16,489

Pode-se concluir que a utilização de latão é realmente mais recomendado, na medida em que, sendo mais denso, aumenta o momento de inércia do anel, reduzindo a frequência natural associada à rotação do mesmo (w_2), diminuindo a ocorrência de batimentos. Logo, este será o material utilizado no protótipo.

4.3. Compatibilidade dimensional

É preciso verificar se as dimensões dos diversos componentes do sensor são compatíveis com a liberdade de movimento que cada um deles deve ter. Deve-se verificar, também, se as dimensões finais do sensor respeitam os limites estabelecidos no capítulo 2. Para isso, será empregada a configuração proposta no capítulo 5. Esta configuração do sensor 2 é resultado de diversas iterações e tentativas de simplificar sua construção. As figuras apresentadas neste item também são resultado de iterações, em que foram variadas dimensões de componentes para que se pudesse chegar a uma montagem adequada do ponto de vista dimensional.

4.3.1. Disco interno – pitch

Sabe-se que um foto-receptor de um mouse *Logitech* consegue registrar o sentido da movimentação de um traço de espessura superior a 0,328mm. Sabe-se que o encoder deve gerar 720 pulsos por volta, para garantir resolução de 0,5°. Como cada conjunto de foto-receptor possui na verdade dois receptores, e como eles conseguem identificar bordas de subida e de descida, cada marcação do encoder será responsável pela geração de 4 pulsos. Assim, serão necessários 180 marcações por circunferência. Com a espessura acima citada, o diâmetro médio do encoder deverá ser de:

$$\pi \cdot D = 2 \cdot 180 \cdot (0,328) \Rightarrow D = 37,59mm$$

(pois haverá 180 marcações de espessura 0,328mm e outros 180 espaços transparentes entre tais marcações, com a mesma espessura).

O diâmetro médio do encoder corresponde à circunferência que passa sobre o centro do foto-receptor. A esse valor, deve-se adicionar metade do comprimento de uma

marcação do encoder para se obter o diâmetro externo do mesmo. Como cada marcação deve ter 4mm de comprimento, o diâmetro externo do encoder será de, aproximadamente, 42mm, como pode-se ver na Figura 4.4.

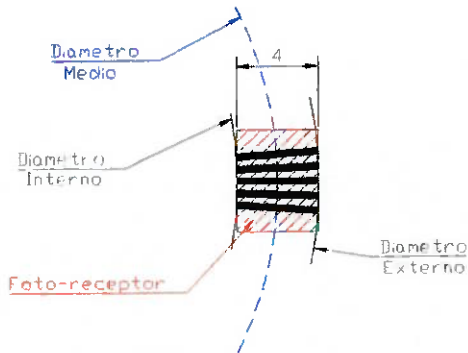


Figura 4.4 Diâmetros do disco interno

Com este valor, e sabendo que o disco interno deve ser capaz de registrar inclinações de até $\pm 60^\circ$, podem-se considerar as dimensões do sensor piezoelétrico, montado sobre o disco interno, para se estimar o comprimento necessário do eixo, como mostra a Figura 4.5.

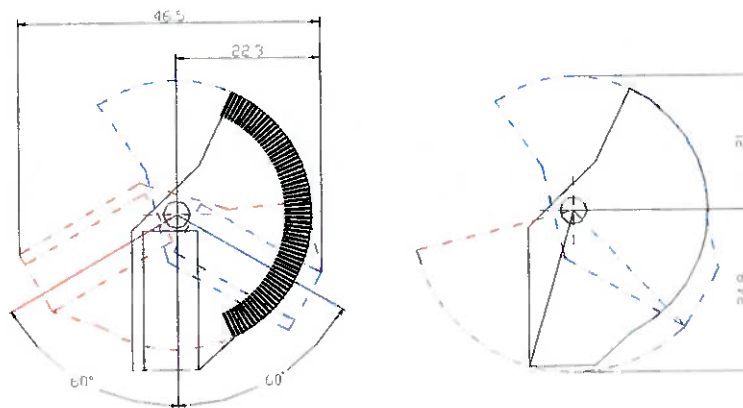


Figura 4.5 Espaço ocupado pelo disco interno

4.3.2. Disco externo – roll

O disco externo deve ser montado sobre o eixo. Portanto, além do espaço já especificado para o disco interno, deve haver ainda espaço para apoiar o disco externo. Considerando que a espessura do disco vale 1mm, verifica-se na Figura 4.6 a montagem do disco externo sobre o eixo.

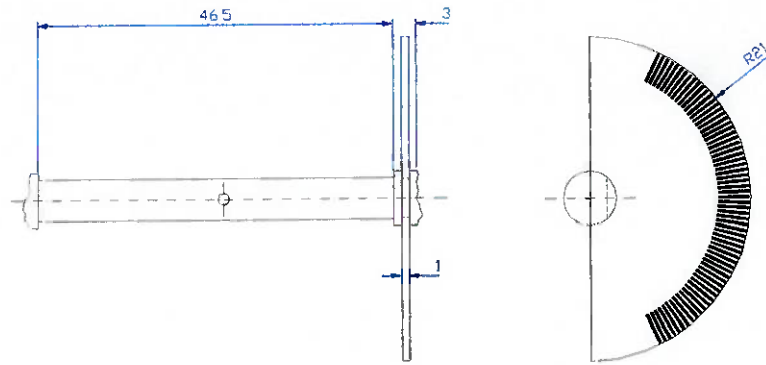


Figura 4.6 Espaço ocupado pelos discos interno e externo no eixo

4.3.3. Invólucro

As dimensões do invólucro devem permitir a movimentação livre dos dois discos – interno e externo – e deve, também, estar dentro dos limites definidos no capítulo 2 (um cubo de aresta de 60mm). A Figura 4.7 mostra a movimentação dos dois discos para intervalos de inclinações maiores do que os especificados no capítulo 2, a favor da segurança.

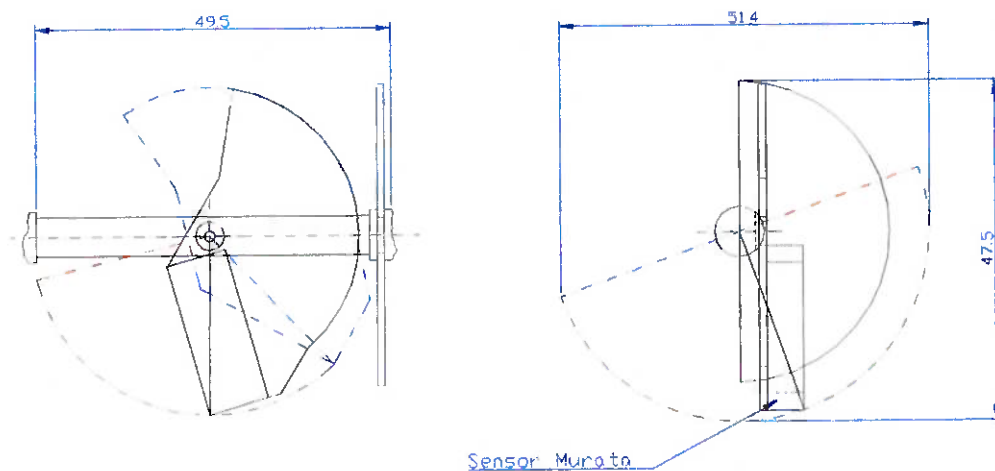


Figura 4.7 Dimensões mínimas do invólucro

Nota-se que para permitir a leitura de oscilações de $\pm 60^\circ$ com o eixo interno (pitch) e de $\pm 90^\circ$ no eixo externo (roll), o invólucro deve ter dimensões internas de 51,4mm (comprimento), 49,5mm (largura) e 47,5mm (altura). Tais valores estão dentro dos limites já especificados, mas podem sofrer pequenas modificações ao longo do

projeto executivo, à medida que surgirem detalhes construtivos não previstos no projeto básico.

5. Projeto Executivo do Sensor

Após a escolha da melhor alternativa e o desenvolvimento da mesma no projeto básico, foram feitos os desenhos e as especificações finais dos conjuntos e dos componentes do sensor inercial. Desse modo, este capítulo será dividido em quatro partes: a primeira mostrará detalhes do projeto do sistema mecânico do sensor. A segunda parte contém o projeto do sistema eletrônico. Na terceira parte do capítulo, podem-se verificar os detalhes do projeto do sistema de software. Finalmente, na quarta e última parte do capítulo, serão apresentados os resultados da construção de um protótipo do sensor, incluindo fotos e gráficos de ensaios realizados com o mesmo.

Devido à complexidade do sistema mecânico, foram construídos dois protótipos. O primeiro, simplificado, foi construído para verificar a exequibilidade física de certos componentes e subsistemas, além de verificar o funcionamento do sensor piezoelétrico quando sujeito a acelerações. Após a construção deste primeiro protótipo, que exigiu desenhos de fabricação de diversas peças, partiu-se para um aperfeiçoamento do projeto mecânico e para a construção do segundo protótipo, com todos os subsistemas.

5.1. Projeto Mecânico

Para facilitar a compreensão deste item, inicialmente será descrito o sistema mecânico de forma superficial, com seus principais subsistemas e componentes. Em seguida, serão mostrados os detalhes de projeto de cada um destes componentes e subsistemas.

A idéia principal do sensor é verificar deslocamentos angulares entre peças móveis por meio de encoders, nos eixos x e y , e por meio de um sensor piezoelétrico

para o eixo z. É importante manter o sensor piezoelétrico orientado segundo a direção da gravidade, e isso foi feito com um pêndulo “duplo”, ou seja, um pêndulo com dois graus de liberdade. Após diversas iterações no projeto básico, chegou-se a uma configuração que é composta por um disco de acrílico com um lastro, que oscila na direção do eixo x. A articulação deste disco é montada sobre um eixo de latão, no qual está preso outro disco de acrílico, responsável pelo registro de inclinações em torno do eixo y. Para isso, o eixo de latão deve oscilar em torno do eixo y, e isso é feito com o uso de dois rolamentos. Estes dois rolamentos estão presos a um invólucro, que serve também para proteger o sensor. Assim, garante-se que o disco interno está sempre alinhado com a direção da gravidade para quaisquer inclinações do sensor. Por isso, o sensor piezoelétrico é montado sobre o disco interno, como pode-se ver nas Figura 5.1 e Figura 5.2 a seguir.

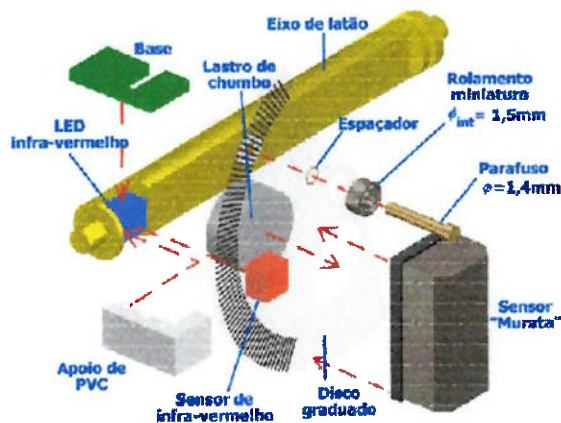


Figura 5.1 Componentes do subsistema “disco interno”

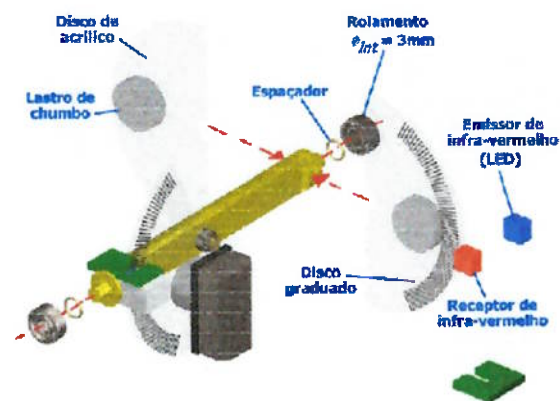


Figura 5.2 Componentes do subsistema “Eixo”

5.1.1. Subsistema 1 – Disco interno

Como já foi mostrado na análise dimensional (item 4.3), para que a resolução do disco interno seja de $0,5^\circ$, o diâmetro do mesmo deve ser aproximadamente de 42mm (mais precisamente, 41,586mm). Sabe-se que esse disco deve ser responsável pelo

monitoramento de inclinações em um campo de $\pm 60^\circ$. Portanto, uma primeira versão do disco, levando em conta apenas o encoder, pode ser vista na Figura 5.3.

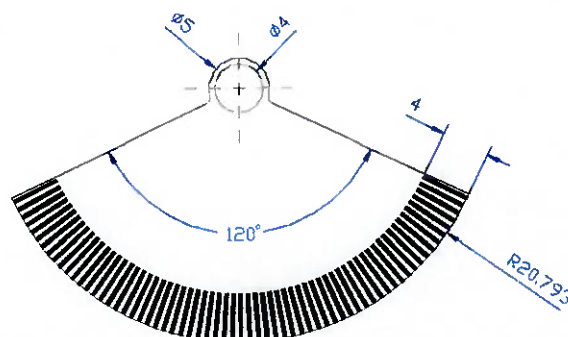


Figura 5.3 Disco interno com marcas óticas

Já foi mencionado no estudo de viabilidade que este sistema baseia-se no efeito pendular para registrar inclinações. Para registrar os deslocamentos do disco interno em relação a seu apoio, utilizam-se marcações óticas no disco, um emissor e um receptor de infravermelho, estes dois últimos presos no apoio do disco. Assim, garante-se que as marcas óticas passam entre o emissor e o receptor de infravermelho, que conseguem então registrar o movimento do disco, tanto em intensidade como em sentido. O sentido de movimento pode ser registrado porque o receptor na verdade é composto por dois receptores encapsulados juntos, entre os quais o sinal de uma marca ótica chega com uma defasagem de 90° . A Figura 5.4 ilustra esta montagem.

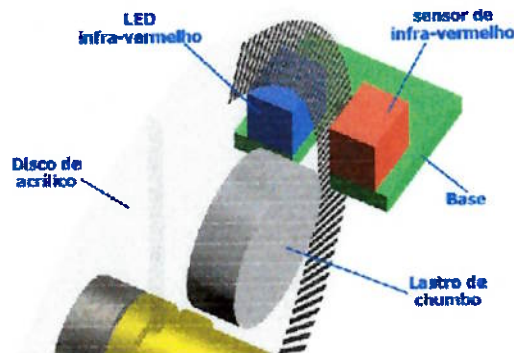


Figura 5.4 Montagem do disco ótico com o emissor e o receptor de infravermelho (encoder)

O material escolhido para este disco foi o polimetilmetacrilato (acrílico), devido a suas características de resistência mecânica, estabilidade química e transparência. As marcas óticas do encoder, já descritas, foram impressas em filme com uma impressora laser, e posteriormente unidas ao disco por meio de adesivo. Como já foi mencionado, este disco deve, também, ser apoio para o sensor piezoelétrico. Considerando suas dimensões, mostradas na Figura 5.5, obtém-se outra possível configuração para o disco interno, como mostra a Figura 5.6.

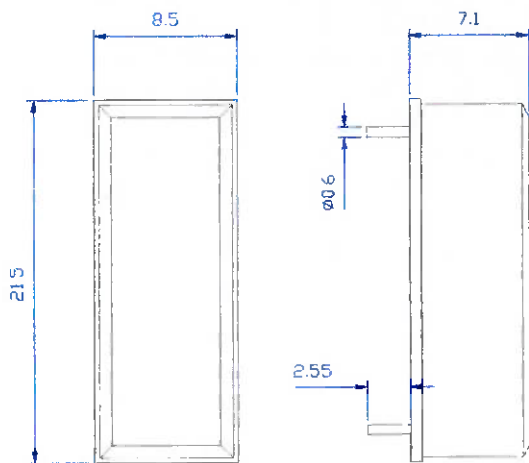


Figura 5.5 Dimensões do sensor piezoelétrico

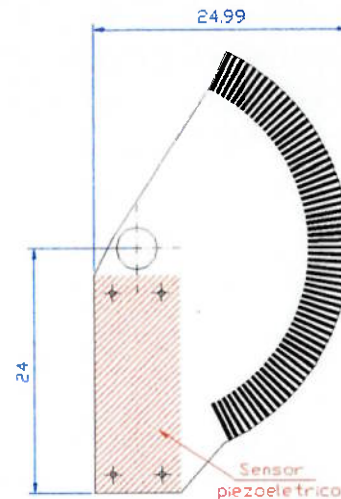


Figura 5.6 Dimensões do disco interno com marcas óticas e sensor piezoelétrico

Como o sensor piezoelétrico não cabe no espaço entre as marcações do encoder e o centro do disco interno, optou-se por posicionar o sensor piezoelétrico abaixo do centro do disco, com o encoder localizado à direita do centro do disco. Entretanto, é preciso balancear o conjunto, de modo que a marcação correspondente ao zero do encoder fique na posição horizontal. Além desse balanceamento em torno do eixo x , deve ser feito, também, o balanceamento estático do conjunto em torno do eixo y , porque o disco interno estará apoiado em um mancal de rolamento, e não é interessante transferir momentos a este mancal. Para conseguir balancear o disco estaticamente em

relação aos dois eixos, foram feitas diversas iterações, e chegou-se à configuração mostrada na Figura 5.7.

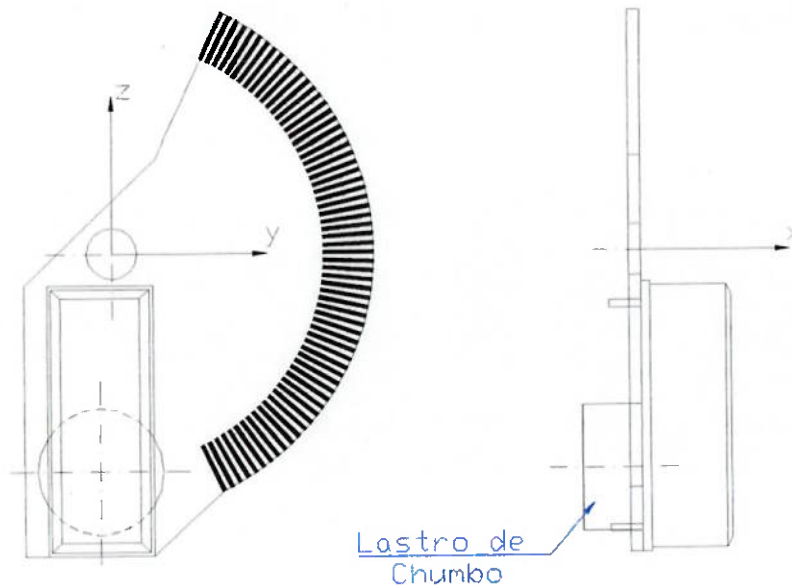


Figura 5.7 Disco interno balanceado, com sensor piezoelétrico e lastro de chumbo

Para realizar este balanceamento, considerou-se o centro de massa do sensor piezoelétrico posicionado a 2,4mm de sua base, já que seus componentes concentram-se na base do mesmo. A Tabela 5.1 mostra as dimensões dos componentes envolvidos no balanceamento do disco interno.

Tabela 5.1 Dimensões dos componentes envolvidos no balanceamento do disco interno

	Disco interno (de acrílico)	Sensor piezoelétrico	Lastro de chumbo
Massa (g)	$8,25 \times 10^{-1}$	2,7	4,21
CG_x (mm)	0	2,9	-1,86
CG_y (mm)	7,62	-0,993	-0,993
CG_z (mm)	-3,74	-13,2	-17,29

Portanto, deve-se utilizar um lastro de chumbo de formato cilíndrico com massa igual a 4,21g, com 10mm de diâmetro e 4,7mm de comprimento. O desenho de fabricação do disco interno pode ser visto no apêndice I.

Como apoio para o disco interno, utilizou-se um mancal de rolamento, devido a suas características dimensionais, resistência a corrosão, baixas velocidades de operação, disponibilidade no mercado, por exigir pequena ou nenhuma manutenção e por garantir baixo coeficiente de atrito. Desse modo, baseando-se em GETSCHKO (1997), chegou-se à conclusão de que o mancal de rolamento mais indicado para a aplicação proposta é o NSK 681X ou similar, com as seguintes propriedades:

$$\varnothing_{\text{int}} = 1,5\text{mm}; \quad \varnothing_{\text{ext}} = 4\text{mm}; \quad \text{largura } B = 2\text{mm};$$

$$\text{capacidade de carga dinâmica } C = 112\text{N}; \quad \text{estática } C_0 = 33\text{N};$$

Dadas as baixas cargas e velocidades de operação do disco interno, os principais parâmetros de projeto não foram capacidade de carga e estimativa de vida útil, mas o momento de atrito resultante.

Para utilizar este rolamento miniatura, decidiu-se empregar um parafuso como eixo, de diâmetro 1,4mm, como mostra a Figura 5.8.

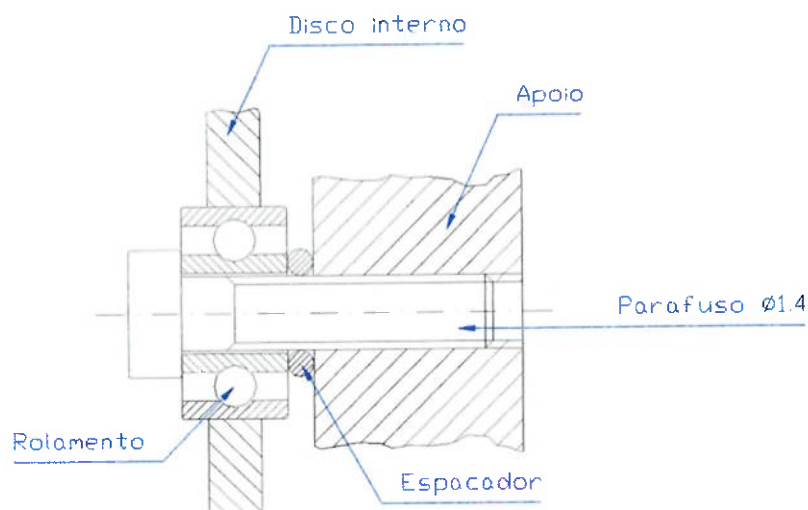


Figura 5.8 Parafuso como eixo do rolamento miniatura

Foi usado, também, um anel espaçador com diâmetro interno de 1,5mm, feito com fio de “wire-up”, que garante o espaçamento necessário entre o apoio e a pista interna

do rolamento, sem entrar em contato com a pista externa do mesmo. Ao rosquear o parafuso na rosca interna do apoio, garante-se a fixação da pista interna do rolamento entre a cabeça do parafuso e o anel espaçador, mesmo com o diâmetro do parafuso sendo menor que o diâmetro interno do rolamento.

5.1.2. Subsistema 2 – Eixo

O parafuso descrito no item anterior, que funciona como eixo para o disco interno, é fixado em um eixo de latão, sobre o qual também são montados o conjunto de emissor e receptor de infravermelho para o disco interno e o disco externo, como mostra a Figura 5.2.

Como material para o eixo, escolheu-se o latão devido a sua resistência a corrosão, facilidade de usinagem e elevada densidade (simulações numéricas revelaram, durante o projeto básico, que o emprego de um metal de baixa densidade, como o alumínio, teria como consequência uma perigosa proximidade entre as frequências naturais dos discos interno e externo que poderia resultar em batimentos). Entretanto, na região que serve como apoio para o parafuso do disco interno, foi utilizado um cilindro de PVC, pois o parafuso deveria cavar uma rosca no material à medida que fosse penetrando, já que não foram encontrados machos para roscas de 1,4mm. O PVC, além de oferecer menor resistência que o latão, sofre uma pequena compressão depois de “usinado” pelo parafuso, o que garante o travamento deste último.

Para a fixação do emissor e do receptor de infravermelho responsáveis pelo registro de movimento do disco interno utilizou-se uma base de placa de “wire-up”, cortada no formato desejado, e um encapsulamento com formato de “J” feito de PVC,

mostrado na Figura 5.9. Para fixar tal conjunto no eixo, foi preciso usinar um rebaixo no mesmo, que será mostrado adiante.

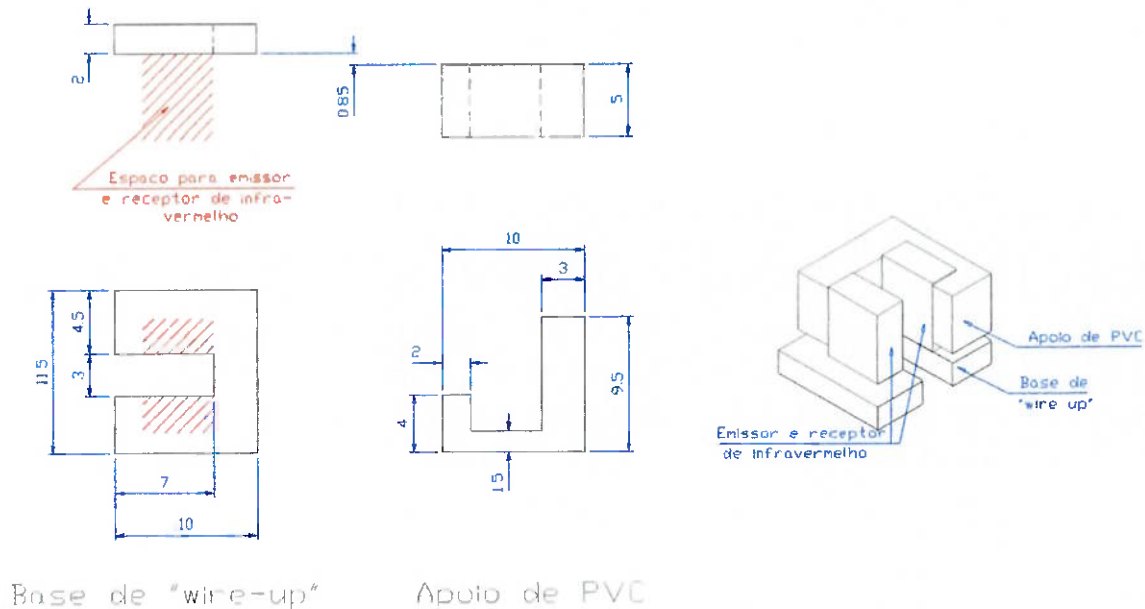


Figura 5.9 Apoio para emissor e receptor de infravermelho do disco interno

Para fixar o disco externo, responsável pelo registro de inclinações em torno do eixo y , foi necessário usinar outro rebaixo no eixo, como mostra a Figura 5.10. A primeira idéia foi utilizar um setor angular de 90° com as marcas óticas impressas, o que já seria suficiente para registrar os ângulos de $\pm 45^\circ$. Entretanto, verificou-se que a inclusão deste disco externo no lado oposto ao do disco interno causaria um desbalanceamento para o lado esquerdo na Figura 5.11, que corresponde ao lado do próprio disco externo. Portanto, seria preciso acrescentar uma massa de desbalanceamento no lado do disco interno.

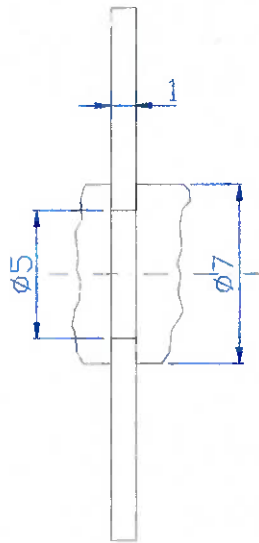


Figura 5.10 Rebaixo para fixação do disco externo

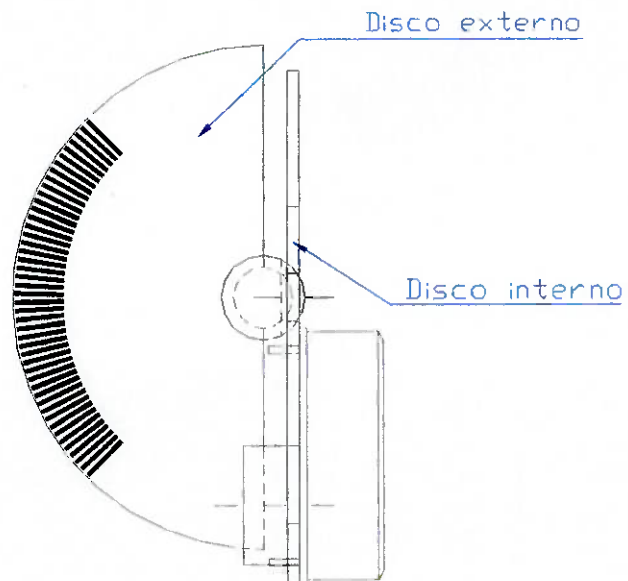


Figura 5.11 Disco externo – primeira versão

Para facilitar o balanceamento estático do eixo na direção y , foram usados dois semi-discos, ou seja, setores angulares de 180° , como mostra a Figura 5.12. Ao montar estes dois semi-discos, o eixo continuaria com um desbalanceamento residual no lado do disco interno. Portanto, seria necessário acrescentar lastros de chumbo ao semi-disco da esquerda, na figura.

Como seriam montados dois semi-discos, aproveitou-se para incluir dois lastros, um em cada semi-disco, com dois objetivos:

1- balancear o eixo estaticamente na direção y ;

2- alterar o momento de inércia do eixo, diminuindo sua frequência natural e afastando-a da frequência natural do disco interno. É interessante manter as frequências naturais dos dois pêndulos o mais afastadas possível para evitar batimentos. Batimentos poderiam resultar em leituras de inclinação incorretas pelos encoders e pelo sensor piezoelétrico.

Antes da inclusão de lastros, o centro de massa do conjunto eixo + disco interno estava deslocado para a direção deste último, provavelmente devido à massa do sensor piezoelétrico. Desse modo, seria preciso acrescentar um lastro de dimensões maiores e mais afastado do eixo no lado oposto (lado esquerdo na Figura 5.12). Como o lastro mais afastado em relação ao eixo poderia interferir com a posição das marcas óticas do encoder do disco externo, estas últimas foram unidas ao semi-disco do lado direito na Figura 5.13 (o mesmo lado do disco interno), por meio de adesivos.

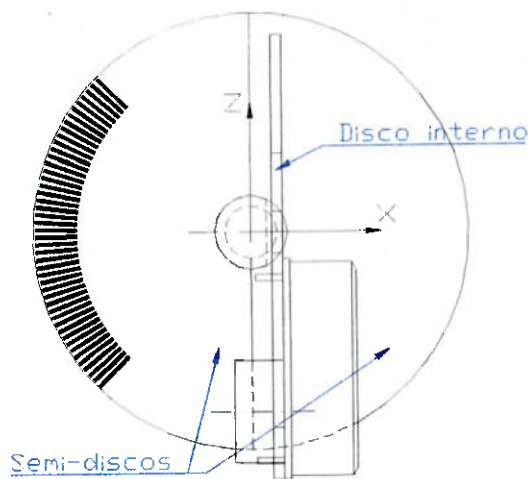


Figura 5.12 Dois semi-discos presos no eixo

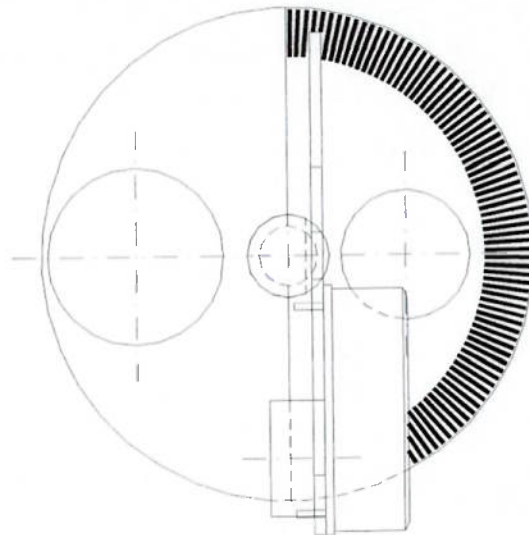


Figura 5.13 Montagem final do disco externo com lastros

Para balancear o eixo na direção y foi preciso considerar posições de centro de massa e massas de diversos componentes, incluindo os elementos já definidos do disco interno, os fotosensores e sua proteção de PVC, os semi-discos e os novos lastros de chumbo nestes semi-discos.

Após diversos cálculos e iterações, chegou-se à conclusão de que o lastro 1 deve ser um cilindro de chumbo de 11mm de diâmetro e 2,77mm de espessura (massa = 3g). O lastro 2 também deve ser um cilindro de chumbo, mas com diâmetro de 15mm e espessura igual a 2,24mm (massa = 4,52g).

Para apoiar o eixo em um invólucro, que será descrito adiante, foram utilizados dois mancais de rolamento, devido às características já citadas em 5.1.1. Por razões construtivas, não foi possível utilizar o mesmo rolamento miniatura empregado com o disco interno. Levando em conta que o atrito aumenta à medida que aumentam as dimensões do rolamento, e considerando as dimensões do eixo, optou-se pelo uso de dois rolamentos NSK 683 ou similar, com:

$$\varnothing_{\text{int}} = 3\text{mm}; \quad \varnothing_{\text{ext}} = 7\text{mm}; \quad \text{largura } B = 2\text{mm};$$

$$\text{capacidade de carga dinâmica } C = 310\text{N}; \quad \text{estática } C_0 = 111\text{N};$$

Novamente, a seleção destes rolamentos baseou-se mais em características dimensionais e atrito reduzido do que em carregamentos e vida útil, pois os esforços axial e radial são pequenos.

Foram usinadas roscas M3 nas extremidades do eixo com a intenção de impedir o movimento axial dos rolamentos com a colocação de porcas. Para evitar o travamento da pista externa, foram usados novamente anéis espaçadores confeccionados com fios de “wire-up”, como mostra a Figura 5.14.

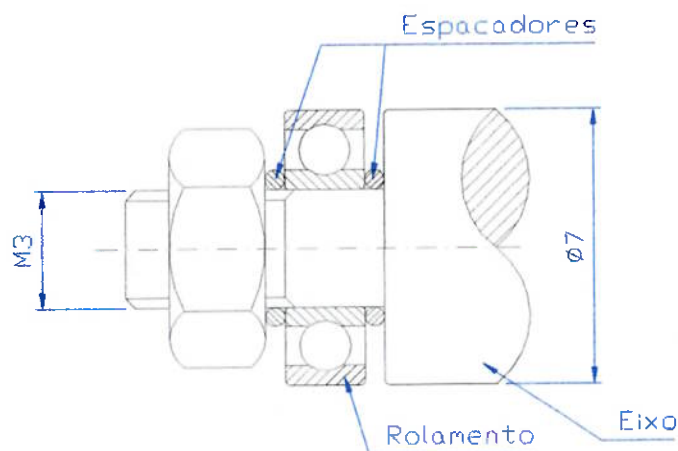


Figura 5.14 Fixação dos rolamentos no eixo

Finalmente, levando em consideração as restrições apresentadas na análise dimensional (item 4.3), a existência de rebaiços, as dimensões dos rolamentos selecionados, a necessidade de se usinar roscas nas extremidades e as dimensões do invólucro (que será descrito a seguir), chegou-se ao seguinte desenho para o eixo:

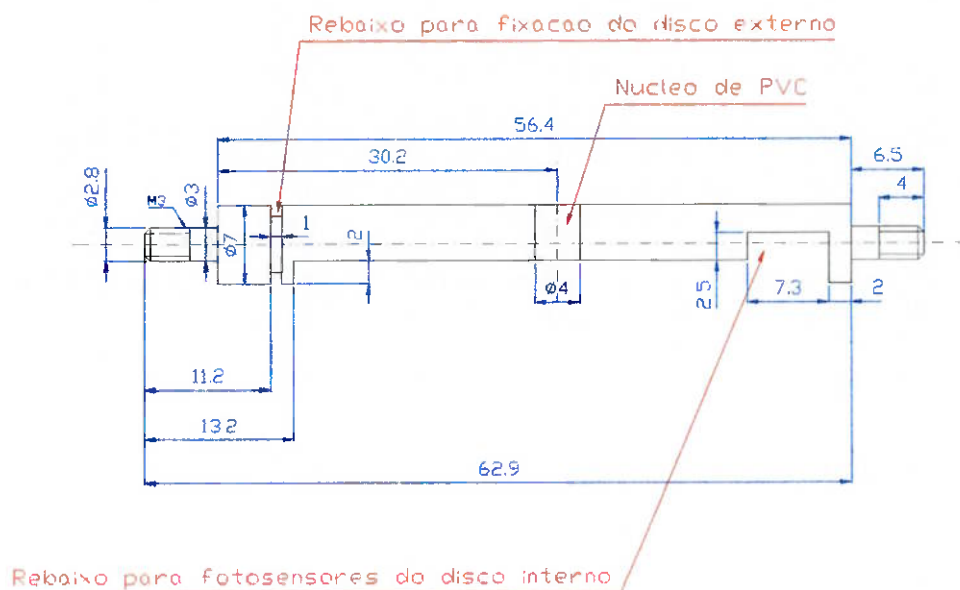


Figura 5.15 Principais dimensões do eixo de latão

O desenho de fabricação do eixo pode ser visto no apêndice I.

5.1.3. Subsistema 3 – Invólucro

O invólucro tem três funções principais: apoiar os rolamentos do eixo, proteger os componentes do sensor e apoiar o emissor e o receptor de infravermelho responsáveis pela detecção de movimento do disco externo. Para testar o acoplamento mecânico entre os dois pêndulos e seus períodos de oscilação – apenas para verificar se não estavam próximos demais – foi construído um apoio para os rolamentos do eixo. Inicialmente, foram usinadas bases de bronze para rolamentos NSK 605 ou similares – o diâmetro interno vale 5mm. Pode-se notar que, para este teste, foi utilizado outro eixo, com diâmetro um pouco diferente, mas a maioria das outras dimensões foi mantida.

Em seguida, foram usinados apoios de aço para as bases de bronze. Finalmente, foi preparada uma base de aço com um rasgo, sobre a qual foram colocados os apoios de aço, de modo que fosse possível alterar a posição e o alinhamento entre estes. Como elementos de conexão entre as bases de bronze, os apoios e a base de aço, utilizaram-se parafusos M4 e M8. A Figura 5.16 mostra um desenho de conjunto desta montagem.

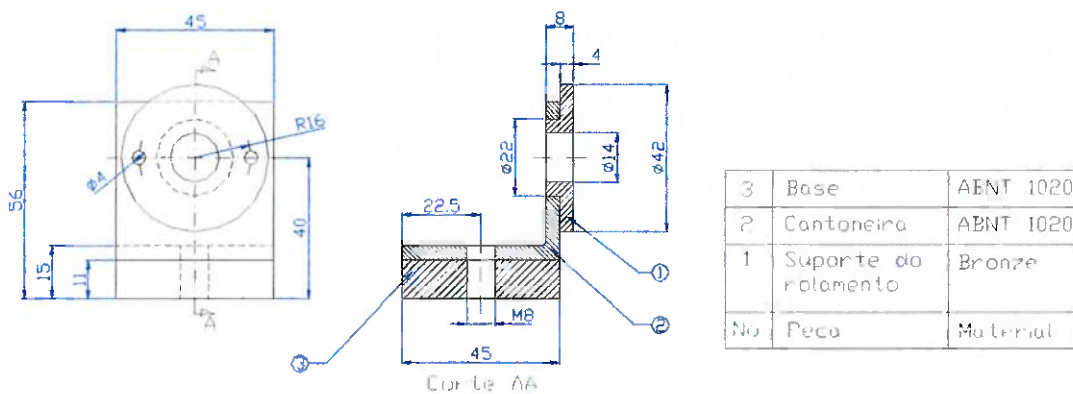


Figura 5.16 Suportes dos rolamentos – base do primeiro protótipo

A construção deste primeiro protótipo foi importante para corrigir alguns detalhes de fabricação e de montagem e também para verificar a importância do alinhamento correto entre rolamentos do eixo. Com tais informações, partiu-se para a construção do segundo protótipo, que incluiu o eixo mostrado na Figura 5.15 e todos os seus componentes e subsistemas.

Notou-se que o principal problema a ser corrigido era o alinhamento entre rolamentos do eixo. Para isso, utilizou-se um tubo de alumínio de seção quadrada com 57mm de aresta interna, 64mm de aresta externa e 51mm de altura. Com tais dimensões, o eixo ficou 2 milímetros maior do que realmente precisaria ser. Entretanto, como este é um tubo padronizado, estava disponível, e imaginando que procurar outro tubo com a dimensão exata desejada poderia ser muito difícil, optou-se por deixar o eixo 2 milímetros maior do que o necessário.

Foram feitos dois furos, um em cada parede oposta, para apoiar os rolamentos das extremidades do eixo. Para minimizar os problemas de alinhamento, os furos foram feitos de uma única vez, sem mover o tubo. O furo foi feito escalonado, ou seja, começando com brocas de diâmetro menor que o desejado e alargando o furo aos poucos, até atingir o diâmetro desejado – 7mm.

Em seguida, o eixo foi montado dentro do tubo de alumínio com seus rolamentos. Após a montagem, um dos rolamentos teve seu anel externo fixado no furo do invólucro por meio de adesivo, para evitar jogo axial de todo o conjunto. Apenas depois disso os demais componentes – incluindo o subsistema do disco interno – foram montados sobre o eixo.

O emissor e o receptor de infravermelho associados ao disco externo foram montados sobre uma placa de “wire-up”, que foi cortada no formato desejado. Em seguida, a placa foi apoiada por um pequeno bloco de PVC, que por sua vez foi fixado à parede do invólucro por meio de adesivo. Nesta montagem, foi importante manter o disco com as marcas óticas perto do receptor, para que não houvesse perda de sinais, mas ao mesmo tempo garantir o alinhamento da montagem e uma distância mínima, para evitar contato entre o disco externo e a base do receptor. A Figura 5.17 mostra em detalhes esta montagem.

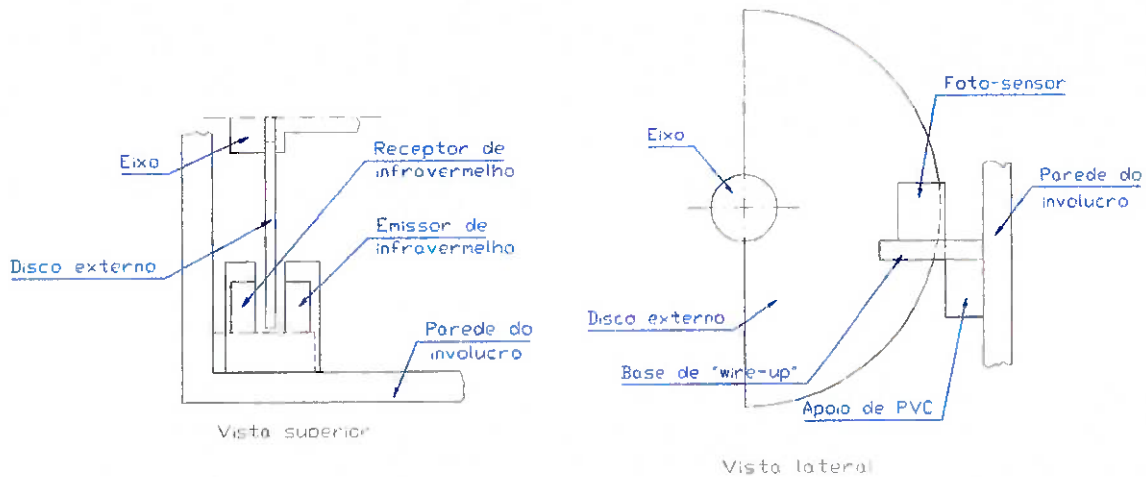


Figura 5.17 Montagem dos fotosensores do disco externo sobre o invólucro

Para proteger o sensor, foram usinadas duas pequenas chapas quadradas de polimetilmetacrilato (acrílico) nas dimensões da aresta externa do tubo de alumínio. Em cada uma das chapas foram fixados dois pequenos cubos de acrílico com uma rosca M3 usinada. Em seguida, foram feitos furos nas paredes do invólucro na mesma posição dos furos nestes pequenos cubos de acrílico. Com isso, foi possível fechar o sensor por baixo e por cima com tampas de acrílico parafusadas nas paredes do tubo de alumínio. Desse modo, garantiu-se proteção ao sensor, manteve-se a manutenibilidade (pois para remover as tampas de acrílico basta remover os parafusos) e continuou sendo possível observar as oscilações dos pêndulos do sensor, já que a espessura do acrílico que foi usado (2mm) não compromete sua transparência.

Na tampa superior, foi feito um corte por onde deveriam passar os diversos fios que saem da parte mecânica e vão para a parte eletrônica do sensor, que será brevemente descrita a seguir.

5.1.4. Subsistema 4 – Módulo eletrônico

Com a intenção de manter o sensor “modular”, todos os componentes e circuitos eletrônicos que precisam ser montados no sensor foram posicionados em um módulo

separado do módulo mecânica, descrito nos itens anteriores. Trata-se do módulo eletrônico, e nada mais é do que uma continuação do invólucro do sensor. Foi usado outro tubo de alumínio de seção quadrada – igual ao usado na parte mecânica – mas com altura de 26mm, suficiente para acomodar os circuitos e os fios quando estes últimos estivessem dobrados.

Para fechar a parte superior deste novo módulo, foi usinada outra chapa de acrílico com dois apoios em formato de cubos – como já foi descrito no item anterior – e foram feitos dois furos nas paredes do módulo eletrônico. Assim, a tampa pode ser parafusada, e protege o módulo de poeira e outros agentes externos. Além disso, esta tampa serve também como base para os circuitos, pois estes últimos foram parafusados nesta tampa de acrílico.

É preciso que os módulos mecânico e eletrônico sejam facilmente separáveis para facilitar a manutenção, mas durante operação é importante que os dois permaneçam juntos. Para manter a união entre os módulos mecânico e eletrônico de forma confiável, foram fixados na tampa superior do módulo mecânico dois parafusos 1/8Wx38 que atravessam o espaço ocupado pelo módulo eletrônico. Na tampa superior do módulo eletrônico há dois furos, por onde estes parafusos passam, e onde são presas porcas. Assim, garante-se que a tampa superior do módulo eletrônico está presa à tampa superior do módulo mecânico, e pode-se assegurar que os dois módulos permanecerão unidos. A Figura 5.18 mostra desenhos destes dois módulos unidos.

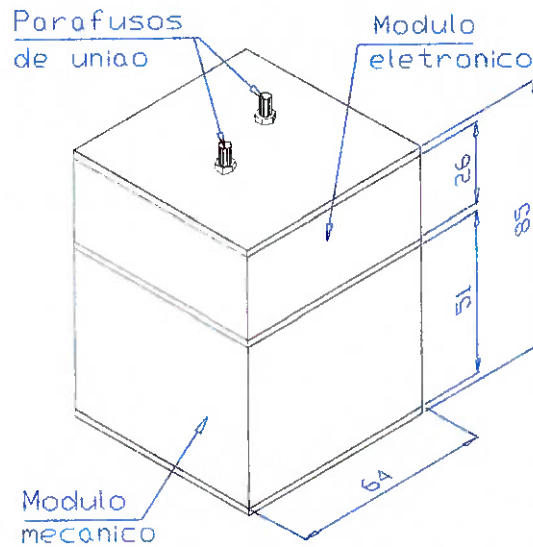


Figura 5.18 Módulos mecânico (inferior) e eletrônico (superior) unidos

5.2. Projeto Eletrônico

Neste item serão apresentados os principais circuitos eletrônicos utilizados no sensor.

Para realizar a aquisição do sinal analógico do sensor piezoelétrico, foi utilizado um filtro passa-baixas e um amplificador implementados analogicamente. Em seguida, o sinal do filtro foi colocado na entrada de uma placa de aquisição de sinais que realiza a conversão AD necessária, disponibilizando, assim, a leitura do sinal pelo microcomputador.

No caso dos sinais dos fotoreceptores, foi utilizado o circuito existente no mouse serial *Logitech*, que já realiza a contagem dos pulsos bem como comunica-se com a porta serial do microcomputador.

5.2.1. Circuitos associados ao sensor piezoelétrico

O sensor piezoelétrico utilizado foi o ENC-05EA da empresa Murata. As principais características elétricas do mesmo são apresentadas na Figura 5.19, que foi extraída do catálogo do produto.

Characteristics	Symbol	Condition	Min.	Std.	Max.	Unit
Supply voltage	Vcc		+4.75	+5.0	+5.25	VDC
Current consumption	I _{cc}	at V _{cc} = +5.0V	2.5	3.5	5.0	mA
Comperative voltage	V _{out}	at -5 - +25°C	+1.15	+2.3	+3.45	VDC
Static output (Noise)	V ₀	angular velocity = 0	+1.0	+2.0	+3.0	VDC
Angular velocity range	ω _{max}			+90		deg/s
Scale factor	S _{in}		-20%	1.11	+20%	mV/deg/s
Temperature coefficient of Scale factor		Reference: S _{in} at -5 - +25°C	-20		+20	1/s
Resonance frequency	f _s		---	23.0	---	kHz
-- version ENC-05EA	f ₀		---	20.5	---	kHz
Resonance frequency disparity	f _s - f ₀	at -5 - +25°C	500			Hz
Linearity		in the maximum angular velocity range	-5	---	+5	10%
Response		Phase delay: 90deg		0.1 - 50		Hz
Operating Temperature Range	T _{op}		-5	---	+35	°C
Storage Temperature Range	T _{stg}		-30	---	+85	°C
Weight			---	---	2.7	g
Dimension		See above			11.5 x 8.5 x 7.1mm	

Figura 5.19 Tabela extraída do catálogo do sensor ENC—05EA

Pode-se ver que o sensor deve ser alimentado com uma tensão de aproximadamente 5VDC, sendo que sua saída em condições estáticas varia de 1,3 a 3,3 V (2,3V típica). Como tem uma sensibilidade de 1,11mV/°/s e uma velocidade máxima permitida de 90°/s, sua saída varia de aproximadamente 0,1V no intervalo de trabalho.

Portanto, é necessária um amplificação do sinal proveniente do sensor para que o mesmo possa ser adquirido por uma placa AD convencional. Além disso, é bastante recomendável que se filtre o sinal antes de disponibilizá-lo à placa, minimizando os problemas de ruídos antes que o sinal se torne digital.

O filtro foi construído baseando-se no circuito já existente no *mouse* giroscópicos Gyrostar, implementando-se algumas modificações¹, sendo a versão final apresentada na Figura 5.20.

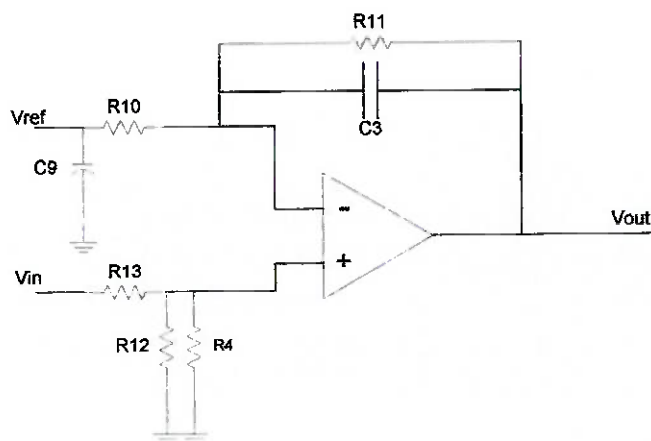


Figura 5.20 Circuito filtro passa baixa e amplificador

Na figura anterior, V_{in} é a tensão de saída do sensor e V_{ref} é a tensão de comparação do mesmo, também disponível em um dos pinos do sensor. Os valores utilizados de resistência e capacitância dos componentes são apresentados na Tabela 5.2

Tabela 5.2 Valores de resistências e capacitâncias utilizados

	Valor		Valor
R10	4K7	R12=R4	120K
R13	4K7	R11	56K
C9	4,7 μ F	C3	2200pF

Realizando uma análise das correntes e tensões no circuito, pode-se concluir que a constante de tempo do mesmo é da ordem de 25ms (equivale ao produto $C_3 * R_{11}$).

¹ O filtro original tem sua saída variando em torno do valor de referência 2,3V, sendo que o circuito usado neste projeto foi modificado para aproveitar todo o intervalo de entrada da placa de aquisição (-5V a 5V).

Assim, ruídos de alta frequências são atenuados numa razão de 20dB/década (filtro de 1ª ordem), sendo que a influência dos mesmos na saída será desprezível. A Figura 5.21 contém o diagrama de Bode do filtro analisado.

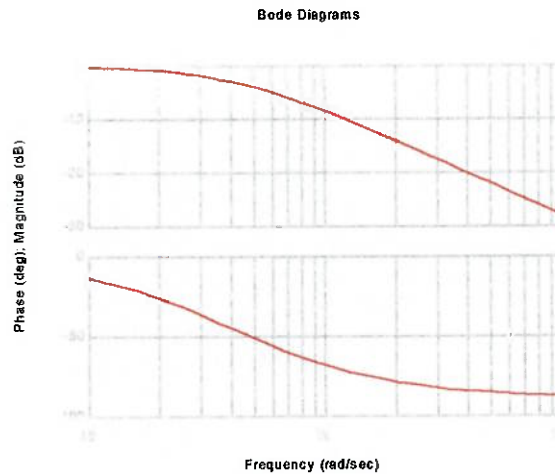


Figura 5.21 Diagrama de Bode do filtro passa baixa em estudo

Além disso, a amplificação do sinal é de aproximadamente 12 vezes para o presente circuito. Logo, variações de $\pm 0,1V$ são amplificadas para $\pm 1,2V$. A Figura 5.22 ilustra a relação entre a tensão de entrada e a saída do circuito, para baixas frequências.

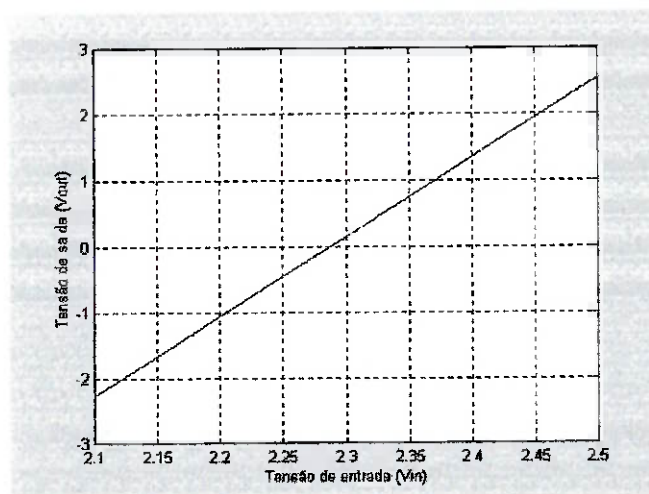


Figura 5.22 Relação entrada-saída para o circuito utilizado (baixas frequências)

A saída do circuito é enviada para a entrada de uma placa de aquisição de sinais de 12bits. Com isso, o sinal analógico é convertido para digital com um fundo de escala de 2,4mV, valor bastante baixo comparado ao sinal proveniente do filtro, que varia de +5 a -5V aproximadamente.

5.2.2. Circuitos associados aos encoders

Os encoders constituem-se de discos com uma série de marcas óticas opacas intercaladas com espaços transparentes. Colocando-se um fotoemissor de um lado do disco e um fotoreceptor do outro, este último gerará um pulso de sinal a cada vez que uma linha transparente passar na sua frente. Contando-se os pulso gerados obtém-se a posição angular do disco, pois o ângulo entre duas linhas é conhecido.

Logo, torna-se necessário um circuito que realize as seguintes funções:

- Alimentar os fotoemissores e fotoreceptores
- Contar os pulsos dos fotoreceptores
- Transferir estes dados ao computador

No presente trabalho, utilizaram-se os fotoemissores e fotoreceptores existentes no Mouse *Logitech*, na medida em que o mesmo possui uma resolução em distinguir traços distanciados de 0,328mm, que permite o uso de um disco de encoder de tamanho compatível (ver item 4.3).

Assim, utilizou-se o mesmo circuito do mouse no presente protótipo, já que este já realiza as 3 funções necessárias citadas anteriormente², comunicando-se via serial ao microcomputador. Para tanto, os elementos ópticos foram dessoldados do circuito e colocados no local apropriado no eixo do sensor. Ligaram-se, então, os elementos ópticos ao circuito através de fios.

5.2.3. Observação: fios utilizados no protótipo

Para ligar o Murata ao filtro, bem como os elementos ópticos presos no eixo ao circuito acima citado, utilizaram-se fios esmaltados AWG nº 44, pois possuem características mecânicas e elétricas adequadas a tal função.

Como tais componentes estão em movimentos, devem-se utilizar fios bastante finos para minimizar o amortecimento causado pela dissipação de energia nos mesmos. O fio utilizado tem diâmetro de 0,054mm, um dos menores encontrados comercialmente, sendo, portanto, bastante adequado com relação a tal característica

Além de se utilizar fios de diâmetro pequeno, o caminho que o fio faz do componente até a placa fixa deve ser otimizado de tal forma que o menor comprimento de fio fique sujeito a movimentos (logo, haverá uma menor dissipação de energia devido ao movimento do fio). Para tanto, os fios percorrem caminhos o mais próximo possível dos eixos de rotação, o que minimiza os movimentos lineares aos quais estão sujeitos.

² O circuito contém um microcontrolador LXC437159P que realiza tais funções.

Com relação às características elétricas, tais fios são esmaltados, evitando curto-circuito ao longo de seu percurso. Além disso, possuem uma resistência de $8,5\Omega/\text{m}$ e uma corrente máxima de 6mA ³. Como os fios têm comprimento de aproximadamente 15cm, a resistência resultante será de $1,3\Omega$, valor que não interfere na transmissão de sinais do sensor piezoelétrico nem dos componentes ópticos⁴.

5.3. Projeto do Software

Para adquirir os sinais enviados pelos fotosensores e pelo sensor piezoelétrico “Murata”, foi desenvolvido um programa em linguagem Pascal. Este programa, além de adquirir os dados acima citados, também processa os sinais – os sinais provenientes dos inclinômetros passam por um “amortecedor”, e os do “Murata”, por um integrador com filtros –, mostra na tela do monitor os ângulos de orientação do objeto medido, e desenha um paralelepípedo inclinado nas orientações do sensor para auxiliar a visualização.

Serão descritos detalhes do projeto do software, começando pela estrutura do programa, passando por uma explicação das principais variáveis usadas, dos diversos blocos em que pode-se dividir o programa, e concluindo com a listagem do mesmo.

³ A corrente envolvida na transmissão dos sinais aqui discutida é inferior à 5mA.

⁴ Esta afirmação é baseada em experimentos realizados antes de se montar o protótipo.

5.3.1. Estrutura do programa

Inicialmente, pode-se descrever o programa desenvolvido como uma “caixa preta”, mostrada na Figura 5.23. Nota-se que as entradas do programa são os sinais enviados pelos inclinômetros e pelo sensor piezoelétrico “Murata”. São saídas do programa os ângulos de orientação do objeto monitorado e o desenho de um paralelepípedo em um monitor.

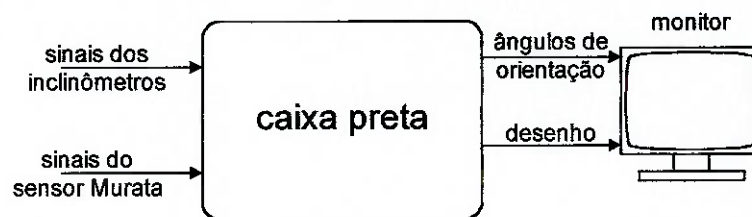


Figura 5.23 O programa como uma “caixa-preta”

Descendo um nível na escala de abstração, pode-se dividir o programa em três blocos dentro de um bloco principal: um bloco para processamento dos sinais dos inclinômetros, que são adquiridos pela porta serial, outro bloco para processamento dos sinais do sensor piezoelétrico “Murata” – enviados ao computador por meio de uma placa de aquisição de dados –, e um terceiro bloco, responsável pela geração das coordenadas do paralelepípedo que acompanha a orientação do sensor e aparece na tela do monitor.

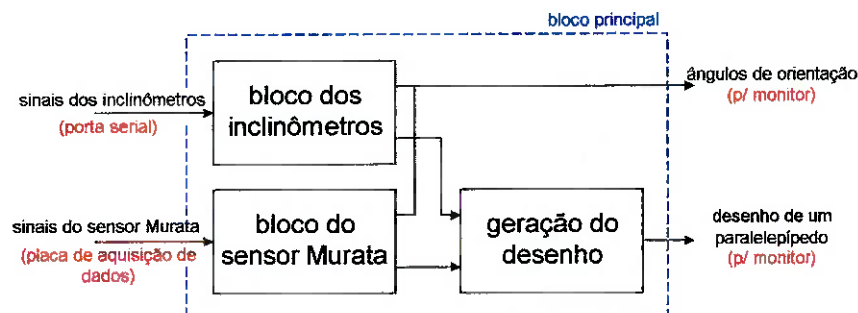


Figura 5.24 Programa dividido em blocos

Os três blocos citados serão descritos em maiores detalhes a seguir. Antes, entretanto, pode ser interessante definir as variáveis usadas no programa.

5.3.2. Variáveis

Para facilitar a compreensão das principais variáveis utilizadas no programa, a descrição destas será dividida em três partes: variáveis do programa principal, variáveis do inclinômetro (relacionadas à aquisição e ao processamento de dados enviados pelos inclinômetros, por meio da porta serial) e variáveis do sensor piezoelétrico “Murata” (referentes à aquisição e ao processamento dos sinais enviados pelo sensor piezoelétrico para a placa de aquisição de dados).

5.3.2.1. Variáveis do programa principal

acabou – variável *boolean* que indica se o programa chegou ao fim (comandada pelo usuário) dentro do loop principal do programa.

5.3.2.2. Variáveis do inclinômetro

x, *y* – variáveis do tipo *word*, guardam o número de pulsos registrados pelos fotossensores, e enviados pela porta serial.

contx, *conty* – variáveis do tipo *integer*, usadas para contar o número de ciclos de leitura de dados da porta serial.

xa, *ya* – do tipo *integer*, guardam os valores do último pico de oscilação de cada um dos inclinômetros (dos eixos *x* e *y*).

xp, *yp* – tipo *integer*, guardam os valores do penúltimo pico de oscilação de cada um dos inclinômetros.

xant, *yant* – variáveis *integer* que guardam os valores de *x2* e *y2* da iteração anterior.

espera – variável *integer* que contém número de ciclos de espera entre impressões consecutivas, na tela do monitor, dos ângulos registrados pelos inclinômetros.

auxx, *auxy* – do tipo *real*, são os ângulos de inclinação do objeto mostrados na tela. São o resultado do “amortecimento numérico” realizado pelo programa.

sobex, *sobey* – variáveis do tipo *boolean*, que indicam se a sequência de pulsos dos inclinômetros está crescendo.

mudoux, *mudouy* – variáveis *boolean* que indicam se ocorreu algum evento que comanda a impressão dos ângulos dos inclinômetros na tela do monitor.

5.3.2.3. Variáveis do sensor piezoelétrico “Murata”

resultado – variável do tipo *integer* que guarda o valor decimal do sinal adquirido pela placa de I/O, enviado pelo circuito do sensor piezoelétrico “Murata”.

resultado_ant, *resultado_ant_ant* – *integer*, armazenam a variável resultado de uma e duas iterações anteriores, e são necessárias para a integração do sinal.

ti, *tf* – variáveis do tipo *integer* que armazenam os instantes (número das iterações) em que começaram e terminaram períodos de deriva pura (ou seja, sensor “Murata” parado – ver item 5.3.3).

`zeroi`, `zerof` – variáveis do tipo *integer* que funcionam como flags. Indicam começo e fim dos períodos de deriva pura.

`tol` – variável do tipo *real* que armazena o valor de tolerância usado na comparação da inclinação do sinal integrado do sensor, e que define se o sinal é deriva pura, ou não (ver item 5.3.3, a seguir).

`zi`, `zf` – do tipo *real*, guardam os valores da integral dos sinais enviados pelo “Murata” nos instantes de começo e fim de períodos de deriva pura.

`incl` – variável do tipo *real* que representa a média de inclinação do sinal integrado (posição angular) das últimas 10 iterações.

`glide` – variável *real* que armazena uma estimativa da deriva do sensor. O modo como esta estimativa é feita pode ser visto no próximo item.

`fim`, `fim_ant` – variáveis do tipo *real* que armazenam o sinal integrado e filtrado (i.e. a saída do filtro) das iterações atual e anterior.

`integral` e `integral_ant` – variáveis do tipo *real* que guardam o sinal do sensor “Murata” integrado nas iterações atual e anterior. Convém lembrar que a integração é digital, implementada pelo programa.

`offset` – é uma variável *real* que representa a diferença entre 0V (2047 em 12 bits, com entrada entre -5V e +5V) e a média do sinal do sensor “Murata”, com este último em repouso. Este valor é utilizado na integração do sinal, para remover a componente “DC”.

5.3.2.4. Variáveis do desenho do paralelepípedo

p – matriz de 3 linhas e 8 colunas que armazenas as coordenadas espaciais (portanto, 3 dimensões, em 3 linhas) dos 8 vértices (daí, 8 colunas) do paralelepípedo.

l, h – respectivamente, comprimento da aresta da base quadrada e altura do paralelepípedo.

$xb1, xb2$ – vetores de 8 posições que armazenam as coordenadas globais y e z dos 8 vértices do paralelepípedo.

x, y – vetores de 8 posições que guardam as posições dos 8 vértices do paralelepípedo em coordenadas da tela do monitor (x e y), considerando fatores de correção de escala.

5.3.3. Blocos funcionais

Inicialmente, será descrito o **bloco dos inclinômetros**. Este bloco é responsável pela aquisição dos dados enviados pelos fotosensores por meio da porta serial. Para isso, o programa lida com registradores e endereços de interrupções, para obter apenas as informações desejadas do “pacote” de dados que chega pela porta serial. Estas informações são o número de pulsos registrados por cada um dos fotosensores desde a última leitura de dados, em formato *word* (palavra).

Além de adquirir estes dados, é preciso processá-los. Como os inclinômetros funcionam como pêndulos, acelerações causam movimentos oscilatórios nestes. Entretanto, não é desejado, para a aplicação escolhida, que o monitor mostre os ângulos de orientação oscilando, devido ao movimento pendular dos inclinômetros. Seria muito

mais útil obter um valor médio destas oscilações. Isso pode ser obtido com o algoritmo de amortecimento digital utilizado neste programa.

Deve haver uma variável que indica se a sequência dos dados de um determinado inclinômetro está crescendo ou decrescendo (*sobex*, por exemplo). Se esta sequência estiver decrescendo e se o número de pulsos registrado na iteração atual for maior do que na iteração anterior, isso significa que o inclinômetro passou por um pico de oscilação – estava oscilando em um sentido e acabou de sofrer inversão deste sentido. Assim, o programa guarda na variável *xa*, por exemplo, o valor do número de pulsos registrados referente ao último pico. A variável *xp* guarda o valor referente ao penúltimo pico de oscilação. O valor médio é calculado como a média entre estes dois últimos picos, e enviado ao monitor.

Além disso, o contador *contx* é zerado quando ocorre uma inversão de sentido de oscilação. É este contador que controla o envio de dados ao monitor. Sempre que ele valer zero, dados atuais são impressos na tela do monitor. Assim, garante-se que, durante uma oscilação, somente serão enviados ao monitor os valores médios calculados quando for atingido algum pico na oscilação.

Entretanto, em movimentos lentos, livres de oscilações, os dados atuais jamais seriam impressos no monitor. Por isso, a cada número determinado de ciclos (variável *espera*), os contadores *contx* e *conty* (um para cada inclinômetro) são zerados, e os dados atuais são enviados à tela do monitor. Pode-se ver, na Figura 5.25, um diagrama de Nasi-Schneiderman referente a este bloco, com a implementação do algoritmo de “amortecimento” dos inclinômetros.

Leitura de dados do Mouse

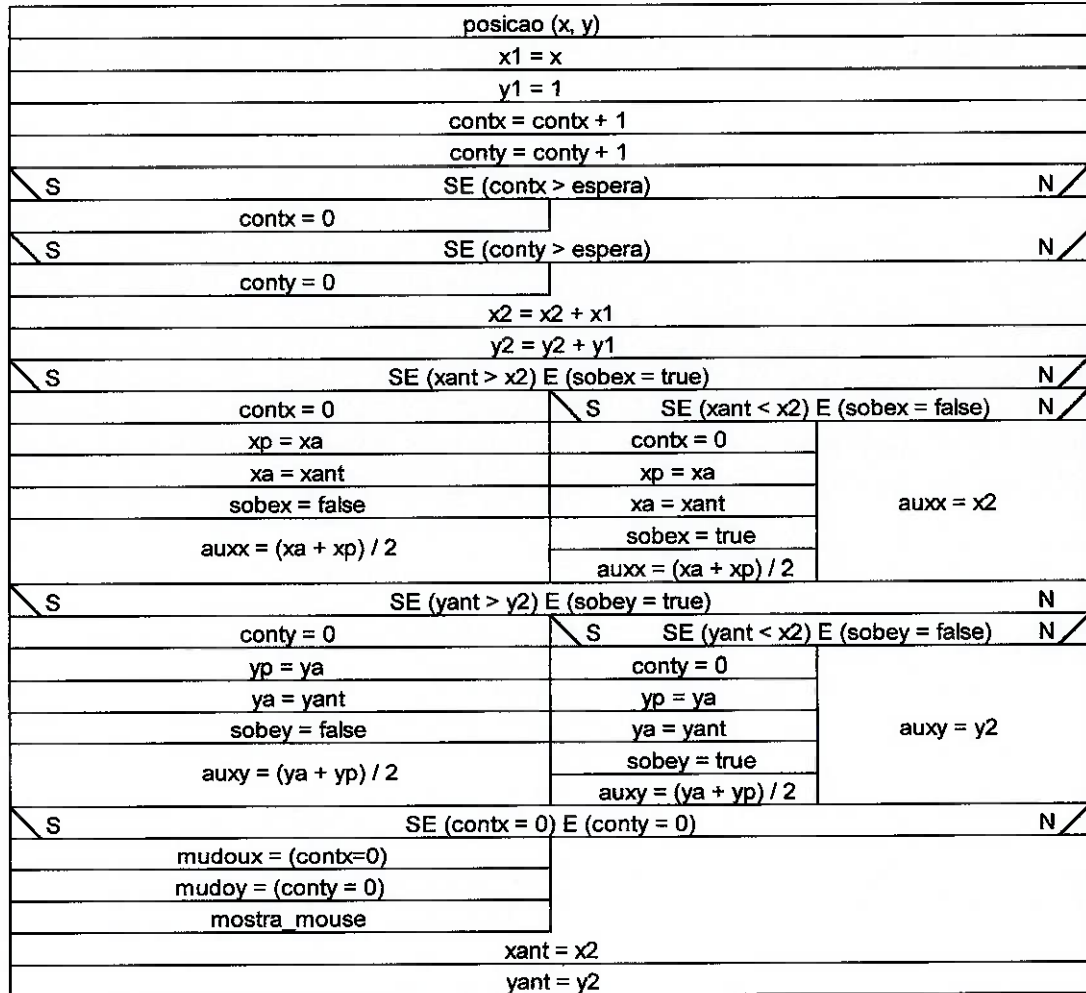


Figura 5.25 Diagrama NS do bloco dos inclinômetros

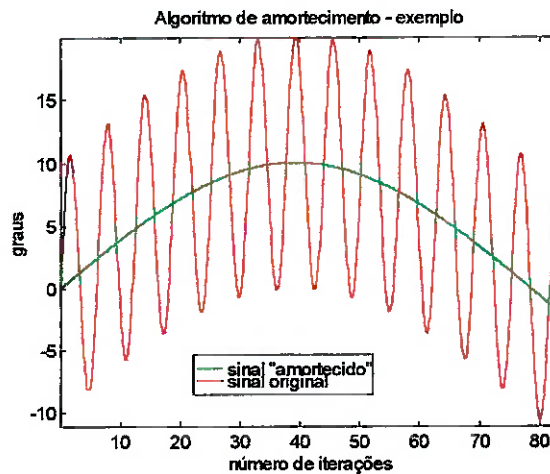


Figura 5.26 Exemplo do amortecimento de sinais por software

O próximo bloco a ser analisado em detalhes é o **bloco do sensor “Murata”**. Neste bloco, os dados do sensor são obtidos por meio de uma placa de aquisição de dados. Para isso, além de definir os endereços corretos de leitura, deve ser respeitado um atraso (correspondente ao tempo de conversão A/D da placa) e deve ser gerado outro atraso, que garante a frequência de amostragem desejada.

O valor lido da placa de aquisição de dados é armazenado na variável `resultado`. Como a placa utilizada converte sinais analógicos de $-5V$ a $+5V$ em sinais digitais de 12 bits, é preciso ler 2 palavras (cada palavra tem 8 bits), e multiplicar os 4 bits menos significativos da palavra mais significativa por 256:

```
resultado = port [ entrada ] + 256 * port [ entrada + 2 ]
```

Em seguida, calcula-se a integral dos sinais enviados pelo sensor “Murata”. Como o sensor piezoelétrico envia sinais de tensão proporcionais à velocidade de rotação, e como o sinal desejado é o de posição angular, deve-se integrar o sinal obtido pela placa de aquisição de dados. Para isso, utiliza-se o método de Simpson de 3ª ordem:

```
integral = integral + (resultado[i-2] + 4*resultado[i-1] +  
resultado[i] - 6*offset)
```

Nota-se que utilizam-se valores do sensor “Murata” de até duas iterações anteriores à atual. A variável `offset`, como já foi explicado, contém a diferença entre 0V e a tensão “resíduo” do sensor “Murata” quando este está parado. A função desta variável no método de integração proposto é remover uma componente “DC” que introduziria resultados falsos na integração do sinal.

Depois, os resultados das integrações das dez últimas iterações são armazenados no vetor `vet_ant`. Assim, é possível calcular a inclinação média da curva nas dez últimas iterações:

$$\text{incl} = (\text{integral}[i] - \text{integral}[i-10]) / 10$$

Este valor de inclinação média da curva é comparado com uma variável de tolerância, `tol`. Esta comparação serve para distinguir movimentos do sensor “Murata” (e, portanto, variações na posição angular do sensor) de sinais associados à deriva do mesmo. Esta deriva pode ter as seguintes causas principais: o movimento de rotação da Terra ($0,25^\circ/\text{min}$); ruído no circuito do sensor e na transmissão de dados ao computador; características construtivas do próprio sensor.

Destas três, as duas últimas são as mais importantes, e podem resultar em variações lentas e constantes no valor de posição angular, mesmo com o sensor piezoelétrico parado. Por isso, se a inclinação média nas dez últimas iterações for menor do que um determinado valor de tolerância, o programa considera que o sensor piezoelétrico está parado, e envia ao monitor o valor da posição angular da iteração anterior (por meio da variável `fim`). Inclinações em módulo menores que esta variável de tolerância são tratadas, portanto, como deriva pura, e desconsideradas.

O algoritmo tem como identificar a mudança de um estado de movimento do sensor para outro de repouso mesmo se houver deriva. Para isso são utilizadas as variáveis `zeroi` e `zerof`, que indicam quando o sensor está em movimento e pára em seguida, e quando o sensor está parado e começa a se mover em seguida. Em cada um destes casos, são armazenados os “tempos” (na verdade, os números das iterações) de início e final de “sensor parado”, e também os valores da curva integrada nestes

instantes. Se a curva do sinal integrado contiver uma componente de deriva, pode-se estimar tal valor da seguinte forma:

$$\text{glide} = (\text{integral}[\text{zerof}] - \text{integral}[\text{zeroi}]) / (\text{zerof} - \text{zeroi})$$

sendo *zeroi* a iteração em que o sensor “Murata” entrou em repouso (já considerando a tolerância) e *zerof* a iteração em que o Murata saiu do repouso.

Esta estimativa da deriva é feita somente quando o algoritmo detecta repouso do sensor por mais de 40 iterações. Caso contrário, a influência de ruídos ou de pequenas oscilações no sensor poderiam gerar falsos “períodos de repouso” e estimativas de deriva inválidas. Pode-se ver, na Figura 5.27, um exemplo da utilização deste filtro “detetor de deriva pura”.

A Figura 5.28 mostra um diagrama de Nasi – Schneiderman com os algoritmos de integração e filtragem propostos.

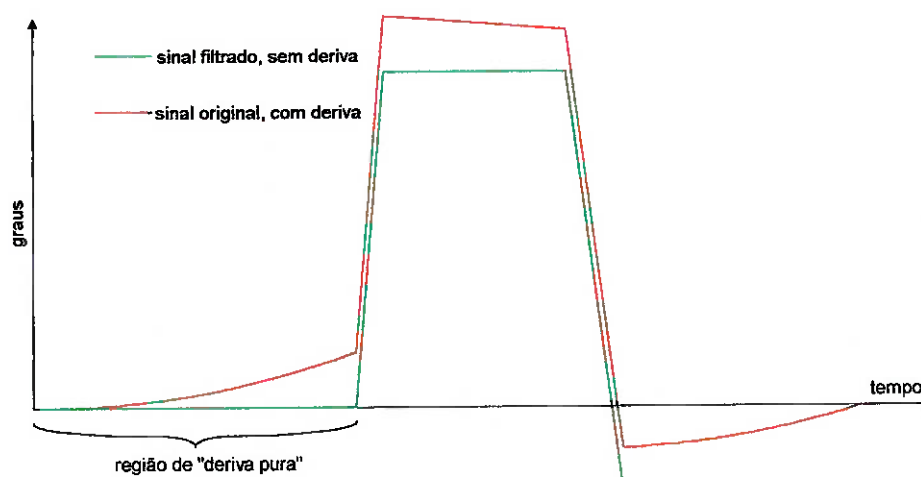


Figura 5.27 Exemplo de aplicação do filtro detetor de deriva

Leitura de dados do Murata

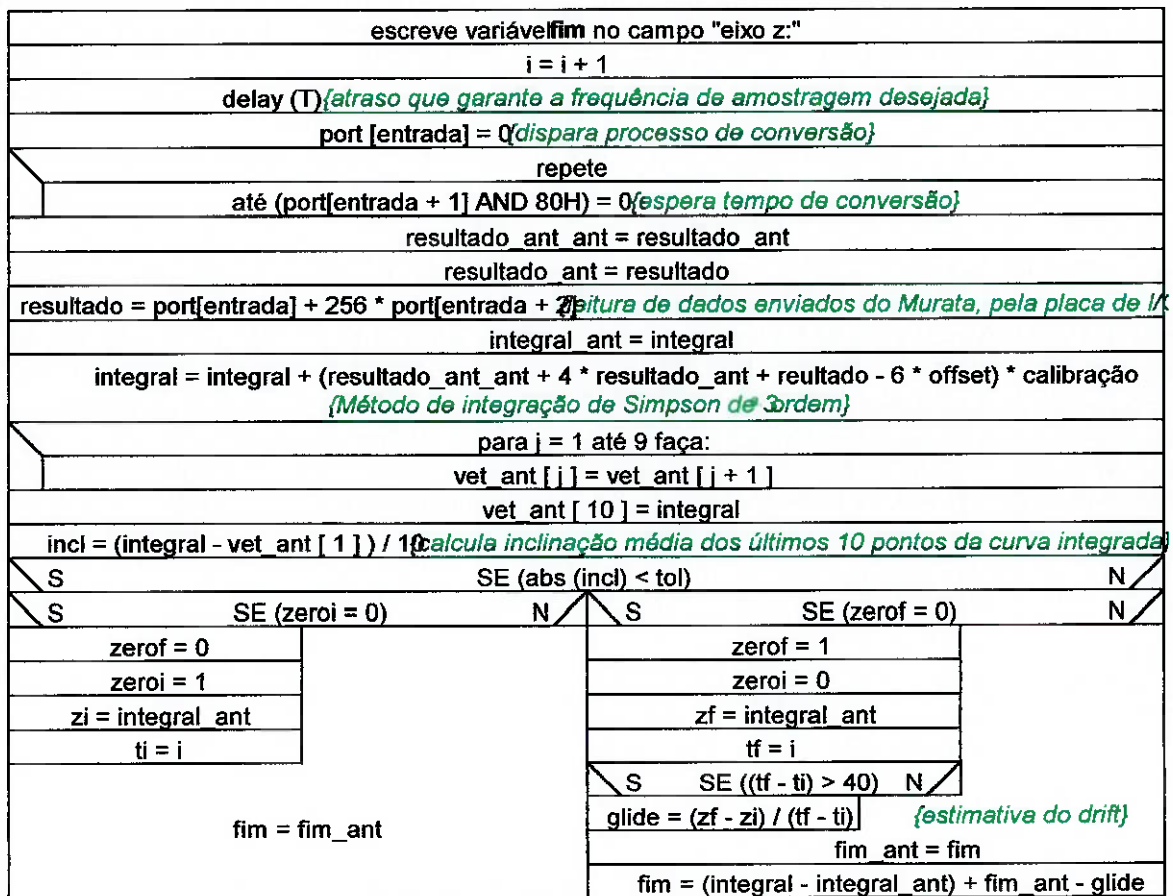


Figura 5.28 Diagrama NS do bloco do sensor piezoelétrico

Além destes dois blocos, existe ainda um terceiro bloco, dentro do programa principal, que cuida da zeragem e calibração dos sensores. Este bloco, por ser mais simples que os anteriores, não será explicado em detalhes.

Se for pressionada a tecla ‘q’, a variável booleana acabou recebe valor ‘true’ e termina o programa.

Se for pressionada a tecla ‘c’, o sensor piezoelétrico será calibrado da seguinte maneira: durante 1000 iterações (10 segundos se a frequência de amostragem for de 100Hz) são registradas e somadas as saídas do sensor, com este em repouso. No final, divide-se esta soma por 1000, e obtém-se o valor do offset, já explicado. É necessário

calcular um valor médio, pois o sinal enviado pelo sensor piezoelétrico, por características construtivas do próprio sensor, tem uma pequena oscilação aleatória de amplitude 10mV, e varia com a temperatura do ambiente.

Ao apertar a tecla 't', o usuário poderá definir um novo valor para a tolerância de comparação e identificação da deriva do sensor piezoelétrico.

Se a tecla 'r' for pressionada, todas as variáveis serão resetadas, exceto o `offset` do sensor piezoelétrico e as variáveis que contêm informações sobre operação da placa de aquisição de dados.

A Figura 5.29 mostra um diagrama de Nasi – Schneiderman deste bloco.

Verificação da tecla pressionada

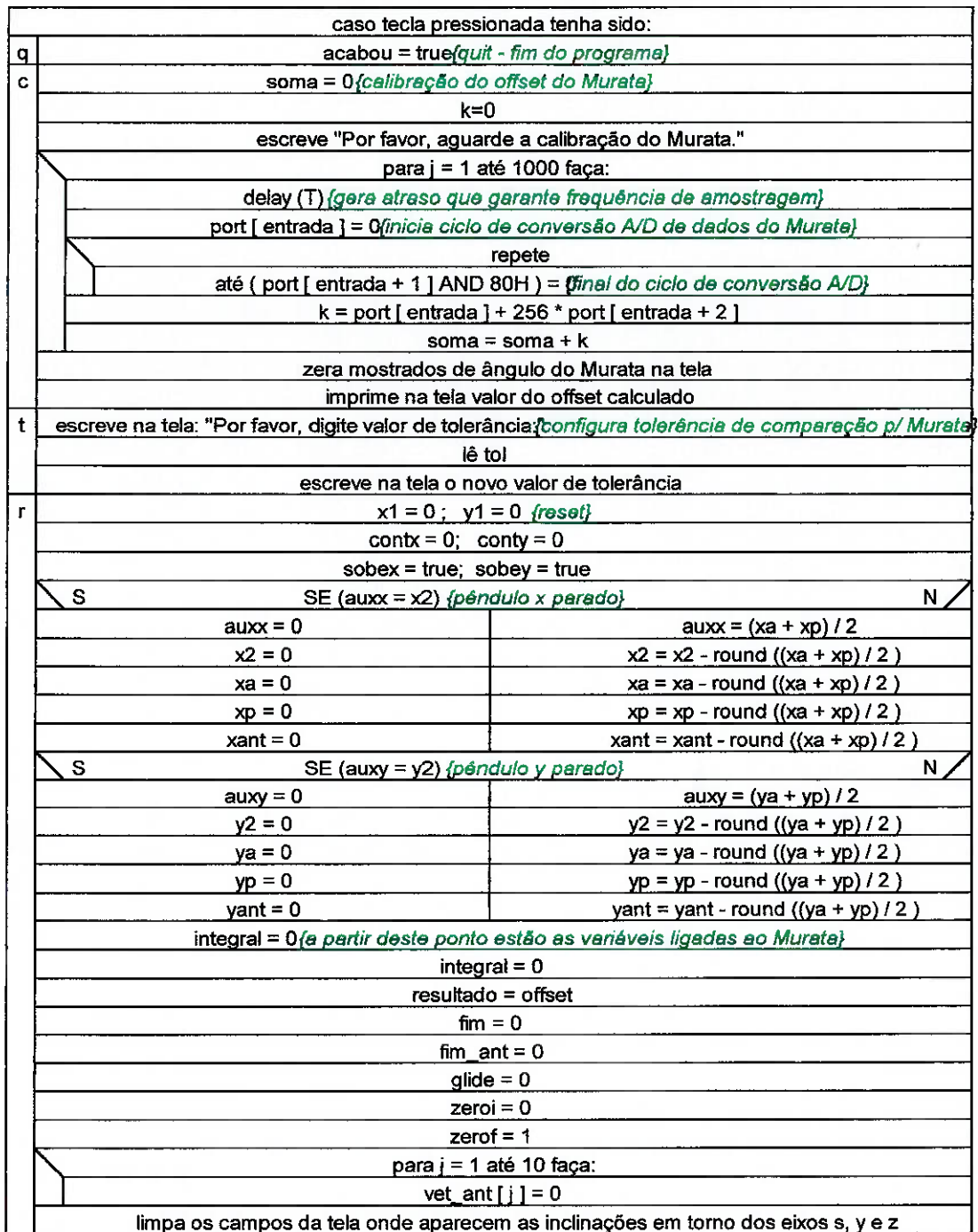


Figura 5.29 Diagrama NS do bloco de verificação de tecla pressionada

Existe, também, um bloco responsável pelo **desenho** de um paralelepípedo na tela do monitor que facilite a visualização da orientação do sensor no espaço. Para isso, definem-se as coordenadas de um paralelepípedo (comprimento da aresta da base quadrada e altura). Depois, este bloco recebe os ângulos de orientação do sensor (saídas

dos blocos de encoder e “Murata”) e calcula as posições dos 8 vértices do paralelepípedo no espaço. O vértice 1 está sempre na coordenadas (0, 0, 0). As fórmulas utilizadas para cálculo das posições dos vértices no espaço podem ser vistas no apêndice III.

No sistema de coordenadas global do sensor, os eixos y e z correspondem aos eixos x e y da tela do monitor. O eixo x global está perpendicular ao plano do monitor, Desse modo, as coordenadas globais x dos vértices do paralelepípedo no espaço não serão utilizadas. As coordenadas globais espaciais dos vértices do paralelepípedo são multiplicadas pelos versores y e z . Em seguida, passam por uma conversão de escala (para que o desenho do paralelepípedo seja impresso na tela do monitor em um tamanho adequado) e definem-se as coordenadas de tela x e y para cada um dos vértices. Finalmente, são impressas as linhas entre os vértices, que caracterizam as arestas deste paralelepípedo.

A Figura 5.30 mostra um diagrama NS do bloco de desenho do paralelepípedo.

Desenho do Paralelepípedo

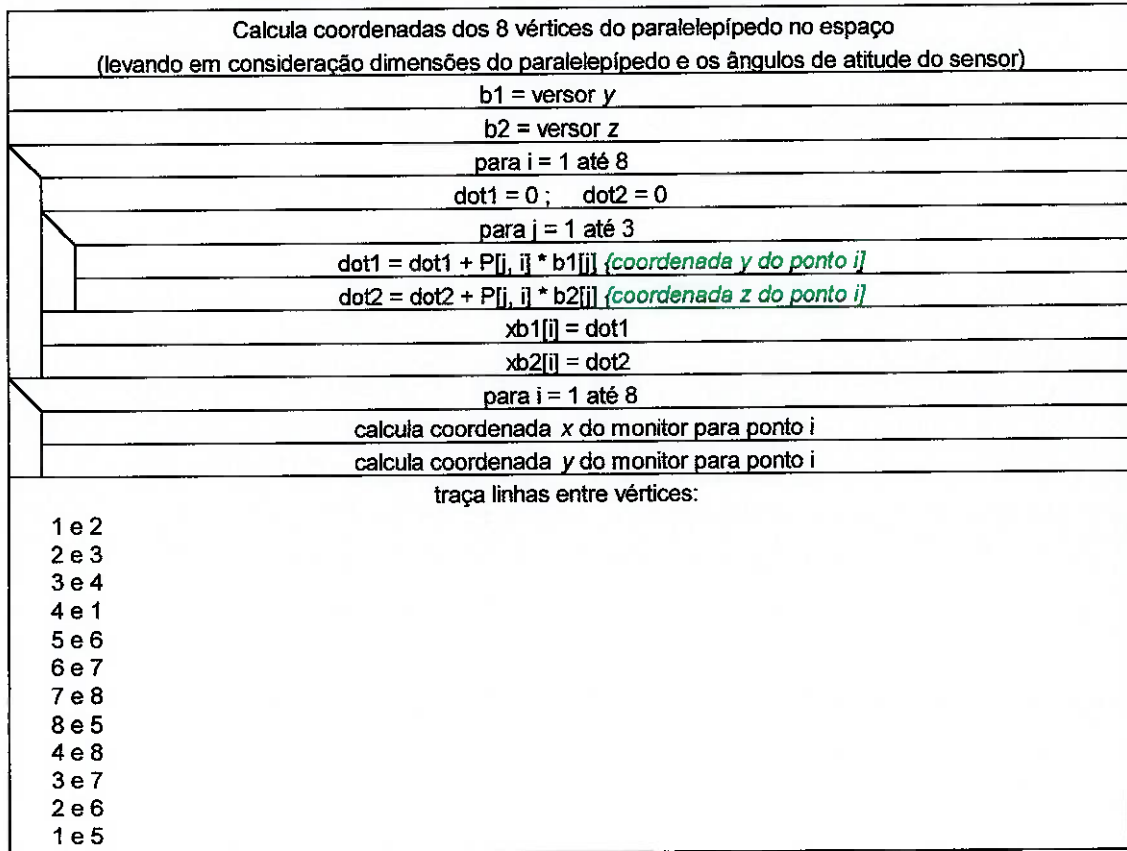


Figura 5.30 Diagrama NS do bloco de desenho do paralelepípedo

Finalmente, pode-se analisar o diagrama NS do bloco principal do programa, pois já foi visto o que cada um dos blocos hierarquicamente inferiores (escritos em vermelho itálico no diagrama a seguir) realiza, exceto:

tela – imprime na tela do monitor informações referentes ao programa;

inicializa variáveis – inicializa todas as variáveis do programa.

Programa Principal

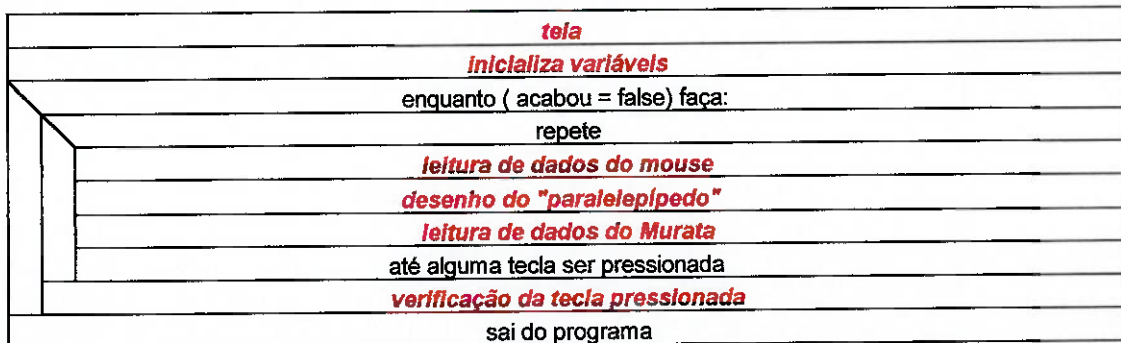


Figura 5.31 Diagrama NS do programa principal

A listagem completa do programa (visual.pas) pode ser vista no Apêndice II.

5.4. Resultados

Os valores, desenhos e diagramas apresentados neste capítulo refletem, em sua maioria, as versões finais de programas, circuitos e montagens mecânicas. É importante lembrar que o projeto seguiu sua característica “espiral”, ou seja, sofreu diversas melhorias e otimizações durante seu desenvolvimento, e que foram apresentados apenas os resultados finais de cada um dos subsistemas do sensor.

Muitas dessas otimizações surgiram devido à necessidade de miniaturização do sensor, já que um dos requisitos de projeto era manter as dimensões finais do sensor reduzidas. Esta miniaturização tornou a montagem mecânica e eletrônica do sensor muito mais trabalhosa.

A versão final do sensor, como já foi citado, é composta por um módulo mecânico e outro eletrônico, ambos encapsulados em tubos de alumínio de seção quadrada. Assim, os componentes internos, peças móveis, circuitos e fios ficam protegidos e o sensor pode ser manuseado com liberdade.

As dimensões finais do sensor são:

Módulo mecânico	Módulo eletrônico
Massa: 50g	Massa: 20g
Comprimento: 64mm	Comprimento: 64mm
Largura: 64mm	Largura: 64mm
Altura: 51mm	Altura: 26mm

1.1.1. Movimentos resultantes

Neste item serão apresentados resultados obtidos experimentalmente do protótipo construído. Serão enfocados os movimentos do inclinômetro bem como a eficácia do método de eliminação de drift empregado na obtenção do ângulo de yaw pelo sensor piezoelétrico.

Para tanto, foi realizada a aquisição dos sinais provenientes do sensor em uma série de ensaios:

1. Acelerou-se o sensor, de tal forma a induzir oscilações do inclinômetro ora no pêndulo interno, ora no eixo. Estes ensaios permitem a análise dos movimentos do inclinômetro, destacando-se o decaimento das oscilações e o período natural das mesmas.
2. Realizaram-se movimentos na direção de yaw, girando o sensor de 90° a uma velocidade de aproximadamente 45° /s. Este ensaio valida a correção de drift implementada.

Para o pêndulo interno, as oscilações são mostradas na figura a seguir.

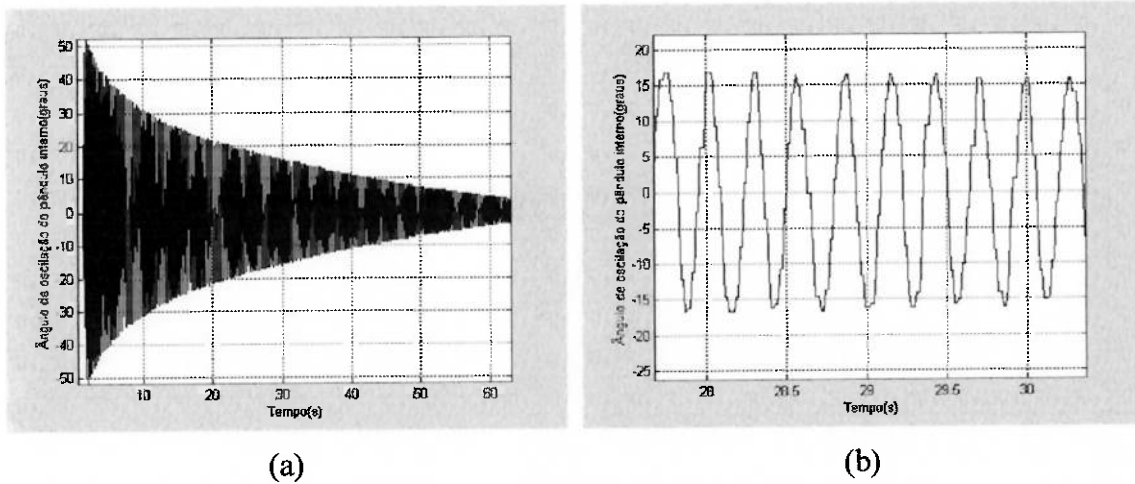


Figura 5.32 Oscilações do pêndulo interno

Pode-se ver que o amortecimento resultante é muito baixo, e é devido principalmente a atrito viscoso, na medida em que o lugar geométrico dos picos da curva (a) tem uma forma semelhante a uma hipérbole.

O período natural desta oscilação é da ordem de 0,28s (resultando uma frequência de 22,6 rad/s). Este valor tem uma boa concordância com a previsão teórica (ver item 4.2.1). Considerando as massas e momentos de inércia dos componentes do protótipo (calculados com AutoCad), a fórmula desenvolvida em 4.2.1 resulta em 23,5rad/s (erro de 4%). Esta diferença pode ser explicada principalmente por imprecisões construtivas do protótipo.

O eixo apresentou uma oscilação bem mais amortecida do que o pêndulo interno. A figura a seguir contém uma série temporal da inclinação do eixo, durante o ensaio explicado anteriormente.

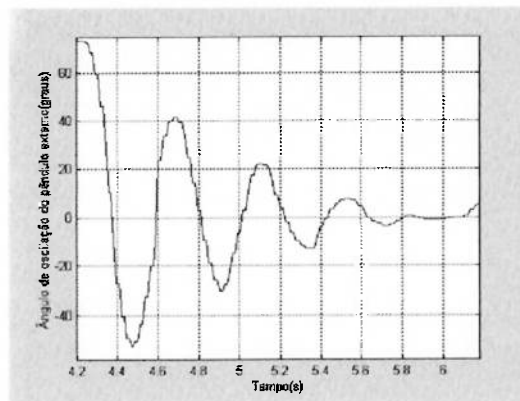


Figura 5.33 Oscilações do pêndulo externo

A frequência natural amortecida do eixo é da ordem de 15,7 rad/s, enquanto que a frequência natural esperada teoricamente é de 18,2rad/s. Esta discrepância (de 13%) deve-se principalmente a componentes fixos no eixo não considerados na análise teórica (rolamentos, fotosensor, fotoreceptor, placa de circuito recortada e tara de chumbo não prevista na análise teórica que foi colocada para corrigir um pequeno desbalanceamento residual).

O amortecimento elevado não pode ser usado para justificar a diferença de frequências naturais por dois motivos:

1. Caso seja de origem viscosa, o coeficiente de amortecimento é da ordem de 0,2 (já que o eixo oscila aproximadamente 3 vezes antes de ficar em repouso). Este valor (0,2) fornece uma diferença entre frequência natural amortecida e não amortecida de apenas 2%, o que elevaria a frequência natural real apenas para 16rad/s;
2. Caso seja de origem seca (o que é mais provável, na medida em que o envoltório da curva de decaimento é praticamente uma reta), a frequência natural amortecida é praticamente igual à não amortecida, já que o atrito seco não tem a capacidade de modificar a frequência natural do sistema.

Este amortecimento elevado pode ser devido à deformações dos rolamentos, desalinhamentos de montagem, resíduos sólidos que contaminaram os rolamentos e, menos provavelmente, dissipação nos fios AWG 40.

Para minimizar os efeitos de possíveis resíduos, os rolamentos receberam banhos de querosene, e foram colocadas gotas de óleo nos mesmos. Ainda assim, registraram-se efeitos de atrito seco na oscilação do eixo de latão. Acredita-se que um alinhamento mais cuidadoso entre rolamentos pode minimizar estes efeitos.

Finalmente, a Figura 5.34 mostra a medida (após passar pelo algoritmo eliminador de drift) do ângulo de yaw do corpo, quando se realiza o ensaio 2 descrito anteriormente. Pode-se ver que a medida apresenta-se bastante estável quando o corpo está parado, o que prova o funcionamento do algoritmo.

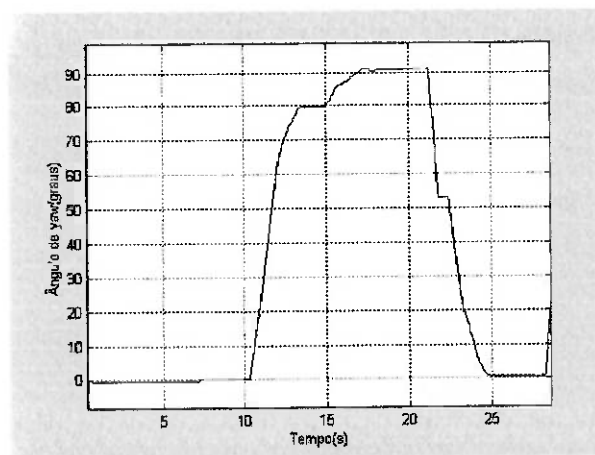


Figura 5.34 Ângulo de yaw medido

5.4.2. Possíveis melhorias

Após a análise de funcionamento do protótipo do sensor inercial, conclui-se que os principais requisitos de projeto (como dimensões e peso reduzidos, resolução de $0,5^\circ$

e bom comportamento durante oscilações) foram respeitados. Entretanto, há melhorias a serem feitas, dentre as quais podem-se citar o alinhamento entre os furos de apoio dos rolamentos do eixo externo e o invólucro do sensor bem como simplificações construtivas que facilitariam a montagem do sensor.

Além disso, acredita-se que o invólucro do sensor (o tubo de alumínio de seção quadrada) esteja superdimensionado. Seria perfeitamente possível utilizar um invólucro com parede menos espessa, o que contribuiria com a diminuição de massa do sensor inercial. Além disso, ainda há espaço para melhorias na miniaturização da montagem mecânica.

5.4.3. Fotos do protótipo

No anexo A existem fotos do protótipo do sensor inercial que podem ajudar na compreensão do funcionamento do mesmo. Pode-se ver na Figura A1.1 o sensor inercial com seus dois módulos – mecânico e eletrônico – unidos e encapsulados com o invólucro de alumínio. Nota-se que o módulo eletrônico é montado sobre o mecânico, e que a divisão entre tais módulos é visível. Na parte superior do módulo eletrônico é possível ver as extremidades dos dois parafusos de união e suas porcas, que já foram mencionados.

A Figura A1.2 mostra os módulos mecânico e eletrônico separados. Podem-se ver os circuitos e fios do módulo eletrônico, bem como os parafusos de união fixados na tampa de acrílico superior do módulo mecânico. Essa característica modular torna a manutenção do sensor muito mais fácil e também facilita a visualização do funcionamento do mesmo. Deve-se notar que os fios que saem dos fotosensores e do próprio sensor piezoelétrico, montados no módulo mecânico, e que vão para os circuitos

do módulo eletrônico podem ser desligados por meio de conectores presos em uma das paredes internas do módulo mecânico. Tais conectores possibilitam a separação real dos dois módulos se isso for necessário.

Podem-se ver na Figura A1.3 detalhes do disco externo, montado sobre o eixo de latão, e cujos movimentos são monitorados por um emissor e um receptor de infravermelho. Estes dois últimos estão montados sobre uma placa de “wire-up”, apoiada por um bloco de PVC que, por sua vez, está preso a uma parede interna do invólucro de alumínio. Estes fotosensores monitoram as oscilações do disco externo por meio das marcas óticas, que também podem ser vistas na Figura A1.3. Tais marcas foram impressas em um filme e posteriormente fixadas no semi-disco de acrílico por meio de adesivo.

Podem-se identificar, também, os dois lastros de chumbo presos nos semi-discos de acrílico, assim como o caminho que os fios do sensor piezoelétrico percorrem até chegarem a um dos conectores na parede interna do invólucro.

A Figura A1.4 mostra o disco interno visto de cima. Podem-se identificar nesta foto as marcas óticas no disco, o lastro de chumbo (cilíndrico) montado atrás do sensor piezoelétrico e os fotosensores que registram os movimentos do disco interno montados sobre o eixo de latão. Pode-se ver, também, o conjunto de fios que saem destes fotosensores e se dirigem a outro conector, também preso na parede interna do invólucro. Em um segundo plano da foto, um pouco acima do disco, pode-se identificar um dos pequenos “cubos” de acrílico responsáveis pela fixação da tampa de acrílico inferior no invólucro de alumínio do sensor.

6. Aplicação

6.1. Introdução – cadeira de rodas motorizada controlada pelo movimento da cabeça

Neste item será apresentada a aplicação desenvolvida para o sensor inercial de orientação angular, que corresponde ao controle de uma cadeira de rodas motorizada por meio dos movimentos da cabeça do deficiente físico.

Dentre os deficientes que se beneficiariam com o sistema citam-se tetraplégicos e paraplégicos com paraparesia dos membros superiores (diminuição de força) ou com doenças neurológicas que comprometem a coordenação motora (o que dificulta o controle ou acionamento manual de uma cadeira de rodas).

Sensores inerciais, por não necessitarem de referências externas, são bastante adequados para a presente aplicação. A aplicação proposta consistiria apenas de um sensor preso na cabeça do deficiente que, conectado por meio de um cabo ao circuito de comando, acionaria os motores da cadeira. Um esquema do sistema é apresentado na Figura 6.1.



Figura 6.1 Esquema funcional do sistema de controle da cadeira de rodas

Assim, não se teria que realizar nenhuma modificação na parte mecânica da cadeira de modo a fornecer referências de posicionamento ao sensor, diminuindo os custos de adaptação de uma cadeira motorizada comum.

A Figura 6.2 resume as ações de controle necessárias para guiar a cadeira. Podem-se utilizar dois dos três movimentos básicos da cabeça para movimentar a cadeira para frente e para trás e para direcioná-la. O terceiro movimento pode ser utilizado para ligar e desligar o sistema. A velocidade da cadeira é proporcional à inclinação da cabeça do usuário¹.

¹ No protótipo desenvolvido, a ação de ligar e desligar o sistema é feita manualmente, sem a utilização do movimento de yaw da cabeça.

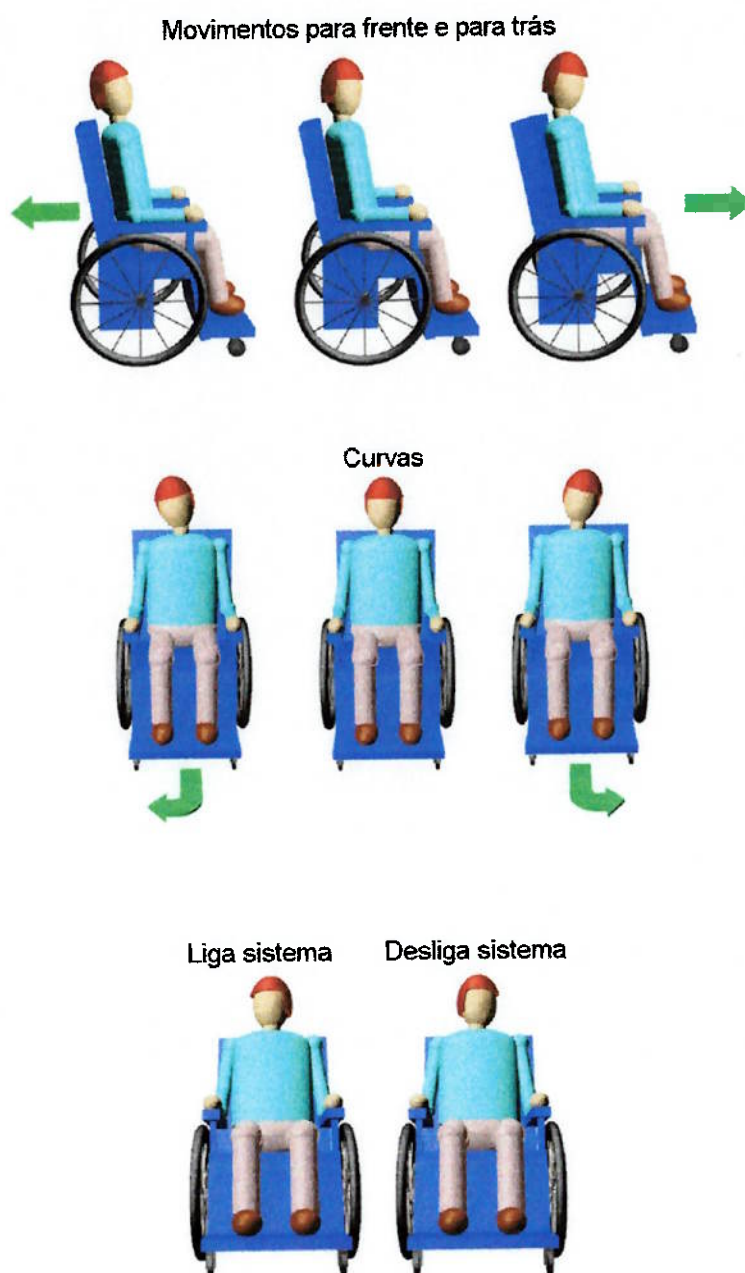


Figura 6.2 Movimentos da cabeça para controlar a cadeira

6.2. Projeto Mecânico

Já que a idéia era construir uma cadeira de rodas simplificada, apenas para demonstrar uma possível aplicação do sensor inercial desenvolvido, optou-se por utilizar uma base de madeira, sob a qual seriam presos motores elétricos e rodas. Sobre a madeira deveria ser fixada uma cadeira, na qual ficaria sentado o usuário.

6.2.1. Capacete

Antes de construir a cadeira de rodas foi preciso prender o sensor em um capacete, para monitorar a orientação da cabeça do operador da cadeira. Para isso, foi utilizado um capacete de obra devido ao seu baixo custo e à facilidade com que o mesmo pode ser furado para a fixação do sensor inercial.

Foram confeccionados dois apoios em madeira, mostrados na Figura 6.3, que depois foram parafusados na parte posterior do capacete. A parte posterior deste apoios, em forma de “L”, recebe o sensor. Para garantir a fixação do sensor inercial nestes apoios utilizou-se uma fita de aço galvanizado de 10mm de largura, 1mm de espessura e 230mm de comprimento que “abraça” o sensor e é fixada nas laterais dos apoios de madeira por meio de parafusos. O lado interno desta fita de aço possui uma camada de espuma. Desse modo, ao apertar a fita contra o sensor, a espuma sofre compressão e também comprime a parede externa do sensor (de alumínio). Assim, garante-se a compressão do invólucro do sensor e sua fixação por meio de atrito, sem tracionar demais a fita de aço, pois basta uma pequena força para comprimir e deformar a espuma.

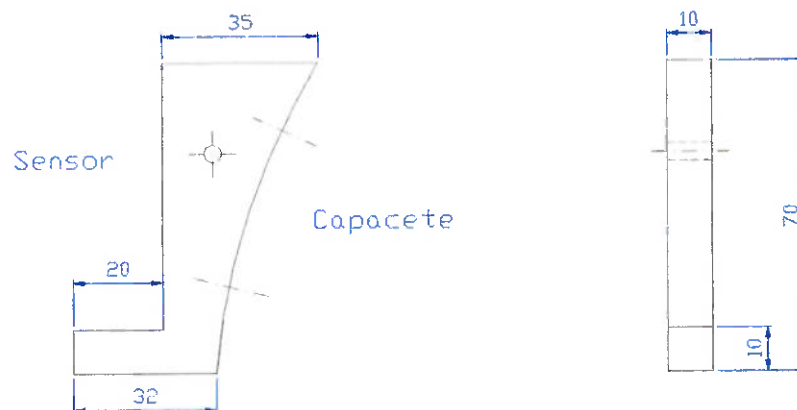


Figura 6.3 Apoios do sensor inercial no capacete

6.2.2. Base

A base da cadeira de rodas, como já foi mencionado, foi feita em madeira. Utilizou-se uma placa de compensado de 22mm de espessura, 530mm de largura e 750mm de comprimento. Desse modo, há espaço suficiente para a fixação de uma cadeira e para o apoio dos pés do usuário sobre a placa de madeira.

6.2.3. Rodas

Foram usadas duas rodas Champion 512 na parte posterior do veículo, responsáveis pela tração. Na parte anterior, utilizaram-se dois rodízios Champion 512, que apoiam o veículo e permitem a realização de curvas com baixo nível de arrasto das rodas no piso. A Figura 6.4 mostra o posicionamento das rodas e dos rodízios na placa de madeira. Para fixar as bases de rodas e rodízios na placa de compensado utilizaram-se parafusos M6.

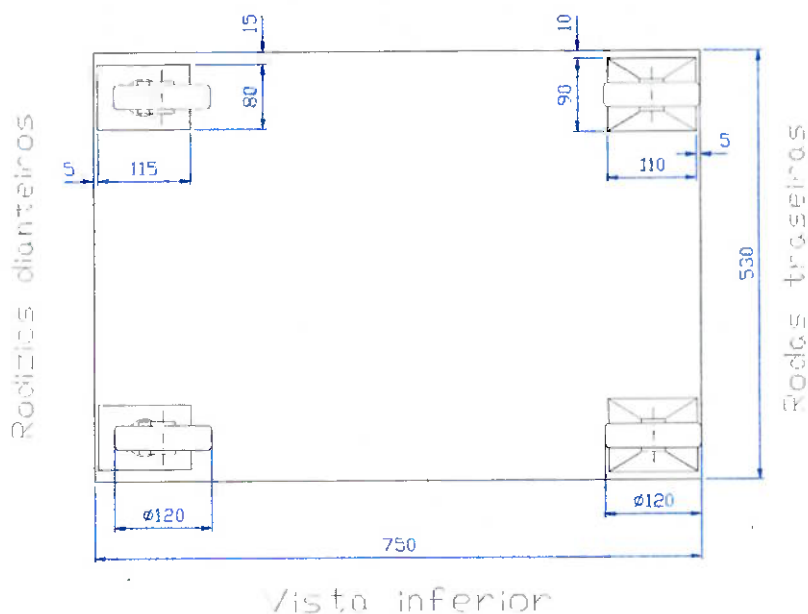


Figura 6.4 Posicionamento das rodas na base de madeira da cadeira de rodas

Optou-se por utilizar tração traseira neste veículo por dois motivos:

1) quase todo o peso da cadeira, de seus acessórios e do operador estará concentrado sobre as rodas traseiras. É interessante que as rodas que movem a cadeira de rodas recebam a maior parte do peso para que não deslizem ou derrapem no piso;

2) testes realizados antes da montagem final da cadeira de rodas comprovaram que o controle de direção da cadeira fica mais estável se a tração for traseira e com os rodízios colocados na parte dianteira da base. Com a configuração oposta – tração dianteira e rodízios na parte traseira da base – o veículo ficou menos estável e apresentou uma tendência maior ao desalinhamento, mesmo com os dois motores operando com tensões iguais.

6.2.4. Motores

Para movimentar a cadeira de rodas, foram usados dois motores elétricos DC GMN7PV012A, de 24V e 80W de potência, sendo que cada um destes motores é responsável pelo acionamento de uma roda traseira (de tração). A transmissão de potência entre motor e roda será descrita a seguir.

Para fixar os dois motores na placa de madeira foi preciso usinar cantoneiras de alumínio, apoios de madeira e fitas de aço. As cantoneiras foram usadas para fixar a parte anterior dos motores, que já contava com abas e furos para fixação. Tais cantoneiras foram fixadas também na base de madeira por meio de parafusos. Na base da cantoneira foram usinados rasgos no lugar de furos para permitir pequenos ajustes e movimentos do conjunto cantoneira – motor. Essa possibilidade de ajustes foi muito importante durante o alinhamento dos motores com as rodas.

Para evitar que a cantoneira sofresse flexões, o que aconteceria se apenas ela estivesse segurando o motor, foi colocado entre a parte posterior do motor e a base de

madeira, em um vão de aproximadamente 11mm, um pequeno apoio de madeira. Para garantir o travamento completo da carcaça do motor utilizou-se uma fita de aço galvanizado de 10mm de largura, 1mm de espessura e 260mm de comprimento. Tal fita foi passada ao redor da carcaça do motor em sua parte posterior, na mesma região do apoio de madeira, e parafusada em suas extremidades na base de madeira. Desse modo, foi possível definir a tensão desejada na fita em função do aperto dos parafusos de fixação (M6) na madeira. Assim, a cantoneira de alumínio na parte anterior, o apoio de madeira entre o motor e a base e a fita de aço “abraçando” a parte posterior da carcaça do motor garantiram sua fixação. É importante lembrar que tanto as rodas como os motores e seus componentes de fixação estão posicionados na parte inferior da base. A Figura 6.5 mostra detalhes da fixação dos motores no compensado.

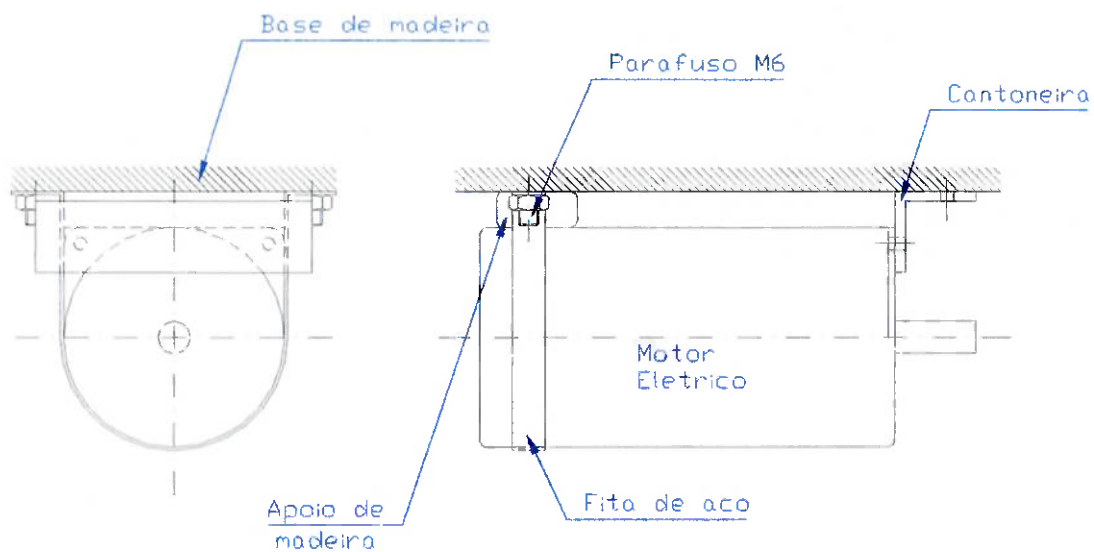


Figura 6.5 Detalhes da fixação dos motores na parte inferior da base de madeira

Com a montagem proposta, o veículo pode mover-se para frente, para trás e realizar curvas por meio do controle das velocidades dos motores elétricos. Por exemplo, se o motor direito ficar parado e o motor esquerdo acionar a roda para frente, o veículo descreverá uma curva para a direita com centro de rotação sobre a roda parada. Pode-se inverter os sentidos dos motores para realizar curvas “fechadas” (com

menor raio de curvatura) ou manter os dois motores operando com o mesmo sentido e velocidades um pouco diferentes para realizar curvas mais “abertas” (maior raio de curvatura).

6.2.5. Transmissão

Para transmitir potência dos motores elétricos às rodas traseiras utilizaram-se correias sincronizadoras (“dentadas”). Engrenagens ocupariam um espaço muito maior e implicariam gastos mais elevados e maior tempo de fabricação. Optou-se por correias sincronizadoras devido à simplicidade de montagem, disponibilidade no mercado, baixos custos envolvidos e pequena potência transmitida. A vantagem da correia sincronizadora sobre a correia plana ou em “V” é que garante-se a sincronização entre motor e roda com uma tensão menor na correia, já que os dentes ajudam a evitar o deslizamento da mesma. Para isso, foi selecionada a correia Gates PowerGrip® XL, de passo 1/5” (5,08mm), largura de 3/8” (9,53mm) e comprimento de 584,2mm, ou similar.

Para realizar tal transmissão foram usinadas polias dentadas, uma para cada motor. Além da polia dentada, a correia passa também pela roda traseira, envolvendo-a. Assim, quem estará em contato com o piso não será a roda traseira, mas a correia dentada. Esta é uma montagem simples e ideal para o espaço reduzido disponível. Testes mostraram que, apesar da correia estar em contato direto com o solo, ela não escapa da roda em condições normais de operação, mesmo sem nenhuma guia lateral na roda.

Foram usinadas em PVC duas polias dentadas, com 40 dentes e diâmetro externo de 64,16mm. O desenho de fabricação destas polias pode ser visto no apêndice I. A escolha do diâmetro e do número de dentes baseou-se em testes realizados com outra

polia dentada de 31,83mm de diâmetro externo e 20 dentes. Notou-se que com esta última polia a velocidade final do veículo era muito pequena, e não havia problemas de torque. Portanto, optou-se pela utilização de polias dentadas de 40 dentes e 64,16mm de diâmetro externo, para aumentar a velocidade. Testes em rampas de até 14% comprovaram não haver problemas de limitação de torque com tais dimensões para a polia dentada.

Além disso, foram usinadas placas de alumínio de formato circular (1mm de espessura e 68mm de diâmetro) que foram fixadas nas laterais das polias por meio de rebites. A função destas placas é guiar as correias e evitar que as mesmas escapem das polias. A Figura 6.6 ilustra a transmissão por correias e as polias dentadas com as guias laterais de alumínio.

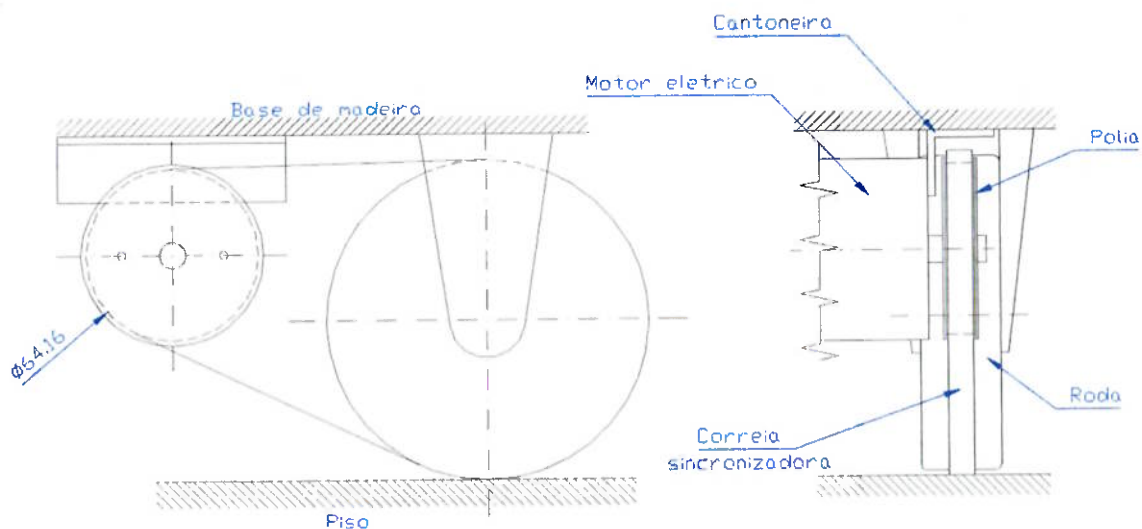


Figura 6.6 Detalhes da transmissão por correia sincronizadora

O travamento da correia dentada no eixo de saída do motor elétrico baseia-se em um pino transversal, que é parte integrante do motor.

6.2.6. Cadeira

Utilizou-se uma cadeira de estrutura tubular de aço, pintada de preto, e com assento de plástico. As extremidades inferiores das quatro pernas da cadeira possuem abas com furos, que foram usadas para fixar a cadeira no lado superior da base de madeira com parafusos de diâmetro 3mm e rosca para madeira.

6.2.7. Outros detalhes

A base de compensado foi lixada e teve todos os cantos e arestas arredondados para evitar acidentes. Depois, a base de madeira foi pintada de preto. Antes da pintura, entretanto, foram fixados no lado superior da base ripas de madeira (compensado e aglomerado) para fixar os elementos que seriam colocados sobre a base, e que são essenciais para o controle e acionamento dos motores. Tais componentes são:

- 1 bateria de 12V e 4Ah para acionar um notebook;
- 4 baterias de 6V e 4Ah para acionar os motores elétricos;
- 1 notebook com processador 486 DX2 66MHz ;
- 1 placa de acionamento dos motores elétricos;

Pode-se ver na Figura 6.7 uma vista superior da base de compensado, sem a cadeira, com os espaços utilizados por cada um destes componentes acima citados.

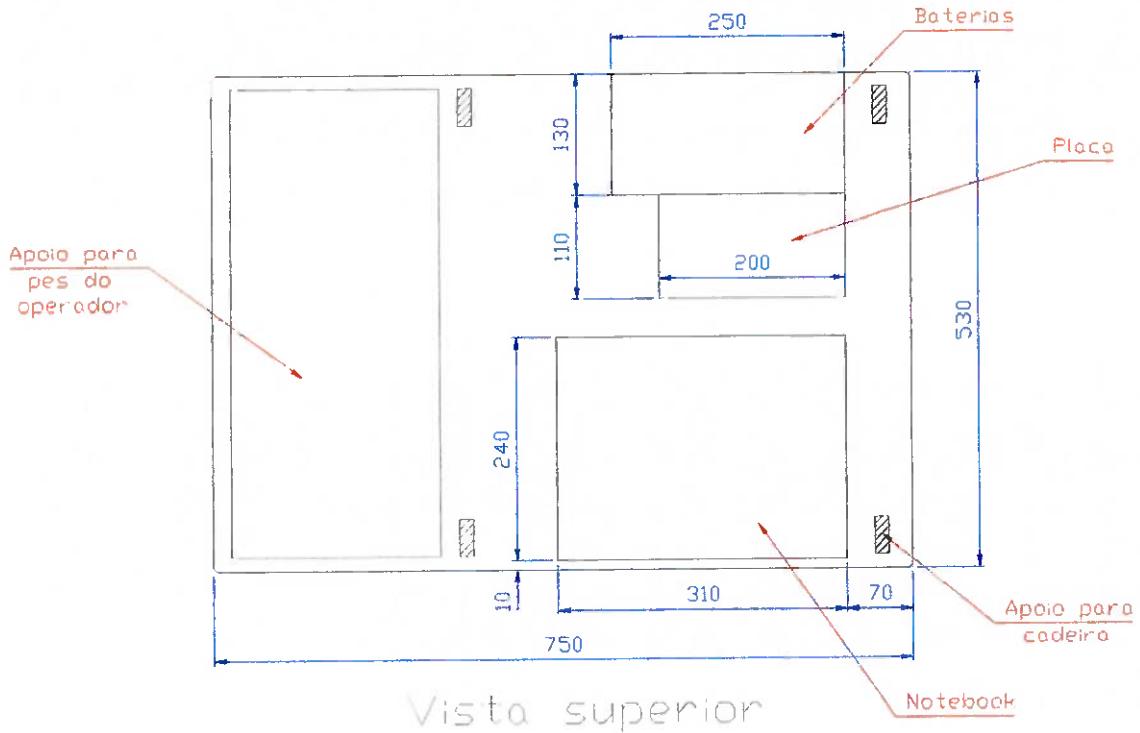


Figura 6.7 Vista superior da base de madeira com os espaços ocupados pelos componentes

6.3. Projeto Eletrônico

6.3.1. Placa de relés

Para controlar os motores elétricos já descritos no item anterior, de projeto mecânico da cadeira de rodas, pretendia-se utilizar um circuito de PWM (*pulse width modulation*). Com tal circuito, seria possível obter um campo contínuo de tensões e, portanto, de velocidades para cada um dos motores.

Como já havia sido projetado um circuito de PWM durante o primeiro semestre de 1998, a primeira tentativa foi utilizá-lo diretamente para controlar os motores elétricos. Um esquema deste circuito pode ser visto na Figura 6.8, na qual nota-se a presença de um componente 3524 (gerador de sinais de PWM) e de uma ponte “H” com transistores Mosfet.

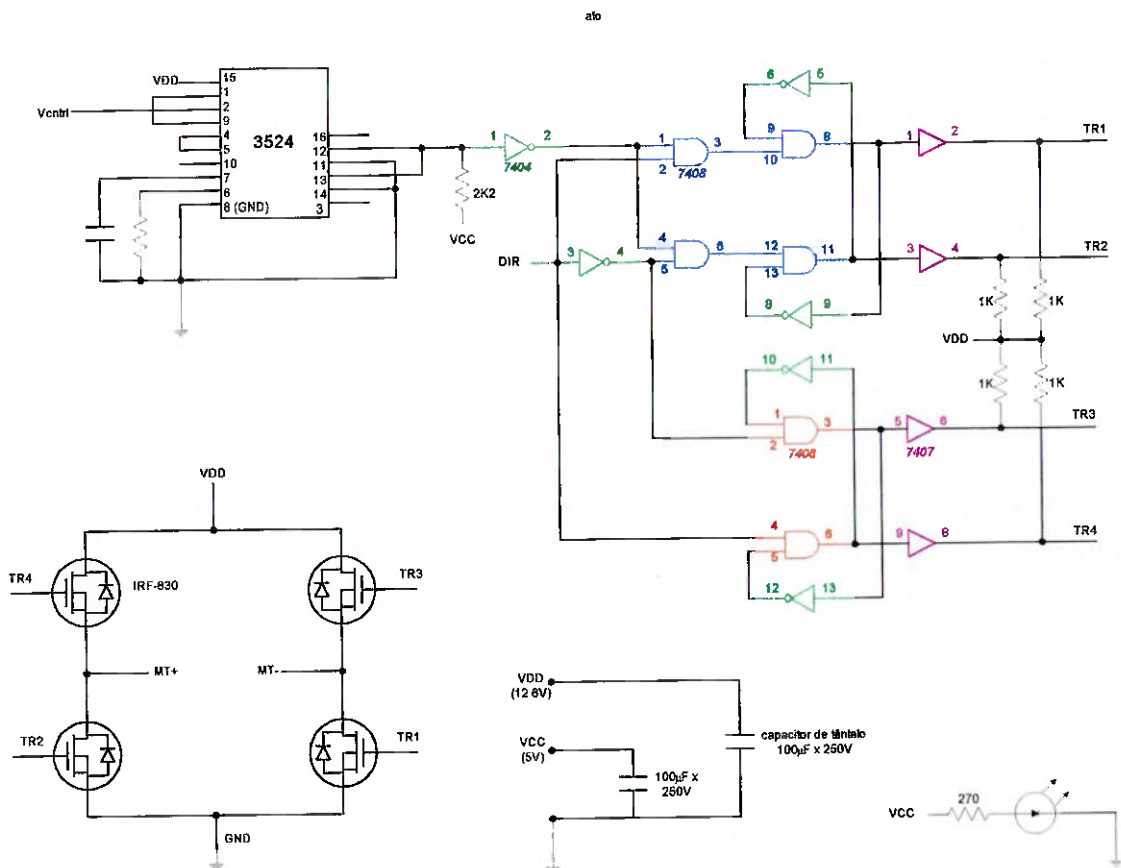


Figura 6.8 Circuito de PWM para acionamento de motores elétricos

Entretanto, este circuito havia sido projetado para controlar motores de 12V. Desse modo, somente seria possível obter metade da velocidade possível com os motores elétricos montados na cadeira de rodas. Portanto, foram feitas algumas modificações para permitir o acionamento de motores de 24V. Estas alterações incluíram, basicamente, alterações em alguns terminais de alimentação do circuito, principalmente da ponte de transistores.

Novos testes revelaram que no ponto de máxima velocidade, a tensão entre os terminais do motor era de apenas 20V. Isso significa que 4V estavam sendo “perdidos” e dissipados pelo circuito, o que explica o considerável aumento de temperatura do mesmo durante operação. Outros testes foram feitos com o circuito, e não foi possível identificar a causa de queda tão grande de tensão. Aparentemente, o PWM deixara de

gerar sinais da mesma forma que fazia para alimentação de 12V, e ao atingir a tensão máxima de controle (que vale 3,5V), os pulsos gerados pelo 3524 apresentavam “falhas” e pequenas curvas entre si. Tais sinais acionavam os transistores também em regiões lineares de operação (além do modo “liga-desliga”), o que explica em parte a dissipação de energia, o aquecimento do circuito e a queda de tensão.

Não foi identificada a causa da não-linearidade e do funcionamento indesejado do PWM para controle do motor elétrico de 24V. Desse modo, chegou-se à conclusão de que seria preciso projetar outro circuito desde o início, especificamente para controlar motores de alimentação 24V. O projeto do circuito de PWM no primeiro semestre levou aproximadamente três meses, e um novo projeto deste tipo de circuito não levaria menos de dois meses. Como a montagem do protótipo da cadeira de rodas começou no início de novembro (já que a ênfase do trabalho é sobre o sensor, e a cadeira de rodas é apenas uma possível aplicação para demonstrar o funcionamento do sensor inercial), notou-se que não haveria tempo para projetar e testar um circuito de PWM e ainda testar outros componentes e detalhes que dependiam do acionamento dos motores, como a sensibilidade do acionamento dos mesmos e algoritmos de amortecimento no programa de aquisição de dados do sensor inercial.

Assim, optou-se pela utilização de um circuito de relés para acionamento dos motores. A vantagem deste circuito é que seu projeto e construção exigem muito menos tempo que um circuito de PWM devido à sua simplicidade. Entretanto, a grande desvantagem deste circuito é que as velocidades possíveis dos motores elétricos passam a ser “discretizadas”, ou seja, há “níveis” de velocidade bem definidos, sem uma variação linear entre eles. Mas se a diferença entre esses níveis de velocidade não for muito grande, os “saltos” entre velocidades com a cadeira em operação podem não ser tão desagradáveis para o usuário.

Para minimizar as diferenças entre os níveis de velocidade foram usadas baterias de 6V no acionamento dos motores. Assim, há 5 estágios possíveis de velocidade, incluindo o veículo parado (velocidade nula). Testes mostraram que os “trancos” resultantes da discretização de velocidades não são tão desagradáveis para o operador da cadeira, e que isso não inviabiliza seu controle.

O projeto deste circuito baseia-se, portanto, na existência de 4 baterias de 6V, cujas ligações são chaveadas por relés. A Figura 6.9 mostra as ligações e os relés necessários para o acionamento de um motor em 5 níveis de velocidade e inversão de sentido, o que totaliza 9 níveis diferentes de velocidade.

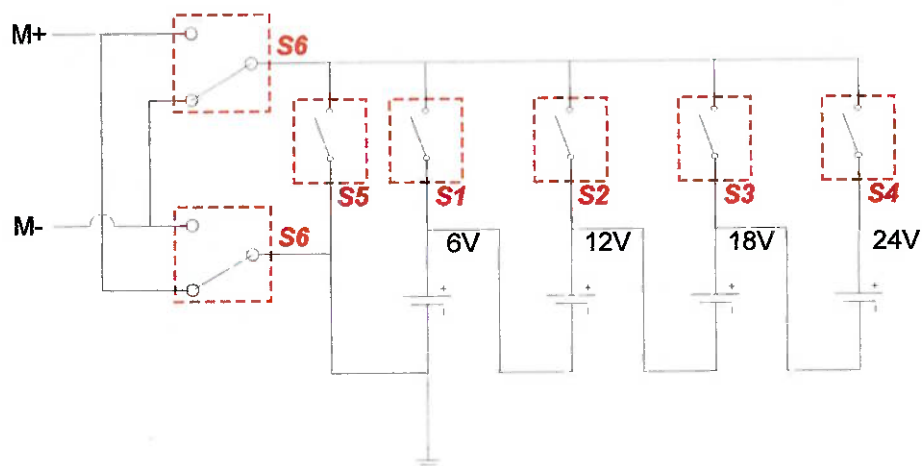


Figura 6.9 Circuito de acionamento de um motor com inversão de sentido

Pode-se ver na Tabela 6.1 a relação entre os valores dos sinais de controle dos relés e a tensão disponível ao motor.

Tabela 6.1 Sinais de controle e níveis de velocidade associados

Nível de velocidade	S1	S2	S3	S4	S5	S6	Tensão disponível
+4	0	0	0	1	0	1	+24V
+3	0	0	1	0	0	1	+18V
+2	0	1	0	0	0	1	+12V
+1	1	0	0	0	0	1	+6V
0	0	0	0	0	1	X	0V
-1	1	0	0	0	0	0	-6V
-2	0	1	0	0	0	0	-12V
-3	0	0	1	0	0	0	-18V
-4	0	0	0	1	0	0	-24V

Nota-se que no nível “0”, ou seja, motor parado, seus terminais são curto-circuitados. Desse modo, garante-se que a velocidade do motor é nula e dificulta-se a movimentação do mesmo por forças externas, pois o curto-circuito entre terminais funciona como um “freio” para o motor. Existe, ainda, outro nível de velocidade que não foi representado na Tabela 6.1 e que também corresponde a velocidade nula, mas que é caracterizado por ter todos os sinais de controle dos relés iguais a zero. O motor fica parado, mas seus terminais não estão em curto-circuito. Assim, pode-se mover o motor com relativa facilidade.

Para acionar os dois motores da cadeira de rodas motorizada deve-se “espelhar” o circuito mostrado na Figura 6.9, exceto as baterias, que são as mesmas para os dois motores. O circuito resultante, incluindo os sinais de controle, pode ser visto na Figura 6.10.

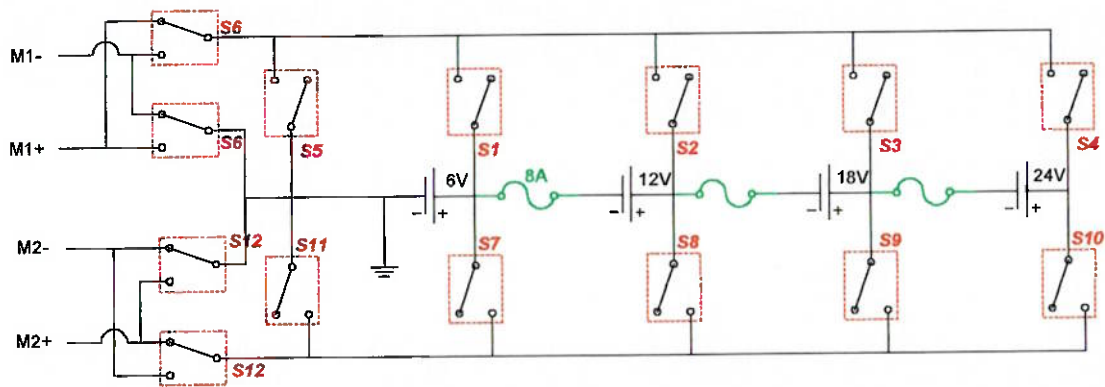


Figura 6.10 Circuito completo de acionamento dos dois motores elétricos da cadeira de rodas

Como utiliza-se um computador para adquirir os sinais enviados pelo sensor inercial, pode-se usar o mesmo computador para gerar os sinais de controle do circuito de acionamento dos motores, mostrados em vermelho na Figura 6.10. Tais sinais podem ser enviados ao circuito por meio de uma porta paralela. A lógica de geração dos sinais de controle dos motores em função da orientação do sensor inercial pode ser vista adiante, no item 6.4.

Para acionar os relés do circuito mostrado na figura anterior deve-se utilizar um transistor, já que os sinais de controle enviados pelo computador (por meio da porta paralela) não têm corrente suficiente para energizar as bobinas dos relés. Assim, baseando-se na Figura 6.11, para que a corrente i_1 valha aproximadamente 2mA:

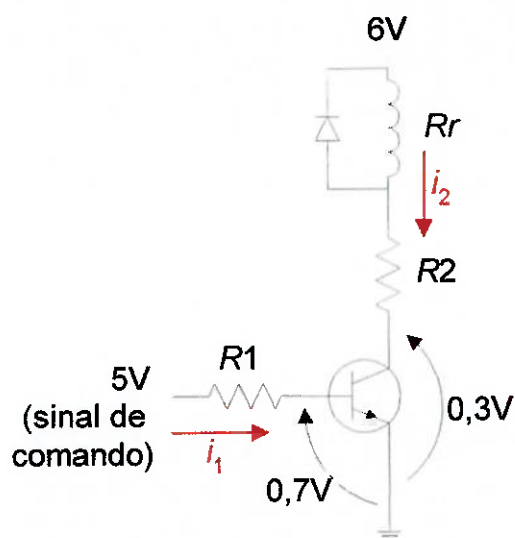
$$4,3 = R1 \cdot 2 \times 10^{-3} \Rightarrow R1 = 2150\Omega$$

Como não existe um resistor de exatamente 2150 Ω , pode-se usar um de $R1 = 2,2k\Omega$:

$$R1 = 2k2 \Rightarrow i_1 = 1,95mA$$

Supondo que o ganho β do transistor usado (NPN – CBC 337) vale 50:

$$i_2 = 97,7mA \Rightarrow Rr + R2 = 58\Omega$$



Mediu-se a resistência da bobina do relé R_r diversas vezes e chegou-se a um valor médio de $R_r = 30\Omega$. Desse modo, $R_2 = 28\Omega$. Como não existe uma resistência de $\frac{1}{4}W$ com este valor no mercado, utilizou-se $R_2 = 27\Omega$.

Figura 6.11 Circuito de acionamento do relé

O diodo, montado em paralelo com a bobina do relé, tem como função direcionar a corrente que surge no transitório do desligamento do relé. Enquanto o transistor está acionado, ele funciona como um “chave” fechada, deixando passar uma corrente i_2 pela bobina do relé (que pode ser modelada como um resistor e um indutor em série). Quando o transistor é desligado, a “chave” que ele representa se abre, e a corrente armazenada no indutor da bobina do relé não tem para onde fluir. Nesse instante, o diodo redireciona a corrente para o outro terminal da bobina, até que ela seja dissipada. Como a corrente de projeto vale aproximadamente 100mA, utilizou-se um diodo de capacidade 1A para cada relé.

O circuito de relés especificado foi montado em uma placa de “wire-up” de 100mm de largura e 200mm de comprimento. A alimentação de +6V, necessária para todos os circuitos de acionamento de relés, foi garantida com a bateria do 1º estágio.

Dentre os relés que comandam a tensão disponível a um único motor, nota-se que se mais de um deles for acionado ao mesmo tempo, ocorre curto-circuito entre uma ou

mais baterias, o que pode resultar em queima de componentes. Para evitar estes curto-circuitos foram tomadas duas medidas preventivas:

1) instalação de fusíveis entre as baterias, mostrados em verde na Figura 6.10;

2) geração de um atraso entre desligamento de um relé e acionamento de outro, que será explicado no item 6.4.

6.3.2. Painel de comando

Neste item será apresentado o projeto do painel de comando do protótipo da cadeira de rodas motorizada, destacando-se as ligações elétricas envolvidas entre os diversos componentes do sistema e os comandos do painel. O painel de controle acionado manualmente foi desenvolvido como uma forma alternativa de guiar a cadeira, com dois principais objetivos: posicionar a cadeira sem a utilização do sensor inercial e testar os subsistemas mecânico e eletrônico de acionamento da cadeira sem considerar o funcionamento do sensor.

O usuário dispõe dos seguintes comandos acionados manualmente:

- 1) Botão de reset do sensor (2 posições, com retorno automático), que zera a leitura do mesmo na posição em que o sensor se encontra no momento em que é pressionado;
- 2) Chave de seleção de modo de controle (2 posições sem retorno automático) – faz a seleção entre controle pelo painel de comando (com joysticks) ou pelo capacete (com o sensor inercial);

- 3) Chaves seletoras de sentido de cada motor (3 posições sem retorno automático) – seleciona o sentido de movimentação de cada motor. A posição intermediária deixa o motor com os terminais abertos;
- 4) Chaves seletoras de velocidades (5 posições sem retorno automático) – seleciona a velocidade de cada motor. A primeira posição corresponde a motor em curto (ou seja, freado).

Um possível esquema do painel de comando é apresentado na figura a seguir.

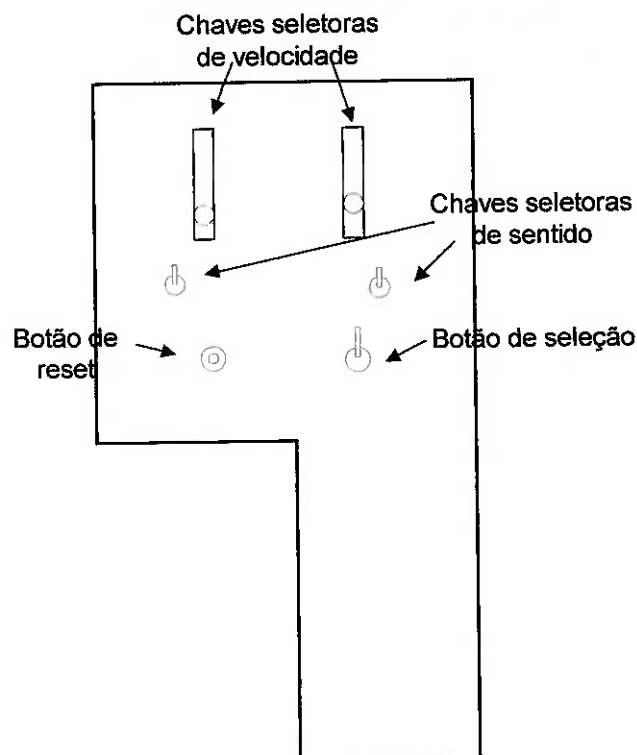


Figura 6.12 Esquema do painel de comando

A seguir serão detalhadas as ligações elétricas de cada um dos elementos do painel de comando.

6.3.2.1. Botão de reset

Este botão deve enviar um sinal ao computador ao ser pressionado. Este sinal é tratado no programa de controle, de tal forma a zerar o sensor.

Foi escolhida a porta paralela do computador, na medida em que a mesma possui 8 pinos reservados para entradas de sinais, além do que não se faz necessário o uso de interrupção para amostrar o sinal deste botão. O usuário leva mais tempo com o botão de reset pressionado do que o período de amostragem (15ms), logo, um *loop de pooling* é suficiente para realizar tal amostragem.

O esquema de ligação é mostrado a seguir:

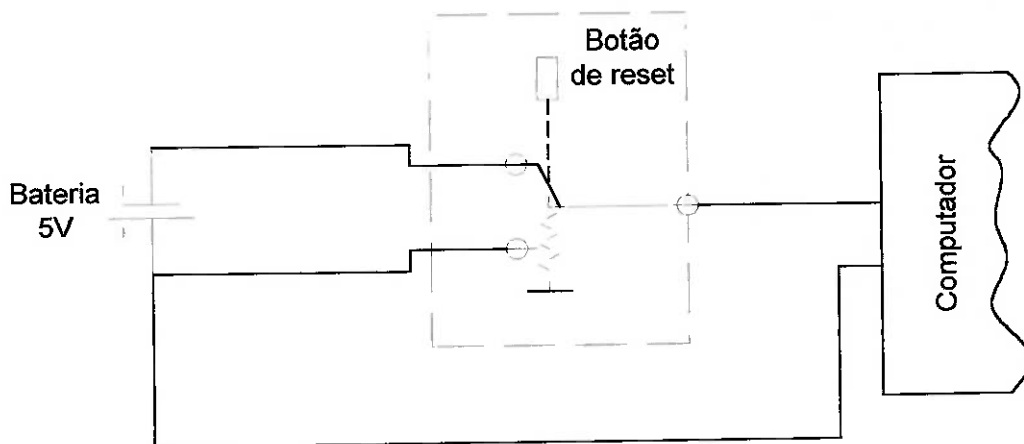


Figura 6.13 Diagrama de ligações elétricas do botão reset

Nota-se que foi utilizado um conjunto de 3 pilhas de 1,5V ligadas em série para alimentar o circuito acima. Não se utilizou uma das baterias de 6V que alimentam os motores porque, em situações de travamento de algum motor, pode ocorrer um pico de tensão que danificaria a porta paralela do computador.

6.3.2.2. Chave de seleção de modo de controle

Esta chave deve também enviar um sinal elétrico ao microcomputador quando acionada. Além disso, deve enviar um sinal à bobina de um relé com quatro contatos NA e quatro NF que realiza o chaveamento dos sinais enviado aos motores (que podem vir ou do painel de comando ou da placa de relés, dependendo da posição da chave de seleção de modo de controle).

Se o sensor inercial preso no capacete estiver em operação, serão usados os sinais da placa de relés para controlar os motores; se os joysticks do painel de comando estiverem acionados, os sinais provenientes deste painel serão usados para acionar os motores. A figura a seguir ilustra as ligações elétricas envolvidas.

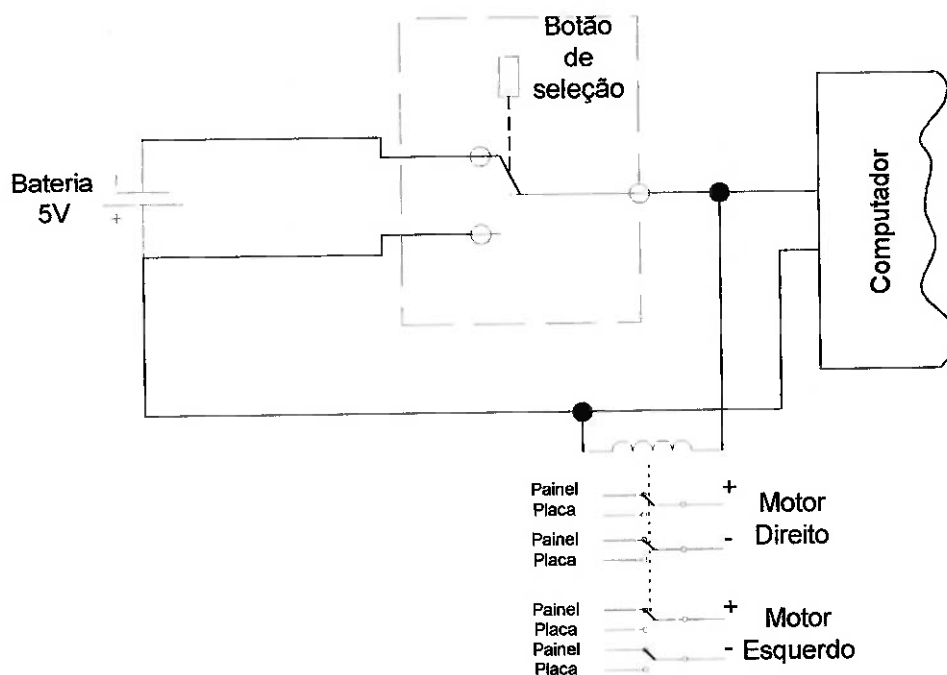


Figura 6.14 Ligações do botão de seleção

6.3.2.3. Chaves seletoras de sentido

Estas chaves realizam a inversão dos sinais provenientes das chaves seletoras de velocidade (e que vão até o relé de quádruplo citado acima, para então chegarem aos

motores). Utilizaram-se chaves de três posições, e as ligações são esquematizadas abaixo:

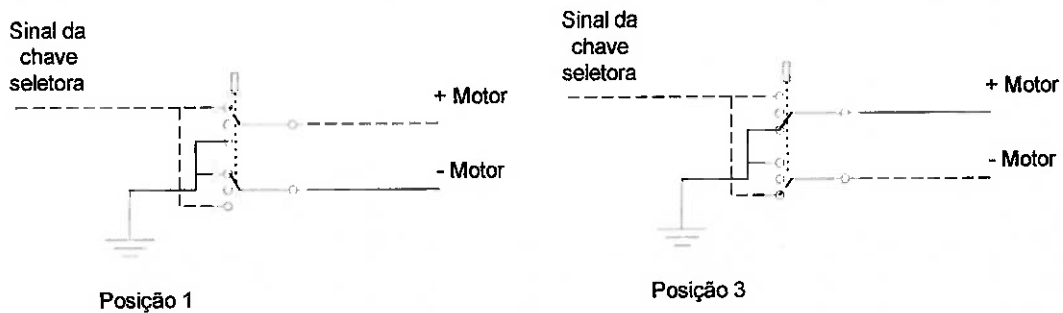


Figura 6.15 Esquema elétrico das chaves seletoras de sentido

Na figura representaram-se as duas posições limites da chave. Na posição intermediária, os terminais dos motores ficam abertos.

6.3.2.4. Chaves seletoras de velocidade

Estas chaves (rotativas, de 5 posições) simplesmente selecionam um dos níveis de tensão que será entregue à chave seletora de velocidades explicada anteriormente. Assim, o diagrama elétrico de suas ligações é apresentado a seguir.

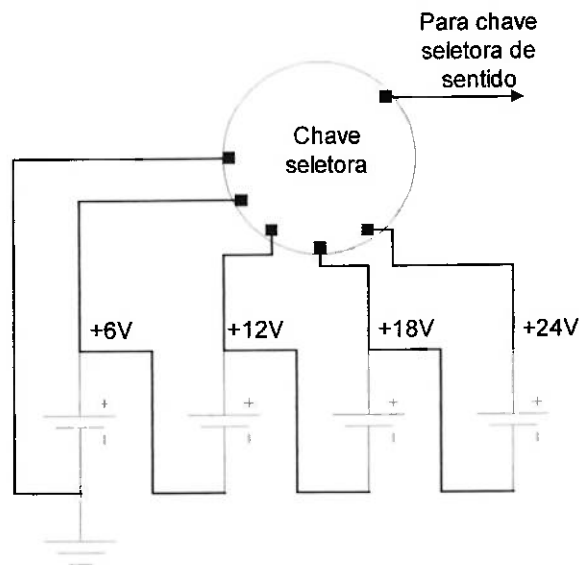


Figura 6.16 Esquema elétrico da chave seletora de velocidades

Para facilitar a dirigibilidade do veículo, foram construídos manches de alumínio presos ao eixo das chaves seletoras de velocidades, como é mostrado esquematicamente na figura a seguir.

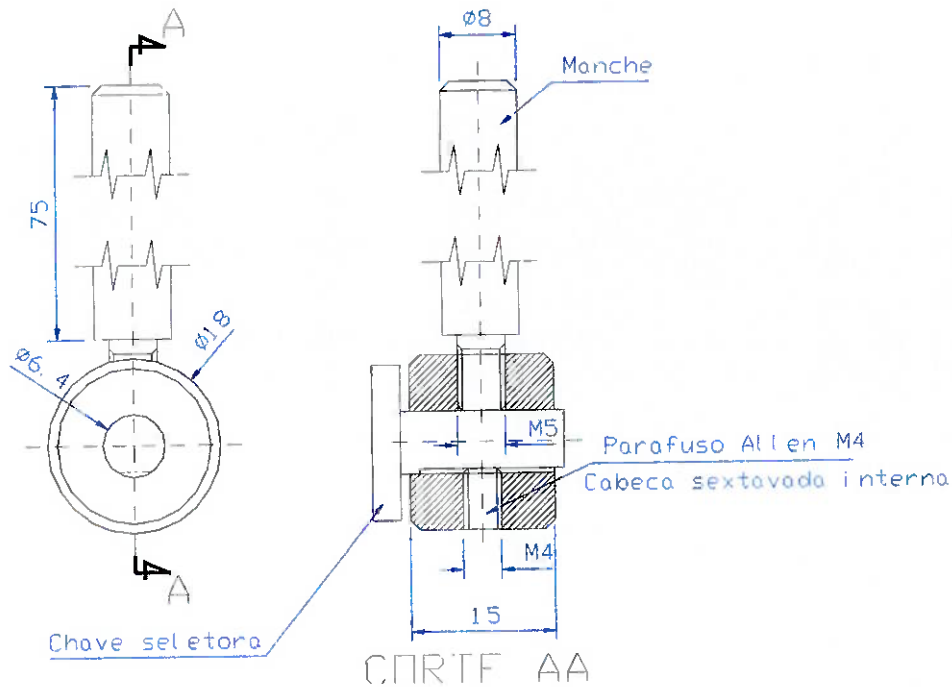


Figura 6.17 Manche preso às chaves seletoras de velocidade

6.4. Projeto do software

Neste item será descrita em detalhes a implementação do programa de acionamento dos motores elétricos da cadeira de rodas motorizada.

Inicialmente serão analisadas as posições da cabeça do operador que levam a cada tipo de movimento do carro. Em seguida, será apresentada a relação entre as variáveis medidas pelo sensor e a posição da cabeça citada anteriormente. As funções em linguagem Pascal para o acionamento dos motores serão descritas em detalhes em seguida.

6.4.1. Movimentos do carro

Cada posição da cabeça do operador levará a um tipo de movimento do carro. Por exemplo, inclinando-se a cabeça para frente, o carro será dirigido para frente, com uma velocidade proporcional à inclinação. Inclinando-se a cabeça para o lado, o carro girará sobre o seu próprio eixo, com uma velocidade de rotação também proporcional à inclinação.

A figura a seguir ilustra os movimentos dos motores para cada posição de um ponto situado no topo da cabeça do operador.

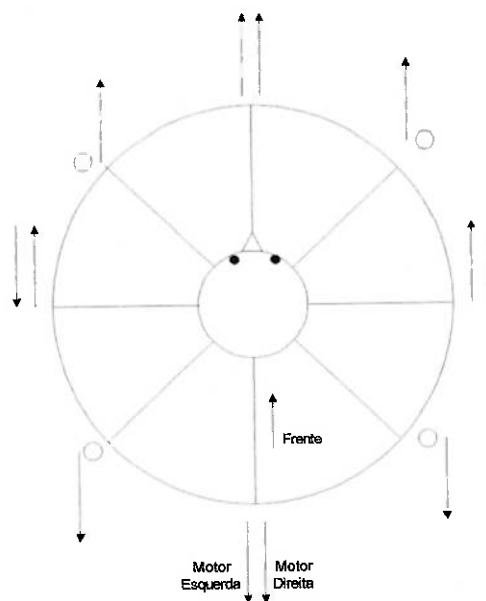


Figura 6.18 Movimentos possíveis dos motores (Vista superior)

Ao inclinar a cabeça para a frente, os dois motores são acionados igualmente. Conforme o operador gira a cabeça para a direita, o motor da direita vai sendo acionado mais lentamente, o que promove uma curva nesta direção. Raciocínios análogos podem ser desenvolvidos para todos os outros movimentos possíveis.

Considerando a região 1 mostrada na figura a seguir, pode-se considerar que a velocidade do motor da esquerda será proporcional ao raio r (distância no plano

horizontal entre o ponto do topo da cabeça do operador e o ponto O) e a velocidade do motor da direita será proporcional ao mesmo raio r e ao ângulo θ mostrado.

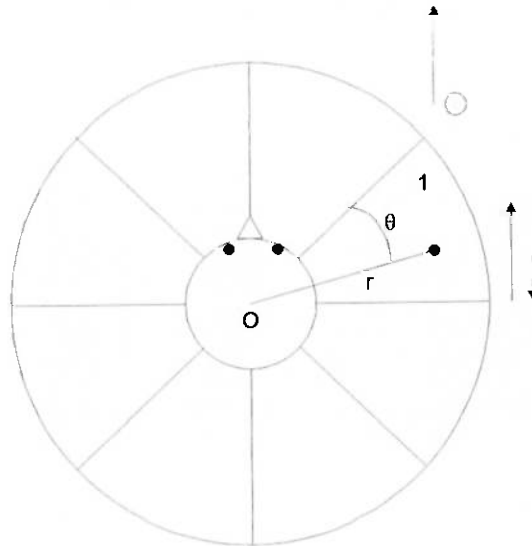


Figura 6.19 Região 1 e o acionamento dos motores

Adotando-se um raciocínio análogo para as outras regiões, podem-se estabelecer as leis completas que governam os acionamentos dos motores, dada a posição da cabeça do operador.

6.4.2. Relação entre variáveis medidas e posição da cabeça

No anexo B é mostrado que podem-se realizar três rotações para levar a cabeça do operador a uma orientação qualquer. Estas rotações são :

1. ψ , equivale ao ângulo de *yaw*, ou seja, rotação em torno do eixo z_0
2. α em torno do eixo x_1 , o que caracteriza o movimento de *pitch*
3. β em torno do eixo y_2 (*roll*)

As três matrizes que de rotação que descrevem estes movimentos são:

$$M_{0 \rightarrow 1} = \begin{bmatrix} \cos \psi & -\sin \psi & 0 \\ \sin \psi & \cos \psi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (6.1)$$

$$M_{1 \rightarrow 2} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \alpha & -\sin \alpha \\ 0 & \sin \alpha & \cos \alpha \end{bmatrix} \quad (6.2)$$

$$M_{2 \rightarrow 3} = \begin{bmatrix} \cos \beta & 0 & \sin \beta \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin \beta & 0 & \cos \beta \end{bmatrix} \quad (6.3)$$

Mostrou-se naquele item que a leitura do encoder preso ao eixo do sensor é igual a $-\alpha$ enquanto a do encoder preso no invólucro é $-\beta$.

Assim, tem-se uma relação direta entre as variáveis medidas e os movimentos que levam a cabeça a uma dada orientação.

Considerando que um ponto da cabeça do operador é escrito, na base 3 (presa à cabeça), como $(0,0,l)^T$, o mesmo fica escrito na base 0 (global) como:

$$M_{0 \rightarrow 1} \cdot M_{1 \rightarrow 2} \cdot M_{2 \rightarrow 3} \cdot (0,0,l)^T \quad (6.4)$$

Considerando l unitário, as coordenadas x e y (plano horizontal) deste ponto serão:

$$\begin{aligned} x &= \cos \psi \sin \beta + \cos \beta \sin \alpha \sin \psi \\ y &= -\cos \psi \cos \beta \sin \alpha + \sin \beta \sin \psi \end{aligned} \quad (6.5)$$

Desconsiderando a rotação de *yaw* ($\psi = 0$):

$$\begin{aligned}x &= \text{sen } \beta \\y &= -\text{cos } \beta \text{ sen } \alpha\end{aligned}\tag{6.6}$$

Assim, as coordenadas polares do ponto P, r e θ , ficam:

$$\begin{aligned}r &= \sqrt{(\text{sen } \beta)^2 + (\text{cos } \beta \text{ sen } \alpha)^2} \\ \theta &= a \tan 2(-\text{cos } \beta \text{ sen } \alpha, \text{sen } \beta)\end{aligned}\tag{6.7}$$

Nota-se que desprezou-se a rotação de *yaw*, ou seja, estando o operador virado para a direita, quando ele inclinar a cabeça para a frente, o carro irá para a frente, não levando em consideração o fato de que a cabeça estava “rodada” para a direita em *yaw*.

6.4.3. Implementação do sistema de acionamento

Foram desenvolvidas duas rotinas em Pascal que realizam a função de acionar o circuito driver do motor. Este circuito, como explicado no item 6.3, aciona os motores por estágios, ou seja, de acordo com a velocidade especificada, fornece uma tensão ao motor, tensão esta que varia de 0 a 24V, discretizada de 6 em 6V. Assim, para cada motor será necessário um bit que indique o sentido de movimento e mais 5 bits para indicar a velocidade (na realidade, seriam necessários apenas 3 bits para indicar as 6 velocidades possíveis; entretanto, por motivo de simplificação, serão utilizados 5 bits, cada um associado a uma velocidade²).

² Não energizando nenhum pino, o motor tem seu terminais abertos. Energizando o primeiro pino, os terminais do motor são colocados em curto-circuito, o que freia o motor

Será utilizada a porta paralela do microcomputador para fazer a comunicação, na medida em que a mesma dispõe de 12 pinos de escrita, número coincidente com o que é necessário para o acionamento.

A pinagem da porta utilizada é mostrada na tabela a seguir:

Tabela 6.2 Esquema de pinos da porta paralela para acionamento do circuito driver dos motores

Pino	Função
1	Sentido motor esquerdo (S6)
2	(S5)
3	(S1)
4	Velocidades motor esquerdo (S2)
5	(S3)
6	(S4)
7	Sentido motor direito (S12)
8	(S11)
9	(S7)
14	Velocidades motor direito (S8)
16	(S9)
17	(S10)

Os procedimentos implementados em Pascal realizam a transformação entre os ângulos lidos pelos encoders³ e os sinais necessários para o acionamento do circuito driver.

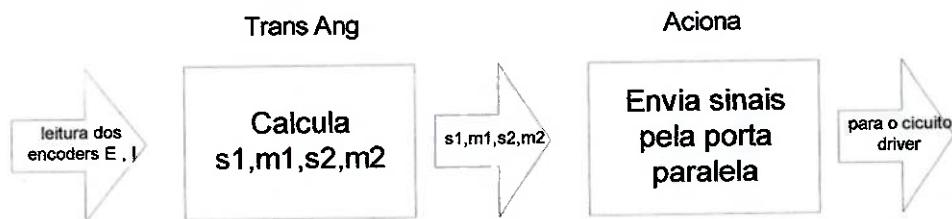


Figura 6.20 Diagrama dos procedimentos em Pascal para acionamento do circuito driver dos motores

A rotina TransAng recebe como entradas as leituras dos dois encoders do sensor (encoder ligado ao invólucro (E) e ao eixo (I)) e gera como saídas os sentidos dos dois motores (s1 e s2) e as velocidades dos mesmos (m1 e m2), utilizando-se a equação (6.7) para realizar tal função.

³ Deve-se lembrar que a cadeira é controlada apenas pelos ângulos de pitch e roll do sensor, o que dispensa o uso do sensor piezoelétrico que mede orientação em yaw.

A rotina Aciona simplesmente recebe os sentidos e velocidades e realiza o acionamento correto dos pinos da porta paralela.

A seguir, são apresentados os fluxogramas detalhados das funções citadas. As listagens completas encontram-se no apêndice II.

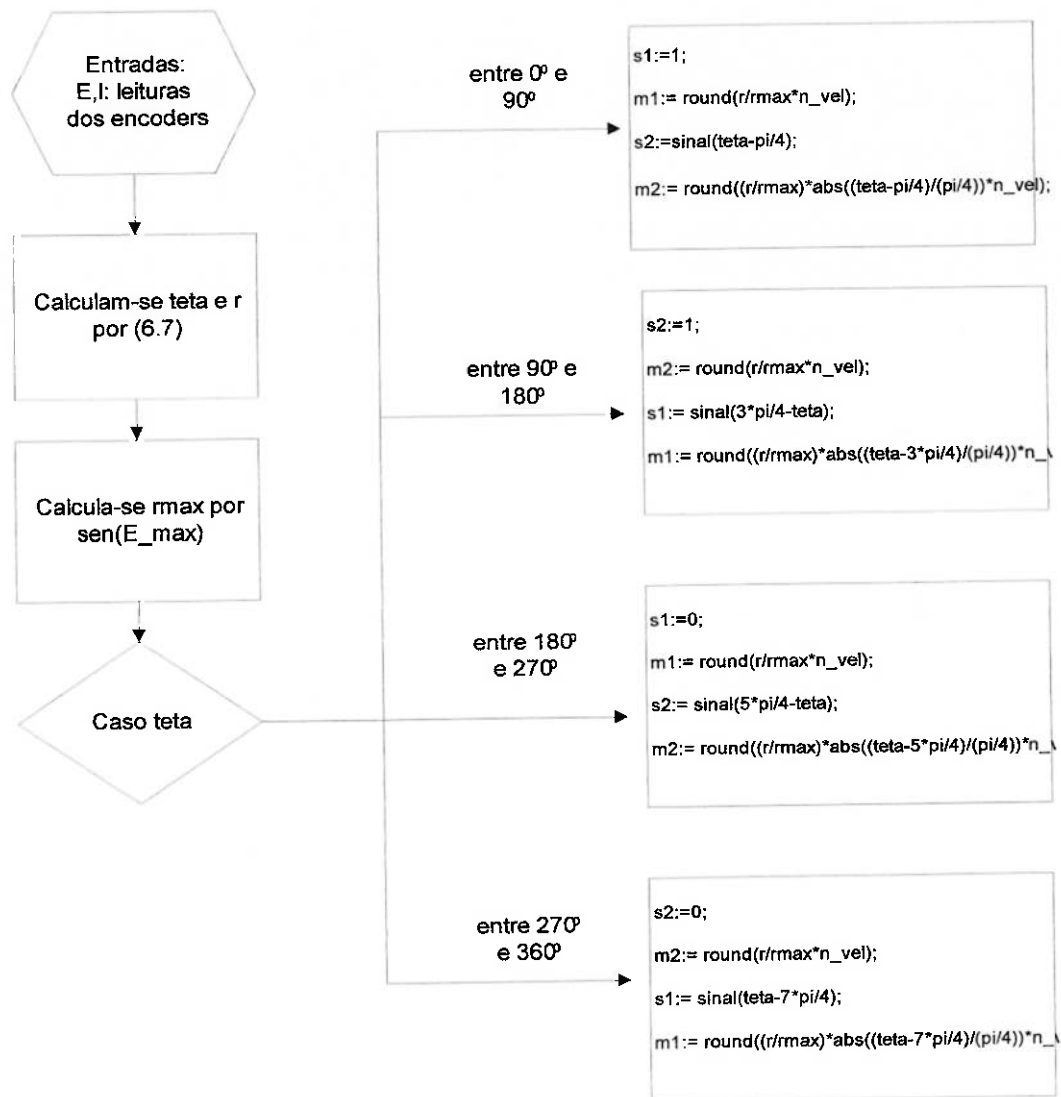


Figura 6.21 Fluxograma da função trans_ang

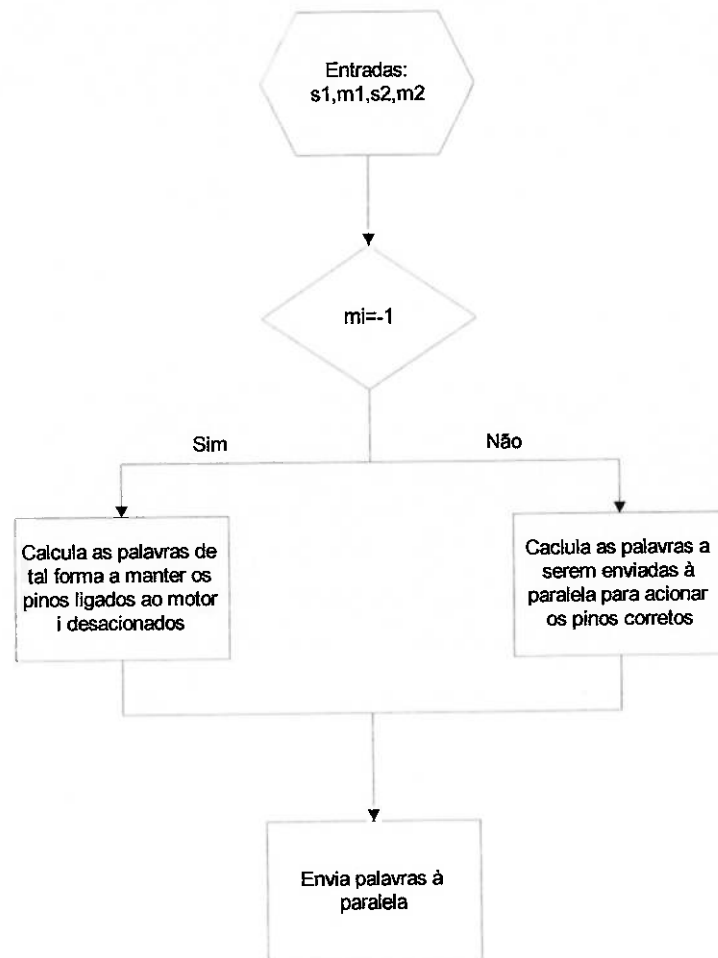


Figura 6.22 Fluxograma simplificado da função aciona

6.4.4. Acessórios do programa de acionamento: *filtros, modo de operação, segurança de operação e de chaveamento*

O programa desenvolvido contém alguns recursos acessórios (não presentes nas funções descritas anteriormente) que colaboram para o melhor funcionamento do sistema.

6.4.4.1. Filtro de primeira ordem aplicado sobre as leituras dos encoders

Para garantir movimentos mais suaves, as velocidades calculadas são filtradas antes de serem enviadas à função de acionamento dos motores. Foi utilizado um filtro de primeira ordem, dado por:

$$\frac{Y}{X} = \frac{1}{1 + \tau s} \quad (6.8)$$

Sendo Y o valor filtrado e X o valor de velocidade calculado para os ângulos atuais dos encoders. Considerando-se um período de amostragem T, o equivalente discreto do filtro é (utilizando o método de Tustin):

$$\frac{Y(z)}{X(z)} = \frac{T(1 - z^{-1})}{(T + 2\tau) + (T - 2\tau)z^{-1}} \quad (6.9)$$

Assim, escrevendo sob a forma de equações de diferenças:

$$y[k] = a(x[k] + x[k - 1]) - by[k] \quad (6.10)$$

na qual:

$$a = \frac{T}{T + 2\tau}$$

$$b = \frac{T - 2\tau}{T + 2\tau}$$

Assim, o seguinte trecho de código realiza a filtragem acima explicada.

```

m1_calc_ant:=m1;           {velocidades anteriores}
m2_calc_ant:=m2;
a := T_amostr/(T_amostr+2*tau); {constantes do filtro}
b := (T_amostr-2*tau)/(T_amostr+2*tau);
trans_ang(ext,int,s1,m1,s2,m2); {calcula velocidades atuais}

```

```
if s1=0 then                                {dá sinal às velocidades4}
  m1:=-m1;
if s2=0 then
  m2:=-m2;
m1_saida_novo:=(a*m1+a*m1_calc_ant-b*m1_saida_atual);
m2_saida_novo:=(a*m2+a*m2_calc_ant-b*m2_saida_atual);
                                     {filtro}
```

Um parâmetro ajustável no programa é a constante de tempo τ . Verificou-se, por meio de testes com o sistema, que o valor de 0,5s fornece uma boa dirigibilidade, garantindo pequeno atraso entre o movimento da cabeça e a resposta dos motores, bem como filtrando oscilações indesejadas da cabeça do operador.

6.4.4.2. Modo de operação

Como já explicado, o painel de controle possui uma chave que seleciona entre o modo de operação manual e pelo capacete. Quando a chave estiver selecionada para modo de operação manual, espera-se que o programa não acione a porta paralela, para evitar que os relés fiquem chaveando desnecessariamente. Assim, o código abaixo realiza esta função:

```
if (ligado = true) then
  begin
    if (chave = 8) then
      aciona(s1,pal1,s2,pal2); {aciona os motores}
    end;
```

⁴ Para se aplicar o filtro, os valores de velocidades são convertidos para negativos caso o sentido correspondente seja 0 (andar para trás). Antes de enviar aos motores, estes valores são novamente transformados em positivos.

Assim, para se acionar a porta paralela, a variável `chave`⁵ deve valer 8 e a variável `ligado` deve estar acionada. A variável `ligado` é acionada via teclado (tecla `I`), o que garante que todo o sistema só funcionará após esta tecla ter sido pressionada.

6.4.4.3. Segurança de chaveamento

Como foi visto, caso haja um acionamento de dois relés simultaneamente na placa de relés, pode ocorrer um curto-circuito nos terminais das baterias, o que, mesmo em um curto intervalo de tempo, poderia danificar a placa.

Assim, o programa desenvolvido implementa um “tempo morto” entre as mudanças de velocidades, tempo este no qual todos os relés são desacionados. Para tanto, toda vez em que a nova palavra a ser enviada à porta paralela for diferente da atual (ou seja, ocorreu uma mudança de velocidade), desacionam-se todos os pinos durante um intervalo de amostragem (o que é feito jogando-se a palavra `-1` à função `aciona`).

Sendo `pal1` e `pal2` as palavras a serem enviadas para a função `aciona` e `pal1_ant` e `pal2_ant` as palavras enviadas no ciclo anterior, o código abaixo implementa a segurança de chaveamento:

```
if (pal1 <> pal1_ant) AND (pal1_ant <> -1) then
    pal1 := -1;
if (pal2 <> pal2_ant) AND (pal2_ant <> -1) then
    pal2 := -1;
```

⁵ Contém a leitura da porta paralela (valendo 8 caso o pino ligado à chave seletora esteja acionado).

O tempo de um ciclo (15ms) é suficiente para garantir a segurança na medida em que o catálogo do relé utilizado especifica um tempo máximo de 12ms para o chaveamento.

6.4.4.4. Segurança de operação

Foi implementado um sistema de segurança que realiza as seguintes ações:

- 1) Quando a orientação da cabeça do operador passa de um valor pré-estipulado (Ang_max) em qualquer direção, os dois motores são desacionados (envia-se a palavra -1 para a porta paralela);
- 2) Quando a orientação da cabeça passar de um ângulo ainda maior (Ang_maxmax), os dois motores são freados (envia-se a palavra 0 para os motores);
- 3) Caso uma das ações acima tenha ocorrido, o operador deve voltar para a posição inicial para que o sistema volte a funcionar. O programa emite um sinal sonoro para informar que o operador já voltou com a cabeça para a posição inicial e que os motores podem ser acionados de novo.

A lógica para implementar as ações acima é resumida abaixo

```
if (passou=false) then
  begin
    Calcula s1,pal1,s2,pal2 a partir de m1_saida_novo e
    m2_saida_novo
  end;
  m1_saida_atual:=m1_saida_novo;
  m2_saida_atual:=m2_saida_novo;

  if (abs(ext)>Emaxmax) OR (abs(int)>Imaxmax) then
    begin
      pal1:=0;
      pal2:=0;
      passou:=true;
    end
  end
```

{Ação 2}

```
else if (abs(ext)>Emax) OR (abs(int)>Imax) then
begin
  pal1:=-1;
  pal2:=-1;           {Ação 1}
  passou:=true;
end;

if(round(m1_saida_atual)=0) AND (round(m2_saida_atual)=0)
then
begin
  if(passou = true) then
  begin
    som;
    passou:=false;   {Ação 3}
  end;
end;
```

A variável `passou` vale `true` caso o usuário tenha passado de `Ang_max` e ainda não tenha retornado à posição inicial.

Ao final do código acima, têm-se os valores de `pal1`, `pal2`, `s1` e `s2` a serem enviados para a função `aciona`, considerando a segurança de operação explicada anteriormente.

Na versão final do programa, adotara-se os limites de 45° e 50° como os valores nos quais o motor é desligado e freado respectivamente.

6.5. Resultados

Assim como no capítulo de projeto executivo do sensor, os circuitos, programas, dimensões e montagens mecânicas apresentados neste capítulo correspondem apenas às versões finais. Apesar de não ter havido tantas iterações, melhorias e otimizações no projeto da cadeira como houve com o projeto do sensor, as etapas intermediárias de desenvolvimento e seus valores não foram apresentados.

Pode-se creditar o pequeno número de melhorias e a simplicidade de certos subsistemas – como a transmissão e o circuito de acionamento de motores por relés – ao

tempo reduzido para a construção da cadeira de rodas e ao fato de que o objetivo principal do projeto era o projeto e a construção de um sensor inercial que respeitasse os requisitos de projeto. A cadeira de rodas não era o item de interesse principal do projeto, mas uma possível aplicação do sensor e uma forma de demonstrar seu funcionamento.

A cadeira de rodas motorizada pode ser dividida em alguns subsistemas, como **transmissão** (que inclui polias, correias, rodas e motores com seus respectivos elementos de fixação), **base** (composta pela própria base da cadeira – de madeira –, a estrutura da cadeira – feita com tubos de aço – e as “molduras” de madeira montadas sobre a base, que mantêm os outros componentes no lugar), **painel de controle, placa de acionamento dos motores e outros componentes** (como as baterias e o notebook que recebe sinais do sensor preso em um capacete e gera os sinais de controle para os motores).

As dimensões finais da cadeira, com todos os componentes e sem usuário são:

Largura (cm): 53

Altura (cm): 93

Comprimento (cm): 75

As cadeiras de rodas motorizadas existentes no mercado – controladas apenas por joysticks – têm largura média de 64cm, altura média de 91cm, comprimento médio de 105cm e massa média de 56kg. Com tais dados, verifica-se que o protótipo de cadeira de rodas motorizada que foi construído para este projeto se assemelha em algumas dimensões às cadeiras de rodas existentes no mercado. Apenas ficaram menores o

comprimento (pois não há nenhum apoio especial para os pés no protótipo, ao contrário dos modelos existentes no mercado) e o peso (pois as cadeiras de rodas motorizadas comercializadas atualmente utilizam baterias de maior carga e, portanto, maior peso).

Foram realizados diversos testes com a cadeira de rodas controlada por meio do capacete com o sensor inercial, tanto pelos autores deste trabalho como por outras pessoas convidadas, e notou-se que é possível controlar a velocidade e a trajetória da cadeira apenas com os movimentos da cabeça. Entretanto, isso exige treino e não é muito intuitivo. Ao longo do projeto foram feitas melhorias no programa de acionamento dos motores para tornar o controle da cadeira mais fácil, e atualmente acredita-se que, após um dia inteiro de treinos, uma pessoa com movimentação normal do pescoço consiga dominar o controle da cadeira de rodas motorizada.

6.5.1. Fotos

No anexo A existem algumas fotos do protótipo da cadeira de rodas motorizada. Pode-se ver na Figura A1.5 o sensor inercial preso no capacete com os dois apoios de madeira e a fita de aço galvanizado com revestimento de espuma, descritos em 6.2.1.

A Figura A1.6 mostra o sistema de transmissão e acionamento das rodas traseiras da cadeira de rodas. É possível notar o apoio de madeira entre o motor e a base de compensado, a fita de aço tracionada por parafusos – responsável pela fixação da carcaça do motor – e uma parte da cantoneira de alumínio parafusada em abas da parte anterior do motor. Além da fixação do motor, a foto mostra também a polia dentada com as guias laterais de alumínio, a correia sincronizadora, uma das rodas traseiras e a montagem da correia, ao redor da polia e da roda.

Na Figura A1.7 pode-se ver o protótipo da cadeira de rodas motorizada com o capacete e o sensor inercial. É possível identificar a base de madeira, a estrutura da cadeira de aço, o assento de plástico, as rodas, o capacete, o painel de controle e os demais componentes da cadeira, abaixo do assento: baterias, placa de acionamento dos motores e notebook (fechado).

O circuito e acionamento dos motores, composto basicamente por transistores e relés, pode ser visto em detalhes na Figura A1.8. Nessa foto é possível ver os terminais no centro da placa que são ligados às baterias, os fusíveis entre esses terminais, os relés (Metaltex), a conexão de cabo de porta paralela (ao alto na foto), os fios que vão para os motores (na parte de baixo da foto) e alguns resistores e transistores dos circuitos de acionamento dos relés. Vale a pena notar que entre a placa e a base de madeira há uma camada de espuma – usada para proteger as trilhas de estanho que estão na parte inferior da placa – e que a placa está presa na base por meio de parafusos.

A Figura A1.9 mostra outros detalhes dos componentes localizados abaixo do assento, como as baterias (do lado direito), o relé de modo de controle da cadeira (entre as baterias e a placa) e o notebook (à esquerda da placa). Pode-se notar, também, a existência de “molduras” de madeira ao redor das baterias e do notebook, para garantir a fixação dos mesmos quando a cadeira estiver em movimento.

O painel de controle, já descrito em detalhes neste capítulo, pode ser visto na Figura A1.10. É possível identificar os dois “manches”, ou joysticks, de alumínio e seus respectivos rasgos no painel, as chaves de seleção de sentido para cada um dos manches, o botão de reset (na foto, abaixo do joystick esquerdo) e a chave de modo de controle (sensor inercial ou joysticks). Também podem ser vistos os parafusos que fixam o painel de controle – feito de madeira – na estrutura de aço do assento.

7. Conclusões

O projeto desenvolvido alcançou os objetivos propostos.

Inicialmente, foi feito o projeto do sensor inercial, que tinha como principais requisitos a simplicidade construtiva e baixo custo. Após a análise teórica de 5 soluções apresentadas, partiu-se para o projeto executivo da solução que se mostrou mais viável, baseando-se na sua exequibilidade física e nos resultados da simulação matemática de seu comportamento.

Em seguida ao projeto executivo, no qual foram gerados os desenhos de fabricação de cada peça e especificaram-se os componentes padronizados a serem utilizados, deu-se início à construção do protótipo. Nesta fase, que durou aproximadamente 2 meses, construiu-se inicialmente um sensor em escala maior, sem os encoders, apenas para testar o comportamento do sensor piezoelétrico utilizado. Em seguida construiu-se o protótipo final, que alcançou os requisitos propostos no início, destacando-se o seu baixo custo, acurácia da ordem de 5° e dimensões reduzidas. O único requisito que foi satisfeito de maneira parcial foi a simplicidade construtiva, na medida em que devido ao tamanho reduzido de alguns componentes, houve certa dificuldade na montagem de algumas partes do protótipo.

A última fase do projeto foi o desenvolvimento de uma aplicação para o sensor construído, que realçasse suas principais características. Assim, o controle de uma cadeira de rodas motorizada pelo movimento da cabeça do operador exige um caráter inercial do sensor (para evitar a necessidade de vínculos externos), além de requerer dimensões reduzidas (será apoiado na cabeça do usuário) e baixo custo (para ser competitivo no mercado). Esta fase foi composta basicamente da construção de uma

cadeira de rodas simplificada e da implementação do *software* e *hardware* de controle da mesma. Inúmeros testes de dirigibilidade foram realizados, o que resultou em melhorias no programa de controle e a finalização do projeto.

Existem alguns aspectos do trabalho que podem ser aprimorados, dentre os quais os principais são:

- 1) Está-se utilizando um microcomputador portátil com processador 486 66Mhz para obter as leituras dos encoders, processar os sinais e enviar os sinais à placa de relés para acionar os motores. Fica evidente que o hardware utilizado está superdimensionado para a aplicação, sendo mais aconselhável o desenvolvimento de um circuito dedicado para a presente aplicação. Sugere-se então a utilização de um microcontrolador comercial que, devidamente programado, poderá exercer a mesma função do computador utilizado, requerendo menor espaço e implicando custos menores.
- 2) O acionamento dos motores está sendo feito por estágios, através de uma placa de relés ligada a 4 baterias de 6V cada. Poder-se-ia utilizar um acionamento PWM (modulação por largura de pulso), o que permitiria a utilização de apenas uma bateria e teria um número maior de velocidades (teoricamente infinito), evitando os pequenos “trancos” nas mudanças de velocidades.
- 3) A transmissão entre os motores e as rodas é feita através de um correia sincronizadora que passa pela parte externa da roda. Propõe-se uma reavaliação do projeto da transmissão de tal forma a garantir uma maior segurança de operação (evitar que a correia se solte) e menor desgaste da correia.

- 4) Deve-se realizar uma revisão no projeto do sensor visando a utilização de rolamentos de menor diâmetro para sustentar o eixo, de forma a diminuir o atrito do mesmo.

- 5) Deve-se realizar uma pesquisa em fabricantes de sensores piezoelétricos vibratórios buscando sensores de dimensões menores que o “Murata” utilizado, na medida em que o mesmo foi o fator limitante para redução de tamanho do sensor protótipo.

Anexo 1. - Fotos

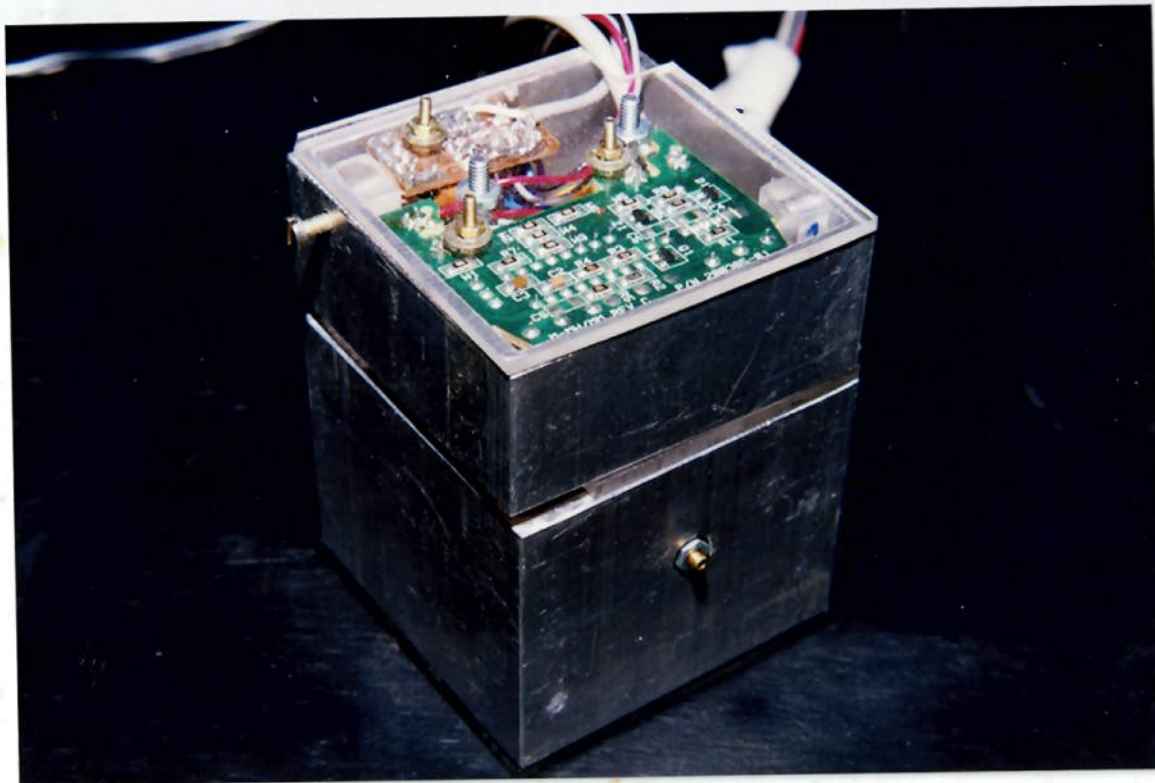


Figura A1.1 Protótipo do sensor inercial e seus módulos mecânico e eletrônico

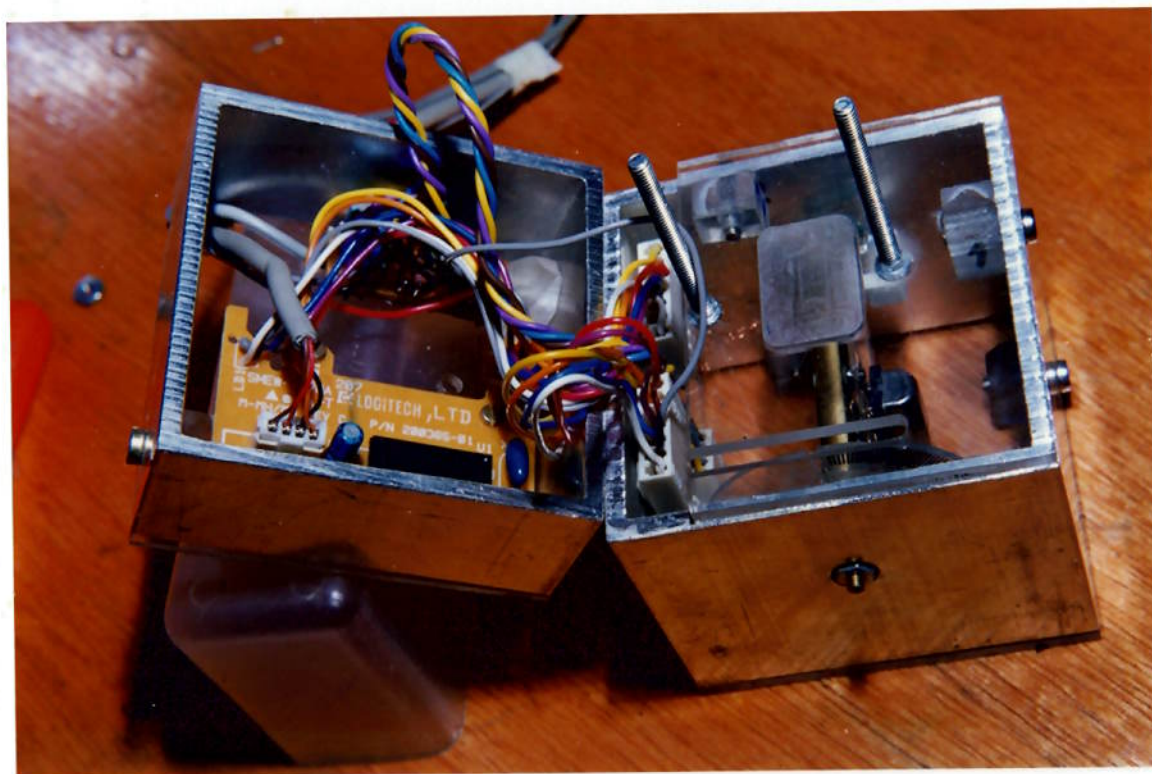


Figura A1.2 Módulos eletrônico e mecânico separados

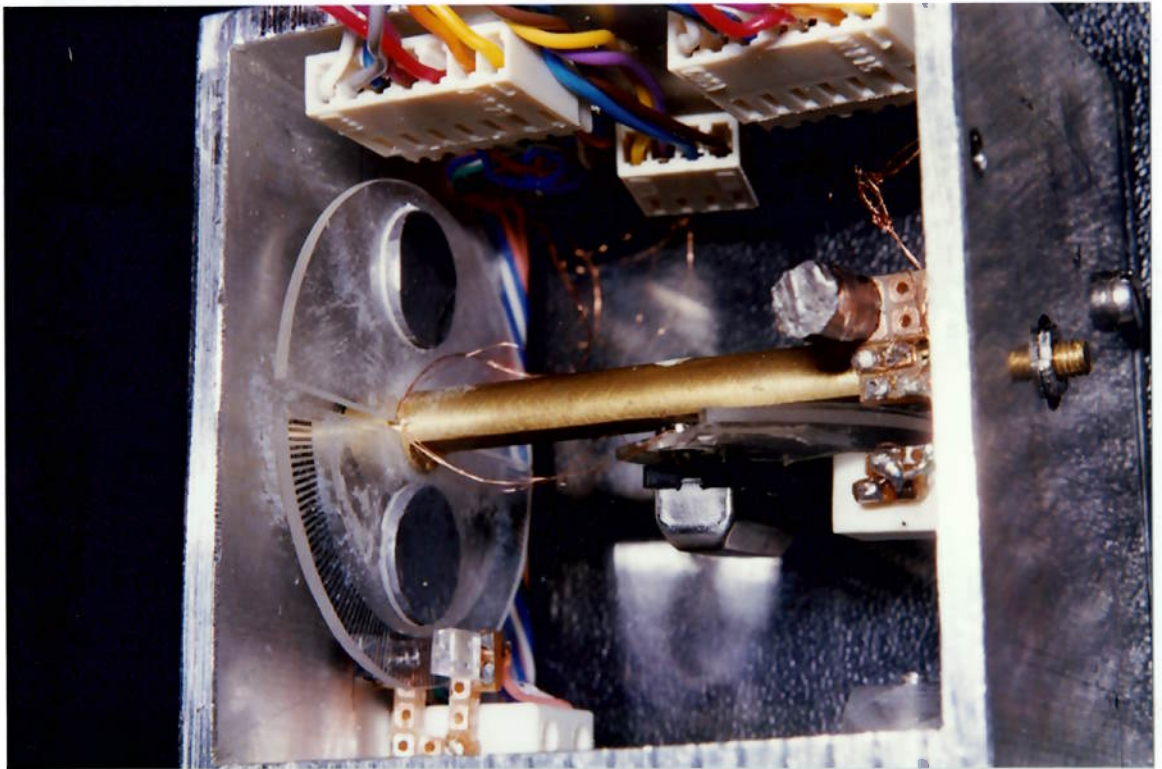


Figura A1.3 Detalhes do disco externo montado sobre o eixo de latão

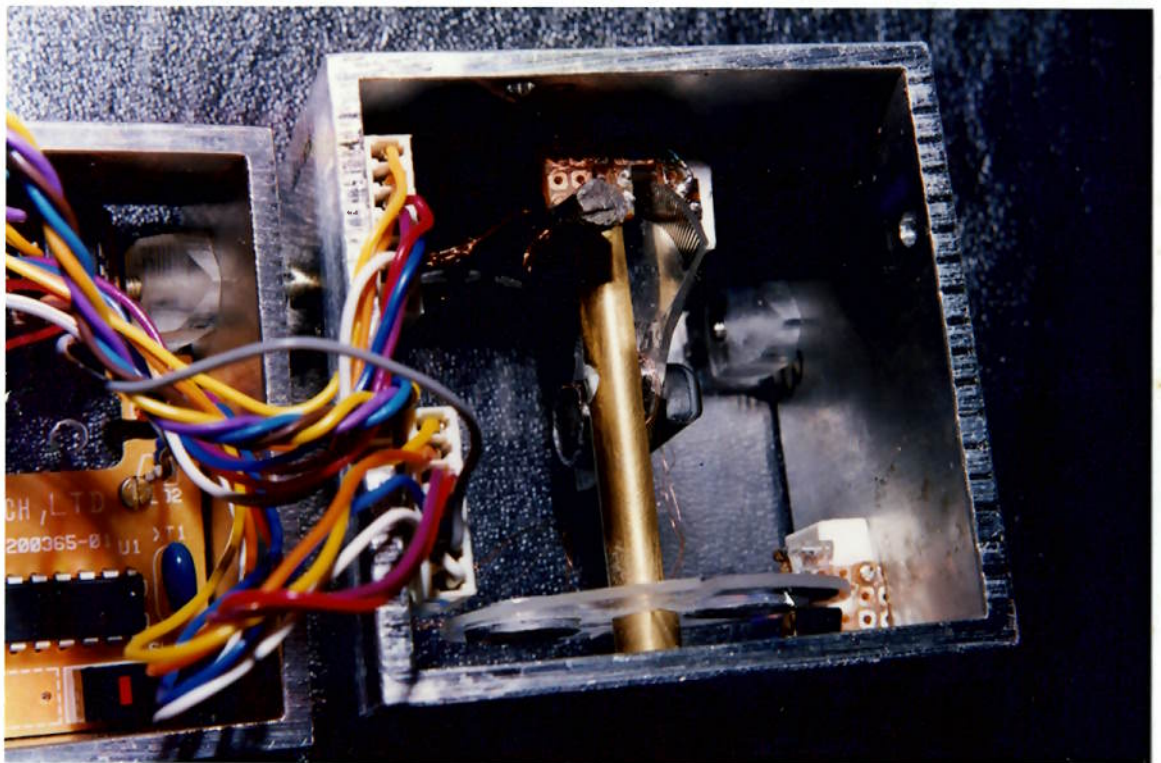


Figura A1.4 Detalhes do disco interno

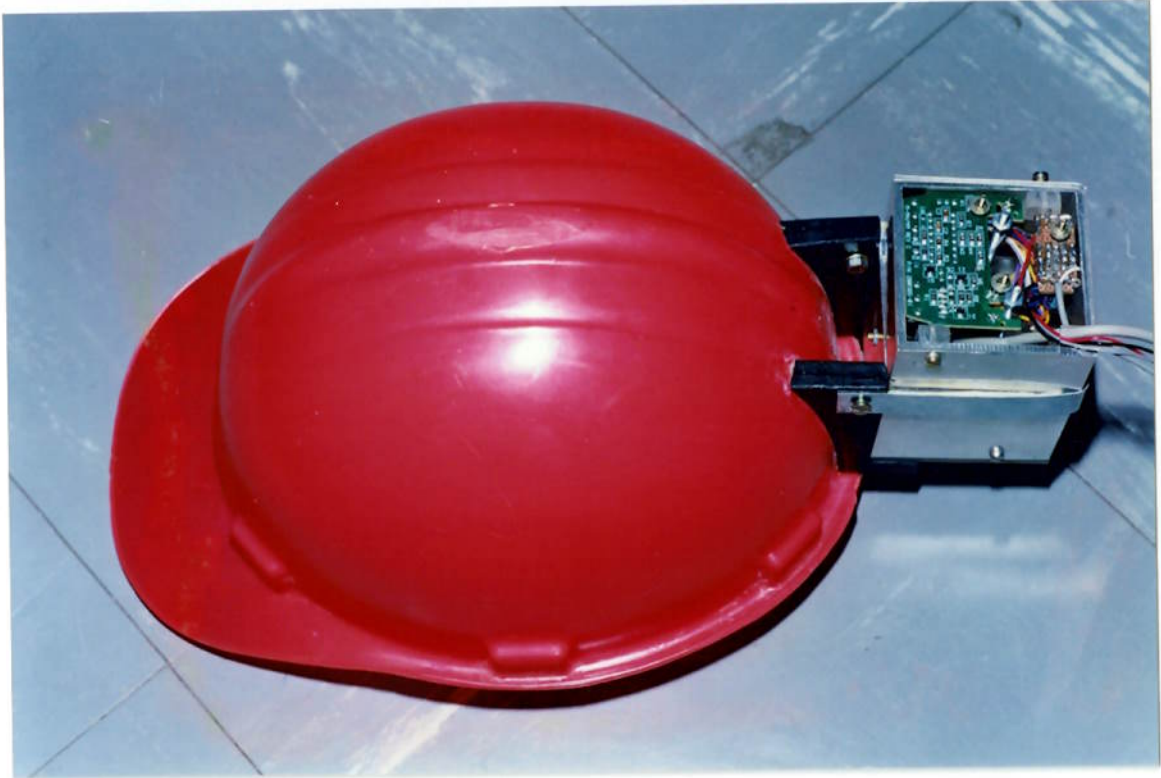


Figura A1.5 Sensor inercial preso em capacete, apoios de madeira e fita de aço

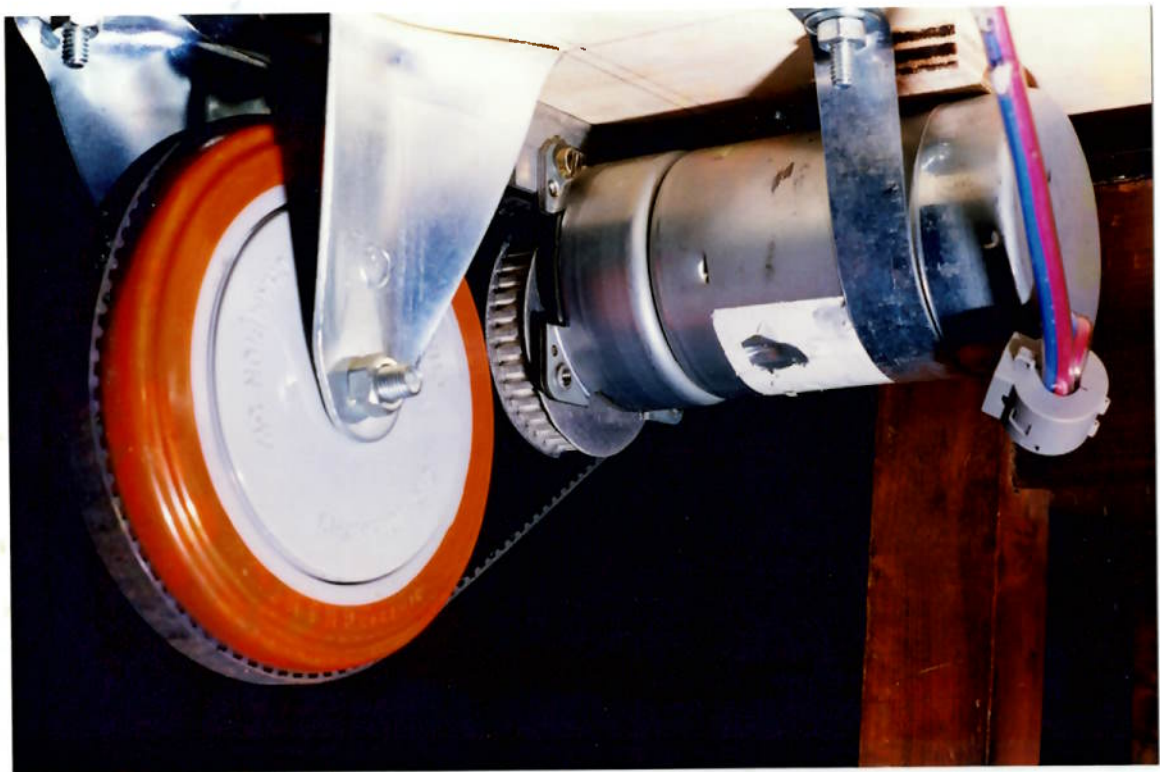


Figura A1.6 Fixação do motor elétrico, roda traseira e sistema de transmissão

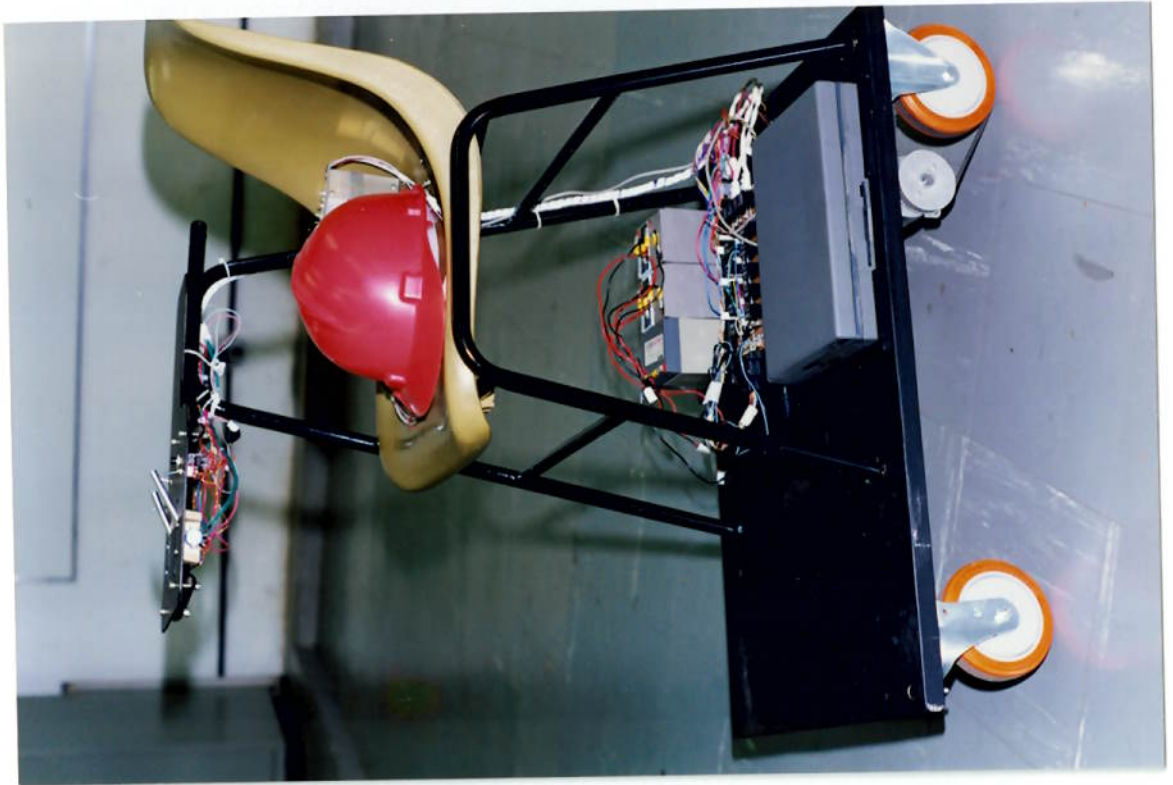


Figura A1.7 Protótipo da cadeira de rodas motorizada com capacete e sensor inercial

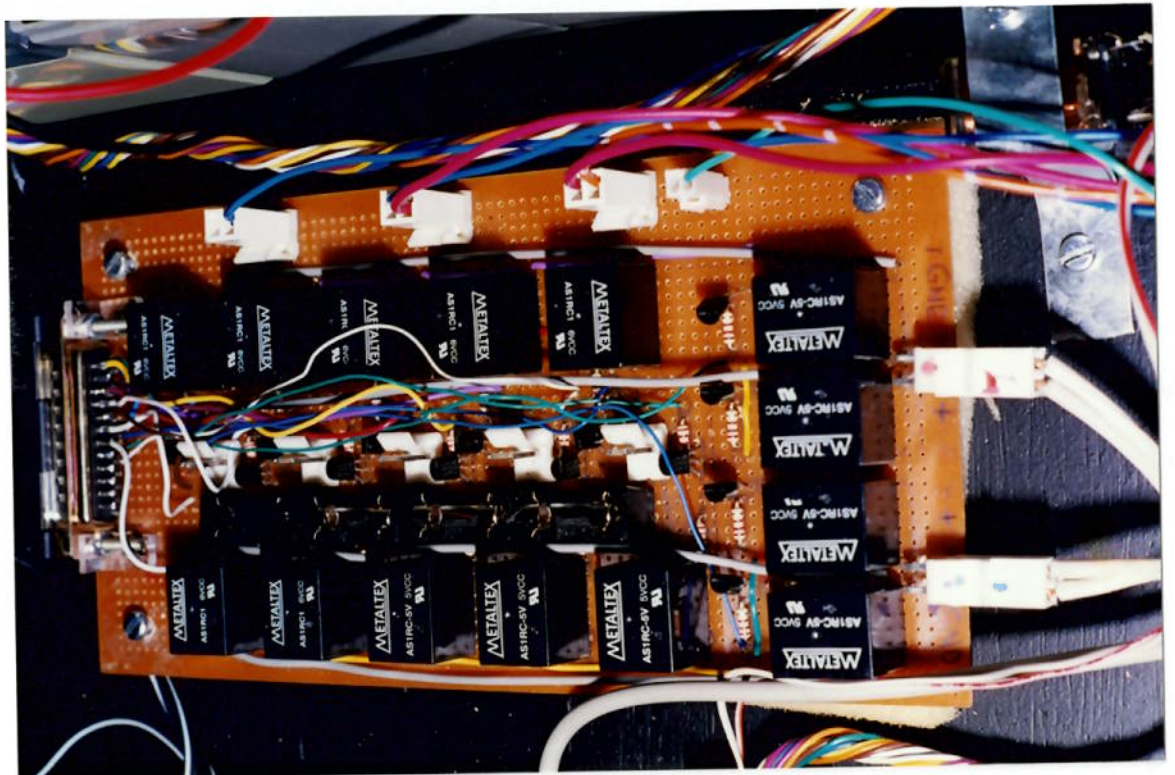


Figura A1.8 Placa de acionamento dos motores elétricos da cadeira de rodas

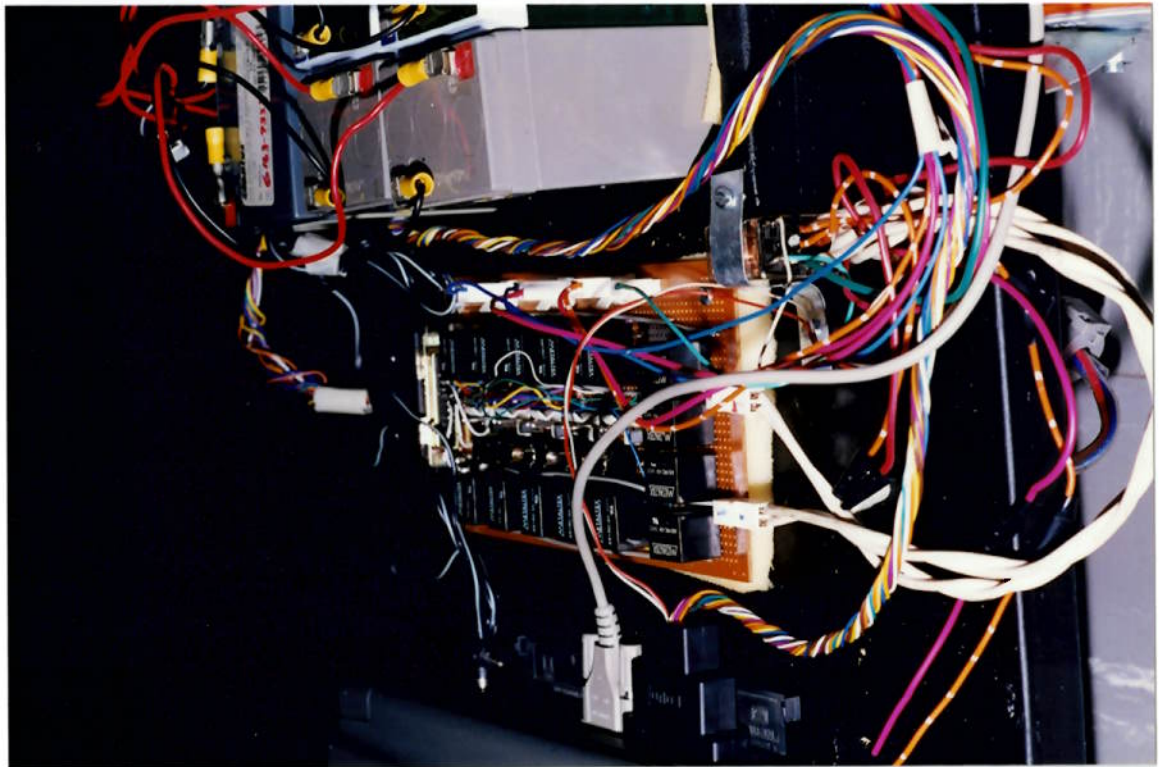


Figura A1.9 Detalhes dos componentes sob o assento da cadeira de rodas



Figura A1.10 Painel de controle da cadeira de rodas motorizada

Anexo 2. Relação entre ângulos medidos pelo sensor 2 e ângulos de atitude do corpo

Como já foi feito para o sensor 5, é preciso verificar qual a relação entre os ângulos registrados pelos sensores (inclinômetros e sensor piezoelétrico) e os ângulos de atitude do corpo em que o sensor inercial está preso. Para isso, estes ângulos de atitude devem ser definidos, como mostra a figura , a seguir.

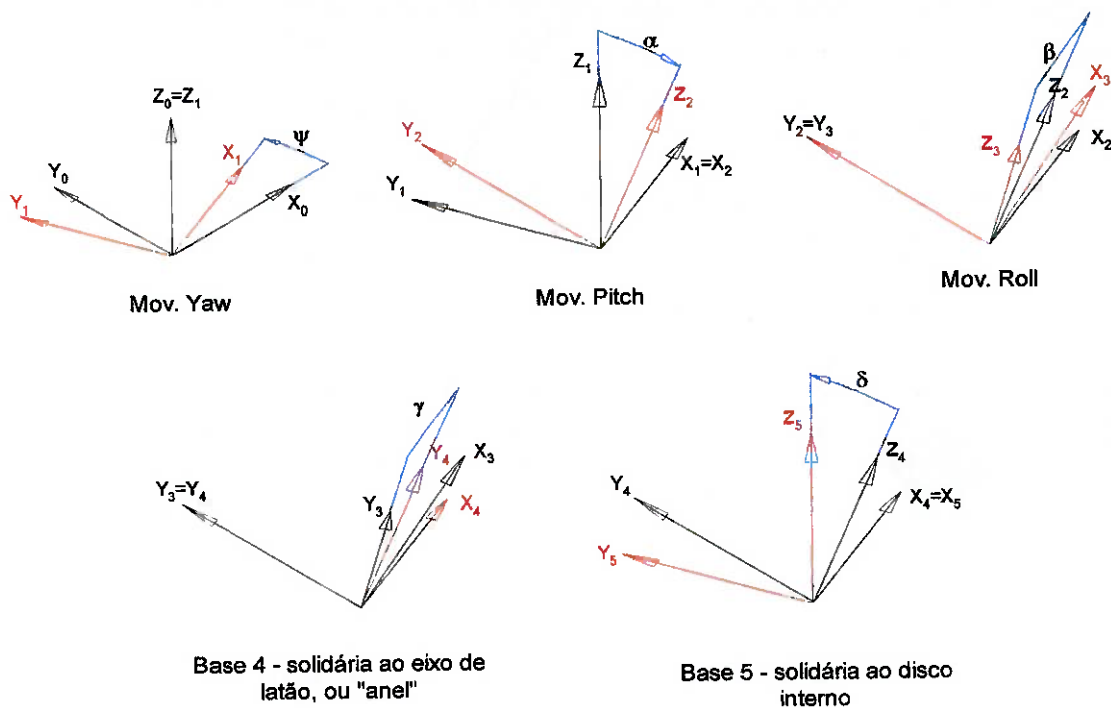


Figura A2.1 Rotações do corpo

Nota-se que o primeiro ângulo, ψ , equivale ao ângulo de *yaw*, ou seja, rotação em torno do eixo z_0 , que leva à base 1. A base 1 pode sofrer rotações de α em torno do eixo x_1 , o que caracteriza o movimento de *pitch* e dá origem à base 2. Esta, por sua vez, pode sofrer rotações de β em torno do eixo y_2 (*roll*), dando origem à base 3. Estes três ângulos (ψ , α , e β) representam os ângulos de atitude do corpo em que o sensor inercial

está preso, e indicam nesta ordem a sequência de rotações que o corpo realizou para chegar à orientação atual.

A partir da base 3, surge uma nova base, de índice 4, solidária ao “anel” do sensor 2. Como este “anel” possui 1 grau de liberdade em relação ao corpo, a base 4 resulta da base 3 rotacionada de γ em torno do eixo y_3 , como pode-se ver na Figura A2.1.

Entre o “anel” e o disco do sensor 2 há mais um grau de liberdade, caracterizado pelo ângulo δ em torno do eixo x_4 . Com esta rotação, obtém-se a base 5, solidária ao disco do sensor e, portanto, solidária ao sensor piezoelétrico de velocidade angular.

As relações entre as diversas bases apresentadas podem ser representadas pelas seguintes matrizes:

$$M_{0 \rightarrow 1} = \begin{bmatrix} \cos \psi & -\sin \psi & 0 \\ \sin \psi & \cos \psi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (\text{A2.1})$$

$$M_{1 \rightarrow 2} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \alpha & -\sin \alpha \\ 0 & \sin \alpha & \cos \alpha \end{bmatrix} \quad (\text{A2.2})$$

$$M_{2 \rightarrow 3} = \begin{bmatrix} \cos \beta & 0 & \sin \beta \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin \beta & 0 & \cos \beta \end{bmatrix} \quad (\text{A2.3})$$

$$M_{3 \rightarrow 4} = \begin{bmatrix} \cos \gamma & 0 & \sin \gamma \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin \gamma & 0 & \cos \gamma \end{bmatrix} \quad (\text{A2.4})$$

$$M_{4 \rightarrow 5} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \delta & -\sin \delta \\ 0 & \sin \delta & \cos \delta \end{bmatrix} \quad (\text{A2.5})$$

Ao realizar a multiplicação destas matrizes, obtém-se a seguinte matriz:

$$M_{0 \rightarrow 5} = \begin{bmatrix} a & b & c \\ d & e & f \\ g & h & i \end{bmatrix} \quad (\text{A2.6})$$

As colunas desta matriz representam os versores da base 5 escritos na base 0. As linhas representam os versores da base 0 escritos na base 5. Sabe-se que, no sensor 2, o sensor piezoelétrico, preso ao disco, deve permanecer sempre orientado segundo a direção da gravidade, indicada pelo eixo z_0 . Desse modo, os versores dos eixos z_0 e z_5 devem ser iguais em módulo, direção e sentido. Portanto, segundo a matriz $M_{0 \rightarrow 5}$:

$$\begin{bmatrix} c \\ f \\ i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} \quad \text{e} \quad [g \ h \ i] = [0 \ 0 \ 1] \quad (\text{A2.7})$$

Com estas duas relações, obtém-se cinco equações. Para efeitos de simplificação, serão mostradas apenas duas destas cinco equações, que são suficientes para esta análise:

$$g = 0 \therefore -\cos(\alpha) \cdot \cos(\gamma) \cdot \sin(\beta) - \cos(\alpha) \cdot \cos(\beta) \cdot \sin(\gamma) = 0 \quad (\text{A2.8})$$

de onde conclui-se que $\gamma = -\beta$

$$h = 0 \therefore \cos(\delta) \cdot \sin(\alpha) + \sin(\delta) \cdot \cos(\alpha) [\cos(\beta) \cdot \cos(\gamma) - \sin(\beta) \cdot \sin(\gamma)] = 0$$

(A2.9)

de onde conclui-se que $\delta = -\alpha$

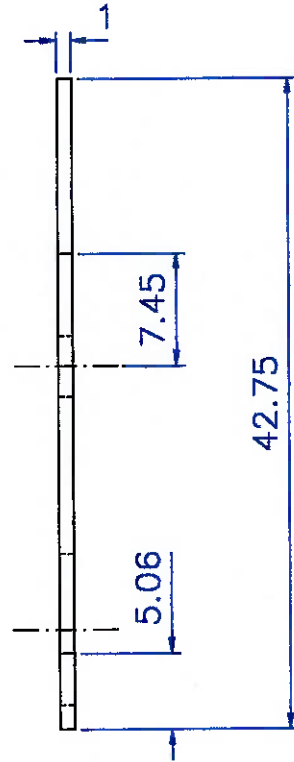
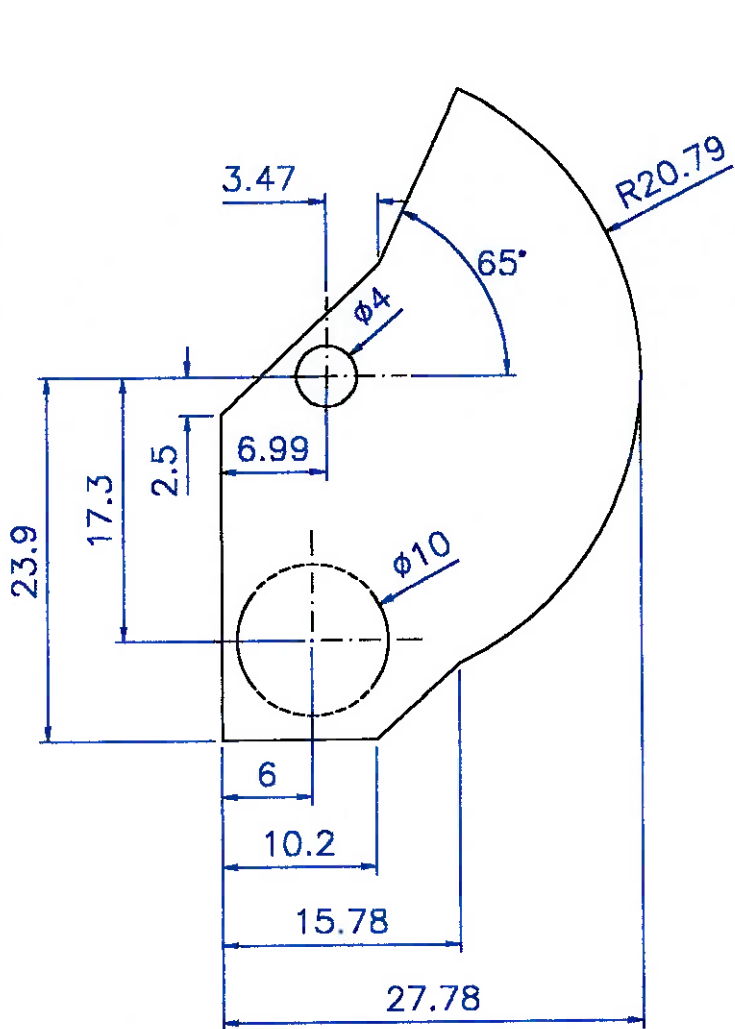
Portanto, os ângulos registrados pelos inclinômetros do sensor inercial (γ e δ) correspondem aos ângulos de atitude β (*roll*) e α (*pitch*), respectivamente. O terceiro ângulo de atitude, ψ (*yaw*), é dado pela leitura do sensor piezoelétrico, φ , já que este último está sempre orientado segundo a direção da gravidade, que coincide com a direção do eixo z_0 , em torno do qual define-se o ângulo de *yaw* do corpo.

Portanto, nota-se que não há necessidade de processamento matemático das leituras dos sensores para se obter o conjunto de ângulos de atitude do corpo, ao contrário do que ocorre com o sensor 5.

Bibliografia

- [1] BEER, F.P.; JOHNSTON, E.R. **Mecânica Vetorial para Engenheiros**. 5.ed. São Paulo, Makron Books, 1991.
- [2] CARNAHAN, B.; LUTHER, H.A.; WILKES, J.O. **Applied Numerical Methods**. John Wiley & Sons, 1969.
- [3] CURTIS, F.G.; WHEATLEY, P.O. **Applied Numerical Analysis**. Addison-Wesley Publishing Company, 1989.
- [4] GETSCHKO, N. **Sistema de Guiagem Assistida para Procedimentos Odontológicos Intra-Orais –SGA**. São Paulo, 1997. 160p. Tese (doutorado) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo.
- [5] GIACAGLIA, G.E.O. **Mecânica Analítica**. Rio de Janeiro, Almeida Neves Editores Ltda., 1978.
- [6] KELLY, A. **Modern Inertial and Satellite Navigation Systems**. Pittsburgh, Carnegie Mellon University Press, 1994.
- [7] MATLAB® Reference Guide, The MathWorks, Inc.
- [8] SCHEDING, S. et al. **Experiments in Autonomous Underground Guidance**. University of Sydney, <http://mecharea.me.su.oz.au/papers/LHD-Experiments-ICRA-97/Experiments.htm>
- [9] VERPLAETSE, C. **Inertial proprioceptive devices: self-motion-sensing toys and tools**. IBM Systems Journal, v.35, n.3-4, 1996
- [10] Gates do Brasil Ind. e Com. Ltda. **Correias e polias sincronizadoras**. São Paulo, 1994.

Apêndice I – Desenhos de Fabricação



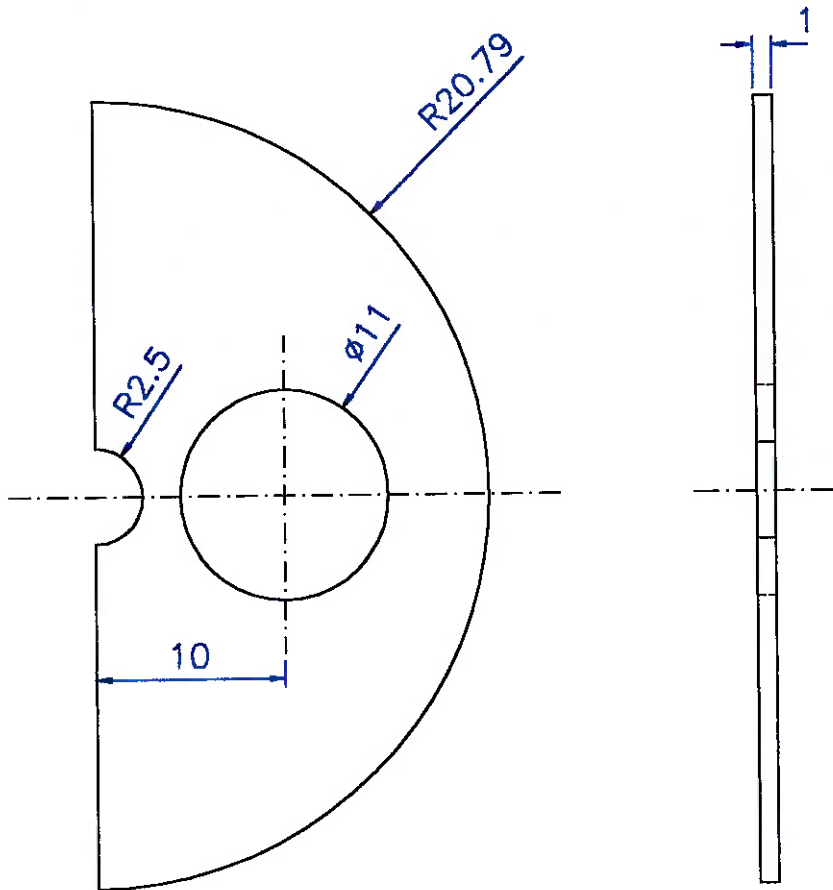
	Data	Nome
Des.	12.12.98	PC
Cop.		
Visto		

EPUSP

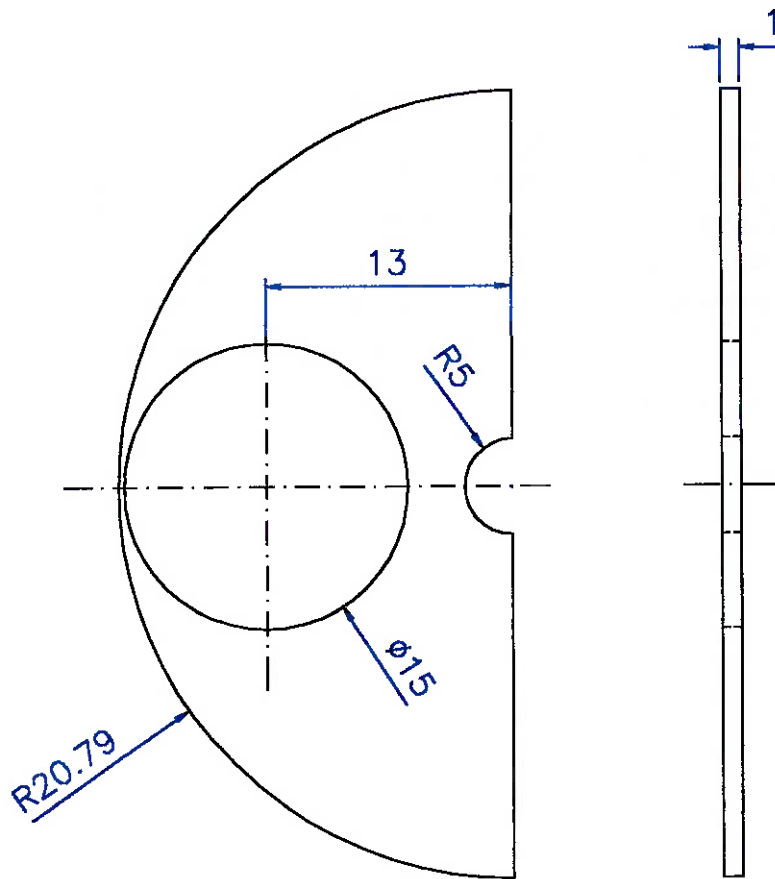
Escala
1:2

Título
Disco interno

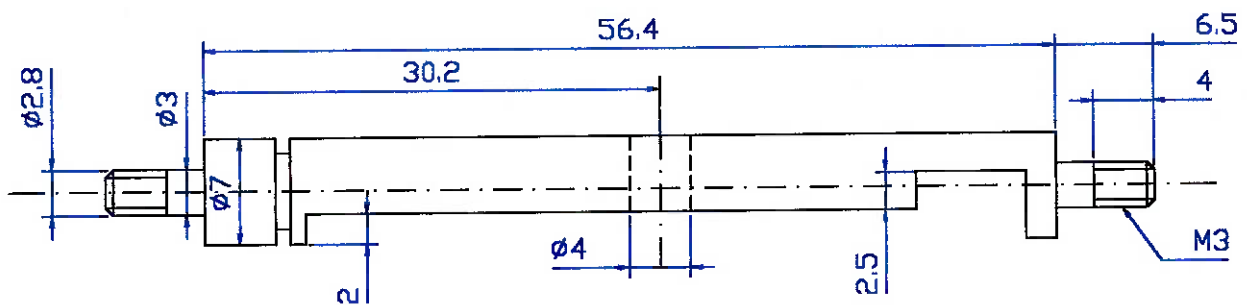
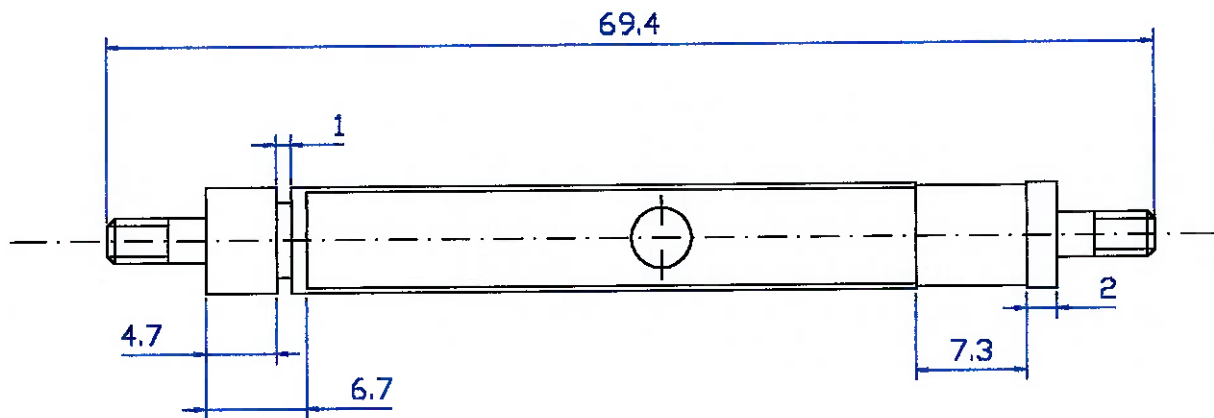
Numero
01.01
Material
Acrílico



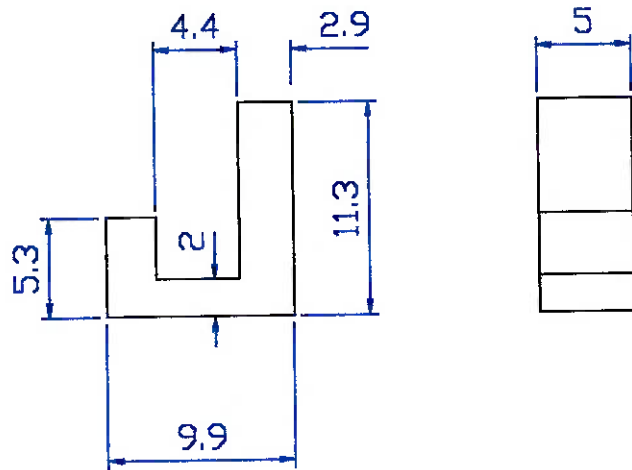
	Data	Nome	EPUSP
Des.	12.12.98	PC	
Cop.			
Visto			
Escala	Titulo		Numero
1:2,5	Semi-disco externo 1		02.01
			Material
			Acrilico



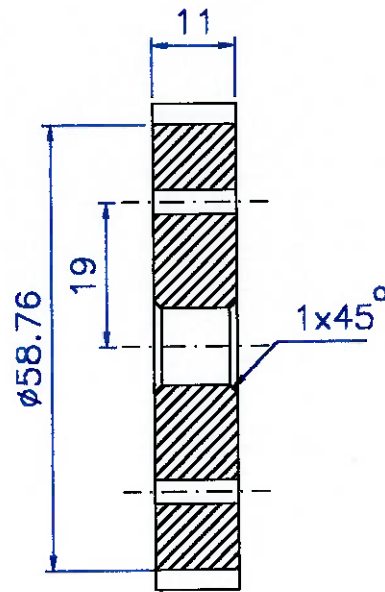
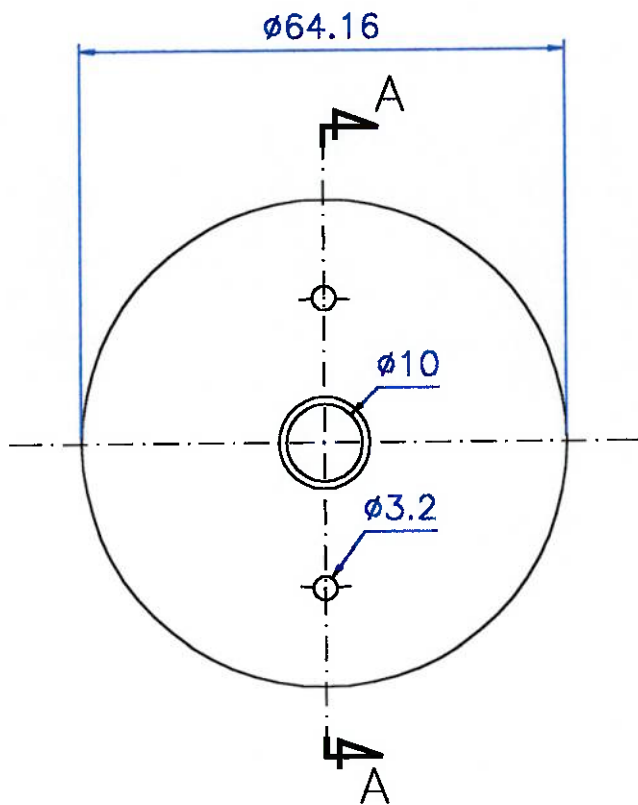
	Data	Nome	EPUSP
Des.	12.12.98	PC	
Cop.			
Visto			
Escala	Titulo		Numero
1:2,5	Semi-disco externo 2		03.01
			Material
			Acrilico



	Data	Nome	EPUSP	
Des.	12.12.98	PC		
Cop.				
Visto				
Escola	Titulo		Numero	04.01
1:2	Eixo		Material	Latao



Des.	Data	Nome	EPUSP
Cop.	12.12.98	PC	
Visto			
Escala	Titulo	Numero	
1:2,5	Apoio "J" de fotossensores	05.01	
		Material	
		PVC	



CORTE AA

OBS.: PASSO 1/5" (5.08mm) (XL)

Des.	Data	Nome	EPUSP
Cop.	12.12.88	PC	
Visto			
Escala	1:1	Titulo	Numero
		Polia dentada	06.01
			Material
			PVC

Apêndice II – Listagem dos Programas

Programa visual.pas

```

program ranso06d;
uses dos,crt,graph;

const pi=3.1416;
      Emax=45;
      Imax=45;

procedure limpa;
begin
  setfillstyle(1,black);
  bar(30,50,410,435);
end;

{ funcao que recebe os tres angulos do corpo e desenha
  a projecao ortogonal do corpo na tela }

Procedure desenha(psi,alfa,beta:real);

Var P
      : array[1..3,1..8] of real;
  b1,b2
      : array[1..3] of real;
  xb1,xb2
      : array[1..8] of real;
  x,y
      : array[1..8] of integer;
  fat_conv
      : real;
  dot1,dot2
      : real;
  i,j
      : integer;
  l,h
      : real;
  grDriver
      : Integer;
  grMode
      : Integer;
  ErrCode
      : Integer;

Begin
  l:=6.6;
  h:=8.5;

  P[1,1]:=0;
  P[2,1]:=0;
  P[3,1]:=0;
  P[1,2]:=-1*cos(alfa)*sin(psi);
  P[2,2]:=1*cos(alfa)*cos(psi);
  P[3,2]:=1*sin(alfa);
  P[1,3]:=- (1*cos(alfa)*sin(psi)) + 1*(cos(beta)*cos(psi) -
    sin(alfa)*sin(beta)*sin(psi));
  P[2,3]:=1*cos(alfa)*cos(psi) + 1*(cos(psi)*sin(alfa)*sin(beta) +
    cos(beta)*sin(psi));
  P[3,3]:=1*sin(alfa) - 1*cos(alfa)*sin(beta);
  P[1,4]:=1*(cos(beta)*cos(psi) - sin(alfa)*sin(beta)*sin(psi));
  P[2,4]:= 1*(cos(psi)*sin(alfa)*sin(beta) + cos(beta)*sin(psi));
  P[3,4]:=- (1*cos(alfa)*sin(beta));
  P[1,5]:=h*(cos(psi)*sin(beta) + cos(beta)*sin(alfa)*sin(psi));
  P[2,5]:=h*(-(cos(beta)*cos(psi)*sin(alfa) + sin(beta)*sin(psi)));
  P[3,5]:=h*cos(alfa)*cos(beta);
  P[1,6]:=- (1*cos(alfa)*sin(psi)) + h*(cos(psi)*sin(beta) +
    cos(beta)*sin(alfa)*sin(psi));
  P[2,6]:=1*cos(alfa)*cos(psi) + h*(-(cos(beta)*cos(psi)*sin(alfa) +
    sin(beta)*sin(psi)));
  P[3,6]:=h*cos(alfa)*cos(beta) + 1*sin(alfa);
  P[1,7]:=- (1*cos(alfa)*sin(psi)) + h*(cos(psi)*sin(beta) +
    cos(beta)*sin(alfa)*sin(psi));
  P[2,7]:=P[1,7]+1*(cos(beta)*cos(psi) - sin(alfa)*sin(beta)*sin(psi));
  P[3,7]:=1*cos(alfa)*cos(psi) + 1*(cos(psi)*sin(alfa)*sin(beta) +
    cos(beta)*sin(psi));
  P[2,7]:=P[2,7]+h*(-(cos(beta)*cos(psi)*sin(alfa) + sin(beta)*sin(psi)));
  P[3,7]:=h*cos(alfa)*cos(beta) + 1*sin(alfa) - 1*cos(alfa)*sin(beta);

```

```

P[1,8]:=h*(cos(psi)*sin(beta) +
cos(beta)*sin(alfa)*sin(psi))+1*(cos(beta)*cos(psi) -
sin(alfa)*sin(beta)*sin(psi));
P[2,8]:=1*(cos(psi)*sin(alfa)*sin(beta) + cos(beta)*sin(psi))+h*(-
(cos(beta)*cos(psi)*sin(alfa) + sin(beta)*sin(psi));
P[3,8]:=cos(alfa)*(h*cos(beta) - 1*sin(beta));

b1[1]:=0; {b1 = y}
b1[2]:=1;
b1[3]:=0;
b2[1]:=0; {b2 = z}
b2[2]:=0;
b2[3]:=1;

for i:=1 to 8 do
begin
dot1:=0;
dot2:=0;
for j:=1 to 3 do
begin
dot1:=dot1+P[j,i]*b1[j];
dot2:=dot2+P[j,i]*b2[j];
end;
xb1[i]:=dot1;
xb2[i]:=dot2;
end;
fat_conv:=getmaxy/32;
for i:=1 to 8 do
begin
x[i]:=round(xb1[i]*fat_conv+getmaxx/2-1*fat_conv/2)-50;
y[i]:=getmaxy-round(xb2[i]*fat_conv+getmaxy/2-h*fat_conv/2)-60;
end;

line(x[1],y[1],x[2],y[2]);
line(x[2],y[2],x[3],y[3]);
line(x[3],y[3],x[4],y[4]);
line(x[1],y[1],x[4],y[4]);
line(x[5],y[5],x[6],y[6]);
line(x[6],y[6],x[7],y[7]);
line(x[7],y[7],x[8],y[8]);
line(x[8],y[8],x[5],y[5]);
line(x[4],y[4],x[8],y[8]);
line(x[3],y[3],x[7],y[7]);
line(x[2],y[2],x[6],y[6]);
line(x[5],y[5],x[1],y[1]);
End;

procedure liga_mouse;
var regi :registers;
begin
regi.ax:=$0; {Habilita drive do mouse}
with regi do intr($33,regi);
end;

procedure Posicao (var x,y:word);
var regi:registers;
begin
regi.ax:=$0b; {Le contadores do mouse}
with regi do intr($33,regi);
x:=regi.cx; {contador de pulsos do eixo x}
y:=regi.dx; {contador de pulsos do eixo y}
end;

procedure mostra_mouse (auxx, auxy:real; mudoux, mudouy:boolean); {imprime pulsos
dos encoders}
var
tempx, tempy:real;
outx, outy:string;
begin
if(mudoux)then
begin
setfillstyle(1,black);
bar(530,200,600,220);
tempx:=auxx/2;
str(tempx:0:2,outx);

```

```

    outtextxy(530,200,+outx);
end;
if(mudouy) then
begin
    setfillstyle(1,black);
    bar(530,240,600,260);
    tempy:=auxy/2;
    str(tempy:0:2,outy);
    outtextxy(530,240,+outy);
end;
end;

procedure mostra_murata (fim:real);
var
    outz:string;
begin
    setfillstyle(1,black);
    bar(530,280,600,300);
    str(fim:0:2,outz);
    outtextxy(530,280,+outz);
end;

procedure tela; {imprime detalhes na tela}
begin
    {clrscr;}
    setfillstyle(9,cyan);
    bar(0,0,640,45);
    bar(0,436,640,480);
    setfillstyle(1,magenta);
    bar(0,0,5,480);
    bar(0,0,640,5);
    bar(640,0,635,480);
    bar(0,480,640,475);
    settextstyle(0,horizdir,2);
    outtextxy(70,20,'SENSOR INERCIAL - Versao 0.6d');
    settextstyle(defaultfont,horizdir,1);
    outtextxy(20,450,'[r] Reset      [q] Quit      [c] Calibrar Sensor Murata');
    outtextxy(450,200,'Eixo x:');
    outtextxy(450,240,'Eixo y:');
    outtextxy(450,280,'Eixo z:');
    outtextxy(530,200,'0.00');
    outtextxy(530,240,'0.00');
    outtextxy(530,280,'0.00');
end;

{inicio do programa principal}

var x,y          :word; {pulsos enviados pelos encoders do mouse}
    contx, conty :integer; {contadores de ciclos p/ dados do mouse}
    x1,y1        :integer; {variaveis temporarias, recebem x e y}
    x2,y2        :integer; {acumulam x1 e y1 (pulsos do mouse)}
    xa, ya       :integer; {valores de pico das oscilacoes de x e y}
    xp, yp       :integer; {valores de pico das oscilacoes de x e y}
    xant, yant   :integer; {valores de x e y da iteracao anterior}
    espera      :integer; {no. de ciclos entre impressoes dos angulos na tela}
    auxx, auxy  :real; {angulos dos inclinometros (mouse) mostrados na tela}
    sobex, sobey :boolean; {indicam se a seq. de pulsos esta crescendo}
    mudoux, mudouy:boolean; {indica se o valor pode ser impresso na tela}
    regis       :registers; {registrador usado para adquirir dados do mouse}
    acabou      :boolean; {indica fim do programa p/ sair do loop principal}

    entrada     :word; {endereço da placa de aquisicao de dados}
    T           :word; {valor passado `a funcao Delay, gera tempo de amostragem}
    hi,mi,si,hundi:word; {tempo inicial de operacao}
    h,m,s,hund  :word; {tempo final de operacao}
    resultado_ant_ant:integer;
    resultado_ant :integer; {valor adquirido pela placa, do Murata, na iteracao anterior}
    resultado     :integer; {valor adquirido do Murata pela placa}
    i,j,k         :integer; {contadores}
    tf,ti        :integer; {tempos final e inicial de periodos de drift puro}
    zeroi,zerof  :integer; {indicadores de comeco e fim de periodos de drift puro}
    soma         :real; {usado no calculo do offset do Murata}

```

```
tol          :real; {tolerancia de comparacao de inclinacao para identificar
drift no sinal}
zi, zf      :real; {valores da pos. angular do Murata no comeco e no fim de
periodos de drift puro}
incl        :real; {media de inclinacao da pos. angular nos 10 ultimos
pontos}
glide       :real; {estimativa do drift do sinal integrado}
fim,fim_ant :real; {sinal integrado que sai do "filtro"}
integral    :real; {valor da integral da vel. angular do Murata}
integral_ant :real; {integral da vel. angular do Murata da iteracao anterior}
f_a         :real; {frequencia de amostragem da placa de I/O}
offset      :real; {offset do sinal de velocidade do Murata}
vet_ant     :array[1..10] of real; {guarda 10 valores anteriores do vetor
fim}
soquete     :byte; {indica qual soquete da placa de I/O e' usado}
cod_ganho   :byte; {indica o ganho no amplificador da placa}
faixa      :byte; {nao sei}
canal       :byte; {indica qual canal do amplificador e' usado}

tetaant     :real; {leitura dos fotos minerva}
teta        :real;
tetap       :real;
alfa        :real; {leitura dos fotos eixo}
beta        :real; {pitch real}
betaant     :real;
betap       :real;
leitura     :real; {leitura corrigida do MURATA}
leitura_ant :real;
leitura_ant_ant:real;

grDriver    :Integer;
grMode      :Integer;
ErrCode     :Integer;

txtoffset   :string;

begin
grDriver := 2;  {inicializacao do modo grafico}
grMode   := 5;
InitGraph(grDriver, grMode, ' ');
ErrCode := GraphResult;
if ErrCode = grOk then
begin { Do graphics }
end
else
  Writeln('Graphics error:', GraphErrorMsg(ErrCode));
tela;
acabou:=false;
liga_mouse;
x1:=0; y1:=0;      {inicializacao das variaveis do mouse}
x2:=0; y2:=0;
xa:=0; ya:=0;
xp:=0; yp:=0;
sobex:=true; sobey:=true;
xant:=0; yant:=0;
espera:=35;
mudoux:=false; mudouy:=false;
entrada :=768; {endereco da placa de aquisicao de dados}
cod_ganho :=0;
faixa := 10;
canal :=5;
soquete :=1;

port[entrada+16] :=soquete; {configuracao da placa de I/O}
port[entrada+2] :=6;
port[entrada+1] :=canal+16*cod_ganho;

i:=0;          {inicializacao das variaveis do Murata}
offset:=2380;
tol:=0.005;
resultado_ant:=round(offset);
resultado:=round(offset);
integral:=0;
integral_ant:=0;
fim:=0;
fim_ant:=0;
zeroi:=0;
```

```

zerof:=1;
glide:=0;
for j:=1 to 10 do
  vet_ant[j]:=0;
T := round(10000/40);  {periodo de amostragem = 15ms}
gettime(hi,mi,sl,hundi);  {tempo inicial de operacao}

{*****}
{ Amortecimento digital}

while acabou=false do
begin
  repeat
    posicao(x,y);
    x1:=x;
    y1:=y;
    contx:=contx+1;
    conty:=conty+1;
    if (contx>espera) then
      contx:=0;
    if (conty>espera) then
      conty:=0;
    x2:=x2+x1;
    y2:=y2+y1;

    if ((xant>x2) and (sobex=true)) then
    begin
      contx:=0;
      xp:=xa;
      xa:=xant;
      sobex:=false;
      auxx:=(xa+xp)/2;
    end
    else
    if ((xant<x2) and (sobex=false)) then
    begin
      contx:=0;
      xp:=xa;
      xa:=xant;
      sobex:=true;
      auxx:=(xa+xp)/2;
    end
    else
    if(contx=0) then
      auxx:=x2;
    if ((yant>y2) and (sobey=true)) then
    begin
      conty:=0;
      yp:=ya;
      ya:=yant;
      sobey:=false;
      auxy:=(ya+yp)/2;
    end
    else
    if ((yant<y2) and (sobey=false)) then
    begin
      conty:=0;
      yp:=ya;
      ya:=yant;
      sobey:=true;
      auxy:=(ya+yp)/2;
    end
    else
    if(conty=0) then
      auxy:=y2;

    if ((contx=0) or (conty=0)) then
    begin
      mudoux:=(contx=0);
      mudouy:=(conty=0);
      mostra_mouse(auxx,auxy,mudoux,mudouy);
    end;
    xant:=x2;
    yant:=y2;

```

```

limpa;
desenha (fim*pi/180,auxy*pi/360,auxx*pi/360);

mostra_murata(fim);
i := i+1;
delay(T);

{*****}
{ Amostragem do Muratam integracao e eliminacao de drift }

port[entrada] :=0;
repeat
until(port[entrada+1] and $80 = 0);
resultado_ant_ant:=resultado_ant;
resultado_ant := resultado;
resultado := port[entrada] + 256*port[entrada+2];

integral_ant := integral;
integral := integral + (resultado_ant_ant + 4*resultado_ant + resultado -
6*offset)* 2.9793E-4*2.7;

for j:=1 to 9 do
vet_ant[j]:=vet_ant[j+1];
vet_ant[10]:=integral;
incl := (integral - vet_ant[1])/10;

if (abs(incl)<tol) then
begin
if (zeroi=0) then
begin
zerof:=0;
zeroi:=1;
zi:=integral_ant;
ti:=i;
end;
fim:=fim_ant;
end
else
begin
if (zerof=0) then
begin
zerof:=1;
zeroi:=0;
zf:=integral_ant;
tf:=i;
if ((tf-ti)>40) then
glide:=(zf-zi)/(tf-ti);
end;
fim_ant:=fim;
fim:=(integral-integral_ant) + fim_ant - glide;
end;

{*****}
{ Interface com usuário }

until (keypressed);

case readkey of 'q': acabou:=true; {sai do programa}
'c': begin {calibracao do offset do Murata}
soma:=0;
k:=0;
outtextxy(450,150,'Calibrando...');
for j:=1 to 1000 do
begin
delay(T);
port[entrada] :=0;
repeat
until(port[entrada+1] and $80 = 0);
k:= port[entrada] + 256*port[entrada+2];
soma:=soma+k;
end;
offset:=soma/1000;
setfillstyle(1,black);
bar(450,150,634,170);
bar(450,350,634,370);
str(offset:0:2,txtoffset);

```

```

        outtextxy(450,350,'Offset: '+txtoffset);
    end;
'r': begin
        {reset}
        x1:=0; y1:=0; {Mouse}
        contx:=0; conty:=0;
        sobex:=true; sobey:=true;
        if (auxx=x2) then {pendulo x parado}
        begin
            auxx:=0;
            x2:=0;
            xa:=0;
            xp:=0;
            xant:=0;
        end
        else {pendulo x ainda em movimento}
        begin
            auxx:=(xa+xp)/2;
            x2:=x2-round((xa+xp)/2);
            xa:=xa-round((xa+xp)/2);
            xp:=xp-round((xa+xp)/2);
            xant:=xant-round((xa+xp)/2);
        end;
        if (auxy=y2) then {pendulo y parado}
        begin
            auxy:=0;
            y2:=0;
            ya:=0;
            yp:=0;
            yant:=0;
        end
        else {pendulo y ainda em movimento}
        begin
            auxy:=(ya+yp)/2;
            y2:=y2-round((ya+yp)/2);
            ya:=ya-round((ya+yp)/2);
            yp:=yp-round((ya+yp)/2);
            yant:=yant-round((ya+yp)/2);
        end;

        integral:=0; {Murata}
        integral_ant:=0;
        resultado:=round(offset);
        fim:=0;
        fim_ant:=0;
        glide := 0;
        zeroi := 0;
        zerof := 1;
        for j:=1 to 10 do
            vet_ant[j] :=0 ;

            mostra_mouse(auxx, auxy, true, true);
            mostra_murata(fim);
        end;

    end;
end;
gettime(h,m,s,hund);
Closegraph;
writeln;
writeln(' Comeco: ',h,':',m,':',s,','. ',hund);
writeln(' Fim : ',h,':',m,':',s,','. ',hund);
writeln(' Amostras :',i);
readln;
end.

```

Programa Controle.pas { controle da cadeira de rodas}

```

program ransoll;
uses dos,crt,graph;

const pi=3.1416;
      Emax=35;
      Emaxmax=40;
      Imax=35;
      Imaxmax=40;
      n_vel=5;
      T_amost=15e-3;

```

```
procedure liga_mouse; {igual à do programa Visual.pas}

procedure Posicao (var x,y:word); {igual à do programa Visual.pas}

procedure mostra_mouse (auxx, auxy:real; mudoux, mudouy:boolean);
{igual à do programa Visual.pas}

procedure tela; {igual à do programa Visual.pas}

{ Funcao potencia inteira}
Function pow(base,exp:integer) : integer;
Var i,temp:integer;
Begin
  temp:=1;
  for i:=1 to exp do
    temp:=temp*base;
  pow:=temp;
end;

{ Funcao atan2 0-360graus}
Function atan2(s,c:real):real;
Var temp:real;
Begin
  if c>0 then
    if (s>0) then
      temp:=ArcTan(s/c)
    else temp:=ArcTan(s/c) + 2*pi
  else if(c<0) then
    temp:=ArcTan(s/c) + pi
  else
    if(s>0) then temp:=pi/2
    else temp:=3*pi/2;
  atan2:=temp;
End;

{ retorna 1 para positivos e 0 para negativos ou zero}
Function sinal(r:real):integer;
Var temp:integer;
Begin
  if(r>0) then
    temp:=1
  else temp:=0;
  sinal:=temp;
End;

{aciona Motor i com sentido si e velocidade vi}

Procedure aciona(s1,m1,s2,m2:integer);
Var pal1,pal2:byte; { palavras para end. $378 e $37A }
Begin
  {Ajusta intervalo de m1 e m2}
  if(m1<-1) then
    m1:=-1;
  if(m1>=n_vel) then
    m1:=n_vel-1;
  if(m2<-1) then
    m2:=-1;
  if(m2>=n_vel) then
    m2:=n_vel-1;
  if(s1<0) then
    s1:=0;
  if(s1>1) then
    s1:=1;
  if(s2<0) then
    s2:=0;
  if(s2>1) then
    s2:=1;

  {Construcao de pal1}
  pal1:=0;
  pal2:=0;
```

```

if m1=0 then
  pal1:=16
else if ( m1>0) then pal1:=pow(2,m1-1);
pal1:=pal1+pow(2,5)*s2;
if((m2>0) AND (m2<=2)) then
  pal1:=pal1+pow(2,m2+5);

{Construcao de pal2}
pal2:=s1;
if(m2>=3) then
  pal2:=pal2+pow(2,m2-2);
if(m2=0) then
  pal2:=pal2+pow(2,3);
pal2:=pal2 XOR 11;

{Atualiza LPT1}
port[$378]:=pal1;
port[$37A]:=pal2;
end;

{ Transforma leituras do sensor para acionamentos dos motores}
Procedure trans_ang(ext,int:real;var s1,m1,s2,m2:integer);
{ ext,int leituras dos encoders interno e externo}
Var
  teta,r:real; {posicao da cabeca}
  rmax:real;

Begin
  ext:=ext*pi/180;
  int:=int*pi/180;
  teta:=atan2(cos(ext)*sin(int),-sin(ext));
  r:=sqrt(sin(ext)*sin(ext)+cos(ext)*cos(ext)*sin(int)*sin(int));
  rmax:=sin(Emax*pi/180);

  if((teta>=0) AND (teta<=pi/2)) then {quadrante 1}
  begin
    s1:=1;
    m1:= round(r/rmax*n_vel);
    s2:=sinal(teta-pi/4);
    m2:= round((r/rmax)*abs((teta-pi/4)/(pi/4))*n_vel);
  end
  else if((teta>pi/2) AND (teta<=pi)) then {quadrante 2}
  begin
    s2:=1;
    m2:= round(r/rmax*n_vel);
    s1:= sinal(3*pi/4-teta);
    m1:= round((r/rmax)*abs((teta-3*pi/4)/(pi/4))*n_vel);
  end
  else if((teta>pi) AND (teta<=3*pi/2)) then {quadrante 3}
  begin
    s1:=0;
    m1:= round(r/rmax*n_vel);
    s2:= sinal(5*pi/4-teta);
    m2:= round((r/rmax)*abs((teta-5*pi/4)/(pi/4))*n_vel);
  end
  else if((teta>3*pi/2) AND (teta<=2*pi)) then {quadrante 4}
  begin
    s2:=0;
    m2:= round(r/rmax*n_vel);
    s1:= sinal(teta-7*pi/4);
    m1:= round((r/rmax)*abs((teta-7*pi/4)/(pi/4))*n_vel);
  end;
  if(m2>n_vel) then
    m2:=n_vel;
  if(m1>n_vel) then
    m1:=n_vel;
End;

Procedure som;
begin
  sound(500);
  delay(1700);
  sound(400);
  delay(3400);
  nosound;
end;

```

```

{*****}
{definicão de variáveis}

  {algumas variáveis igual à do programa Visual.pas}

  m1, m2          :integer; {velocidades calculadas dos motores esquerdo e
  direito}
  s1, s2          :integer; {sentidos de operação dos motores}
  m1_saida_atual,m2_saida_atual  :real; {velocidade e sentidos atuais}
  m1_saida_novo,m2_saida_novo    :real; {velocidade e sentidos novos}
  m1_calc_ant,m2_calc_ant       :integer; {velocidades calculadas passo anterior}
  ext, int        :real; {ângulos dos foto-sensores externo e interno}
  cont           :longint; {contador do no. de ciclos de espera no
  acionamento dos motores}
  a,b            :real; {coeficientes do filtro de 1ª ordem}
  pal1,pal2      :integer; {valores jogados aos motores}
  pal1_ant,pal2_ant :integer; {valores jogados aos motores}
  tal           :real; {constante do filtro}

  ligado        :boolean;
  passou        :boolean; {indica se usuário saiu da região de operação}

  botao         :integer; {botão de reset}
  botao_ant     :integer;
  chave, chave_ant :integer; {chave liga-desliga}

{*****procedure de reset das variáveis*****}
Procedure reset;
begin
  x1:=0; y1:=0;      {Mouse}
  contx:=0; conty:=0;
  sobex:=true; sobey:=true;
  if (auxx=x2) then {pendulo x parado}
  begin
    auxx:=0;
    x2:=0;
    xa:=0;
    xp:=0;
    xant:=0;
  end
  else {pendulo x ainda em movimento}
  begin
    auxx:=(xa+xp)/2;
    x2:=x2-round((xa+xp)/2);
    xa:=xa-round((xa+xp)/2);
    xp:=xp-round((xa+xp)/2);
    xant:=xant-round((xa+xp)/2);
  end;
  if (auxy=y2) then {pendulo y parado}
  begin
    auxy:=0;
    y2:=0;
    ya:=0;
    yp:=0;
    yant:=0;
  end
  else {pendulo y ainda em movimento}
  begin
    auxy:=(ya+yp)/2;
    y2:=y2-round((ya+yp)/2);
    ya:=ya-round((ya+yp)/2);
    yp:=yp-round((ya+yp)/2);
    yant:=yant-round((ya+yp)/2);
  end;
  gotoxy(1,4); writeln('eixo x: ',(auxx/2):0:2);
  gotoxy(1,5); writeln('eixo y: ',(auxy/2):0:2);
  gotoxy(1,9); writeln(' ');
end;

{***** começo do programa *****}

begin

Inicialização e amortecimento digital igual à visual.pas

{*****}

```

```

{***** Verificacao da Chave On - Off *****}
{*****}
chave_ant := chave;
chave := port[$379];
chave := chave AND $0F;
if (chave = 8) AND (chave <> chave_ant) then
begin
gotoxy(50,7);
textcolor(green);
write('CHAVE');
gotoxy(49,8);
write(' LIGADA ');
textcolor(white);
end
else
if (chave <> 8) AND (chave_ant = 8) then
begin
gotoxy(50,7);
textcolor(red);
write('CHAVE');
gotoxy(49,8);
write(' DESLIGADA ');
textcolor(white);
end;

{*****}
{***** ACIONAMENTO DOS MOTORES *****}
{*****}
ext:=auxx/2;
int:=auxy/2;
m1_calc_ant:=m1;
m2_calc_ant:=m2;
a := T_amos/(T_amos+2*tal);
b := (T_amos-2*tal)/(T_amos+2*tal);
trans_ang(ext,int,s1,m1,s2,m2);
if s1=0 then
m1:=-m1;
if s2=0 then
m2:=-m2;
m1_saida_novo:=(a*m1+a*m1_calc_ant-b*m1_saida_atual);
m2_saida_novo:=(a*m2+a*m2_calc_ant-b*m2_saida_atual);
pal1_ant:=pal1;
pal2_ant:=pal2;
if (passou=false) then
begin
s1:= sinal(round(m1_saida_novo));
pal1:=abs(round(m1_saida_novo));
s2 :=sinal(round(m2_saida_novo));
pal2:=abs(round(m2_saida_novo));
if pal1 = 5 then pal1 := 4;
if pal2 = 5 then pal2 := 4;
end;
m1_saida_atual:=m1_saida_novo;
m2_saida_atual:=m2_saida_novo;

if (abs(ext)>Emaxmax) OR (abs(int)>Imaxmax) then
begin
pal1:=0;
pal2:=0;
passou:=true;
end
else if (abs(ext)>Emax) OR (abs(int)>Imax) then
begin
pal1:=-1;
pal2:=-1;
passou:=true;
end;

if (pal1<>pal1_ant) AND (pal1_ant<>-1) then
pal1:=-1;
if (pal2<>pal2_ant) AND (pal2_ant<>-1) then
pal2:=-1;

gotoxy(3,11); write('Ext: ',ext:0:2,' Int: ',int:0:2);
gotoxy(3,12); write('s1 = ',s1,' s2 = ',s2,' ');
gotoxy(3,13); write('m1 = ',pal1,' m2 = ',pal2,' ');

```

```

if(round(m1_saida_atual)=0) AND (round(m2_saida_atual)=0) then
begin
  if(passou = true) then
  begin
    som;
    passou:=false;
  end;
end;

if (ligado = true) then
begin
  if (chave = 8) then
    aciona(s1,pall,s2,pal2); {aciona sentidos e velocidades dos motores}
  end;
}

{*****}
{*** Verificacao do Botao de Reset ****}
{*****}
  botao_ant := botao;
  botao := port[$379];
  botao := botao AND $40;
  if (botao = 64) AND (botao_ant <> 64) then reset;
}

{*****}

until (keypressed);

case readkey of 'q': acabou:=true; {sai do programa}
'r': reset; {reseta variaveis}
'l': begin
  textcolor(green);
  gotoxy(50,4); write('SISTEMA');
  gotoxy(49,5); write(' LIGADO ');
  ligado:=true;
  textcolor(white);
end;
'd': begin
  aciona(s1,-1,s2,-1); {desliga motores}
  textcolor(red);
  gotoxy(50,4); write('SISTEMA');
  gotoxy(49,5); write(' DESLIGADO');
  ligado:=false;
  textcolor(white);
end;
'f': begin
  gotoxy(30,20); write('Digite novo Tal: (s)');
  readln(tal);
  gotoxy(30,20);      writeln('Tal      =      ',tal:0:2,'
');
end;

end;
end;
gettime(h,m,s,hund);
writeln;
writeln(' Comeco: ',hi,':',mi,':',s,',' ,hund);
writeln(' Fim   : ',h,':',m,':',s,',' ,hund);
writeln(' Amostras :',i);
readln;

end.

```

Apêndice III – Cálculo das posições dos vértices do sensor para programa visual.pas

Considerando as três rotações do corpo descritas no Anexo 2, pode-se estabelecer a matriz de rotação que leva da posição inicial à posição atual do corpo, definida por:

$$M_{0 \rightarrow 3} = M_{0 \rightarrow 1} M_{1 \rightarrow 2} M_{2 \rightarrow 3} \quad (\text{III.1})$$

sendo as matrizes acima dadas por (A2.1), (A2.2) e (A2.3).

Assim, a posição atual de cada vértice é dada por:

$$V_3 = M_{0 \rightarrow 3} \cdot V_{\text{base sensor}} \quad (\text{III.2})$$

sendo V_3 a posição atual do vértice dada na base 0 e $V_{\text{base sensor}}$ a posição do mesmo dada numa base fixa ao sensor.

Assim, para obter a projeção de cada vértice na tela basta realizar o produto escalar entre os vetores que definem o plano da tela (plano de projeção) e o vetor V_3 de cada vértice.

Assim, considerando que a tela é o plano Oyz, as coordenadas na tela serão:

$$\begin{aligned} Y &= V_3 \cdot (0,1,0)^T \\ Z &= V_3 \cdot (0,0,1)^T \end{aligned} \quad (\text{III.3})$$