



**Gonçalo Alberto
Ramos Carpinteiro**

**Medição de Orientações Relativas de um Veículo
em Movimento**



**Gonçalo Alberto
Ramos Carpinteiro**

**Medição de Orientações Relativas de um Veículo
em Movimento**

Dissertação apresentada à Universidade de Aveiro para cumprimento dos requisitos necessários à obtenção do grau de Mestrado em Engenharia Mecânica, realizada sob orientação científica de Vitor Manuel Ferreira dos Santos, Professor Associado do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de Aveiro e coorientação científica de Ricardo José da Silva Pascoal, Estagiário Pos-Doc no Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de Aveiro.

o júri / the jury

presidente / president

Professor Doutor Jorge Augusto Fernandes Ferreira
Professor Auxiliar da Universidade de Aveiro, (presidente).

vogais / examiners committee

Professor Doutor José Luis Costa Pinto de Azevedo
Professor Auxiliar da Universidade de Aveiro, (arguente principal).

Professor Doutor Vitor Manuel Ferreira dos Santos
Professor Associado da Universidade de Aveiro, (orientador).

agradecimentos / acknowledgements

À minha família e em especial aos que são como família pelo apoio, dedicação e paciência ao longo destes 5 anos.

Um agradecimento especial ao Professor Vítor Santos que desde a primeira aula de Instrumentação Electrotecnic Aplicada (I.E.A.) tem vindo a demonstrar um acompanhamento exemplar, fonte de motivação e boa disposição mesmo nos momentos mais árduos. Obrigado pela preciosa orientação dada, e por ter sempre acreditado em mim mesmo quando eu já não acreditava.

Um muito obrigado ao Jorge Almeida não só pelo acompanhamento e conhecimentos transmitidos mas também pelo grande amigo de bancada que tem sido e pela sua boa disposição.

Também um muito obrigado ao Professor Ricardo Pascoal (master Yoda) por todo o vasto conhecimento, acompanhamento e aconselhamento. Foi um prazer tê-lo como coorientador.

Aos meus colegas do Laboratório de Automação e Robótica (L.A.R.) não só por tornarem possível conciliar trabalho e diversão mas também pelas opiniões e conhecimentos trocados, em especial ao João Torrão pelo apoio e boa disposição.

Agradeço à MOTOFIL pelos manipuladores da Fanuc cedidos que foram muito úteis neste trabalho.

Aos meus amigos e colegas de casa por tudo, sem eles teria sido tudo mais difícil.

À minha namorada Zaira um muito obrigado por tudo.

Palavras-Chave

AtlasCar; Sensor Infravermelho; Sensor Sharp; Orientações veículo;

Resumo

Este trabalho descreve um método de obtenção das orientações de um veículo em movimento. O facto de o veículo estar em movimento é para adicionar variações nas orientações. Para obter as orientações mediu-se a distância da estrutura do veículo à estrada por unidades locais de medição: ULM. Foi implementada uma unidade central de integração, UCI, que recebe a informação das ULM e envia para a unidade computacional do veículo. A leitura da distância foi realizada através de sensores de medição por infravermelhos da *Sharp*. Para que os dados provenientes desses sensores fossem o mais precisos possíveis, foi levado a cabo um estudo e caracterização destes mesmos sensores. Cada sensor foi calibrado individualmente, de modo a se obter a relação da diferença de potencial lida com a distância à estrada. Foi levado a cabo um estudo de qual o melhor método matemático para obter as orientações com base nas distâncias à estrada. Foram ainda conduzidos vários testes de modo a estimar o erro do sistema desenvolvido. Por fim, testou-se o sistema final em ambiente real.

Keywords

AtlasCar; Infrared Sensors; Sharp Sensors; Vehicle orientations;

Abstract

This work describes a method to obtain the orientations of a moving vehicle. The fact that the vehicle is in motion is going to add variation to the orientations. To obtain the orientations the measurement of the distance between the vehicle structure and the road was performed by the local measurement units: ULM. A central unit of integration, UCI, receives data from the ULM and sends it to the computational unit aboard the vehicle. *Sharp* infra red sensors were used to measure the distance between the vehicle structure and the road. In order to improve the data from those sensors, a study of characterization was carried out. Each sensor was individually calibrated to get the ratio from voltage with distance to the road. A study of the best mathematical method was carried out to obtain orientations based on the distance to the road. Several tests were conducted in order to estimate the error of the developed system. Finally, was tested the final system in a real operative environment.

Conteúdo

Conteúdo	i
Lista de Figuras	iii
Lista de Tabelas	v
1 Introdução	1
1.1 O projeto ATLASCAR	1
1.2 Apresentação do problema	3
1.3 Objetivos do trabalho	4
1.4 Estado atual do ATLASCAR	5
1.5 Estado da arte	5
1.6 Escolha da metodologia	8
1.7 Estrutura do documento	9
1.7.1 Estudo e caracterização dos sensores	9
1.7.2 Processamento e interpretação dos dados	9
1.7.3 Infraestrutura do software	9
1.7.4 Testes e resultados	9
1.7.5 Conclusões e trabalho futuro	9
1.7.6 Anexos	9
2 Estudo e caracterização dos sensores	11
2.1 Sensores de distância	11
2.2 Robot Fanuc M-6iB	12
2.3 Aquisição do sinal	13
2.4 Circuito da unidade local de medição (ULM)	15
2.5 Calibração dos sensores	16
2.6 Teste da resposta com sinusoides	18
2.7 Teste de interferência	21
2.8 Erros associados e precisão dos sensores	21
3 Processamento e interpretação dos dados	23
3.1 Aquisição do sinal	23
3.1.1 Arduino	23
3.1.2 Circuito da unidade central de interligação (UCI)	23
3.2 Métodos de obtenção das orientações	24
3.2.1 Método do plano médio	24

3.2.2	Método da pseudo-inversa	26
3.3	Simulação do sistema em movimentos definidos	28
3.4	Erros associados e precisão do método	32
4	Infraestrutura do software	33
4.1	<i>Robot Operating System</i> ROS	33
4.2	Obtenção da informação dos sensores	33
4.3	Calibração do sistema	34
4.4	Obtenção das orientações	35
5	Testes e resultados	37
5.1	Teste realizado	37
5.1.1	Calibração inicial	37
5.2	Resultados obtidos e casos específicos	39
5.2.1	Resultados obtidos	39
5.2.2	Arranque e curvas	40
5.2.3	Cruzamento	43
5.2.4	Rotunda	43
5.2.5	Lombas	46
5.3	Variação dos resultados com o número de sensores	48
5.4	Variação dos resultados com a colocação dos sensores	48
6	Conclusões e trabalho futuro	53
6.1	Conclusões	53
6.2	Trabalho futuro	55
	Bibliografia	57
7	Anexos	59

Lista de Figuras

1.1	O projeto ATLAS e ATLASCAR [2].	1
1.2	Solução para o alternado auxiliar.[2]	2
1.3	Esquema da distribuição da alimentação.[17]	2
1.4	Exemplos de sistemas de visão no ATLASCAR [2].	3
1.5	Exemplos de sistemas laser no ATLASCAR [2].	3
1.6	Esquema dos referenciais do ATLASCAR.	4
1.7	Sensores no ATLASCAR [13].	5
1.8	Resultados obtidos para as orientações no trabalho [14]	7
1.9	Esquema do sistema proposto.	8
2.1	Sensor <i>SHARP</i> GP2Y0A21YK0F.	11
2.2	Juntas do robô Fanuc M-6iB.	12
2.3	Resultados de 500 amostragens do sensor a uma distância constante ao chão.	13
2.4	Gráfico de frequências existentes no sinal adquirido pelo sensor.	14
2.5	Leitura do sinal analógico no osciloscópio.	14
2.6	Problemas do fenómeno de interferência <i>aliasing</i> , o sinal amostrado é totalmente diferente do real.	14
2.7	Esquema de um filtro passa baixo.	15
2.8	Resultados de 500 amostragens do sensor, utilizando um filtro passa baixo, a uma distância constante ao chão.	16
2.9	Circuito da unidade local de medição.	17
2.10	Esquema elétrico do circuito da unidade local de medição.	17
2.11	Gráfico dos resultados obtidos para calibrar o sensor 0.	18
2.12	Curvas de calibração obtidas para o sensor 0.	19
2.13	Função sinusoidal, a azul dados de posição do robô Fanuc e a vermelho os dados de posição do sensor 0.	20
2.14	Resultados dos testes de interferência.	21
3.1	<i>Arduino</i> nano utilizado no trabalho.	23
3.2	Circuito da unidade central de interligação.	24
3.3	Esquema elétrico do circuito da unidade central de interligação.	25
3.4	Esquema ilustrativo do método do plano médio para quatro pontos.	26
3.5	Esquema para o calculo dos ângulos de <i>pitch</i> e <i>roll</i>	28
3.6	Esquema ilustrativo do método da pseudo-inversa para quatro pontos.	28
3.7	Leitura da altura do robô Fanuc e dos sensores sem movimento.	29
3.8	Valores das orientações obtidos nas leituras em posição estática.	29

3.9	Distribuição das leituras feitas em posição estática.	30
3.10	Resultados da leitura de posição em z para o teste com variação nas orientações.	30
3.11	Resultados obtidos para o método da média das combinações dos planos.	31
3.12	Resultados obtidos através do método com a pseudo-inversa.	31
4.1	Interface de calibração do sistema.	34
4.2	Ferramenta de visualização dos marcadores publicados em ROS.	35
4.3	Diagrama de blocos explicitando o fluxo de informação entre os diversos blocos.	36
5.1	Esquema da colocação dos sensores e referenciais do ATLASCAR.	38
5.2	Sentido positivo dos ângulos segundo o referencial adotado.	38
5.3	Valores lidos pelos sensores durante a calibração do sistema colocado no ATLAS-CAR.	38
5.4	Trajeto percorrido com o ATLASCAR durante o teste.	39
5.5	Parte do trajeto que representa o arranque e as primeiras curvas.	40
5.6	Orientações do veículo durante o arranque.	41
5.7	Valores obtidos da orientação, velocidade e rotação do volante durante o arranque.	41
5.8	Orientações do veículo durante as curvas.	42
5.9	Valores obtidos da orientação, velocidade e rotação do volante durante as curvas.	42
5.10	Parte do trajeto que representa o cruzamento.	43
5.11	Orientações do veículo no cruzamento.	44
5.12	Valores obtidos da orientação, velocidade e rotação do volante no cruzamento.	44
5.13	Parte do trajeto que representa a rotunda.	45
5.14	Orientações do veículo na rotunda.	45
5.15	Valores obtidos da orientação, velocidade e rotação do volante na rotunda.	46
5.16	Parte do trajeto que representa as lombas.	46
5.17	Orientações do veículo nas lombas.	47
5.18	Valores obtidos da orientação, velocidade e rotação do volante nas lombas.	47
5.19	Valores obtidos utilizando diferente número de sensores.	49
5.20	Valores obtidos utilizando as coordenadas corretas e as coordenadas afastadas.	51
7.1	Valores gráficos obtidos para a calibração dos restantes sensores.	60
7.2	Curvas de calibração obtidas para sensor 1.	61
7.3	Curvas de calibração obtidas para sensor 2.	62
7.4	Curvas de calibração obtidas para sensor 3.	63
7.5	Curvas de calibração obtidas para sensor 4.	64
7.6	Curvas de calibração obtidas para sensor 5.	65
7.7	Curvas de calibração obtidas para sensor 6.	66
7.8	Curvas de calibração obtidas para sensor 7.	67
7.9	Valores gráficos obtidos para o teste da resposta com sinusóides dos restantes sensores.	69

Lista de Tabelas

1.1	Precisões do sistema Applanix POS LV 120 SPS variáveis no tempo [1].	7
2.1	Tabela das características do robô Fanuc M-6iB.	12
2.2	Valores do coeficiente de correlação, da variância e dos coeficientes para os diversos sensores.	20
2.3	Valores do coeficiente de correlação e da variância para os diversos sensores. . .	20
2.4	Valores do desvio padrão e da incerteza para os diversos sensores.	22
3.1	Valores obtidos da variância, do desvio padrão e da incerteza para o sistema final.	32
5.1	Valores das coordenadas X e Y dos sensores para a calibração do sistema. . . .	37
5.2	Valores do desvio padrão e da incerteza do <i>pitch</i> para o mesmo teste com número diferente de sensores utilizados.	48
5.3	Valores do desvio padrão e da incerteza do <i>roll</i> para o mesmo teste com número diferente de sensores utilizados.	48
5.4	Valores do desvio padrão e da incerteza do <i>pitch</i> para o mesmo teste com erro nas coordenadas dos sensores de 100 mm e de 200 mm para o exterior.	50
5.5	Valores do desvio padrão e da incerteza do <i>roll</i> para o mesmo teste com erro nas coordenadas dos sensores de 100 mm e de 200 mm para o exterior.	50
6.1	Valores do coeficiente de correlação obtidos das curvas de calibração para os diversos sensores.	54
6.2	Valores da incerteza para os diversos sensores.	54
6.3	Valores obtidos da incerteza para o sistema com quatro sensores e espaçamento de 700 mm.	54
6.4	Valores da incerteza para o mesmo teste com número diferente de sensores utilizados.	55
6.5	Valores da incerteza para o mesmo teste com erro introduzido nas coordenadas dos sensores de 100 mm e de 200 mm para o exterior.	55

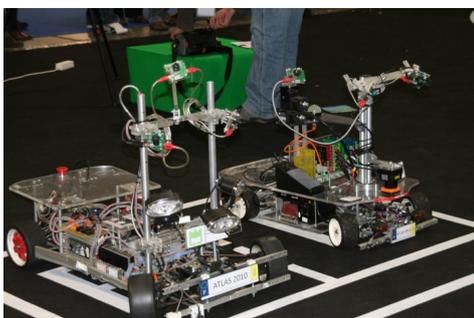
Capítulo 1

Introdução

O Laboratório de Automação e Robótica (LAR) no Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de Aveiro, tem desenvolvido atividades nas áreas da Robótica e Automação, focadas principalmente nas áreas de Navegação Autónoma, Perceção Avançada e Robô Humanoide. Um dos projetos de maior sucesso é o projeto ATLAS [2], dentro do qual se tem desenvolvido o ATLASCAR [17].

1.1 O projeto ATLASCAR

O projeto ATLAS fig. 1.1 participou e foi vencedor de competições de condução autónoma nos festivais nacionais de robótica nos anos de 2006 a 2010. O projeto ATLAS está bastante desenvolvido no que diz respeito à navegação autónoma em ambientes controlados. No entanto, em ambientes reais, o mesmo sistema precisa de ser aperfeiçoado. Para fazer a ponte para cenários reais foi criado o ATLASCAR fig. 1.1, que é um protótipo à escala real de um veículo, Ford Escort Wagon, equipado com diversos sensores capazes, não só de recolher informação do meio exterior, como também monitorizar o veículo para que seja possível uma condução assistida e mais tarde uma condução autónoma.



(a) Exemplos de alguns robôs do projeto ATLAS.



(b) O projeto ATLASCAR.

Figura 1.1: O projeto ATLAS e ATLASCAR [2].

Para alimentar todos os sensores e sistemas a bordo foi necessário implementar um alter-

nador auxiliar para gerar energia suficiente, fig. 1.2. A energia gerada vai diretamente para

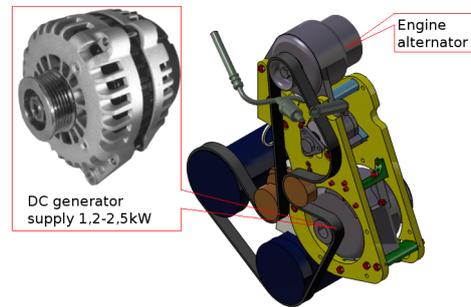


Figura 1.2: Solução para o alternado auxiliar.[2]

um inversor que alimenta uma *Uninterruptible Power Supply* UPS que garante energia a todos os sensores, fig. 1.3.

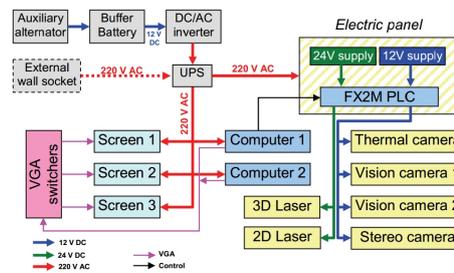


Figura 1.3: Esquema da distribuição da alimentação.[17]

O ATLASCAR possui a bordo alguns sistemas de visão, entre eles o de visão *Stereo* fig. 1.4. Este sensor utiliza duas câmaras separadas por uma distância conhecida, e permite calcular a profundidade dos pontos captados por ambas. Isto é possível devido à correspondência estabelecida entre a posição nos píxeis dos CCD para um mesmo ponto no espaço. Existe também um sistema de visão *Foveated* fig. 1.4 que é constituído por duas câmaras equipadas com diferentes óticas, cada uma com um certo ângulo de visão. O objetivo deste sensor será reduzir o esforço computacional, para tal, com a câmara de maior abertura são detetados padrões de interesse. Com ajuda de motores instalados na base das câmaras, uma unidade *pan-tilt*, alinhar esse padrão com a outra câmara de menor abertura. Por sua vez, a câmara de menor abertura irá focar apenas a região necessária.

Um outro exemplo de sistema de medição é o sensor laser 3D, fig. 1.5. Este sensor aplica um sensor 2D convencional, rodado através de um eixo externo, o que lhe confere a capacidade de efetuar medições no espaço 3D. A função deste sensor será efetuar a medição da distância do sensor ao meio exterior para reconstituição do mesmo. Existe também um sensor laser 2D, fig. 1.5, com plano de deteção a cavar a estrada, que permite a deteção de obstáculos à frente do veículo. Este sensor também é usado por software para fazer a acumulação geométrica da superfície da estrada para efeitos de navegação.

Todos estes sensores representam o ambiente exterior visto do veículo, e necessitam de estar referenciados em sistemas de coordenadas conhecidos para se poderem utilizar e conciliar entre si.



(a) Sistema *Stereo* implementado no ATLASCAR [2].



(b) Sistema *Foveated Vision* implementado no ATLASCAR [2].

Figura 1.4: Exemplos de sistemas de visão no ATLASCAR [2].



(a) Laser 3D implementado no ATLASCAR [2].



(b) Laser 2D implementado no ATLASCAR [2].

Figura 1.5: Exemplos de sistemas laser no ATLASCAR [2].

1.2 Apresentação do problema

Nos países modernos, uma das maiores causas de fatalidade são os acidentes rodoviários[4]. A preocupação com as consequências desses acidentes é cada vez maior. Tanto a comunidade científica como as indústrias de automóveis têm contribuído para o desenvolvimento de diferentes sistemas de ajuda à condução. Esses sistemas são denominados de sistemas avançados de apoio ao condutor (*Advanced Driver Assistance Systems* ou ADAS) [8].

Vários estudos foram realizados tentando prever quais os principais fatores que provocam acidentes rodoviários, para posteriormente tentar atuar sobre eles. No trabalho [19] tentam-se identificar alguns desses fatores, tais como erros de distração do condutor, para posteriormente se desenvolverem sistemas que previnam esses mesmos erros.

Os sistemas avançados de apoio ao condutor, nas variantes mais sofisticadas, exigem que o sistema computacional do veículo tenha um conhecimento o mais preciso possível de um conjunto de variáveis de estado do veículo. Por exemplo, em [6] é desenvolvido um sistema avançado de apoio ao condutor com múltiplos sensores. No entanto, é necessário integrar toda a informação recolhida pelos múltiplos sensores num único sistema de coordenadas. Assumir que a posição e orientação do sensor são constantes não é possível na maioria dos cenários, pois as orientações de um veículo podem facilmente ser afetadas pelas imperfeições da estrada, tais como lombas e buracos, mas também pela dinâmica do veículo em especial nas curvas e

nas rotundas. Apesar de um sistema de visão poder estar fixo na estrutura do veículo, este mesmo tem variação de orientações em relação ao plano da estrada, condicionando os dados adquiridos pelo sistema.

A definição do sistema de coordenadas tem impactos na percepção externa e intervêm na análise de risco à estabilidade do veículo perante determinadas condições. Assim, torna-se essencial o conhecimento das orientações do veículo relativas ao meio exterior, principalmente as relativas ao plano da estrada. Sendo conhecidas as orientações relativas é então possível corrigir as leituras feitas pelos diversos sensores, e ter uma representação mais fiel do meio exterior.

1.3 Objetivos do trabalho

A cada sensor do ATLASCAR está associado um referencial, fig. 1.6. Para que a informação dos sensores de percepção seja de confiança, é necessário, a cada momento, saber as orientações entre o referencial do plano da estrada e do ATLASCAR. Por exemplo, se o ATLASCAR descrever uma trajetória curvilínea, com conseqüente inclinação do veículo, a imagem que uma câmara irá obter estará rodada em relação ao plano da estrada. Se nesse momento se conhecerem as orientações, facilmente se aplicam transformações à imagem para um referencial externo.

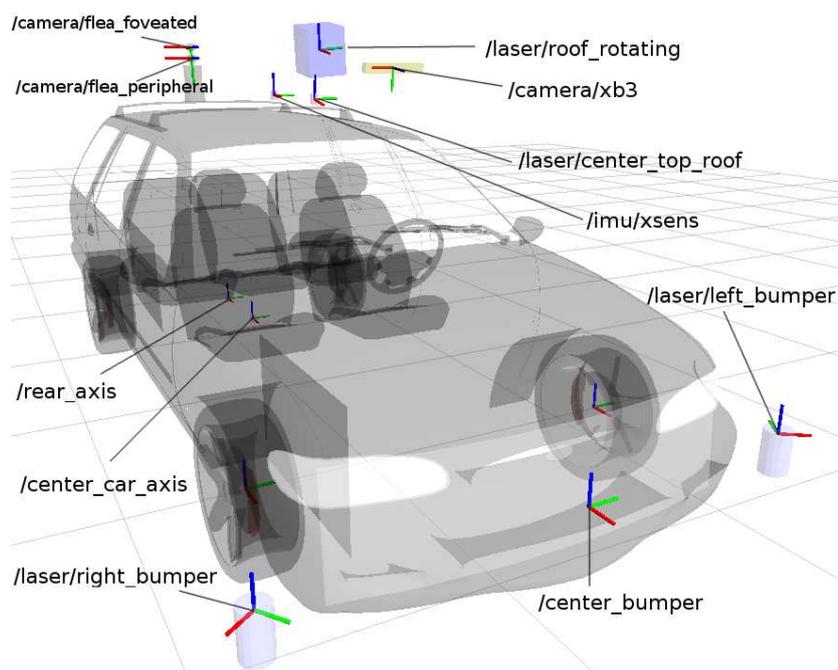


Figura 1.6: Esquema dos referenciais do ATLASCAR.

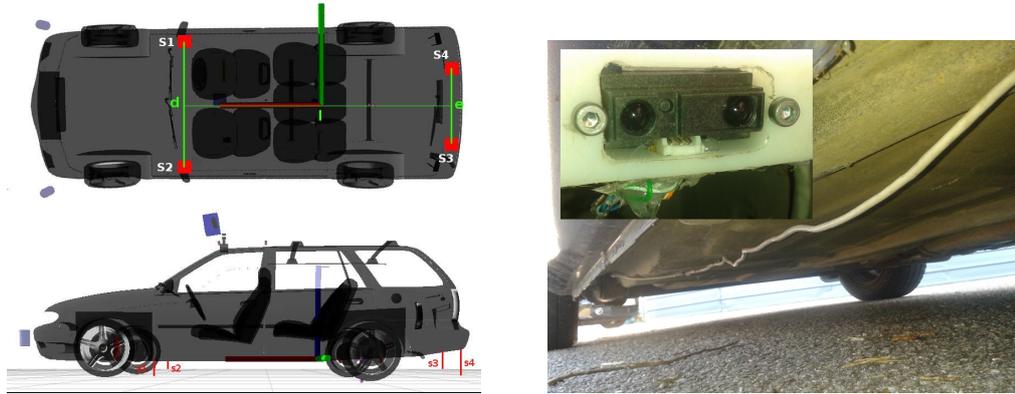
Este trabalho destina-se ao desenvolvimento de um sistema para obtenção das orientações de um veículo, em particular as relativas ao plano da estrada. O sistema deverá ser de instalação fácil e não invasiva.

O sistema deverá monitorizar com boa precisão as orientações de um veículo. Para tal, será necessário uma boa caracterização dos sistemas a utilizar, bem como um estudo acerca

dos métodos de leitura, tratamento, processamento e interpretação de dados adquiridos. Será também desenvolvida uma interface gráfica que deverá apresentar informação relevante para o utilizador, bem como um modo de calibração do sistema, caso seja necessário.

1.4 Estado atual do ATLASCAR

Atualmente, o sistema de obtenção das orientações é composto por quatro sensores de infravermelhos que medem a distância ao plano da estrada, fig. 1.7. Por trigonometria, é realizado o cálculo dos ângulos para as orientações eq. 1.1 e 1.2 [13].



(a) Esquema da localização atual dos sensores.

(b) Estado atual dos sensores.

Figura 1.7: Sensores no ATLASCAR [13].

$$pitch = \arctan \left(\frac{\frac{s3+s4}{2} - \frac{s1+s2}{2}}{l} \right) \quad (1.1)$$

$$roll = \arctan \left(\frac{\frac{s1+s4}{2} - \frac{s2+s3}{2}}{\frac{d+e}{2}} \right) \quad (1.2)$$

No entanto, foram identificadas limitações no estado atual da solução e que se enumeram:

- Isolamento à intempérie ineficiente dos sensores: apenas um estava ainda operacional.
- Cabo de transmissão da leitura demasiado longo e sujeito a ruído, visto que o sinal se transmite em diferença de potencial (analógico).
- Método de obtenção das orientações limitado: se um sensor falhar, todo o método falhará.

1.5 Estado da arte

Muitos são os trabalhos que necessitam das orientações do veículo para navegação, mas essa informação é escassa ou pouco esclarecida, pois esses projetos dão maior ênfase às metodologias usadas para a navegação.

Um sistema muito popular de medição da posição e orientação de veículos é o sistema integrado do sistema de posicionamento global (*Global Position System* GPS) e unidade de medição inercial (*Inertial Measurement Unit* IMU).

Os IMU convencionais, utilizados sobretudo em veículos aéreos ou navios, são relativamente dispendiosos e de grandes dimensões. Por norma, os IMU escolhidos são uma versão menos dispendiosa e mais compacta. Estes, apesar de terem uma precisão aceitável para posição estática, têm um erro acumulado muito grande, o que os torna ineficientes para medições durante longos períodos de tempo. Por outro lado, o GPS não tem erro acumulado, no entanto tem taxas de atualização baixas comparando com o IMU. A solução integrada dos dois torna-se popular, pois consegue-se o melhor de cada um deles: taxas de atualização elevadas e pouco erro acumulado. Os trabalhos [21], [14] e [11] usam este sistema integrado. Em geral para obter as orientações, através do método do plano horizontal, utilizam-se as taxas de velocidade angular, medidas através de três giroscópios, bem como a orientação inicial, que será integrada ao longo do tempo. O método de obtenção passa por, a cada instante, se incrementar a velocidade angular sofrida à orientação inicial e assim obter as orientações atuais.

Existem diversas representações para a orientação, como ângulos de *Euler*, Cossenos Diretores e Quaterniões. A representação dos Cossenos Diretores é a comumente usada para navegação inercial. O filtro de *Kalman* é um algoritmo matemático, que através da informação recolhida ao longo de um dado intervalo de tempo, permite estimar o valor de uma nova medida com um certo grau de precisão. Por vezes a solução adotada para a propagação das orientações ao longo do tempo utiliza um filtro de *Kalman*. A leitura das acelerações no IMU é extremamente afetada pela dinâmica do veículo, pois esta induz acelerações no sensor. No trabalho [14] foi usada a representação dos ângulos de *Euler* com relação mecânica entre acelerómetros e giroscópios. A equação usada para calcular as orientações foi a seguinte, eq. 1.3.

$$\begin{bmatrix} \dot{\phi} \\ \dot{\theta} \\ \dot{\psi} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & \sin(\phi)\tan(\theta) & \cos(\phi)\tan(\theta) \\ 0 & \cos(\theta) & -\sin(\theta) \\ 0 & \sin(\phi)\sin(\theta) & \cos(\phi)\cos(\theta) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} w_x \\ w_y \\ w_z \end{bmatrix} \quad (1.3)$$

Em que *Roll*, *Pitch* e *Yaw* correspondem a ϕ , θ e ψ respetivamente, e w_x , w_y e w_z correspondem às velocidades angulares nos respetivos eixos. Posteriormente, em [14] os autores ajustaram os valores da covariância no filtro de *Kalman* para melhorar os resultados das leituras realizadas pelo IMU e obter assim um valor para as orientações mais próximo da realidade. No final, acabam por concluir que o sistema é bastante estável, tendo praticamente eliminado o erro acumulado no IMU. Os resultados são bons quanto à posição e ao ângulo de *yaw* do veículo. No entanto no que diz respeito aos ângulos de *pitch* e *roll* o mesmo não pode ser afirmado, fig. 1.8. Por observação gráfica, verifica-se que o sistema não é capaz de obter, com precisão, as orientações do veículo, um dos objetivos fundamentais do trabalho que será desenvolvido. Sendo assim, não foi considerada esta metodologia no presente trabalho.

Em [21] é desenvolvido um método para conseguir integrar o sistema GPS/IMU num ambiente altamente dinâmico. A chave do sucesso deste método passa pela imunidade dos recetores GPS às acelerações externas. Se a dinâmica exterior exceder essa capacidade e o GPS perder o sinal, todo o sistema fica comprometido, devido ao facto da informação do GPS ser crucial para a correção da posição e da orientação no IMU. Naquele trabalho foram adquiridos recetores GPS capazes de funcionar com acelerações até 10g. Posteriormente implementando algoritmos foi possível explorar o sistema até acelerações de 50g. Esta metodologia, além de

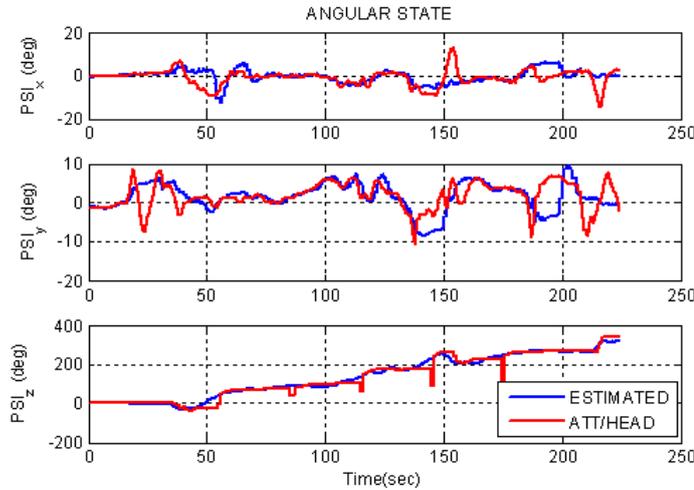


Figura 1.8: Resultados obtidos para as orientações no trabalho [14] .

necessitar de um recetor GPS de elevado custo, não é vantajosa pelo facto de o sistema ficar comprometido se o sinal GPS se perder. O sistema final a desenvolver deverá ser funcional sob condições tais como passagens em túneis ou dias de elevada nebulosidade.

Um sistema mais rigoroso baseado nos mesmos conceitos para obtenção da posição e orientação é o sistema Applanix, [7]. O Applanix consiste numa tecnologia com um algoritmo proprietário e um sistema de processamento de sinal para integrar a informação do recetor GPS e de IMU, obtendo assim, com elevada precisão, a posição e orientação do veículo. Por exemplo, o modelo Applanix POS LV 120 SPS [1], tipicamente usado em veículos terrestres, adquire dados a uma frequência de 200Hz e tem as seguintes precisões tabela 1.1.

Outage	Roll (graus)	Pitch (graus)	Heading (graus)	X (m)	Y (m)	Z (m)
0 sec.	0.20	0.20	0.25	3.0	3.0	5.0
10 sec.	0.21	0.21	0.40	4.0	4.0	5.2
30 sec.	0.22	0.22	0.60	6.0	6.0	5.5
60 sec.	0.25	0.25	0.80	9.0	9.0	6.0

Tabela 1.1: Precisões do sistema Applanix POS LV 120 SPS variáveis no tempo [1].

Na literatura são propostos vários métodos de obtenção das orientações por câmaras, monoculares ou *Stereo*. Em geral os sistemas com câmaras monoculares baseiam-se nos mesmos métodos, a calibração inicial é feita com o veículo parado e sobre estrada perfeitamente plana. Obtém-se a linha do horizonte que posteriormente servirá de comparação para o veículo em movimento [15]. Esta metodologia é útil em cenários de autoestrada mas não em ambiente urbano pois esta não é muito precisa devido às variações abruptas da estrada, curvas apertadas, lombas, entre outros.

Outra metodologia para calcular as orientações de veículos é utilizando câmaras *Stereo*, [18],[10] e [12]. Com essas câmaras é possível calcular a profundidade dos pontos através da sua disparidade. A disparidade está relacionada com a diferença da localização do mesmo objeto em imagens captadas por diferentes câmaras afastadas entre si uma distância conhecida.

O princípio base desta metodologia passa por obter uma nuvem de pontos 3D através da informação das duas imagens capturadas. Posteriormente, através de algoritmos, identificam-se, na nuvem de pontos, um padrão o mais próximo possível com um plano, ou, noutros casos, consideram que estatisticamente escolhendo pontos aleatórios estes têm maior probabilidade de se encontrarem no plano da estrada, método iterativo para estimar os parâmetros de um modelo matemático conhecido por *Random Sample Consensus*, RANSAC [5]. São obtidas as linhas de horizonte através dos planos calculados por um dos métodos. Esta metodologia não foi tida em conta no presente trabalho, porque os sistemas de visão exigem muito processamento e a taxa de dados é baixa. Caso o sistema final tenha uma taxa de dados muito baixa, fará com que todos os outros sistemas tenham taxas iguais ou inferiores a essa, ou caso contrário poderão devolver leituras com base em orientações erradas, ou pouco precisas.

1.6 Escolha da metodologia

Assim, face às opções descritas, em alternativa, a solução que se propõe explorar é a da medição da distância entre diversos pontos da estrutura rígida do veículo e a estrada. A filosofia adotada passa por utilizar múltiplas unidades locais de medição (ULM) que comunicam com uma unidade central de interligação (UCI), que por sua vez disponibiliza a informação global para a unidade computacional do veículo, fig. 1.9. Em [13] foi utilizada uma metodologia similar, atualmente presente no ATLASCAR, cujos os resultados obtidos foram promissores. Um sistema baseado nesta filosofia será robusto à variação da luminosidade bem como a outros problemas encontrados nos trabalhos anteriormente descritos. O custo e precisão final do sistema dependerá dos sensores utilizados para medição da distância entre diversos pontos da estrutura rígida do veículo e a estrada. No entanto o preço final de um sistema composto por sensores de baixo custo será inferior aos outros sistemas descritos.

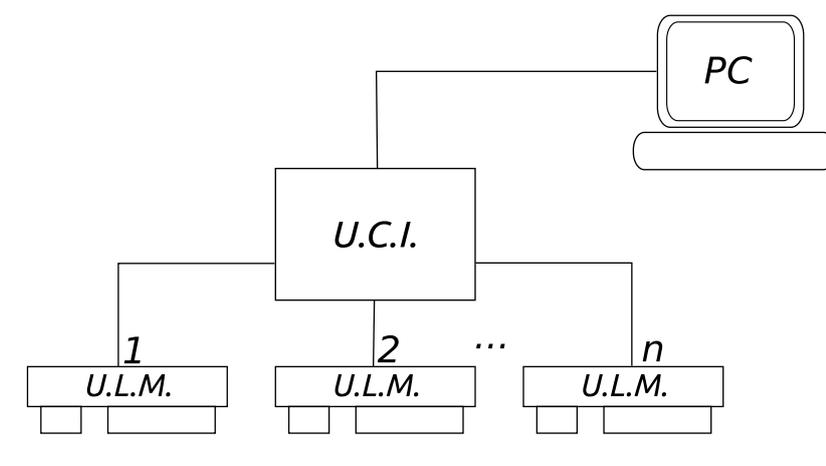


Figura 1.9: Esquema do sistema proposto.

1.7 Estrutura do documento

1.7.1 Estudo e caracterização dos sensores

Neste capítulo será explicado quais os sensores utilizados para medir a distância entre a estrutura rígida do veículo ao plano da estrada. Será também explicado como foi realizada a calibração e qual o sistema de referência escolhido. Qual a importância da necessidade de tratar o sinal enviado pelo sensor e o impacto dessas alterações. Com isto calcular as possibilidades destes sensores nas unidades locais de medição e as incertezas associadas.

1.7.2 Processamento e interpretação dos dados

Aqui será descrito qual o sistema de aquisição dos dados. Será abordado o método de cálculo do plano com os pontos de medição obtidos. Para tal são proposto dois métodos de obtenção do plano. Será também detalhado quais os resultados desses dois métodos e qual a incerteza obtida.

1.7.3 Infraestrutura do software

Neste capítulo será detalhado o que é o *Robot Operating System*, ROS. Também será explicado não só o software e interfaces desenvolvidas bem como o fluxo de informação entre os diversos módulos ROS desenvolvidos.

1.7.4 Testes e resultados

Por fim serão explicados os testes feitos com o sistema final, o seu percurso e os resultados obtidos. Será também descrito os testes à robustez do sistema feitos e quais os seus resultados.

1.7.5 Conclusões e trabalho futuro

É descrito as conclusões deste trabalho e possível trabalho a desenvolver no futuro.

1.7.6 Anexos

Neste capítulo está presente informação complementar mas não necessária para a compreensão do documento.

Capítulo 2

Estudo e caracterização dos sensores

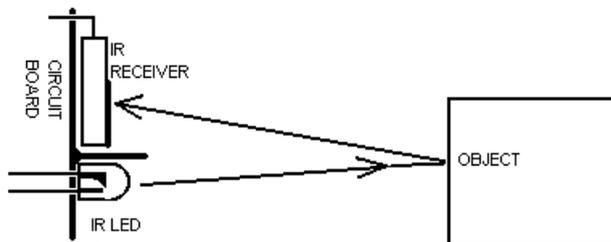
Antes de utilizarem os sensores para medir a distância da estrutura do veículo ao pavimento, será necessário tratar o sinal enviado pelo sensor, obter relação entre os valores lidos pelo sensor e a distância real, erros associados, entre outros. Este capítulo vai tratar toda a informação sobre o estudo e caracterização dos sensores utilizados.

2.1 Sensores de distância

Os sensores escolhidos para efetuar a medição da distância do veículo à estrada foram os sensores infravermelhos da *SHARP* GP2Y0A21YK0F, fig. 2.1. Este sensor é uma unidade de medição de distância, composto por uma combinação integrada de um sistema de detecção de posição (*position sensitive detector* PSD) e um diodo emissor de infravermelhos (*infrared emitting diode* IRED). O IRED emite luz no comprimento de onda infravermelho ($\lambda = 870 \pm 70$ nm) que posteriormente é detetada pelo PSD. Através de triangulação determina a distância e a restante eletrónica gera uma tensão correspondente, fig. 2.1. A precisão destes sensores não é um ponto forte, mas o seu baixo custo de aproximadamente 6 EUR, é uma grande vantagem relativamente a outros sensores. O sensor deve ser alimentado com uma diferença de potencial entre 4,5 e 5 V consumindo uma intensidade de corrente aproximadamente igual a 30 mA. Estes sensores medem num intervalo de 10 a 80 cm e, nesse intervalo, a tensão de saída varia em média 1,9 V. A frequência a que o sensor disponibiliza uma nova leitura é de 20 Hz.



(a) Sensor de medição de distância da *SHARP*.



(b) Sistema de medição do sensor *SHARP*.

Figura 2.1: Sensor *SHARP* GP2Y0A21YK0F.

2.2 Robot Fanuc M-6iB

Durante o trabalho será preciso recorrer a um sistema robusto que seja considerado referência, ou seja, os valores lidos por este sistema serão considerados os valores reais. Este sistema será preciso para proceder à calibração e a testes que exijam o conhecimento dos valores reais. O robô Fanuc M-6iB, fig. 2.2, possui seis eixos, de construção modular e é acionado por motores servo. Este robô é concebido para desempenhar uma variedade de aplicações industriais. Na tabela 2.1 estão presentes algumas especificações do robô. Este robô é bastante preciso, sendo portanto útil na calibração dos sensores e no estudo dos mesmos. Será referência de comparação nos testes a realizar. Anteriormente foi desenvolvido um módulo de comunicação TCP/IP para comunicar com o robô [16], conhecido por *RobCOM*. Este módulo tem várias funções predefinidas que permitem, por envio de mensagens TCP/IP, movimentar o robô, fazer leituras da posição, alterar memórias, entre outros. Com ajuda deste módulo é possível desenvolver programas em linguagem de programação *C* e *C++* que leiam os sensores e a posição do robô, e daí possibilitar a calibração dos sensores e gerar informação sobre precisão e exatidão.

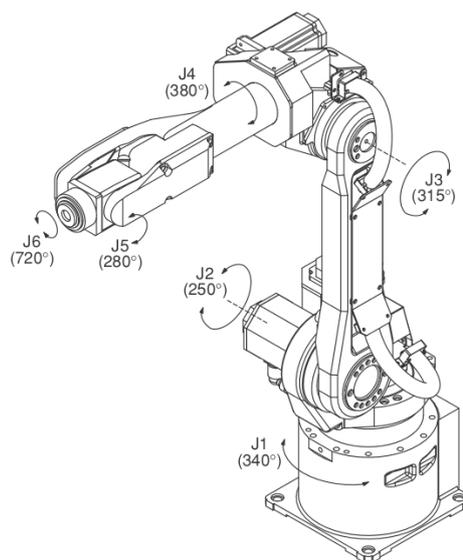


Figura 2.2: Juntas do robô Fanuc M-6iB.

Características		Velocidade	(graus/s)	Zona trabalho	(graus)
Eixos	6	Junta 1	200	Junta 1	340
Carga máxima	6 kg	Junta 2	200	Junta 2	250
Repetibilidade	$\pm 0,08$ mm	Junta 3	260	Junta 3	310
Alcance	951 mm	Junta 4	400	Junta 4	380
Vibração	$4,9 \frac{m}{s^2}$	Junta 5	400	Junta 5	280
Massa do robô	135 kg	Junta 6	720	Junta 6	720

Tabela 2.1: Tabela das característica do robô Fanuc M-6iB.

2.3 Aquisição do sinal

Para perceber qual a natureza dos dados recebidos pelo sensor da *Sharp*, foi feita uma primeira leitura dos dados do sensor posicionado a uma distância constante ao chão.

A fig. 2.3 apresenta, sob a forma de um histograma, a informação recolhida do sensor, adquirida com uma frequência de amostragem de 50Hz. Os dados obtidos apresentam-se sobre uma distribuição não *gaussiana*. O valor convertido em digital para a distância em causa deverá ser o valor com maior probabilidade estatística. A distribuição obtida tem dois nodos, um com maior probabilidade que outro mas o segundo nodo tem significado suficiente para não ser desprezado. Para perceber qual a natureza dos valores no segundo nodo foi analisado o gráfico de frequências obtido pelo método de *Welch*, fig. 2.4. A amostragem

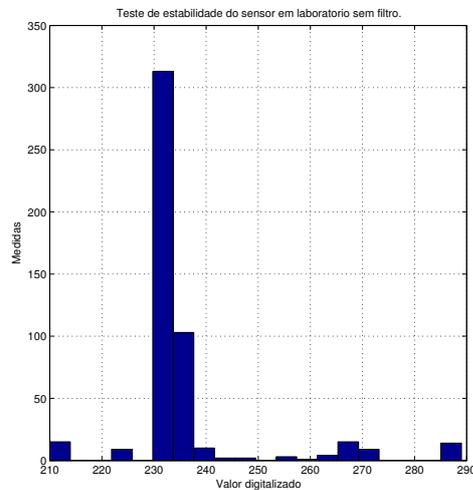


Figura 2.3: Resultados de 500 amostragens do sensor a uma distância constante ao chão.

foi realizada para uma distância constante, o que fará com que se obtenha uma frequência dominante aproximadamente igual a 0 Hz, componente DC. No entanto verificam-se alguns harmónicos com baixas frequências de origem desconhecida. Analisou-se o sinal analógico vindo do sensor num osciloscópio para concluir qual poderia ser a origem dos harmónicos. Após a análise do sinal no osciloscópio, verificou-se que, na verdade, o sinal sobreposto não era de baixa frequência mas sim com uma frequência na ordem dos 1000 Hz, fig. 2.5. Devido à limitação da frequência de amostragem, os sinais de baixas frequências que se sobrepunham eram, na verdade, problemas do fenómeno de interferência *aliasing* na amostragem, fig. 2.6. Ao contrário do esperado, o sensor não contém no seu circuito qualquer filtragem do sinal. Deste modo, o sinal final será a soma de vários sinais com diferentes frequências. Para eliminar a sobreposição de frequências não desejadas no sinal a amostrar, adicionou-se um filtro passa baixo ao sensor da *Sharp*.

Um filtro passa baixo é constituído por uma resistência e um condensador, fig. 2.7. A função transferência para este filtro é dada pela eq. 2.1. Através desta é possível obter a resposta em frequência eq. 2.2 bem como o seu módulo eq. 2.3. A expressão do ganho em dB para a frequência de corte é dada pela eq. 2.4, desenvolvendo a expressão obtem-se a expressão

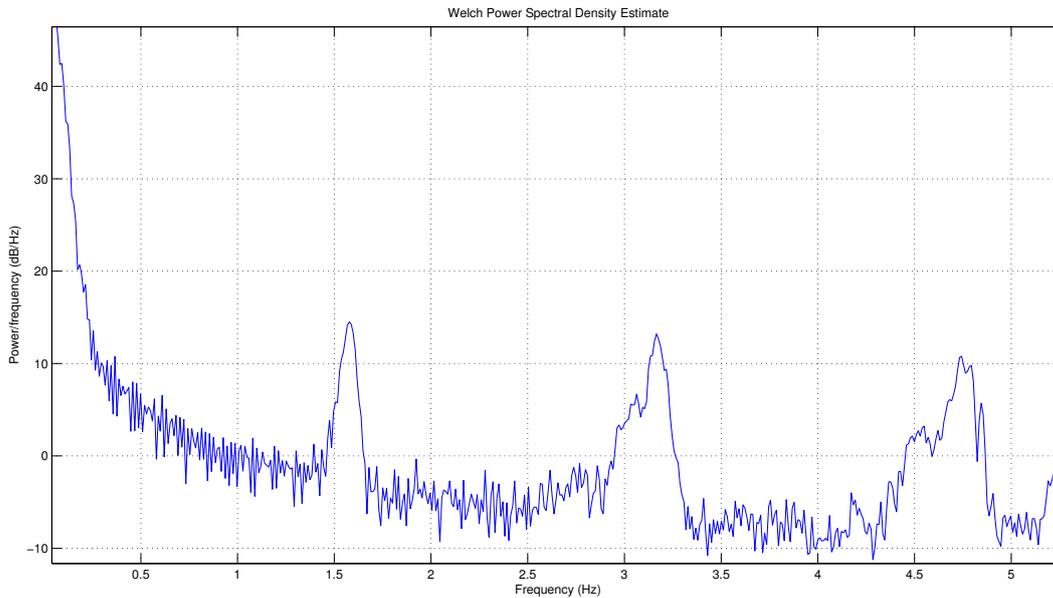
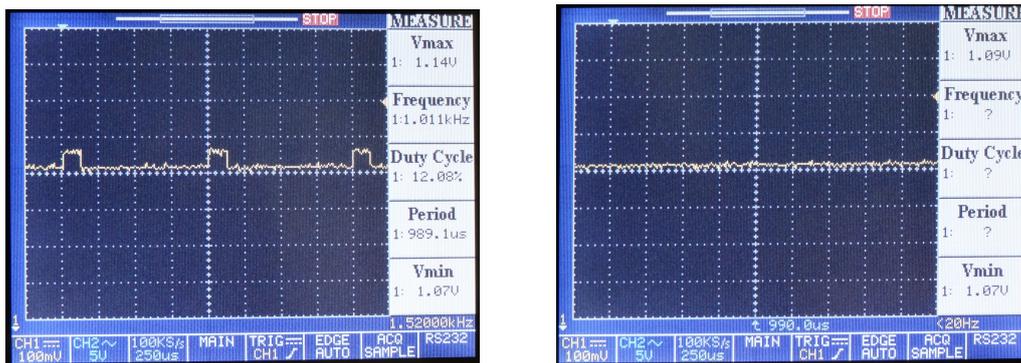


Figura 2.4: Gráfico de frequências existentes no sinal adquirido pelo sensor.



(a) Sem utilização do filtro passa baixo.

(b) Com utilização do filtro passa baixo.

Figura 2.5: Leitura do sinal analógico no osciloscópio.

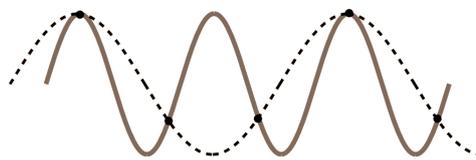


Figura 2.6: Problemas do fenómeno de interferência *aliasing*, o sinal amostrado é totalmente diferente do real.

para o cálculo da frequência de corte, eq. 2.5.

$$G(s) = \frac{X(s)}{Y(s)} = \frac{1}{1 + RCs} \quad (2.1)$$

$$G(jw) = \frac{1}{1 + jwRC} \quad (2.2)$$

$$|G(jw)| = \frac{1}{\sqrt{1 + (wRC)^2}} \quad (2.3)$$

$$20 \times \log_{10}(|G(jw)|) = -3dB \quad (2.4)$$

$$20 \times \log_{10}(|G(jw)|) = -3 \Rightarrow f = \frac{\sqrt{\frac{1}{10^{-0.3}} - 1}}{2\pi \times RC} \quad (2.5)$$

Em que R é o valor da resistência, C é o valor do condensador, ω é frequência angular ($\omega = 2\pi f$) e f é a frequência de corte.

Como $\sqrt{\frac{1}{10^{-0.3}}}$ é aproximadamente igual a 1, simplificando a expressão da frequência de corte, ter-se-á $f = \frac{1}{2\pi \times RC}$.

O filtro passa baixo escolhido será de primeira ordem, -20 dB por década, com uma frequência de corte de aproximadamente 20 Hz. Os valores obtidos para a resistência são de 1,8 k Ω e para o condensador são de 4,7 μ F. Estes valores foram obtidos por iteração de valores reais para a resistência e o condensador até obter um valor da frequência de corte aproximado a 20 Hz.

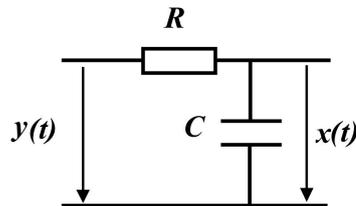


Figura 2.7: Esquema de um filtro passa baixo.

Os valores obtidos utilizando o filtro passa baixo, mas mantendo as mesmas condições, estão presentes no histograma da fig. 2.8. Os dados obtidos apresentam-se sobre uma distribuição *gaussiana*, sendo possível determinar qual o valor convertido em digital com maior probabilidade para a distância em causa.

2.4 Circuito da unidade local de medição (ULM)

A unidade local de medição, ULM, será responsável por medir a distância da estrutura rígida do veículo ao plano da estrada em cada instante. Assim sendo, o sinal da ULM terá de ser o melhor possível, pois este sinal será a base da metodologia utilizada.

Em eletrônica, o ruído é uma flutuação indesejada num sinal elétrico. O ruído sobrepõe-se ao sinal que se pretende amostrar, eventualmente impedindo uma leitura correta do sinal. Os sinais em corrente elétrica imposta não são tão suscetíveis ao ruído, porque o ruído em geral é uma diferença de potencial. Através do uso de amplificadores eletrônicos, cria-se um circuito que à saída tenha uma variação de corrente, em vez de uma diferença de potencial. Para melhorar o sinal vindo da unidade local de medição, incluiu-se um conversor tensão-corrente

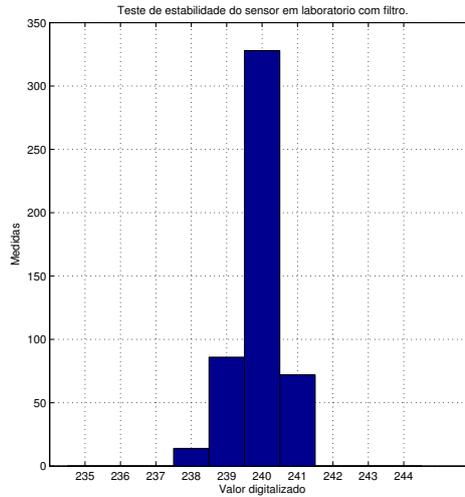


Figura 2.8: Resultados de 500 amostragens do sensor, utilizando um filtro passa baixo, a uma distância constante ao chão.

no circuito da ULM. Foi estudada uma solução concetual para o circuito, este deverá ter o sensor infravermelho e um conversor tensão-corrente. A solução final do circuito está presente na fig. 2.9 e fig. 2.10.

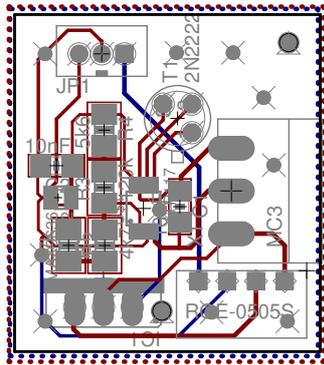
O circuito desenvolvido continha um conversor tensão-corrente compostor por um transístor bipolar (2N2222), um amplificador de deteção de corrente (XTR117) e um amplificador operacional (MAX9636). Continha também um regulador de tensão (OKI-78SR), que regulava a tensão de 14 volts para 5 volts, e um conversor DC/DC isolado (ROE-0505S).

O circuito da ULM foi colocado numa caixa com IP 44, para aumentar a resistência à intempérie, e fixa ao veículo através de um íman de neodímio, NdFeB, íman este que foi colado na caixa. O íman poderia trazer problemas ao sistema por causa da indução eletromagnética. A indução eletromagnética é o fenómeno que origina uma força eletromotriz num condutor exposto a um campo magnético variável, ou num condutor móvel exposto a um campo magnético estático. Como o circuito e o íman estão fixos à caixa e não existe qualquer movimento relativo entre eles, logo, à partida não se irão verificar problemas de indução eletromagnética.

O íman e o circuito tiveram de ficar afastados pois observou-se que se estivessem relativamente próximos, ao colocar a caixa numa superfície metálica os valores lidos eram incorretos e o sistema passaria a consumir mais corrente. Pressupôs-se que, ao aproximar a caixa de elementos metálicos, o campo magnético do íman seria alterado de tal forma que saturariam as ferrites do conversor DC/DC fazendo com que este não funcione corretamente. Esta suposição assenta no facto de, passado alguns minutos com este problema, o conversor DC/DC começava a ter comportamento anormal, consumindo mais corrente e não convertendo para a tensão correta acabava por se queimar. Com apenas 2 cm de afastamento entre o circuito e o íman esse efeito deixou de se verificar.

2.5 Calibração dos sensores

A calibração é o processo que permite estabelecer a relação entre os valores obtidos pelo sistema de medição e os valores representados por uma medida de referência. A utilização



(a) Esquema da placa.



(b) Produto final para a ULM.

Figura 2.9: Circuito da unidade local de medição.

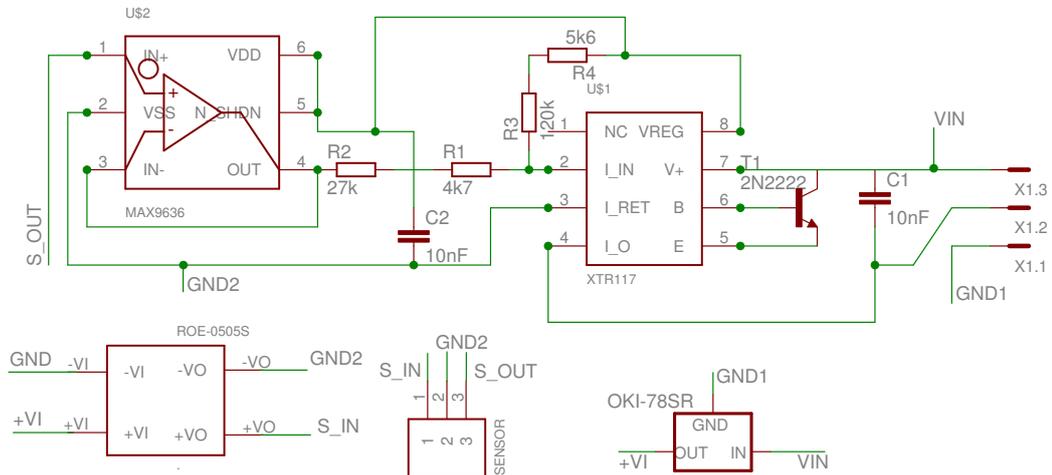


Figura 2.10: Esquema elétrico do circuito da unidade local de medição.

do robô Fanuc M-6iB terá grande importância no método de calibração adotado. O método aplicado consiste em efetuar 500 leituras de 10 em 10 mm no intervalo de leitura dos sensores infravermelhos: 10 a 80 cm. O valor de referência é dado pela leitura da posição do robô Fanuc.

Os dados obtidos estão presentes na fig. 2.11 em que, para cada centímetro, os valores lidos são os pontos vermelhos, a média está representada a azul, e o desvio padrão a preto.

Visualmente, os pontos obtidos parecem estar distribuídos segundo uma exponencial. Para obter a melhor curva de calibração comparou-se o coeficiente de correlação, também chamado de R^2 , e variância de cada curva de calibração obtida de modo a escolher a curva com menor erro e melhor correlação.

O coeficiente de correlação é uma medida de concordância do modelo estimado em relação aos valores observados. O R^2 varia entre 0 e 1, indicando o grau de credibilidade do modelo ao conseguir explicar os valores observados. Quanto maior o R^2 , mais credível é o modelo,

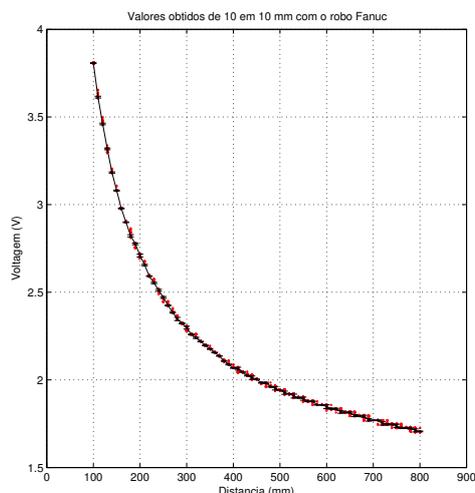


Figura 2.11: Gráfico dos resultados obtidos para calibrar o sensor 0.

ou seja, melhor ele se ajusta à amostra. A variância é uma medida que avalia a diferença entre um valor estimado e o valor observado. Assim, quanto menor for a variância, melhor será a aproximação dos valores estimados com os valores observados. Com estes dois critérios podemos comparar os valores estimados e o comportamento da curva estimada. A melhor curva de calibração será aquela que tiver menor variância e maior coeficiente de correlação.

Na fig. 2.12 estão presentes as curvas de calibração obtidas para um dos sensores.

Como se pode observar na fig. 2.12 os melhores resultados são relativos a uma função que é composta por uma soma de exponenciais, tendo esta curva, o maior coeficiente de correlação e a menor variância. A equação genérica da curva é dada pela eq. 2.6.

$$D = a \times e^{b \times V} + c \times e^{d \times V} \quad (2.6)$$

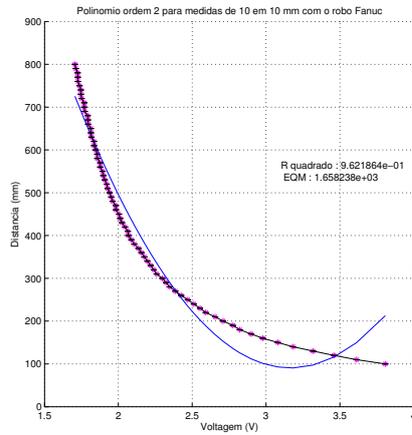
Em que D é a distância em centímetro e V é a diferença de potencial em volt e a,b,c e d são os coeficientes resultantes do "Fitting" dos pontos obtidos para a expressão.

O mesmo método de calibração foi aplicado a todos os outros sensores. Os gráficos relativos às calibrações dos outros sensores encontram-se em anexo.

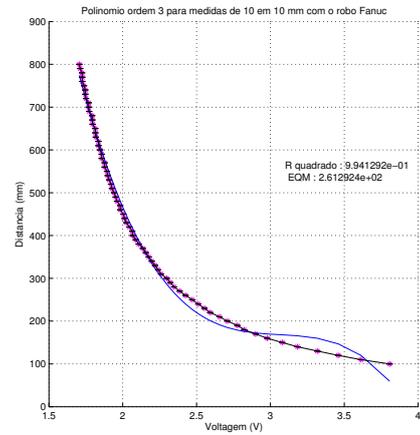
Os valores obtidos para o coeficiente de correlação, para a variância e os diversos coeficientes da exponencial dos diferentes sensores encontram-se na tabela 2.2. O sensor seis foi apenas calibrado até 600 mm em vez dos 800 mm. O sensor deverá ter algum defeito de fabrico ou algum problema eletrônico que o impede de medir para além de 600 mm.

2.6 Teste da resposta com sinusoides

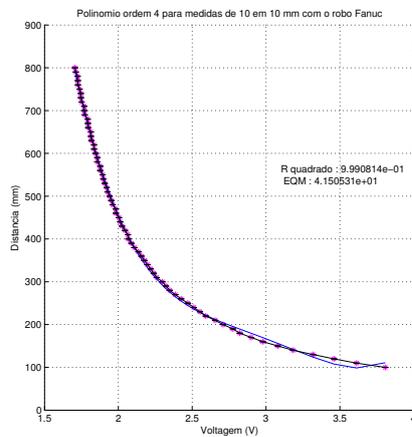
Depois de calibrar os sensores, será necessário elaborar um teste à sua resposta e precisão. Colocando o robô Fanuc num movimento circular, segundo um plano vertical, a leitura da altura será uma senoide. Pretende-se assim, através das sinusoides, calcular erros de medição dos sensores considerando o robô Fanuc como referência. Na fig. 2.13 estão representados, a azul, os valores da distância ao chão lidos a partir do robô Fanuc e a vermelho a mesma distância lida pelo sensor. O mesmo teste foi elaborado para todos os sensores, cujos resultados gráficos se encontram em anexo. Os valores do coeficiente de correlação e da variância estão



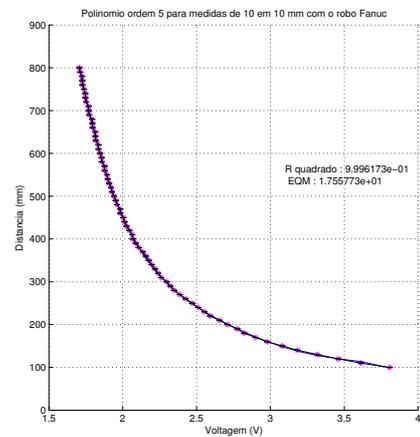
(a) Polinómio de ordem 2.



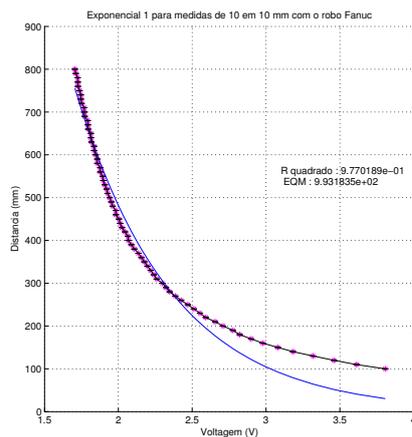
(b) Polinómio de ordem 3.



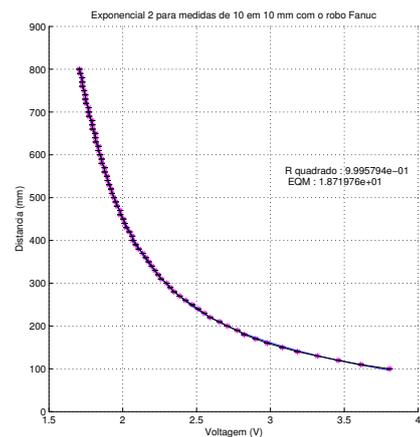
(c) Polinómio de ordem 4.



(d) Polinómio de ordem 5.



(e) Exponencial do tipo 1.



(f) Exponencial do tipo 2.

Figura 2.12: Curvas de calibração obtidas para o sensor 0.

presentes na tabela 2.3. Como se pode verificar, o valor do sensor número seis é o que tem

Sensor	Coef. correlação	Variância (mm)	a	b	c	d
0	0.99957	18.71976	1.52×10^5	-3.38×10^0	8.95×10^2	-5.85×10^{-1}
1	0.99939	26.77874	5.75×10^5	-4.12×10^0	1.11×10^3	-6.65×10^{-1}
2	0.99951	11.38799	7.99×10^5	-4.31×10^0	1.23×10^3	-7.13×10^{-1}
3	0.99954	20.27606	2.31×10^5	-3.65×10^0	1.01×10^3	-6.36×10^{-1}
4	0.99952	21.15612	3.91×10^5	-3.98×10^0	1.11×10^3	-6.43×10^{-1}
5	0.99950	22.11836	5.20×10^5	-4.20×10^0	1.13×10^3	-6.67×10^{-1}
6	0.99927	17.11551	4.24×10^6	-3.38×10^0	1.40×10^3	-7.20×10^{-1}
7	0.99869	57.55453	3.98×10^8	-7.77×10^0	2.05×10^3	-8.37×10^{-1}

Tabela 2.2: Valores do coeficiente de correlação, da variância e dos coeficientes para os diversos sensores.

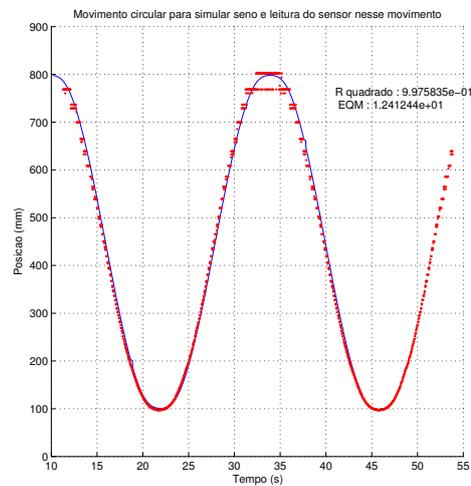


Figura 2.13: Função sinusoidal, a azul dados de posição do robô Fanuc e a vermelho os dados de posição do sensor 0.

pior resultado. Isto deve-se ao facto de a calibração do mesmo ter apenas ocorrido até valores de 600 mm em vez dos habituais 800 mm.

Sensor	Coef. correlação	Variância (mm)
0	0.9975	12.4124
1	0.9946	17.7651
2	0.9707	41.8933
3	0.9946	17.7939
4	0.9941	19.4234
5	0.9984	09.7736
6	0.8788	85.0028
7	0.9958	15.9660

Tabela 2.3: Valores do coeficiente de correlação e da variância para os diversos sensores.

2.7 Teste de interferência

Com objetivo de usar mais do que um sensor para efetuar uma leitura local, foi conduzido um teste com dois sensores lado a lado, emitindo e recebendo ao mesmo tempo. Na fig. 2.14 pode-se observar os resultados desse teste. A azul está a leitura da distância do robô Fanuc, a verde e vermelho, os dois sensores. A partir de 55 cm, a distância é tal que permite que os dois sensores tenham ângulo suficiente para interferirem mutuamente. Como se pode ver pela fig. 2.14, os valores a partir de 55 cm são aleatórios. Por este motivo, não foi adicionado outro sensor na unidade local de medição.

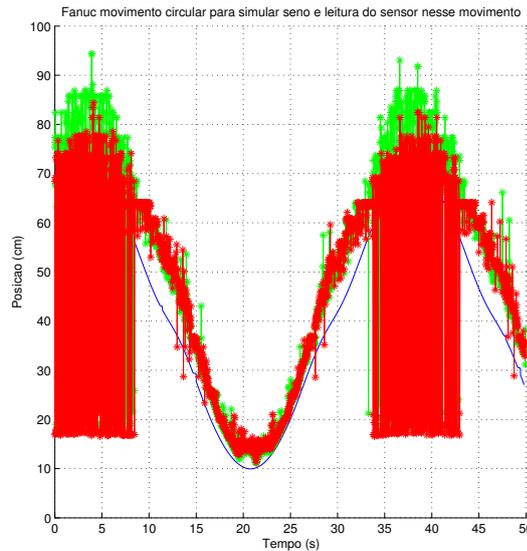


Figura 2.14: Resultados dos testes de interferência.

2.8 Erros associados e precisão dos sensores

Todos os equipamentos de medição têm um erro associado. Por norma, quanto menor for o erro do equipamento, mais dispendioso será o equipamento. Sensores como os da *Sharp*, com um custo de aproximadamente 6 EUR, competem no mercado pelo baixo preço e não pelas suas elevadas precisões. Por este motivo, o sensor é simplesmente composto por um emissor de infravermelhos e um recetor. Como já foi referido, para melhorar as potencialidades destes sensores foi feito um estudo exaustivo de caracterização dos mesmos e foram implementadas algumas soluções para proteger o sinal.

Através dos valores obtidos para a resposta dos sensores, tabela 2.3, foi calculado o desvio padrão de cada um dos sensores. O intervalo de mais ou menos um desvio padrão em relação à média abrange aproximadamente 68% dos valores amostrados, com duas vezes o desvio padrão é possível abranger 95%.

Na tabela 2.4 estão presentes os valores do desvio padrão para cada sensor e a incerteza de cada sensor. Esta será igual a mais ou menos duas vezes o valor do desvio padrão, ($\pm 2 \times \sigma$), tendo assim um intervalo de confiança de 95%.

Existem equipamentos industriais com melhores desempenhos, como o sistema de medição da *Sick* DT20-P130B1080[3], com uma incerteza de ± 4 mm. Estes têm em média uma

Sensor	Desvio padrão (mm)	Incerteza (mm)
0	3.5231	± 07.0462
1	4.2149	± 08.4298
2	6.4725	± 12.9450
3	4.2153	± 08.4306
4	4.4072	± 08.8144
5	3.1263	± 06.2526
6	9.2197	± 18.4394
7	3.5957	± 07.1914

Tabela 2.4: Valores do desvio padrão e da incerteza para os diversos sensores.

incerteza 2,5 vezes menor, no entanto o seu custo aproximado é de 486 EUR, ou seja, com um preço 81 vezes superior relativamente aos sensores utilizados. O desempenho e resistência dos sensores da *Sharp* são, por norma, inferiores aos dos sensores industriais, no entanto os resultados obtidos após o estudo e caracterização dos mesmos são bastante fiáveis tendo em consideração o preço dos mesmos.

Capítulo 3

Processamento e interpretação dos dados

3.1 Aquisição do sinal

No capítulo anterior foi descrita a caracterização dos sensores de infravermelhos. No entanto, para recolher informação é necessário um sistema de aquisição de sinal.

3.1.1 Arduino

O *Arduino* é uma plataforma eletrónica com base em *hardware* e *software* de fácil utilização. A ele é possível ligar múltiplos sistemas, tais como sensores, tanto analógicos como digitais, placas de comunicação, entre outros. Neste trabalho, foi utilizado um *Arduino* nano, fig. 3.1, composto por um microcontrolador ATmega328, com oito entradas analógicas, memória *Flash* de 32 kB, SRAM de 2 kB, EEPROM de 1kB, entre outros. Pretende-se que o *Arduino* receba a informação dos sensores, e em seguida transforme o sinal analógico em digital, enviando a informação relativa a cada sensor para a unidade computacional do veículo.

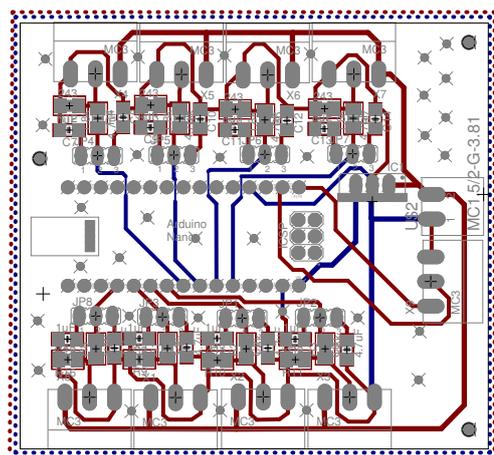


Figura 3.1: *Arduino* nano utilizado no trabalho.

3.1.2 Circuito da unidade central de interligação (UCI)

A unidade central de interligação será responsável por receber a informação dos sensores e envia-la para a unidade computacional a bordo. O *Arduino*, nas suas entradas analógicas, lê apenas diferenças de potencial em relação ao seu ground. O sinal enviado pelos sensores é uma variação de corrente, este sinal deverá portanto, ser convertido em tensão. Através do uso de uma resistência, o sinal terá sido convertido para tensão. No entanto, como foi

demonstrado no capítulo anterior, este sinal necessita de ser filtrado. Assim sendo, o circuito da unidade central de interligação terá de ser composto não só por um *Arduino* mas também pelas resistências e por os filtros passa baixo. Deverá incluir fichas para ligar aos sensores, uma entrada para alimentação de todo o sistema e uma ficha ligada aos pinos de comunicação para ligar à unidade computacional do veículo. Na fig. 3.2 e fig. 3.3 está representado o circuito da unidade central de interligação.



(a) Esquema da placa.



(b) Produto final para a UCI.

Figura 3.2: Circuito da unidade central de interligação.

3.2 Métodos de obtenção das orientações

Para obter as orientações finais, é preciso implementar um método de interpretação dos dados adquiridos pelo *Arduino*. A metodologia escolhida para obter as orientações passa por calcular um plano com base nos dados adquiridos pelos sensores. O plano obtido será comparado com um plano de calibração pré-definido, obtendo-se assim as orientações do veículo. O plano de calibração será um plano obtido através da informação proveniente dos sensores na situação em que o veículo está paralelo ao plano da estrada. Um plano necessita de três pontos para ser definido, mas neste caso existem mais que três pontos de medição. Como o número de sensores pode variar, o método de obtenção das orientações deverá adaptar-se de modo a funcionar com um número de sensores variável. Propôs-se assim estudar qual seria a melhor forma de calcular o plano que melhor se adequa aos pontos obtidos pelos sensores.

3.2.1 Método do plano médio

Uma forma possível de calcular o plano é através da média dos planos de três pontos obtidos, considerando diferentes combinações: Consideram-se as diferentes combinações, acumulando os valores dos diferentes coeficientes de cada plano em cada interação, para posteriormente fazer a média dos coeficientes. O número de combinações é dado pela eq. 3.1.

$$C_s^n = \frac{n!}{s!(n-s)!} \quad (3.1)$$

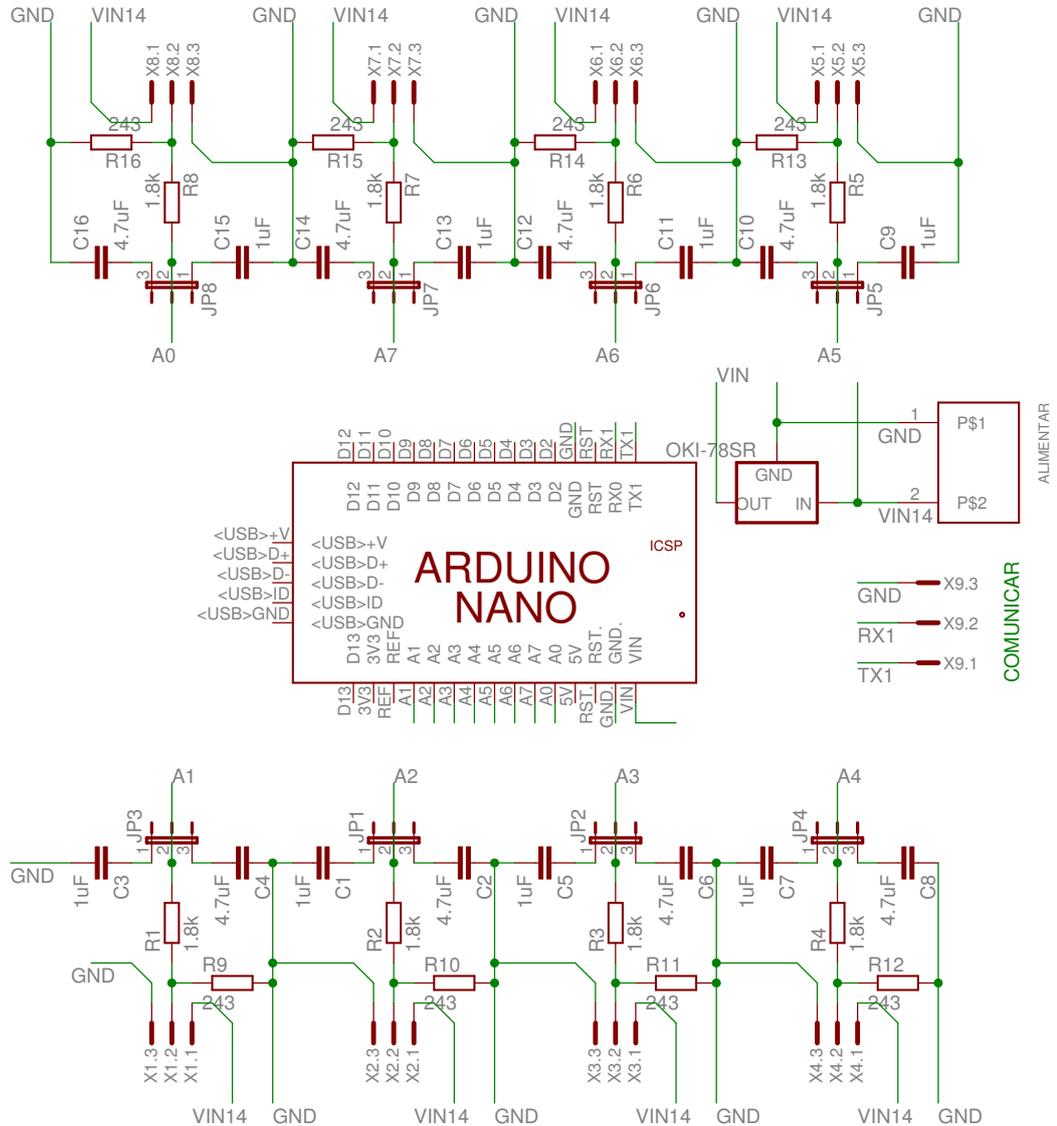


Figura 3.3: Esquema elétrico do circuito da unidade central de interligação.

Em que n será o número de sensores e s será igual a 3, pois são precisos 3 pontos para definir o plano.

Assim sendo, e com base na equação do plano, eq. 3.2, é possível criar um sistema de equações, eq. 3.3, para calcular os valores de $\frac{A}{D}$, $\frac{B}{D}$ e $\frac{C}{D}$. Por fim, o valor de D será calculado com base nas eq. 3.4 e eq. 3.5, visto que o coeficiente D representa um *offset* do plano em z .

$$Ax_i + By_i + Cz_i = D \Leftrightarrow \frac{A}{D}x_i + \frac{B}{D}y_i + \frac{C}{D}z_i = 1 \quad (3.2)$$

Em que x_i , y_i e z_i são valores de x, y e z de qualquer ponto pertencente ao plano com os coeficientes A, B, C e D.

$$\begin{bmatrix} x_1 & y_1 & z_1 \\ x_2 & y_2 & z_2 \\ x_3 & y_3 & z_3 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \frac{A}{D} \\ \frac{B}{D} \\ \frac{C}{D} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \end{bmatrix} \quad (3.3)$$

Em que x_i e y_i são as coordenadas no sensor i e z_i é a leitura realizada.

$$z_i = -\frac{A}{C}x_i - \frac{B}{C}y_i = -\frac{A}{C}x_i - \frac{B}{C}y_i \quad (3.4)$$

Em que z_i é o valor da cota para um ponto i contido no plano com os coeficientes A, B e C mas D ainda não definido.

$$D = z_p - z_i \quad (3.5)$$

Em que z_p é o valor real obtido pelo sensor e z_i é o valor calculado através equação, eq. 3.4, em que z_i e z_p têm as mesmas coordenadas x e y.

Na fig. 3.4 está presente uma ilustração do método do plano médio para quatro pontos.

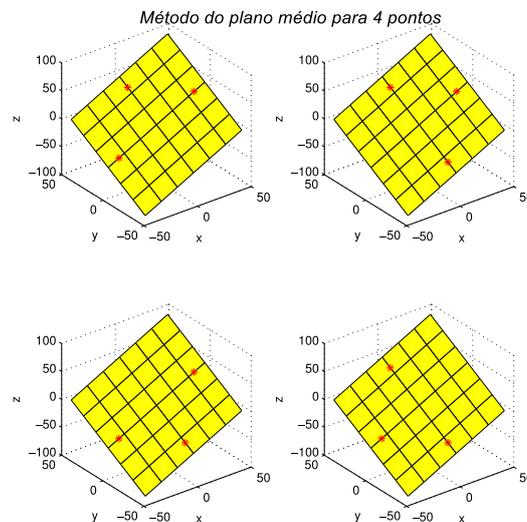


Figura 3.4: Esquema ilustrativo do método do plano médio para quatro pontos.

3.2.2 Método da pseudo-inversa

Outra forma possível para obtenção do plano seria através da equação do plano, eq. 3.2, criando um sistema de equações, eq. 3.6, para todos os pontos. No entanto, a matriz não é invertível pois não é quadrada, logo é necessário aplicar uma pseudo-inversa para calcular a solução do sistema de equações. Utilizou-se a pseudo-inversa de *Moore-Penrose* [20] dada pela

eq. 3.7 para calcular os coeficientes do plano.

$$\begin{bmatrix} x_1 & y_1 & z_1 \\ x_2 & y_2 & z_2 \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ x_n & y_n & z_n \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \frac{A}{D} \\ \frac{B}{D} \\ \frac{C}{D} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ \vdots \\ 1 \end{bmatrix} \quad (3.6)$$

$$[A] \times [x] = [B] \Leftrightarrow [x] \approx ([A^T] \times [A])^{-1} \times [A]^T \times [B] \quad (3.7)$$

Por fim, o valor de D será calculado com base nas mesmas equações utilizadas anteriormente, eq. 3.4 e eq. 3.5.

Com os coeficientes do plano é possível calcular as orientações do plano em relação ao sistema de coordenadas, fig. 3.5. O vetor \vec{n} é normal ao plano, eq. 3.8, e, por sua vez, normal aos vetores que passam pelos pontos p_1 , p_3 e p_2 , p_3 .

$$\vec{n} = (A, B, C) \quad (3.8)$$

Em que A, B e C são coeficientes da equação do plano.

Então, o produto interno entre o vetor \vec{n} e um vetor contido no plano será sempre igual a zero, pois estes são perpendiculares. Um vetor possível de obter e contido no plano é o vetor que passa pelo ponto de interseção do plano com o eixo z, (0,0,d), e o ponto de interseção do plano com um dos outros eixos, ($l_p, 0, 0$) ou ($0, l_r, 0$), conforme o ângulo que se pretenda calcular, fig. 3.5. Assim sendo, o valor de l_p e l_r é dado pela eq. 3.9 e pela eq. 3.10. Com estes valores será então possível calcular os ângulos de *pitch* e *roll* por trigonometria, como se pode observar na fig. 3.5, em relação ao sistema de coordenadas, eq. 3.11 e eq. 3.12.

$$((l_p, 0, 0) - (0, 0, d)) \cdot \vec{n} = 0 \Leftrightarrow a \times l_p - c \times d = 0 \Leftrightarrow l_p = \frac{cd}{a} \quad (3.9)$$

$$((0, l_r, 0) - (0, 0, d)) \cdot \vec{n} = 0 \Leftrightarrow b \times l_r - c \times d = 0 \Leftrightarrow l_r = \frac{cd}{b} \quad (3.10)$$

Em que a, b, c e d são coeficientes da equação do plano A, B, C e D respetivamente.

$$pitch = \arctan\left(\frac{d}{l_p}\right) \quad (3.11)$$

$$roll = \arctan\left(\frac{d}{l_r}\right) \quad (3.12)$$

Como as posições dos sensores podem variar dependendo da colocação, é fundamental calibrar o sistema. Por exemplo, se um sensor ficar colocado numa posição mais elevada, o plano calculado com o veículo paralelo ao plano da estrada terá um ângulo em relação ao sistema de coordenadas. Para que este erro não ocorra será necessário que, a cada instante, as orientações de calibração sejam subtraídas às orientações calculadas.

Na fig. 3.6 está presente uma ilustração do método da pseudo-inversa para quatro pontos.

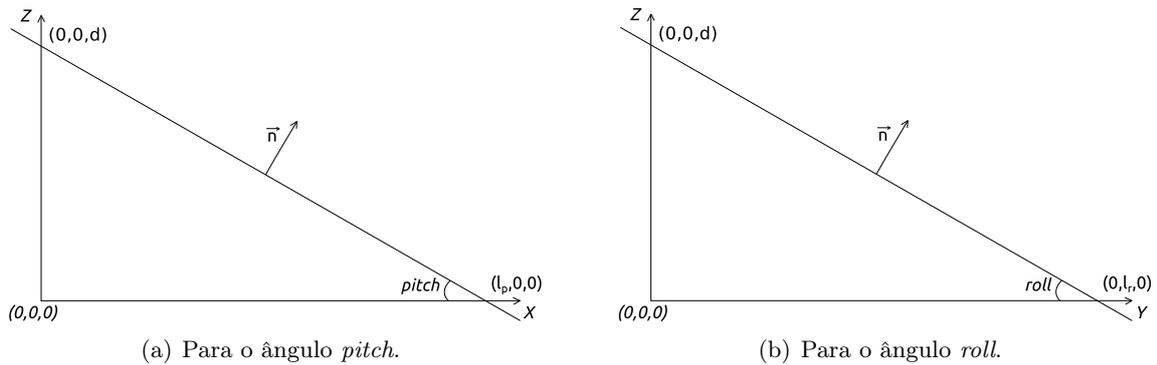


Figura 3.5: Esquema para o calculo dos ângulos de *pitch* e *roll*.

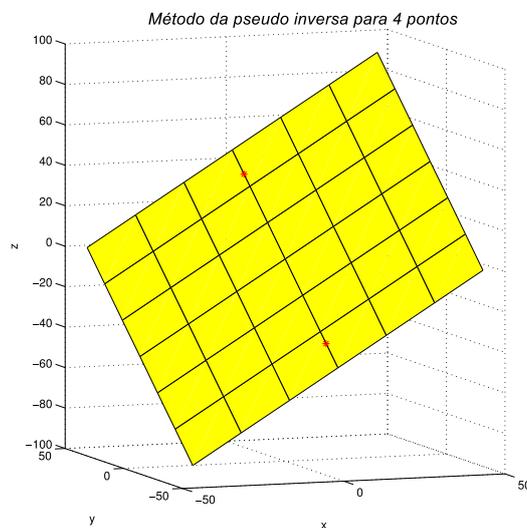


Figura 3.6: Esquema ilustrativo do método da pseudo-inversa para quatro pontos.

3.3 Simulação do sistema em movimentos definidos

Para testar qual será o melhor método a utilizar, recorreu-se ao robô Fanuc e conduziu-se um teste em que o robô faz uma série de movimentos definidos. Ao mesmo tempo foram lidos os sensores e a posição do robô Fanuc. A leitura da posição do robô Fanuc é referência para o teste. Por fim, calculou-se o erro de cada um dos métodos de obtenção do plano.

Antes de efetuar qualquer medição é necessário calibrar o sistema. Para tal, o robô Fanuc permaneceu estático, com os sensores a efetuar leituras, fig. 3.7. Os resultados relativos a cada ângulo encontram-se presentes na fig. 3.8 e a distribuição das leituras encontra-se presente nos histogramas da fig. 3.9. Como se pode verificar, o valor médio do *pitch* é de 0.218 ± 0.2 graus e o valor médio de *roll* é de $2,994 \pm 0.2$ graus. A distribuição das leituras tem um comportamento aproximado de uma distribuição *gaussiana*.

Não foi distinguido qual o melhor método de tratamento dos dados obtidos, devido ao facto de produzirem resultados idênticos.

O movimento definido para o teste com variação nas orientações foi o seguinte: em primeiro lugar, realizaram-se movimentos de translação, subida e descida da garra do robô, fig. 3.10, em

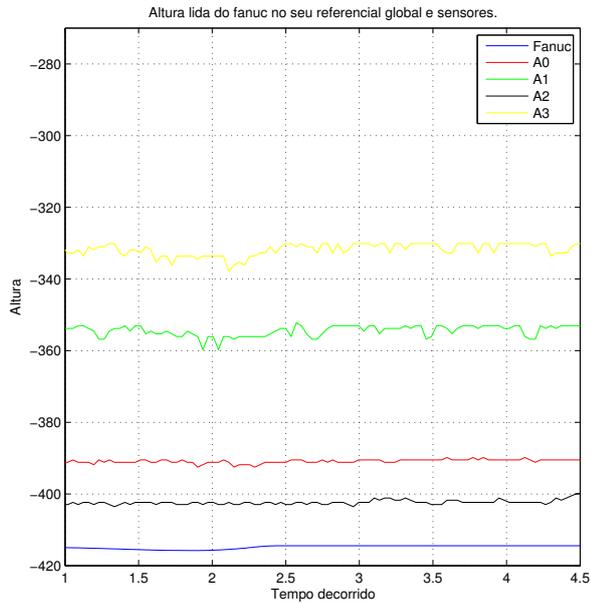
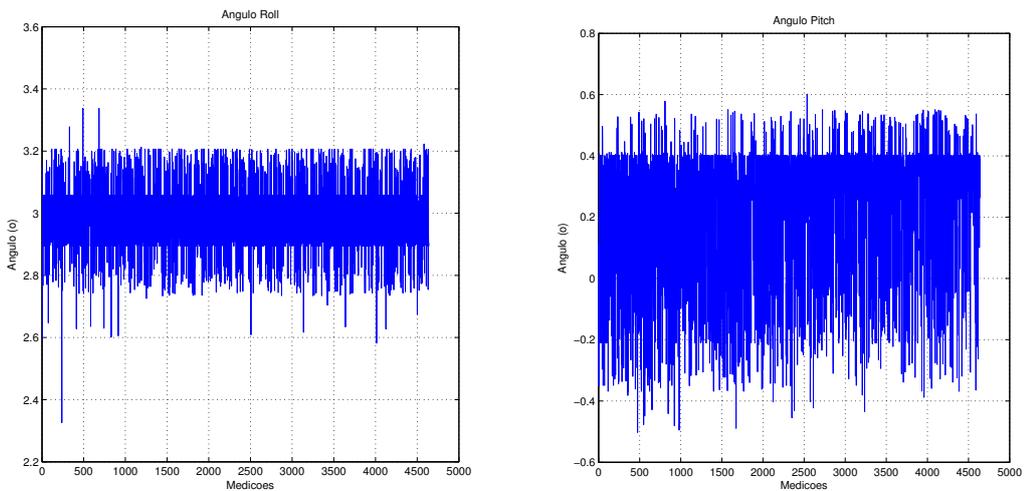


Figura 3.7: Leitura da altura do robô Fanuc e dos sensores sem movimento.



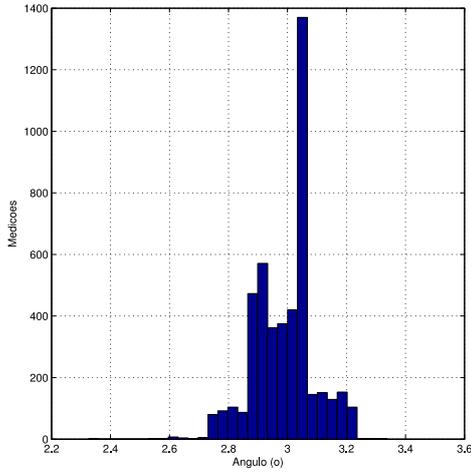
(a) Valores obtidos para o ângulo de *roll*.

(b) Valores obtidos para o ângulo de *pitch*.

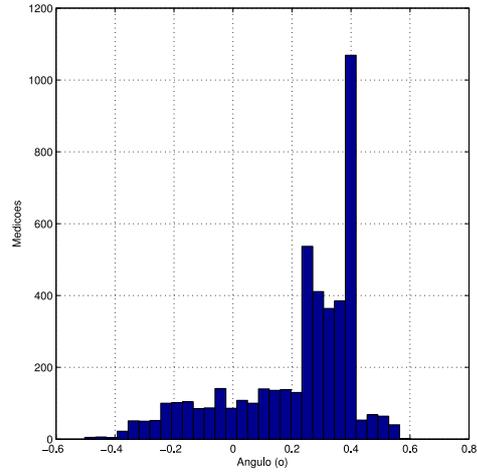
Figura 3.8: Valores das orientações obtidos nas leituras em posição estática.

seguida, movimenta-se rotacionalmente apenas num dos ângulos, seguido de um movimento de rotação no outro ângulo, fig. 3.10. Por fim, é realizado um movimento composto por translações e rotações.

Os resultados obtidos através do método que utiliza a média das combinações dos planos estão presentes na fig. 3.11. A azul encontra-se o valor da leitura da posição do robô Fanuc, a vermelho os resultados aplicando este método. No cálculo do ângulo de *pitch* obteve-se um coeficiente de correlação igual a 0,985 e uma variância de 0,489. Para o ângulo de *roll* obteve-se um coeficiente de correlação igual a 0,979 e uma variância de 0,531. Os resultados

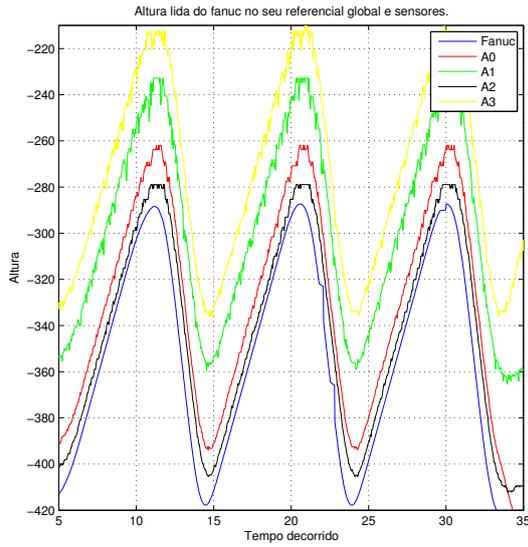


(a) Valores obtidos para o ângulo de *roll*.

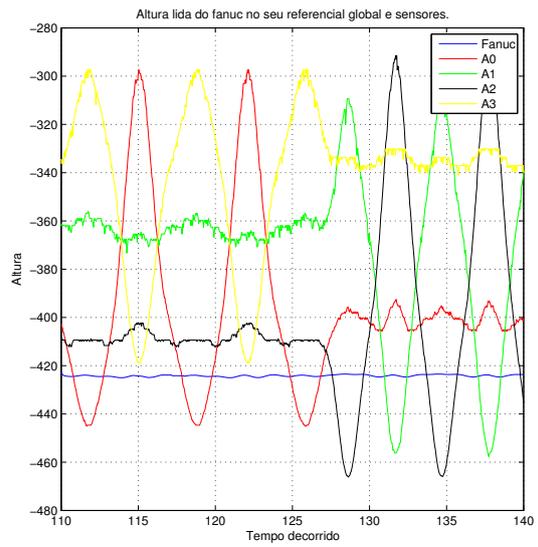


(b) Valores obtidos para o ângulo de *pitch*.

Figura 3.9: Distribuição das leituras feitas em posição estática.



(a) Leitura da altura do robô Fanuc e dos sensores num movimento de translação de subida e de descida.



(b) Leitura da altura do robô Fanuc e dos sensores num movimento rotacional em cada um dos ângulos separadamente.

Figura 3.10: Resultados da leitura de posição em z para o teste com variação nas orientações.

obtidos através do método com a pseudo-inversa estão presentes na fig. 3.12. À semelhança do que se passa na calibração, os métodos produzem resultados similares: no cálculo do ângulo de *pitch* obteve-se um coeficiente de correlação igual a 0,985 e uma variância de 0,489. Para o ângulo de *roll* obteve-se um coeficiente de correlação igual a 0,979 e uma variância de 0,531. Ambos os métodos permitem obter o plano que melhor se aproxima aos valores lidos. Os valores utilizados para os dois métodos foram os mesmo daí os resultados serem similares.

O fator decisivo entre os dois processos será o tempo de computação, e este depende do

número de operações a realizar. Para oito sensores as combinações necessárias de planos serão 56 e em cada combinação será resolvido um sistema de 3 equações, ou seja, 168 equações para resolver. Já no método que utiliza a pseudo-inversa será necessário resolver apenas 8 equações ligeiramente mais extensas. Por esta razão prevê-se que o método que utiliza a pseudo-inversa de *Moore-Penrose* seja mais rápido, sendo portanto este o método escolhido.

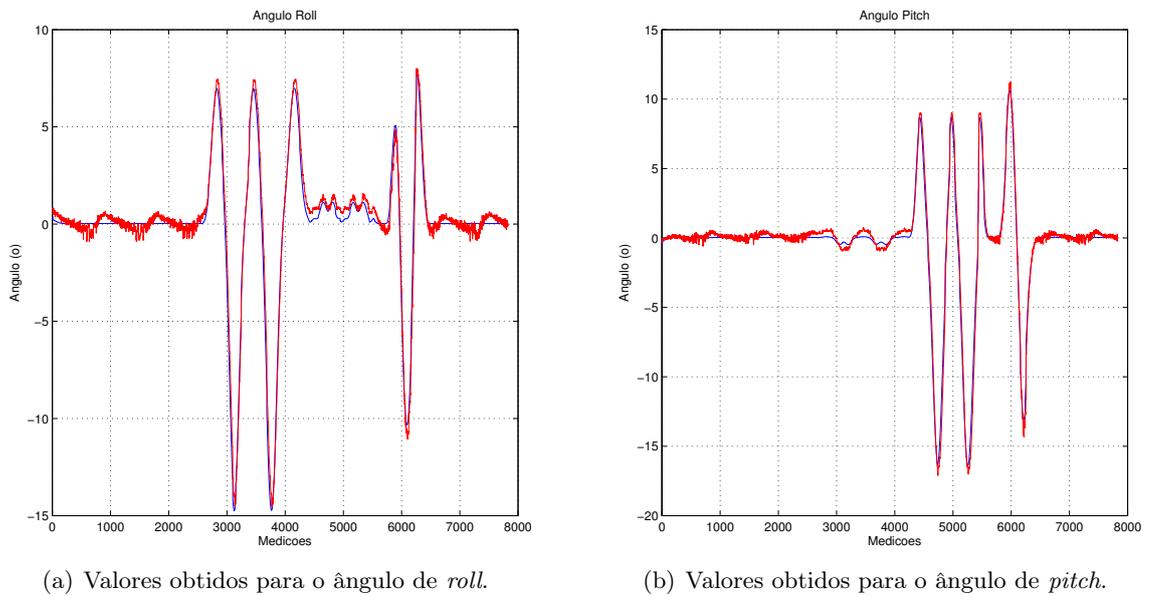


Figura 3.11: Resultados obtidos para o método da média das combinações dos planos.

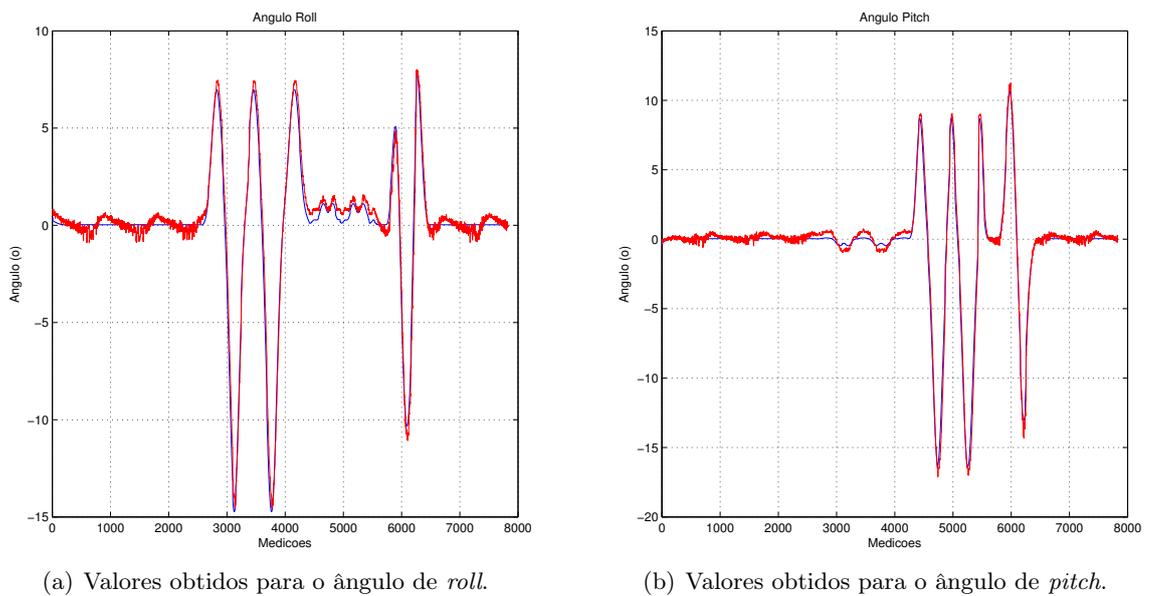


Figura 3.12: Resultados obtidos através do método com a pseudo-inversa.

3.4 Erros associados e precisão do método

Na tabela 3.1 estão presentes os valores obtidos para a variância, desvio padrão e incerteza, considerando mais uma vez a incerteza do sistema igual a duas vezes o desvio padrão, ou seja, intervalo de confiança de 95%.

Ângulo	Variância (°)	Desvio padrão (°)	Incerteza (°)
<i>Pitch</i>	0.489	0.6994	± 1.3988
<i>Roll</i>	0.531	0.7284	± 1.4568

Tabela 3.1: Valores obtidos da variância, do desvio padrão e da incerteza para o sistema final.

O sistema *Applanix*[1] tem uma incerteza de $\pm 0,25$ graus tanto para o *pitch* como para o *roll*. No entanto, o preço do sistema desenvolvido é muito inferior ao preço do sistema *Applanix* e este é o produto de referência no mercado de determinação da posição e orientação. Os resultados foram obtidos com base em apenas quatro sensores, espaçados entre si 700 mm mas poderiam ser melhorados se se aumentasse o espaçamento entre os sensores, de facto quanto maior for o espaçamento entre os sensores, maior será a precisão final do sistema, podendo assim atingir precisões superiores.

Capítulo 4

Infraestrutura do software

O *Arduino* envia a informação das leituras efetuadas pelos sensores para a unidade computacional a bordo. Esta unidade será responsável por gerir essa informação e obter as orientações relativas do veículo em movimento. Para tal recorreu-se a uma ferramenta denominada por *Robot Operating System* ou ROS.

4.1 *Robot Operating System* ROS

O ROS é um *framework* utilizado em desenvolvimento de softwares, em geral para aplicações em robótica, que permite reduzir bastante a complexidade dos projetos, devido à sua arquitetura modular, facilitando a compreensão e a deteção de erros. A arquitetura do ROS divide um grande projeto em pequenos módulos de aplicações específicas. Estes módulos podem ser reutilizados noutros projetos ou adquiridos numa biblioteca, focando assim o trabalho e o desenvolvimento naquilo que ainda não foi desenvolvido ou é realmente importante. Exemplo disso é a comunicação com *Arduino*, utilizando o módulo de comunicação serial anteriormente desenvolvido será possível focar esse tempo noutras tarefas.

Outra característica do ROS é permitir, dentro do mesmo projeto, diferentes linguagens de programação nos diversos módulos desenvolvidos. À partida cada módulo cria um nó. Este nó é um processo a correr que tem um identificador do processo, pid, conhecido para a gestão do ROS. Assim sendo, a comunicação entre processos é feita através de mensagens de estrutura predefinidas. Um nó envia uma mensagem através da publicação de um tópico e pode receber mensagens de outros nós através da subscrição dessa. Sendo assim, a troca de mensagens é simples, facilitando a comunicação entre diversos nós.

O ROS incluiu também ferramentas de monitorização e controlo de informação, tais como o Rviz. A simples publicação de um marcador na interface gráfica disponibilizada pelo ROS torna fácil a visualização, em tempo real, de todos os sistemas envolvidos no projeto.

4.2 Obtenção da informação dos sensores

Foi desenvolvido um módulo em linguagem C++ para o ROS, responsável pela publicação dos valores lidos pelos sensores nas unidades locais de medição. As mensagens a publicar são mensagens de distância predefinidas pelo ROS, *sensor_msgs::Range*.

O módulo, denominado de *orientation-base*, está estruturado para receber a mensagem vinda do *Arduino* pela porta serial. Para tal, foram incluídos aos módulos funções e classes

para a comunicação serial, anteriormente desenvolvido. A mensagem é interpretada e daí são retirados os valores convertidos em digitais para cada sensor. Os valores convertidos em digitais são convertidos para tensão através das curvas de calibração obtidas no capítulo dois.

Por fim, os valores obtidos para a distância de cada sensor são publicados.

4.3 Calibração do sistema

Para calibrar o sistema foi necessário criar uma interface de utilização, denominada de *calibration-base*. A necessidade de calibrar o sistema é de extrema importância, pois o utilizador pode colocar os sensores em diferentes coordenadas X e Y e também em cotas diferentes. Na fig. 4.1 é possível visualizar o aspeto da interface desenvolvida. A interface faz o processo

Calibração
Verificar se X e Y corretos

Numero de sensores:

A0 X: Y:

A1 X: Y:

A2 X: Y:

A3 X: Y:

A4 X: Y:

A5 X: Y:

A6 X: Y:

A7 X: Y:

Considere o sensor A0 como X e Y igual a zero.
Coloque o sensor A0 no canto inferior direito.
Todos os outros terão X e Y positivos em relação a A0.
Sendo X segundo comprimento do veículo.
Sendo Y segundo a largura do veículo.

Ler Existentes

Calibrar Sair

Figura 4.1: Interface de calibração do sistema.

de calibração para o veículo paralelo com o plano da estrada. Após a introdução dos valores das coordenadas dos sensores em X e Y, e clicando no botão calibrar, o programa encarrega-se de fazer leitura da cota dos sensores e calcular o plano de calibração. Este plano poderá ter ângulo de *pitch* e *roll* diferentes de zero devido ao facto de os sensores serem colocados a diferentes cotas. A interface foi desenvolvida através de uma ferramenta denominada de GTK+ [9] em linguagem de programação C e C++.

O módulo ROS desenvolvido é assim responsável por iniciar a interface. Uma vez preenchidos todos os campos e ao clicar no botão calibrar, o módulo efetua o cálculo do plano de calibração. Para tal, subscrive às mensagens dos sensores e, utilizando o método da pseudo-inversa, calcula as orientações para o plano de calibração. A informação relativa à calibração e as coordenadas dos sensores é guardada num ficheiro do tipo YAML, uma variante do XML, para que mais tarde possa ser utilizada por outros módulos ou por a interface para leitura dos valores anteriormente inseridos.

4.4 Obtenção das orientações

Com objetivo de obter as orientações do veículo em movimento, terá sido criado um módulo de perceção, denominado de *perception-base*. Este módulo ao iniciar lê o ficheiro YAML com os dados relativos à calibração do sistema e as coordenadas dos sensores. Subscrive às mensagens dos sensores, e combinando essa informação com a anteriormente obtida do ficheiro YAML, calcula as orientações, ângulo *pitch* e *roll*, do veículo para cada instante. Posteriormente será responsável pela publicação de uma mensagem com o valor desses ângulos e também pela publicação de um marcador com a forma do ATLASCAR transformado por as mesmas orientações, sendo assim possível visualizar as variações sofridas ao longo do tempo de uma forma intuitiva, fig. 4.2. Para representar o veículo foi preciso fazer a conversão

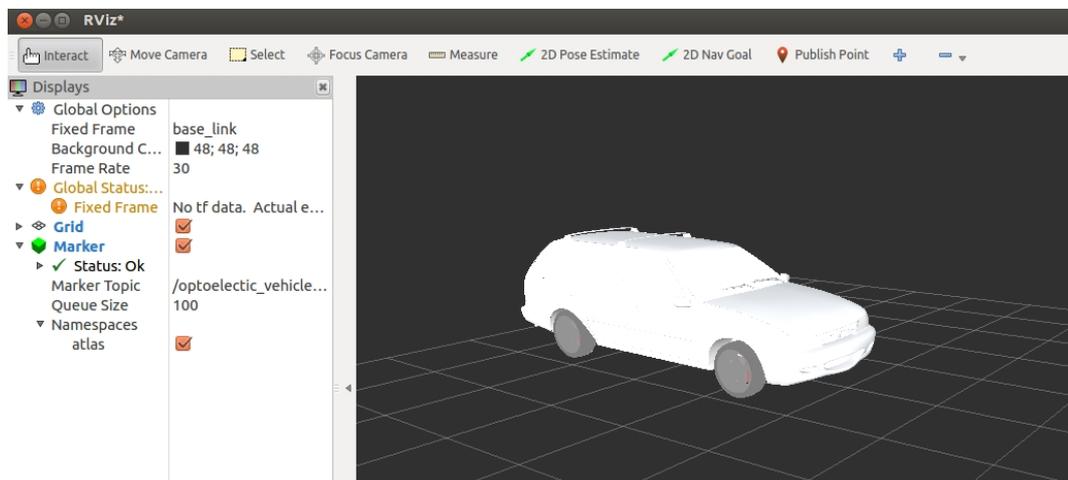


Figura 4.2: Ferramenta de visualização dos marcadores publicados em ROS.

dos ângulos de *Euler* para quaterniões, a expressão utilizada foi a seguinte, eq. 4.1. Como não é considerado o cálculo do *yaw* neste trabalho, porque este não influencia as leituras dos sensores do ATLASCAR, considerou-se igual a zero apenas para efeitos de visualização do marcador no Rviz.

Na fig. 4.3 apresenta-se um diagrama da informação e do *software*.

$$\begin{bmatrix} w \\ x \\ y \\ z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\left(\frac{roll}{2}\right) \times \cos\left(\frac{pitch}{2}\right) \times \cos\left(\frac{yaw}{2}\right) + \sin\left(\frac{roll}{2}\right) \times \sin\left(\frac{pitch}{2}\right) \times \sin\left(\frac{yaw}{2}\right) \\ \sin\left(\frac{roll}{2}\right) \times \cos\left(\frac{pitch}{2}\right) \times \cos\left(\frac{yaw}{2}\right) - \cos\left(\frac{roll}{2}\right) \times \sin\left(\frac{pitch}{2}\right) \times \sin\left(\frac{yaw}{2}\right) \\ \cos\left(\frac{roll}{2}\right) \times \sin\left(\frac{pitch}{2}\right) \times \cos\left(\frac{yaw}{2}\right) + \sin\left(\frac{roll}{2}\right) \times \cos\left(\frac{pitch}{2}\right) \times \sin\left(\frac{yaw}{2}\right) \\ \cos\left(\frac{roll}{2}\right) \times \cos\left(\frac{pitch}{2}\right) \times \sin\left(\frac{yaw}{2}\right) - \sin\left(\frac{roll}{2}\right) \times \sin\left(\frac{pitch}{2}\right) \times \cos\left(\frac{yaw}{2}\right) \end{bmatrix} \quad (4.1)$$

Em que w, x, y e z são as quatro componentes necessárias para definir uma orientação do tipo quaterniões.

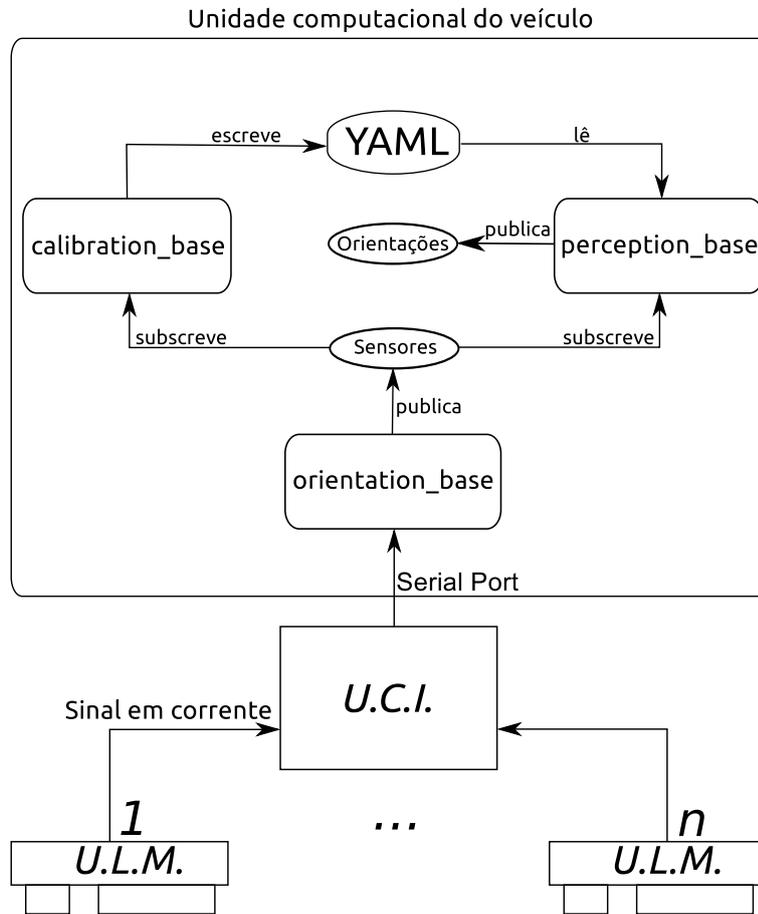


Figura 4.3: Diagrama de blocos explicitando o fluxo de informação entre os diversos blocos.

Capítulo 5

Testes e resultados

Para testar o sistema em situações reais de um veículo em movimento, instalou-se o sistema desenvolvido no ATLASCAR. Este capítulo descreve esses ensaios e resultados.

5.1 Teste realizado

Foi realizado um teste com o veículo em movimento segundo um percurso predefinido, sendo registados mais alguns dados para além dos sensores nesse trajeto. Os dados registados para além dos sensores foram as mensagens que contêm a informação sobre a rotação do volante e a velocidade do ATLASCAR em cada instante.

5.1.1 Calibração inicial

Antes de iniciar o teste é necessário efetuar a calibração do sistema. Na tabela 5.1 estão presentes os valores das coordenadas dos sensores em X e Y, necessárias à calibração. Na fig. 5.1 pode-se observar a localização dos sensores, bem como o sistema de coordenadas considerado. A roda do veículo será à partida o ponto de maior oscilação no veículo, daí a colocação dos sensores ser antes e depois de cada roda. O ângulo *roll* será então uma rotação segundo o eixo X, e o ângulo *pitch* será uma rotação segundo o eixo Y. Na fig. 5.3 estão presentes os valores das leituras dos sensores durante a calibração.

Sensor	X (mm)	Y (mm)
0	0	0
1	1000	-30
2	3480	220
3	2480	10
4	2460	1100
5	3460	820
6	960	1140
7	90	1120

Tabela 5.1: Valores das coordenadas X e Y dos sensores para a calibração do sistema.

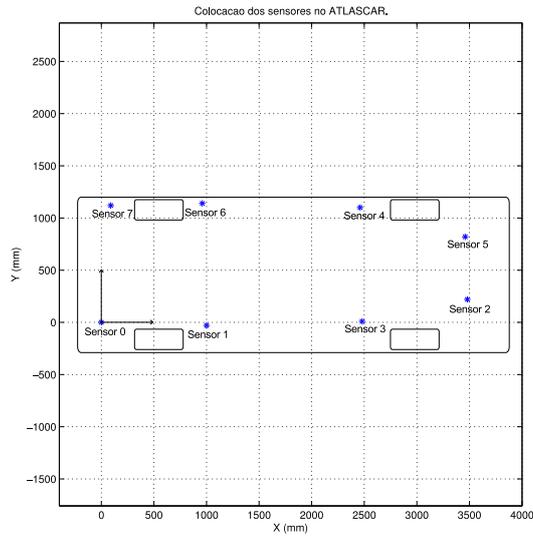


Figura 5.1: Esquema da colocação dos sensores e referenciais do ATLASCAR.

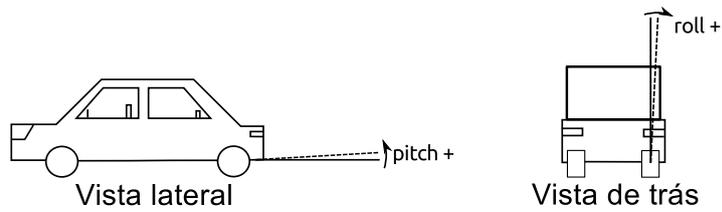


Figura 5.2: Sentido positivo dos ângulos segundo o referencial adotado.

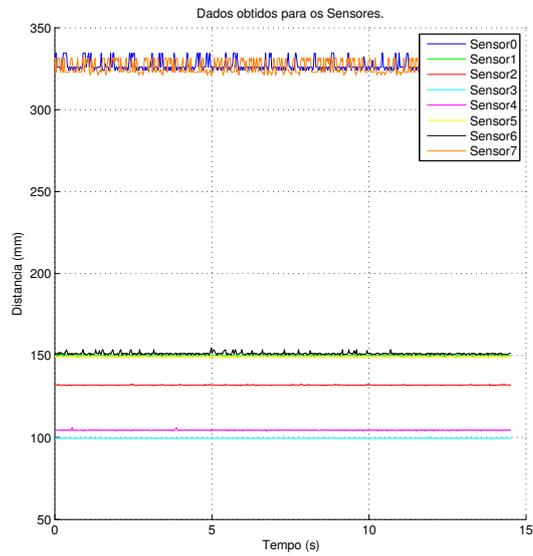


Figura 5.3: Valores lidos pelos sensores durante a calibração do sistema colocado no ATLASCAR.

5.2.2 Arranque e curvas

O primeiro caso específico de análise foi o arranque do veículo e as duas curvas seguintes. O trajeto neste caso está representado na fig. 5.5. O veículo arrancou junto ao departamento de engenharia mecânica, ponto A, e descreveu uma curva à esquerda, ponto 1, e em seguida uma curva à direita, ponto 2.

Na fig. 5.7 e 5.6 encontram-se os dados obtidos para o arranque do veículo. Até aproximadamente um segundo o veículo permaneceu em repouso e em seguida iniciou o movimento. Como se pode verificar, a velocidade aumenta durante o arranque, e o valor do ângulo *pitch* diminui, ou seja, a traseira do veículo aproxima-se da estrada isto é o comportamento normal num arranque. Verifica-se que o ângulo *pitch* a certa altura aumenta, isto deve-se à troca de mudança na caixa de velocidades. Durante esta troca, a aceleração do veículo diminui pois, ao carregar na embraiagem, deixa de se transmitir potência do motor para as rodas do veículo.

Durante o arranque a rotação do volante é aproximadamente igual a zero, e por sua vez, o valor do ângulo *roll* permanece relativamente constante.

Na fig. 5.9 e 5.8 encontram-se os dados obtidos para as duas primeiras curvas. Com aproximação da primeira curva a velocidade decresce e o ângulo *pitch* aumenta, ou seja, a dianteira do veículo aproxima-se da estrada. Segue-se um aumento de velocidade e novamente uma redução da velocidade com aproximação da segunda curva e o ângulo *pitch* diminui e aumenta respetivamente. O valor absoluto do ângulo *pitch* é menor que no arranque, pois a aceleração também é menor, ou seja, demora mais tempo a aumentar ou diminuir a mesma variação de velocidade.

O ângulo *roll* na primeira curva à esquerda aumenta, o que corresponde à parte direita do veículo aproximar-se da estrada. O ângulo *roll* diminui na segunda curva à direita, comportamento inverso visto as curvas serem para sentidos diferentes.

Os resultados obtidos tanto para o arranque como para as curvas são bastante fiáveis qualitativamente.

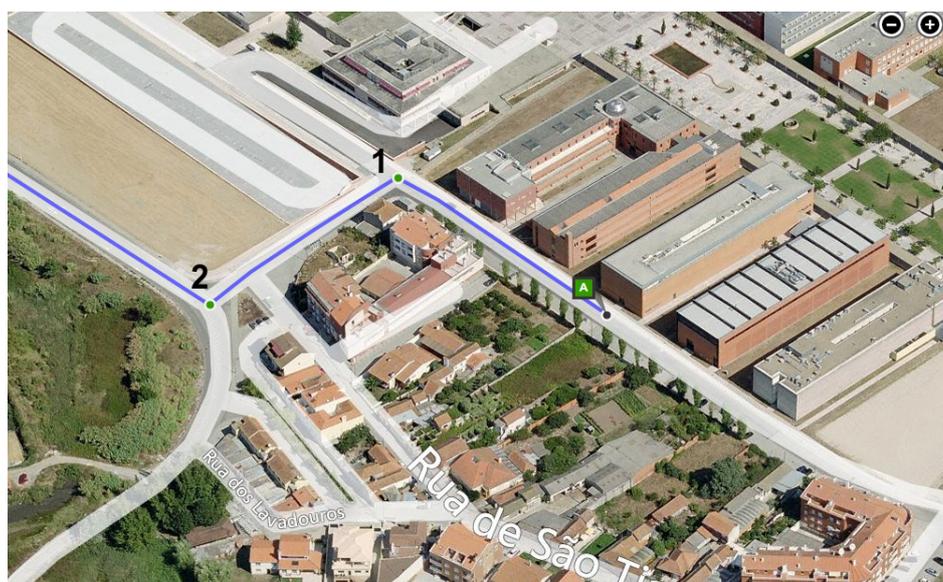


Figura 5.5: Parte do trajeto que representa o arranque e as primeiras curvas.

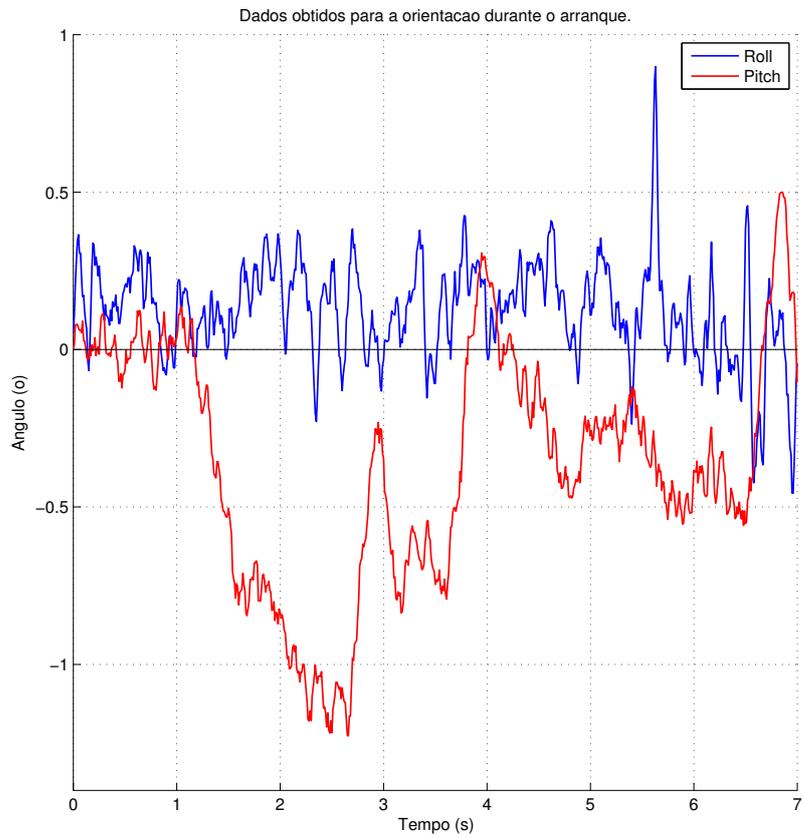
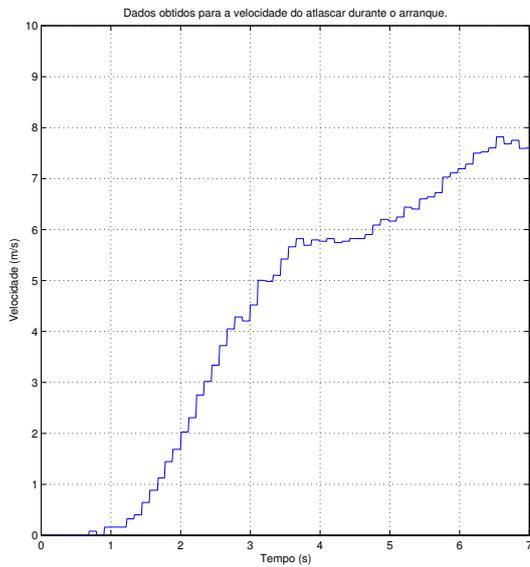
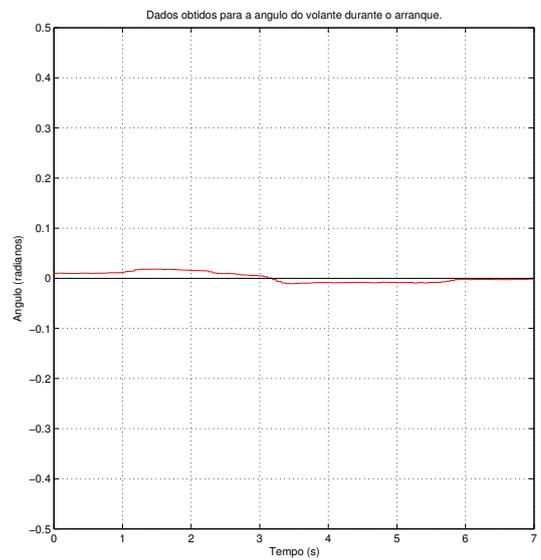


Figura 5.6: Orientações do veículo durante o arranque.



(a) Velocidade do veículo.



(b) Rotação do volante.

Figura 5.7: Valores obtidos da orientação, velocidade e rotação do volante durante o arranque.

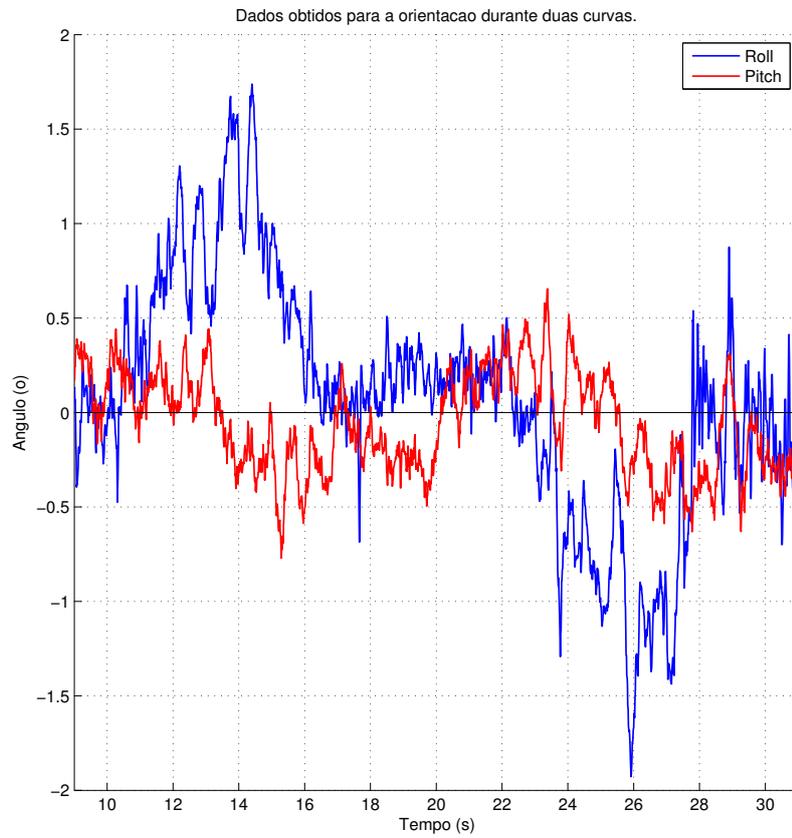
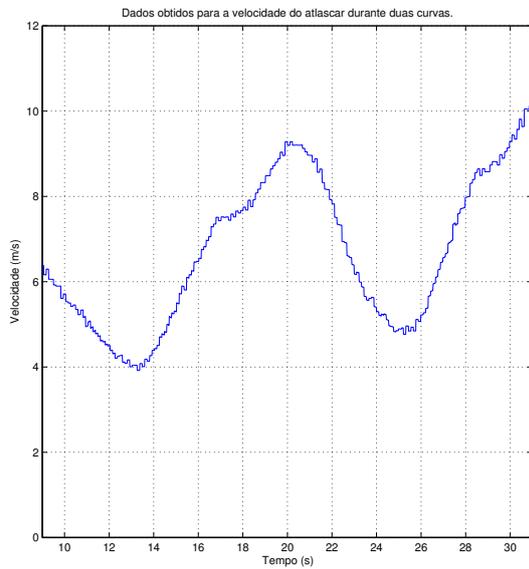
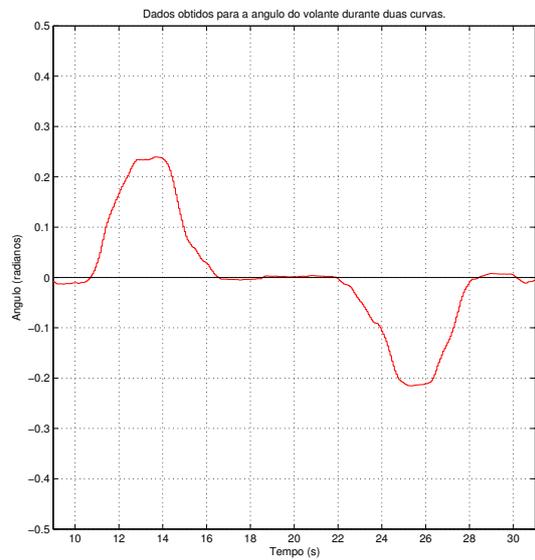


Figura 5.8: Orientações do veículo durante as curvas.



(a) Velocidade do veículo.



(b) Rotação do volante.

Figura 5.9: Valores obtidos da orientação, velocidade e rotação do volante durante as curvas.

5.2.3 Cruzamento

Um caso específico analisado foi o comportamento do veículo num cruzamento. Na fig. 5.10 está representada a parte do trajeto que contém o cruzamento, ponto 3. Como se pode visualizar na fig. 5.12 até aproximadamente 130 segundos o veículo encontrava-se parado na fila de trânsito. Depois disto movimenta-se um pouco mais próximo do cruzamento e aos 135 segundos entra no cruzamento virando à direita.

Na fig. 5.12 e 5.11 podem visualizar-se as variações do ângulo *pitch* nos sucessivos arranques e paragens na fila de trânsito, sucessivas aproximações e afastamento da traseira do veículo à estrada. É ainda possível visualizar o arranque no cruzamento e a troca de velocidade como no arranque inicial.

Pode-se ainda visualizar a variação do ângulo *roll* ao curvar à direita. Como seria de esperar o ângulo é negativo, o que indica que a parte esquerda do veículo aproximou-se da estrada.

Tal como no caso anterior os dados obtidos para as orientações são fiáveis qualitativamente.

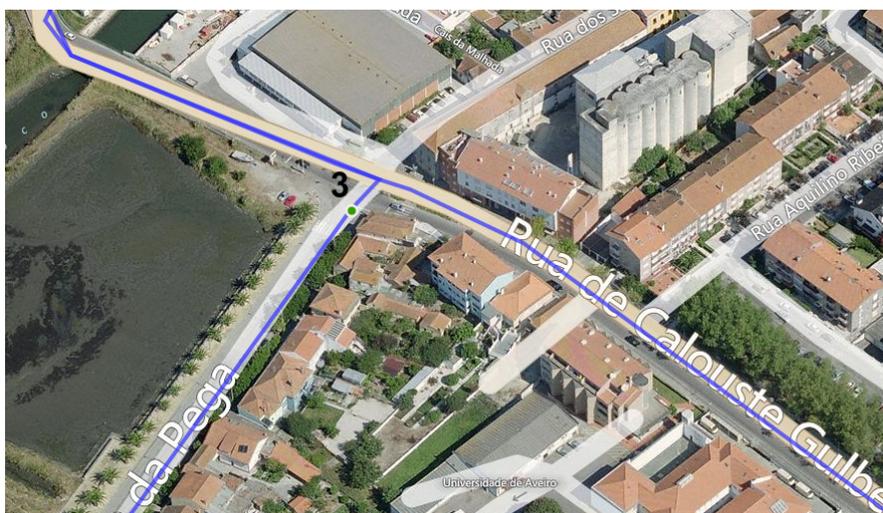


Figura 5.10: Parte do trajeto que representa o cruzamento.

5.2.4 Rotunda

Outro caso específico analisado foi a variação da orientação numa rotunda. Para tal, durante o teste passou-se numa rotunda que foi contornada duas vezes. Na fig. 5.13 pode-se observar a parte do trajeto que continha a rotunda, ponto 4. Como se pode visualizar na fig. 5.15 o ângulo *roll* é inicialmente negativo devido à ligeira curva à direita para entrar na rotunda. O ângulo *roll* rapidamente passa a um valor positivo, ou seja, parte direita do veículo é empurrada contra a estrada, comportamento normal numa rotunda. No final da rotunda o ângulo *roll* volta a ser negativo graças a ligeira curva à direita para sair da rotunda. O mesmo comportamento é observado para a rotação do volante.

Quanto ao ângulo *pitch* mantém-se relativamente constante e com um valor ligeiramente positivo. Este ligeiro valor do ângulo *pitch* deve-se à inércia do veículo dentro da rotunda. As únicas situações em que isso não acontece é no início devido à redução de velocidade para

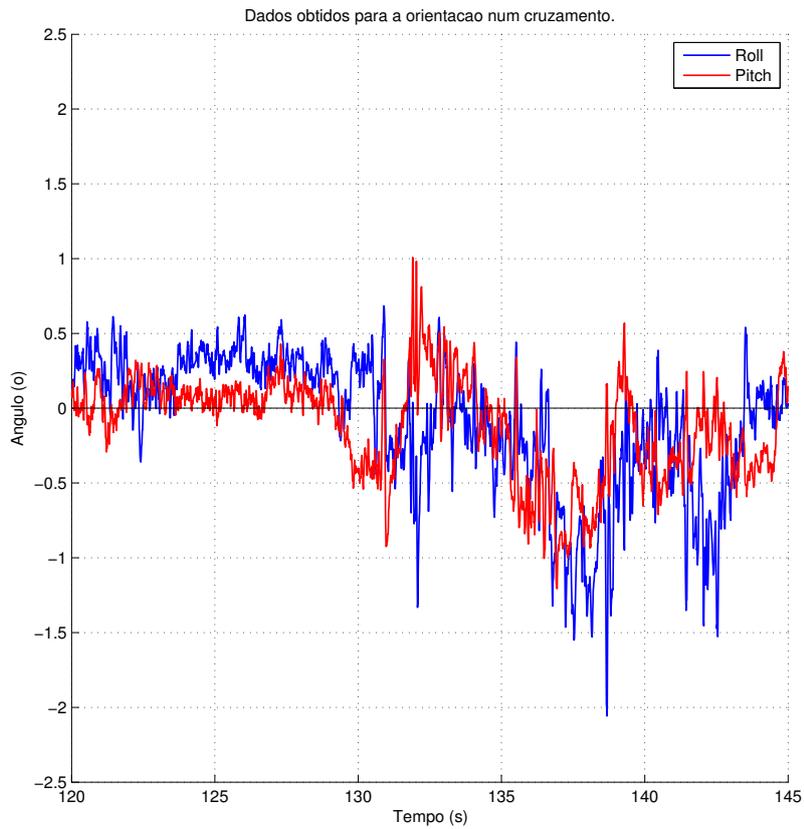
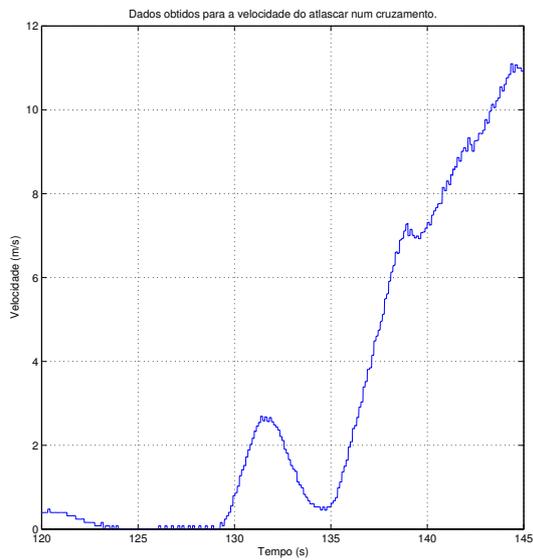
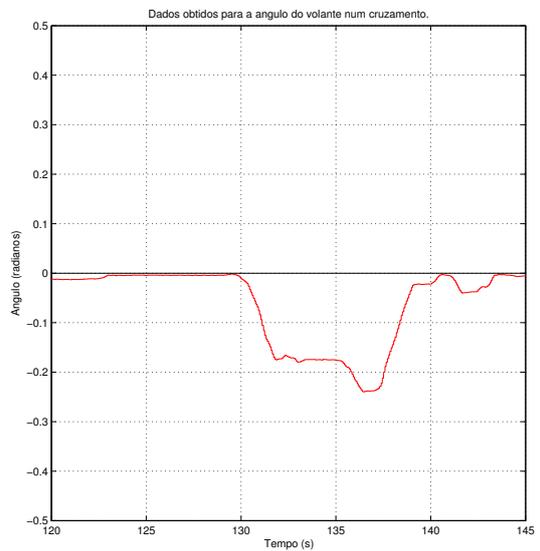


Figura 5.11: Orientações do veículo no cruzamento.



(a) Velocidade do veículo.



(b) Rotação do volante.

Figura 5.12: Valores obtidos da orientação, velocidade e rotação do volante no cruzamento.

entrar na rotunda e a meio da rotunda em que foi reduzida a velocidade e troca para uma mudança inferior.

Os valores obtidos são razoáveis apesar de apresentarem uma descontinuidade nas orientações para 292 e 296 segundos.



Figura 5.13: Parte do trajeto que representa a rotunda.

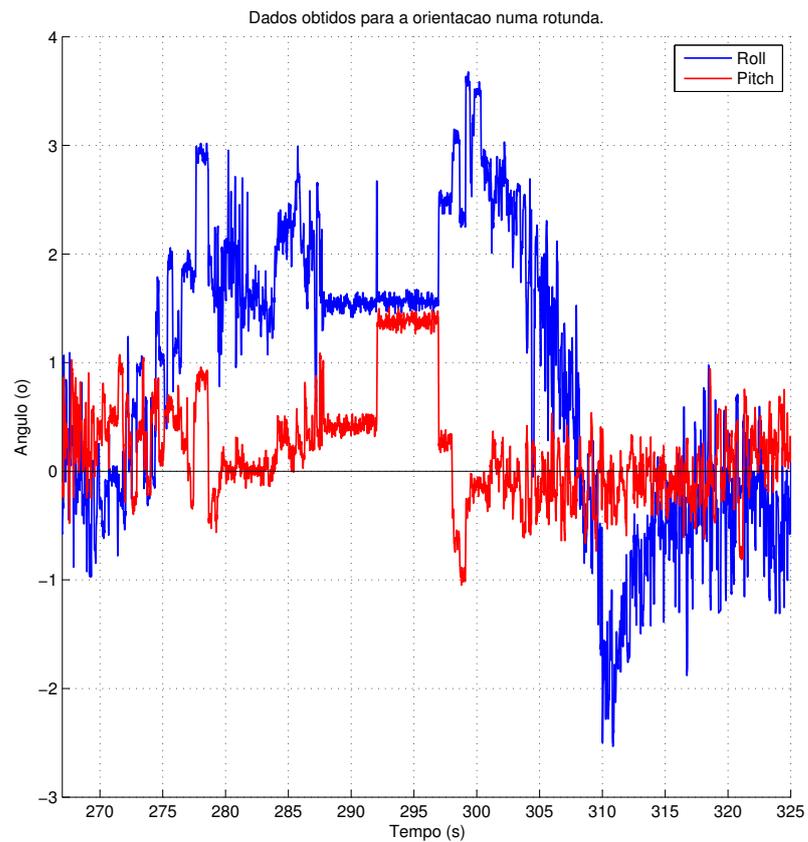
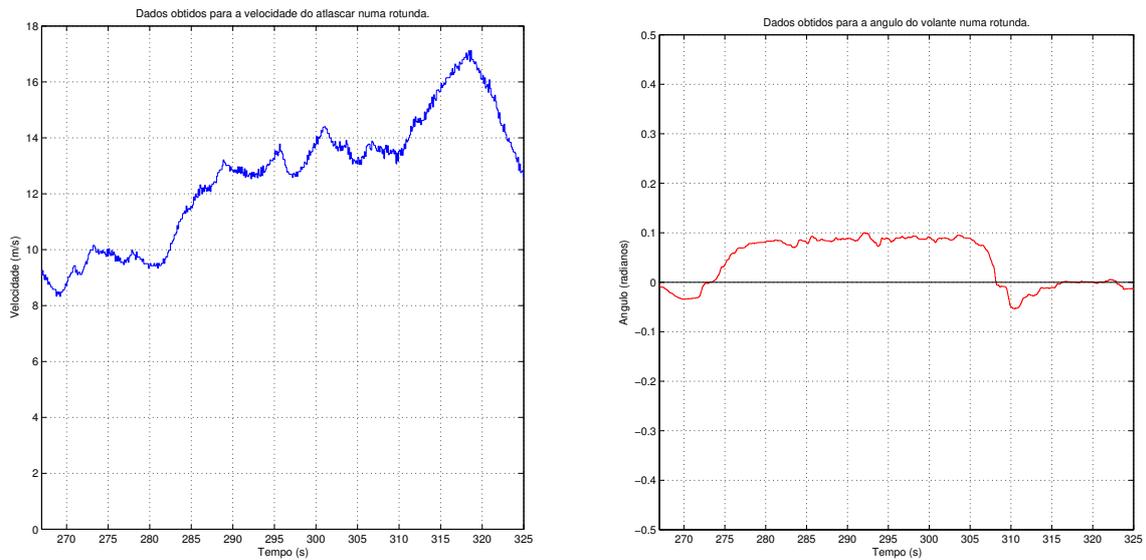


Figura 5.14: Orientações do veículo na rotunda.



(a) Velocidade do veículo.

(b) Rotação do volante.

Figura 5.15: Valores obtidos da orientação, velocidade e rotação do volante na rotunda.

5.2.5 Lombas

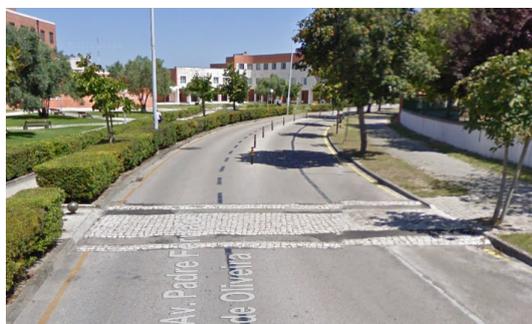
Quase no fim do trajeto encontravam-se as lombas na estrada que passa por dentro do campus da Universidade de Aveiro. Analisou-se também o comportamento do sistema nesta situação específica. Na fig. 5.16 é apresentado parte do trajeto em que se encontram as lombas, desde o ponto 5 ao ponto 6.

Os resultados obtidos nessa parte do trajeto estão presentes na fig. 5.18. Em relação ao ângulo *pitch* visualiza-se o comportamento das sucessivas travagens e arranques nas lombas. No entanto na redução de velocidade verificam-se picos elevados do ângulo *pitch*, por exemplo para 485 e 495 segundos. Isto deve-se ao facto dos sensores dianteiros ao aproximarem-se da lomba detetarem valores mais próximos à estrada.

O ângulo *roll* sofre alguma variação quando o veículo se encontra nas lombas. No final visualiza-se a maior variação devido à curva à esquerda no final do trajeto. Existem alguns picos descontínuos sem explicação aparente.



(a) Trajeto que contém as lombas.



(b) Exemplo de uma das lombas.

Figura 5.16: Parte do trajeto que representa as lombas.

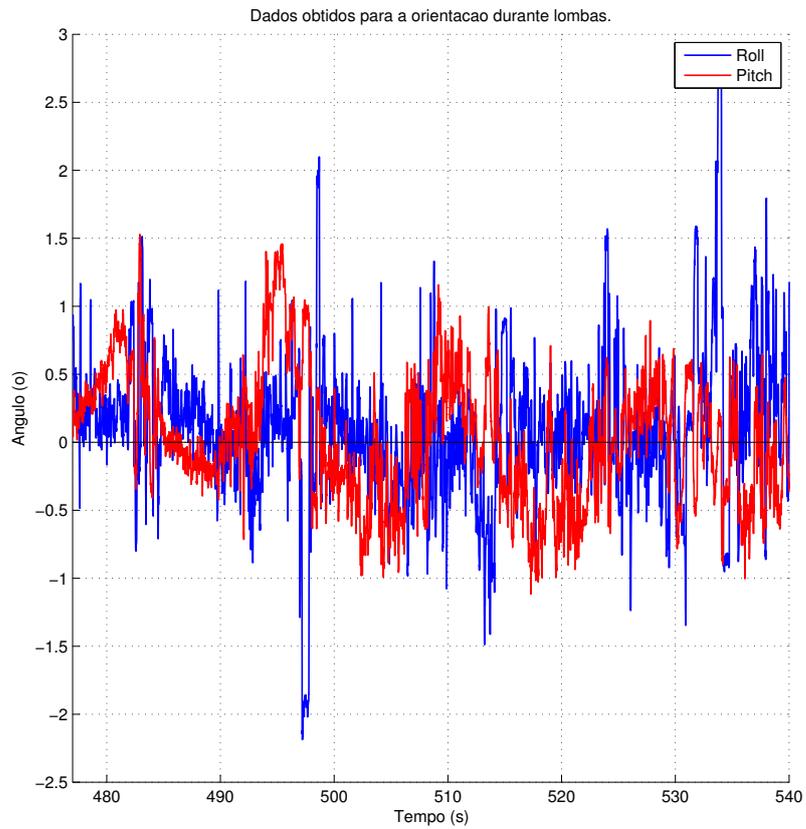
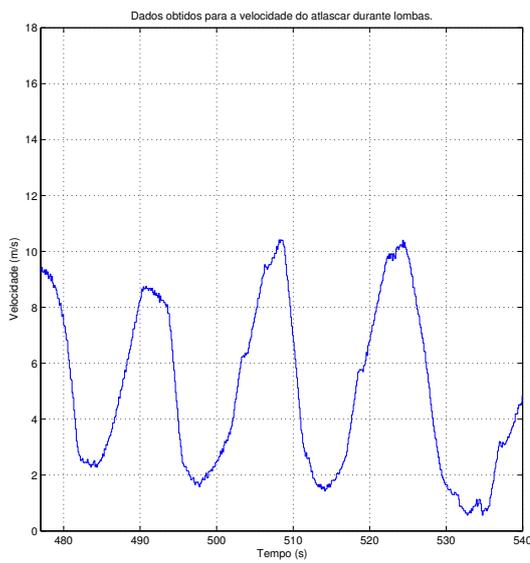
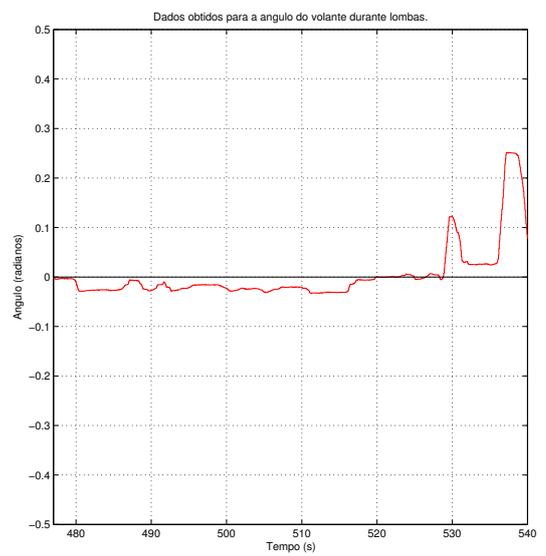


Figura 5.17: Orientações do veículo nas lombas.



(a) Velocidade do veículo.



(b) Rotação do volante.

Figura 5.18: Valores obtidos da orientação, velocidade e rotação do volante nas lombas.

5.3 Variação dos resultados com o número de sensores

Ao calibrar o sistema é possível escolher qual o número de sensores em uso. É certo que quanto maior o número de sensores presentes no veículo melhores serão os resultados obtidos, pois ter-se-á um maior número de pontos para calcular o plano que melhor represente as inclinações do veículo.

Foram então considerados como referência os valores obtidos com oito sensores. Para o mesmo trajeto, foram recalculadas as orientações com sete, seis e cinco sensores. Para sete sensores foi retirado o sensor número sete, para seis sensores foram retirados os sensores número sete e seis e para cinco sensores foram retirados os sensores número sete, seis e cinco. Na fig. 5.19 estão representados os resultados obtidos.

Considerou-se a incerteza igual a duas vezes o valor do desvio padrão, obtendo assim um intervalo de confiança de 95%. Nas tabelas 5.2 e 5.3 estão os valores obtidos para o desvio padrão e para a incerteza com o número de sensores utilizados, considerando como referência o teste que utilizava os oito sensores.

Como seria de esperar, quanto menor o número de sensores utilizados, maior será a incerteza do sistema.

Sensores utilizados	Desvio padrão <i>pitch</i> (°)	Incerteza <i>pitch</i> (°)
8	-	-
7	0.5872	±1.1744
6	0.6586	±1.3172
5	0.6837	±1.3674

Tabela 5.2: Valores do desvio padrão e da incerteza do *pitch* para o mesmo teste com número diferente de sensores utilizados.

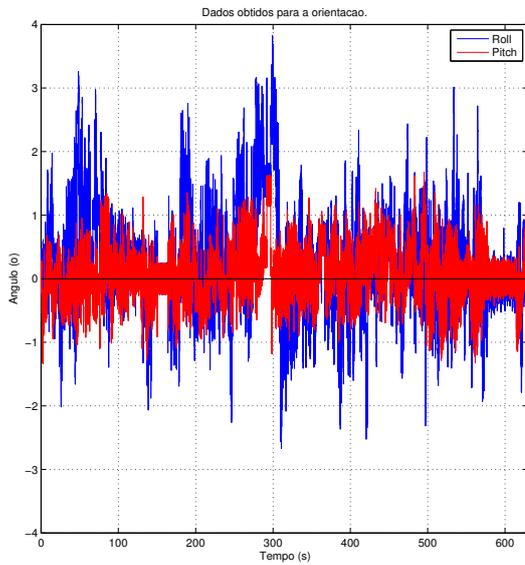
Sensores utilizados	Desvio padrão <i>roll</i> (°)	Incerteza <i>roll</i> (°)
8	-	-
7	0.7451	±1.4902
6	0.8246	±1.6492
5	0.9723	±1.9446

Tabela 5.3: Valores do desvio padrão e da incerteza do *roll* para o mesmo teste com número diferente de sensores utilizados.

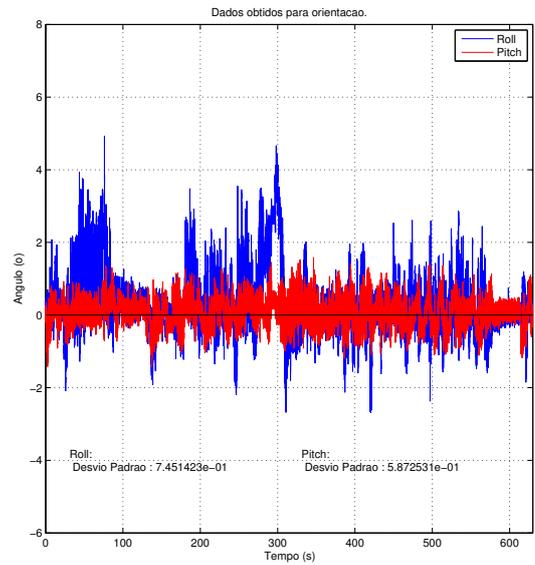
5.4 Variação dos resultados com a colocação dos sensores

Para calibrar o sistema são introduzidas as coordenadas X e Y dos sensores. Como a obtenção das coordenadas é feita manualmente, e está sujeita a erros de medição, é importante saber até que ponto o levantamento incorreto das coordenadas influencia os valores finais obtidos para as orientações.

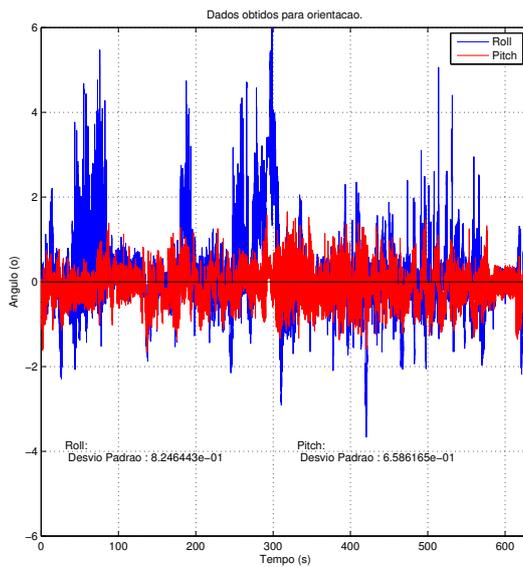
Foram então considerados como referência os valores obtidos com as coordenadas corretas, e para o mesmo trajeto foram recalculadas as orientações com coordenadas incorretas, 100 mm afastadas para o exterior do veículo e num outro teste com 200 mm. Na fig. 5.20 estão representados os resultados obtidos. Verifica-se que os valores médios dos ângulos para 100



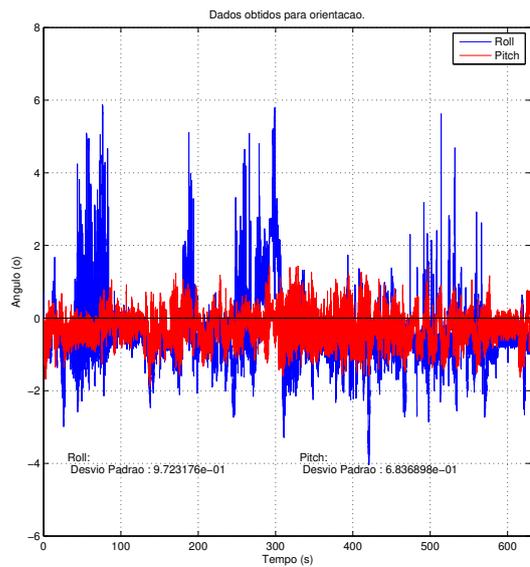
(a) Valores obtidos utilizando 8 sensores.



(b) Valores obtidos utilizando 7 sensores.



(c) Valores obtidos utilizando 6 sensores.



(d) Valores obtidos utilizando 5 sensores.

Figura 5.19: Valores obtidos utilizando diferente número de sensores.

mm são menores que no original e que para 200 mm os ângulos são menores que para 100 mm. Isto deve-se ao facto de os valores da cota lidos pelos sensores serem sempre os mesmos para coordenadas mais afastadas, daí resulta um valor de ângulo inferior.

Para se obterem valores com confiança considerou-se a incerteza igual a duas vezes o valor do desvio padrão, obtendo assim um intervalo de confiança de 95%. Nas tabelas 5.4 e 5.5 estão os valores obtidos para o desvio padrão e para a incerteza relativamente ao erro induzido nas coordenadas dos sensores.

A incerteza do sistema aumenta com o erro das coordenadas dos sensores. O erro na

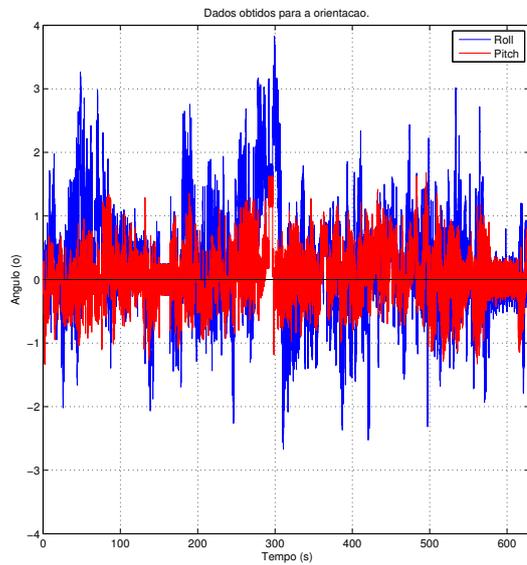
medição das coordenadas é algo que não pode ser contornado pois este depende das medições efetuadas pelo utilizador. O erro nas coordenadas não altera o comportamento das curvas obtidas para as orientações, apenas altera as amplitudes dos valores lidos.

Coordenadas dos sensores	Desvio padrão <i>pitch</i> (°)	Incerteza <i>pitch</i> (°)
originais	-	-
100 mm afastadas	0.5949	±1.1898
200 mm afastadas	0.5974	±1.1948

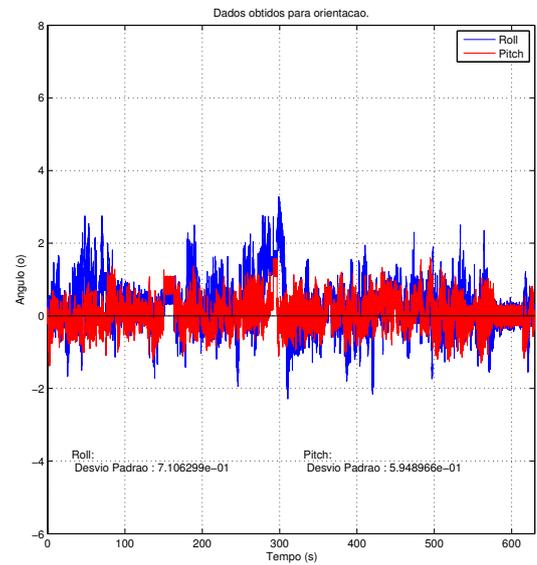
Tabela 5.4: Valores do desvio padrão e da incerteza do *pitch* para o mesmo teste com erro nas coordenadas dos sensores de 100 mm e de 200 mm para o exterior.

Sensores utilizados	Desvio padrão <i>roll</i> (°)	Incerteza <i>roll</i> (°)
originais	-	-
100 mm afastadas	0.7106	±1.4212
200 mm afastadas	0.7375	±1.4750

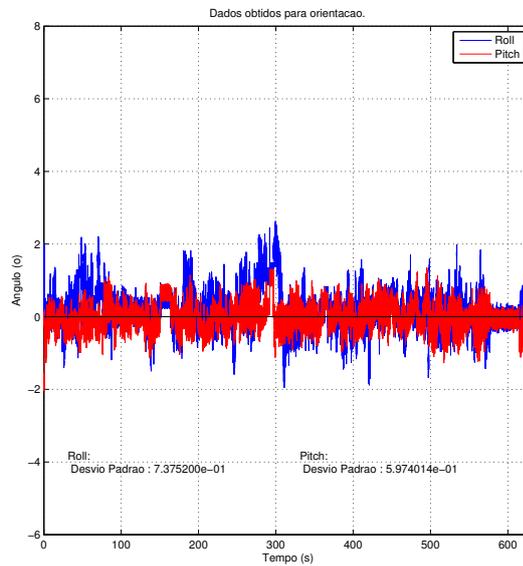
Tabela 5.5: Valores do desvio padrão e da incerteza do *roll* para o mesmo teste com erro nas coordenadas dos sensores de 100 mm e de 200 mm para o exterior.



(a) Valores obtidos utilizando as coordenadas corretas dos sensores.



(b) Valores obtidos utilizando as coordenadas afastadas 100 mm para o exterior do veículo.



(c) Valores obtidos utilizando as coordenadas afastadas 200 mm para o exterior do veículo.

Figura 5.20: Valores obtidos utilizando as coordenadas corretas e as coordenadas afastadas.

Capítulo 6

Conclusões e trabalho futuro

6.1 Conclusões

Com este trabalho pretendiam-se obter as orientações relativas de um veículo em movimento. Para tal, torna-se essencial o conhecimento das orientações do veículo relativas ao meio exterior, principalmente as relativas ao plano da estrada para corrigir os sistemas com percepção no exterior.

A filosofia adotada passa pela utilização de múltiplas unidades locais de medição, (ULM), que medem a distância entre a estrutura rígida do veículo e o plano da estrada. As unidades locais de medição comunicam com uma unidade central de interligação, (UCI). Esta unidade é responsável por receber a informação das ULM e também pelo envio da informação para a unidade computacional do veículo.

Os sensores utilizados para efetuar a medição da distância entre a estrutura rígida do veículo e o plano da estrada foram os GP2Y0A21YK0F da *Sharp*. Estes sensores são muito versáteis e baratos, no entanto, o sinal analógico é altamente instável. Verifica-se que a distribuição das amostras para uma distância fixa é muita dispersa, não permitindo portanto definir um valor com grande confiança para o sinal analógico.

Foi então conduzido um estudo e caracterização dos sensores da *Sharp*. Para diminuir a interferência do ruído adicionou-se um conversor tensão-corrente pois, por norma, o ruído é uma tensão induzida no condutor.

Procedeu-se à calibração individual de cada sensor de 100 a 800 mm com ajuda do robô Fanuc. A curva de calibração que melhor caracteriza as amostras obtidas na calibração foi obtida como a soma de duas exponenciais. Na tabela 6.1 estão presentes os coeficientes de correlação obtidos nas calibrações dos sensores. Os valores obtidos permitem concluir que as curvas de calibração escolhidas representam bastante bem a realidade.

Após a calibração, foram elaborados testes de 100 a 800 mm, com ajuda do robô Fanuc, para estimar a incerteza individual de cada um dos sensores. Na tabela 6.2 estão presentes os valores da incerteza para cada um dos sensores. Um dos sensores, (número seis) tem uma incerteza maior pois o sensor encontra-se com defeito, apenas conseguia medir até 600 mm. No entanto num veículo muito dificilmente se obtêm leituras acima desse valor.

Foi necessária a implementação de um algoritmo que obtenha as orientações do veículo com base nas medições da distância à estrada. Como o número de sensores pode ser variável, considerou-se calcular o plano que passa pelos pontos obtidos e igualar as orientações aos ângulos que o plano faz com o sistema de eixos.

Sensor	Coefficiente de correlação
0	0.99957
1	0.99939
2	0.99951
3	0.99954
4	0.99952
5	0.99950
6	0.99927
7	0.99869

Tabela 6.1: Valores do coeficiente de correlação obtidos das curvas de calibração para os diversos sensores.

Sensor	Incerteza (mm)
0	± 07.0462
1	± 08.4298
2	± 12.9450
3	± 08.4306
4	± 08.8144
5	± 06.2526
6	± 18.4394
7	± 07.1914

Tabela 6.2: Valores da incerteza para os diversos sensores.

Para calcular o plano foram propostos dois métodos. O método do plano médio obtém o plano final com base na média das combinações de planos de três pontos possíveis. O outro método, método da pseudo-inversa, obtém o plano através da resolução de um sistema matricial. A matriz do sistema é não invertível para mais de três pontos pois fica não quadrada. Para resolver o sistema recorreu-se assim à pseudo-inversa de *Moore-Penrose*.

Ambos os métodos permitem obter o plano que melhor se aproxima dos pontos. Foi elaborado um teste para determinar qual dos métodos o melhor, no entanto os resultados obtidos para os dois métodos foram similares. O fator decisivo foi o tempo computacional necessário para cada método obter o plano. O método da pseudo-inversa foi o mais rápido daí ser o método adotado neste trabalho.

Foi levado a cabo um teste, com ajuda do robô Fanuc, para determinar a incerteza do sistema. Este teste utilizou apenas quatro sensores espaçados de 700 mm entre si. Na tabela 6.3 estão presentes os valores da incerteza para o teste.

Ângulo	Incerteza (°)
<i>Pitch</i>	± 1.3988
<i>Roll</i>	± 1.4568

Tabela 6.3: Valores obtidos da incerteza para o sistema com quatro sensores e espaçamento de 700 mm.

Foi criado em ROS um nó que lê os valores convertidos em digitais dos sensores na porta

serial e publica a distância correspondente. Foi ainda criada uma interface para a calibração do sistema. Esta interface é uma ferramenta muito útil e de utilização intuitiva. Por fim foi criado um nó em ROS responsável por subscrever as mensagens dos sensores e publicar as orientações do veículo.

Em último lugar foram ainda realizados testes do sistema no ATLASCAR. Os resultados obtidos para as orientações foram comparados com a velocidade do veículo e a rotação do volante. As alterações nas orientações devem-se às acelerações tangenciais e normais à trajetória. O ângulo de *pitch* é influenciado pela aceleração tangencial, enquanto que o ângulo de *roll* é influenciado pela aceleração normal. Os resultados obtidos para as orientações são fidedignos com as curvas obtidas para a velocidade e rotação do volante do veículo.

Estudou-se ainda a influência do número de sensores utilizados bem como da eventual má calibração do sistema. Nas tabelas 6.4 e 6.5 estão presentes os valores das incertezas. Verificou-se que quanto menor o número sensores utilizados piores serão os resultados obtidos.

Sensores utilizados	Incerteza <i>pitch</i> (°)	Incerteza <i>roll</i> (°)
8	-	-
7	±1.1744	±1.4902
6	±1.3172	±1.6492
5	±1.3674	±1.9446

Tabela 6.4: Valores da incerteza para o mesmo teste com número diferente de sensores utilizados.

Coordenadas dos sensores	Incerteza <i>pitch</i> (°)	Incerteza <i>roll</i> (°)
originais	-	-
100 mm afastadas	±1.1898	±1.4212
200 mm afastadas	±1.1948	±1.4750

Tabela 6.5: Valores da incerteza para o mesmo teste com erro introduzido nas coordenadas dos sensores de 100 mm e de 200 mm para o exterior.

O sistema desenvolvido mede as orientações do veículo relativas ao plano da estrada obtendo resultados fiáveis qualitativamente.

6.2 Trabalho futuro

Como trabalho futuro propõe-se a alteração do sistema de modo a que este seja *wireless* e que inclua baterias para a alimentação.

É proposto o desenvolvimento do projeto, passando do protótipo para o produto comercial. Propõe-se ainda o teste em veículos cuja distância à estrada fosse superior à considerada neste trabalho, tais como veículos pesados.

Seria importante estudar o modelo físico de vários tipos de veículos, como por exemplo SUV's ou monovolumes, para posteriormente, se criar uma interface de avisos. Imagine-se que, para um dado ângulo de *pitch*, o veículo se encontra na eminência de perder o controlo, seria interessante ter um aviso um pouco antes desse ponto para o utilizador moderar a sua condução, e possivelmente evitar um acidente.

Verificando-se todas estas constatações, seria importante estudar o mercado das escolas de condução.

Bibliografia

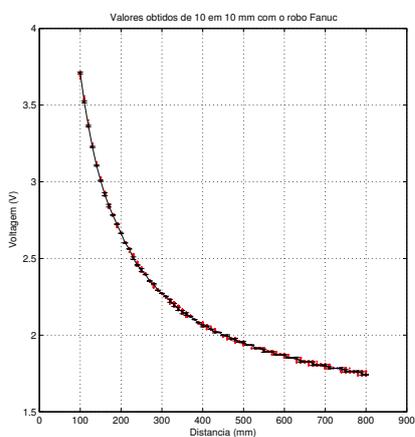
- [1] Applanix POS LV, <http://www.applanix.com/products/land/pos-lv.html/>, February 2014.
- [2] ATLAS project, <http://atlas.web.ua.pt/>, February 2014.
- [3] SICK partner portal, <https://www.mysick.com/eCat.aspx?go=FinderSearch&Cat=Row&At=Fa&Cult=English&FamilyID=380&Category=Produktfinder&Selections=48041/>, February 2014.
- [4] Causes of death statistics - statistics explained, http://epp.eurostat.ec.europa.eu/statistics_explained/index.php/Causes_of_death_statistics/, May 2104.
- [5] Martin A. Fischler and Robert C. Bolles. Random sample consensus: A paradigm for model fitting with applications to image analysis and automated cartography. *Commun. ACM*, 24(6):381–395, June 1981.
- [6] Xin Jia, Zhencheng Hu, and Hsin Guan. A new multi-sensor platform for adaptive driving assistance system (ADAS). In *2011 9th World Congress on Intelligent Control and Automation (WCICA)*, pages 1224–1230, June 2011.
- [7] Mohamed Mostafa Joe, Joe Hutton, Blake Reid, and Richmond Hill. *GPS/IMU products - the Applanix approach*. 2001.
- [8] W.D. Jones. Building safer cars. *IEEE Spectrum*, 39(1):82–85, January 2002.
- [9] Andrew Krause. *Foundations of GTK+ Development*. Apress, Berkeley, Calif. : New York, 1 edition edition, April 2007.
- [10] R. Labayrade and D. Aubert. A single framework for vehicle roll, pitch, yaw estimation and obstacles detection by stereovision. In *IEEE Intelligent Vehicles Symposium, 2003. Proceedings*, pages 31–36, June 2003.
- [11] Eduardo Nebot and Hugh Durrant-Whyte. Initial calibration and alignment of low-cost inertial navigation units for land vehicle applications. *Journal of Robotic Systems*, 16(2):81–92, February 1999.
- [12] P. Coulombeau and C. Laurgeau. Vehicle yaw, pitch, roll and 3D lane shape recovery by vision. In *IEEE Intelligent Vehicle Symposium, 2002*, volume 2, pages 619–625 vol.2, June 2002.
- [13] Pedro Salvado. *Reconstrucao Dinamica de Mapa Local para o AtlasCar*. Master degree, Universidade de Aveiro, 2012.

- [14] Nguyen Ho Quoc Phuong, Hee-Jun Kang, Young-Soo Suh, Young-Shick Ro, and Kyu-Chan Lee. A GPS/INS integration system with new orientation measurement scheme for land vehicle application. In *IECON 2006 - 32nd Annual Conference on IEEE Industrial Electronics*, pages 3099–3104, November 2006.
- [15] D. Ponsa, A. Lopez, F. Lumbreras, J. Serrat, and T. Graf. 3D vehicle sensor based on monocular vision. In *2005 IEEE Intelligent Transportation Systems, 2005. Proceedings*, pages 1096–1101, September 2005.
- [16] Rui Cancela. *Extensao e flexibilizacao da interface de controlo de um manipulador robotico FANUC*. Master degree, Universidade de Aveiro, 2007.
- [17] V. Santos, J. Almeida, E. Avila, D. Gameiro, M. Oliveira, R. Pascoal, R. Sabino, and P. Stein. ATLASCAR - technologies for a computer assisted driving system on board a common automobile. In *2010 13th International IEEE Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC)*, pages 1421–1427, September 2010.
- [18] A. Sappa, D. Geronimo, F. Dornaika, and A. Lopez. Stereo vision camera pose estimation for on-board applications. In Rustam Stolkin, editor, *Scene Reconstruction Pose Estimation and Tracking*. I-Tech Education and Publishing, June 2007.
- [19] Maria Staubach. Factors correlated with traffic accidents as a basis for evaluating advanced driver assistance systems. *Accident Analysis & Prevention*, 41(5):1025–1033, September 2009.
- [20] Eric W. Weisstein. Moore-penrose matrix inverse - from wolfram MathWorld, <http://mathworld.wolfram.com/Moore-PenroseMatrixInverse.html/>, February 2014.
- [21] Wang Yandong, Chen Xiaoqiang, Cai Junliang, Han Zhihua, and Ji Qingchang. Design and analysis of high dynamic GPS/SINS integrated navigation schemes. In *2011 2nd International Conference on Intelligent Control and Information Processing (ICICIP)*, volume 1, pages 462–466, July 2011.

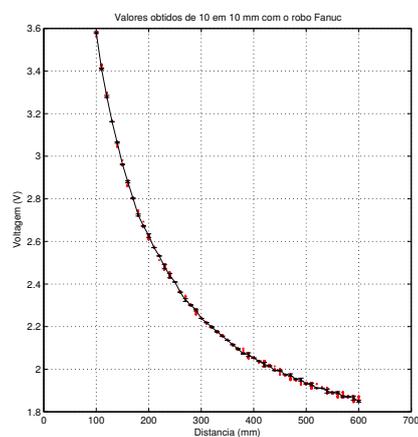
Capítulo 7

Anexos

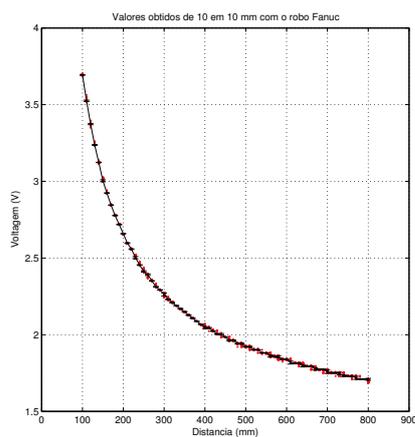
As seguintes figuras são os gráficos dos dados obtidos para calibrar os restantes sensores.



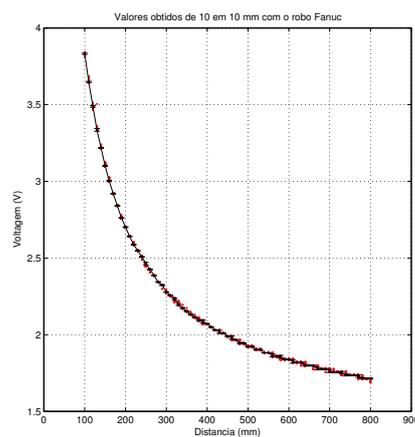
(a) Gráfico dos resultados obtidos para calibrar o sensor 1.



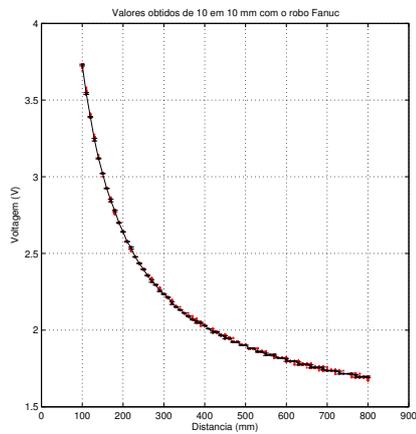
(b) Gráfico dos resultados obtidos para calibrar o sensor 2.



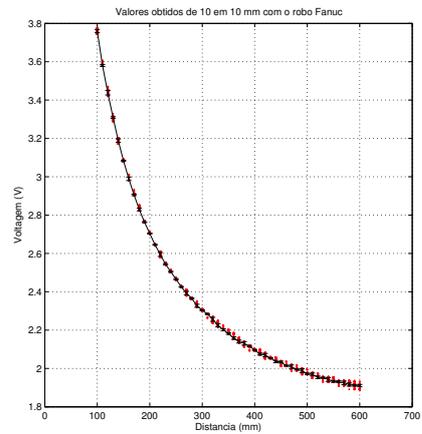
(c) Gráfico dos resultados obtidos para calibrar o sensor 3.



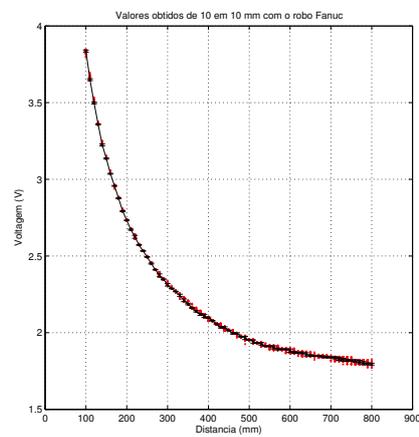
(d) Gráfico dos resultados obtidos para calibrar o sensor 4.



(e) Gráfico dos resultados obtidos para calibrar o sensor 5.



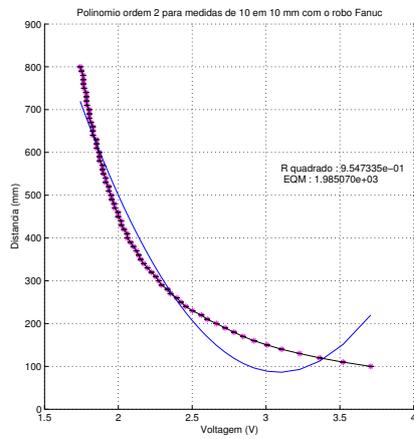
(f) Gráfico dos resultados obtidos para calibrar o sensor 6.



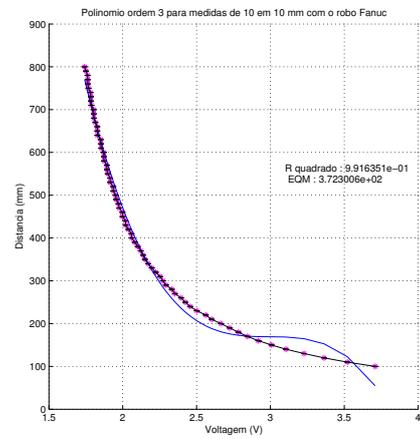
(g) Gráfico dos resultados obtidos para calibrar o sensor 7.

Figura 7.1: Valores gráficos obtidos para a calibração dos restantes sensores.

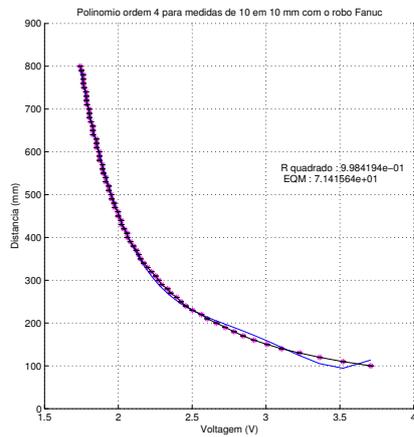
Nas figuras seguintes estão presentes as curvas de calibração obtidas para os restantes sensores.



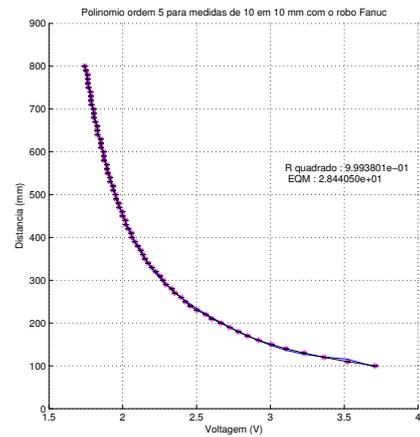
(a) Polinômio de ordem 2.



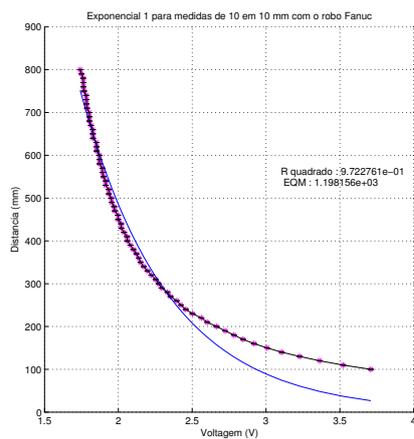
(b) Polinômio de ordem 3.



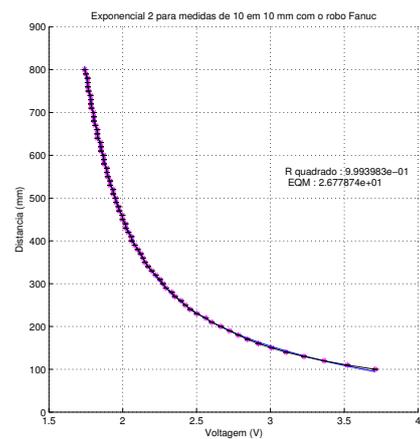
(c) Polinômio de ordem 4.



(d) Polinômio de ordem 5.

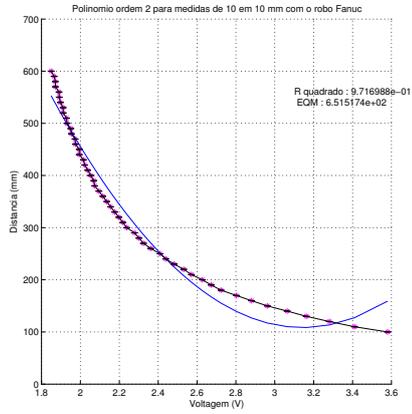


(e) Exponencial do tipo 1.

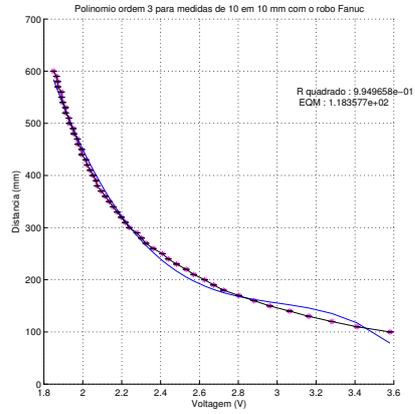


(f) Exponencial do tipo 2.

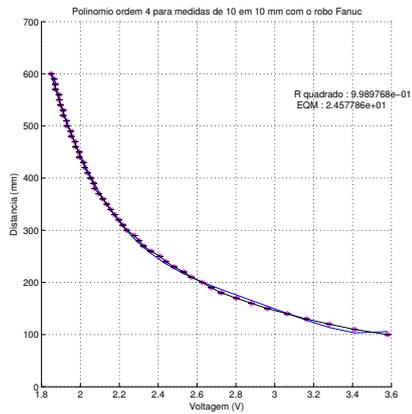
Figura 7.2: Curvas de calibração obtidas para sensor 1.



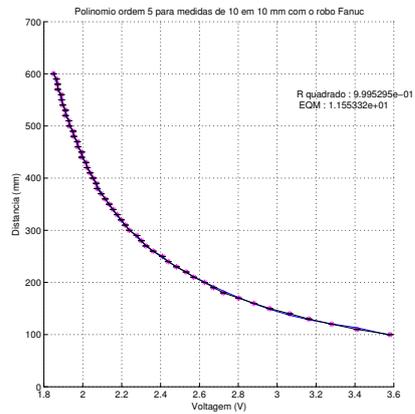
(a) Polinómio de ordem 2.



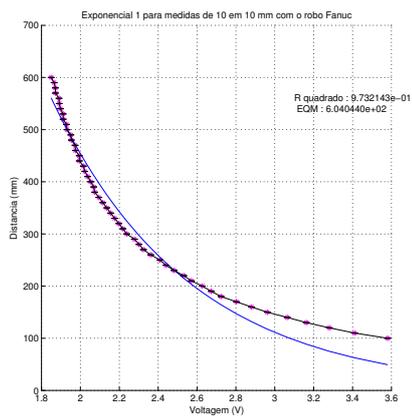
(b) Polinómio de ordem 3.



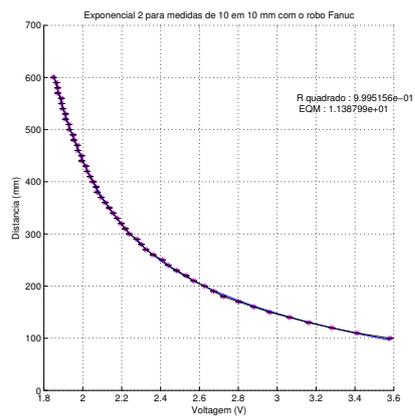
(c) Polinómio de ordem 4.



(d) Polinómio de ordem 5.

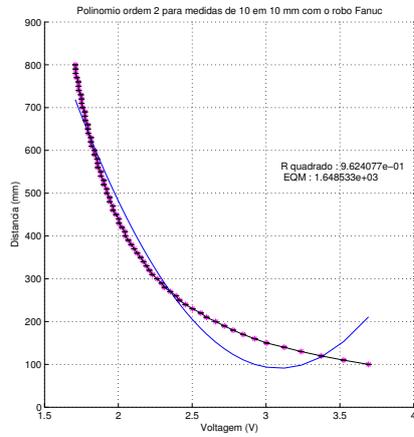


(e) Exponencial do tipo 1.

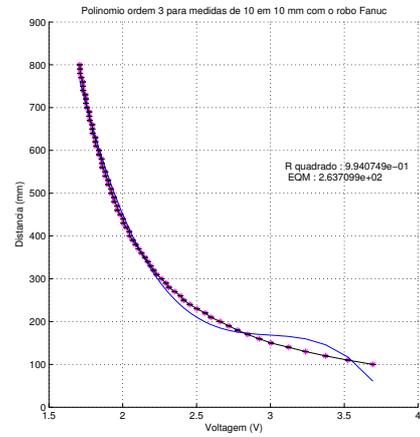


(f) Exponencial do tipo 2.

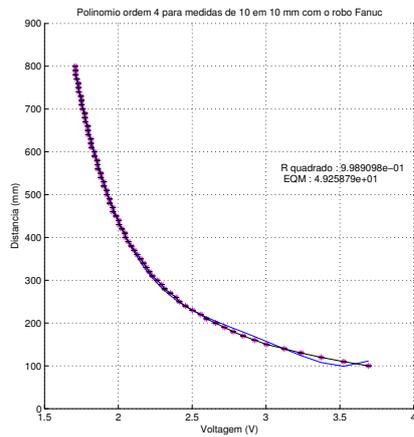
Figura 7.3: Curvas de calibração obtidas para sensor 2.



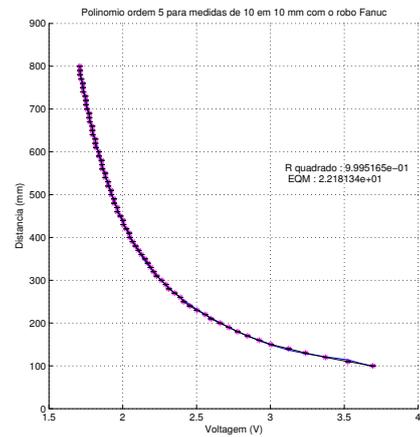
(a) Polinômio de ordem 2.



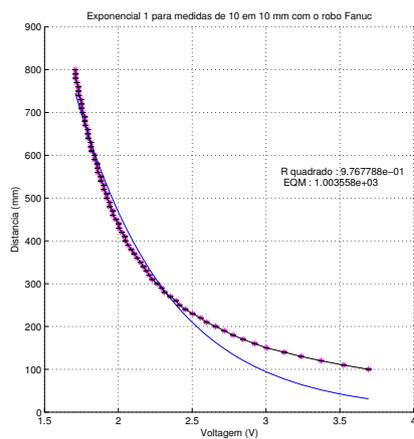
(b) Polinômio de ordem 3.



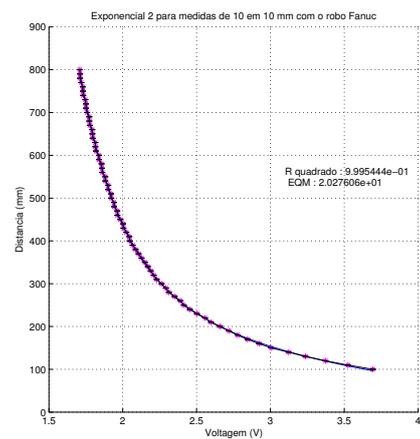
(c) Polinômio de ordem 4.



(d) Polinômio de ordem 5.

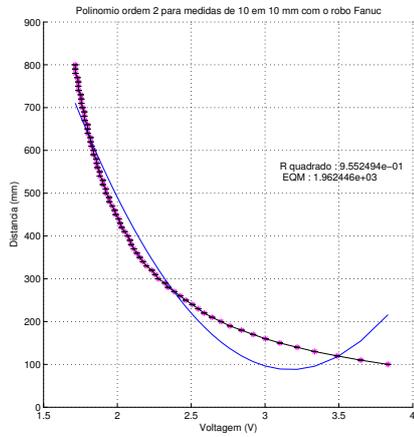


(e) Exponencial do tipo 1.

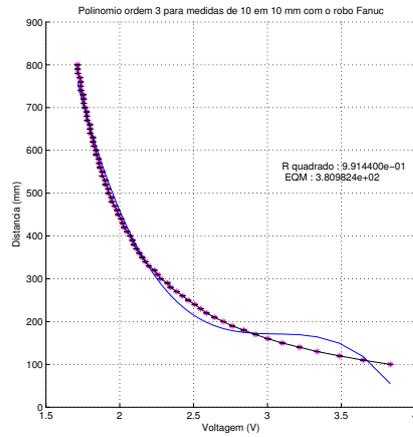


(f) Exponencial do tipo 2.

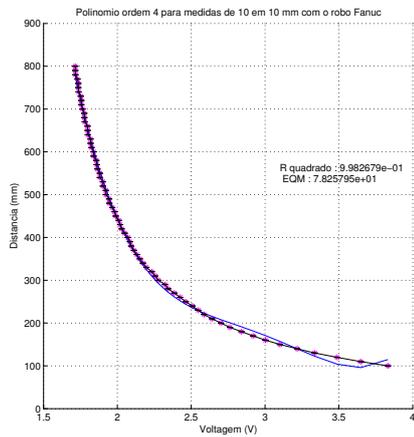
Figura 7.4: Curvas de calibração obtidas para sensor 3.



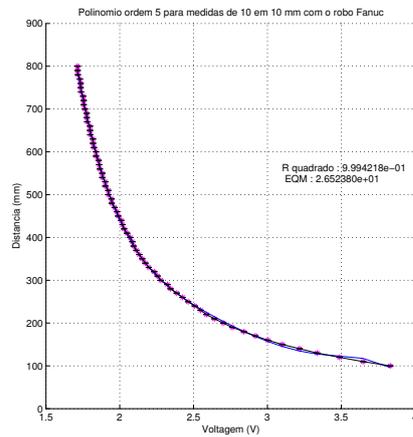
(a) Polinómio de ordem 2.



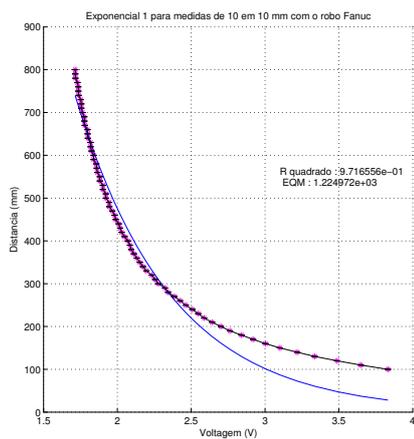
(b) Polinómio de ordem 3.



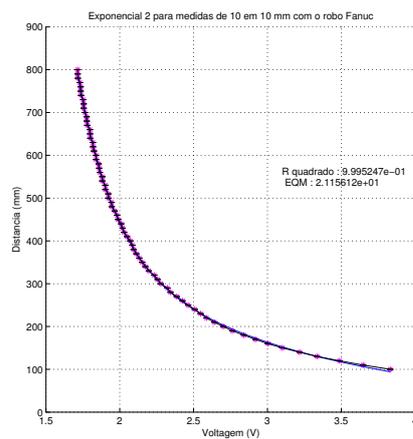
(c) Polinómio de ordem 4.



(d) Polinómio de ordem 5.

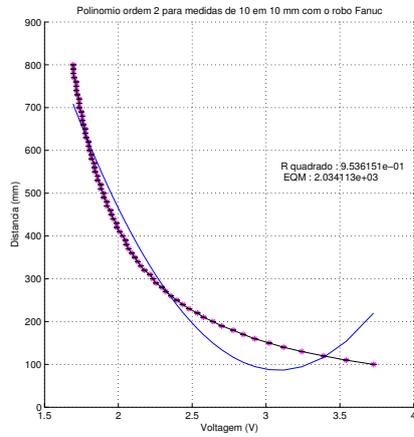


(e) Exponencial do tipo 1.

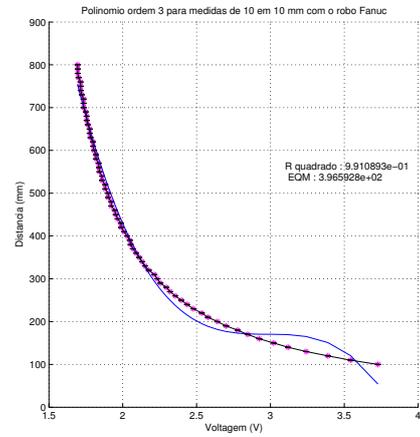


(f) Exponencial do tipo 2.

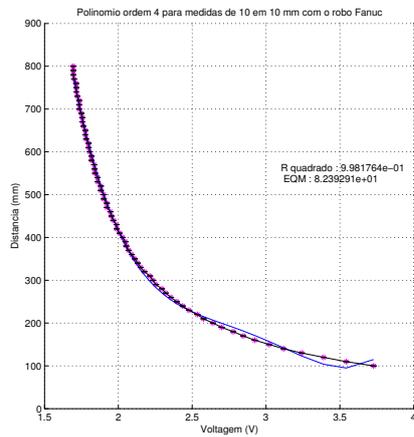
Figura 7.5: Curvas de calibração obtidas para sensor 4.



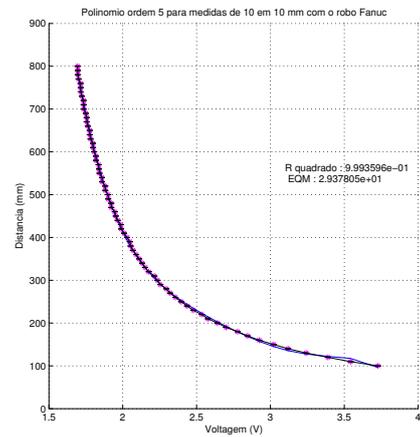
(a) Polinômio de ordem 2.



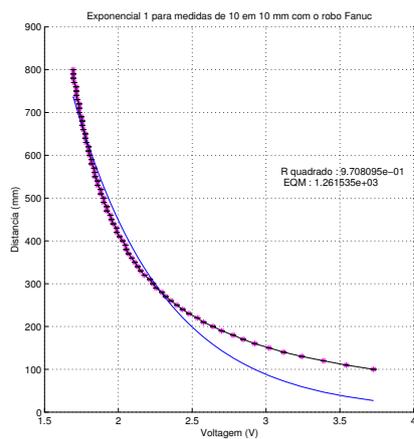
(b) Polinômio de ordem 3.



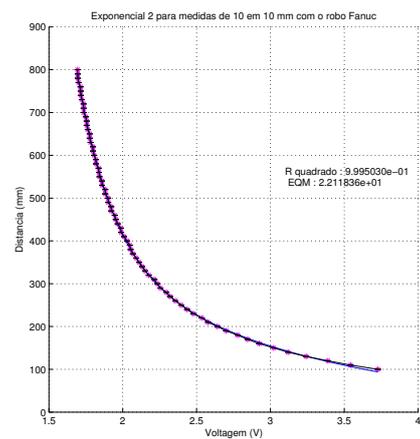
(c) Polinômio de ordem 4.



(d) Polinômio de ordem 5.

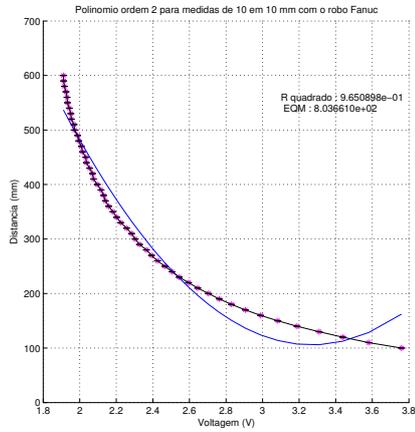


(e) Exponencial do tipo 1.

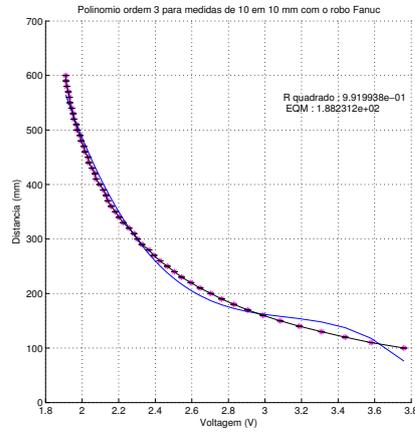


(f) Exponencial do tipo 2.

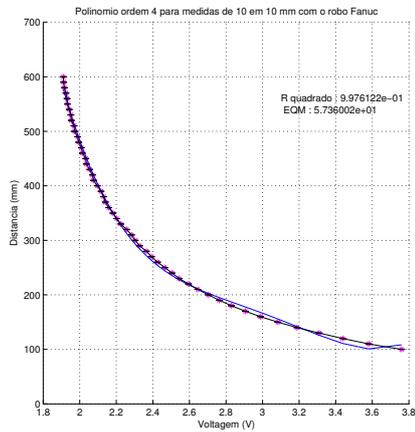
Figura 7.6: Curvas de calibração obtidas para sensor 5.



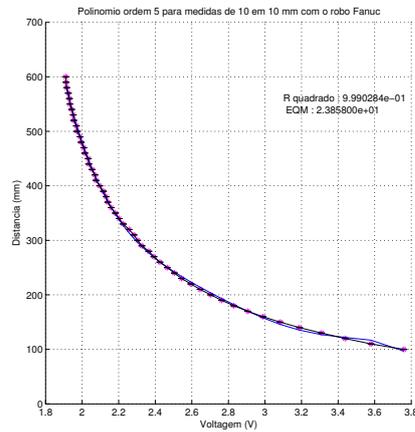
(a) Polinómio de ordem 2.



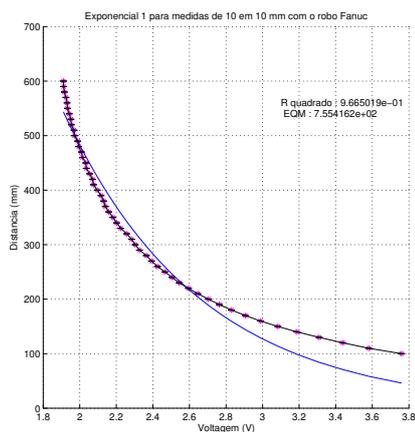
(b) Polinómio de ordem 3.



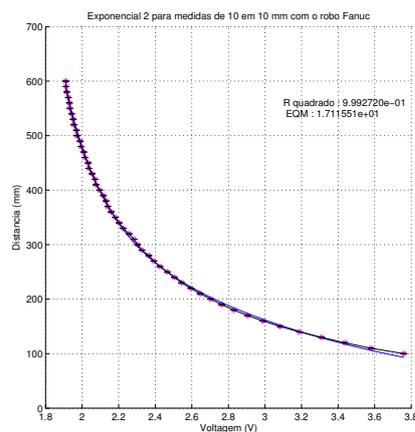
(c) Polinómio de ordem 4.



(d) Polinómio de ordem 5.

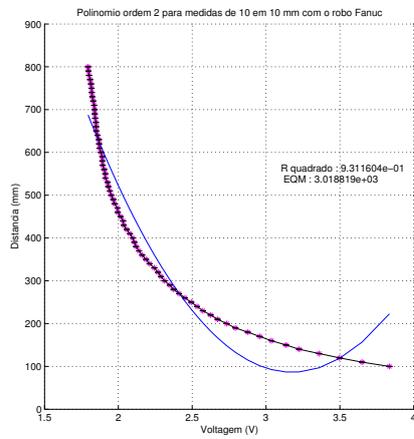


(e) Exponencial do tipo 1.

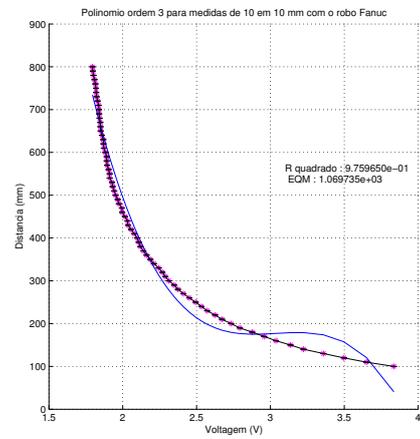


(f) Exponencial do tipo 2.

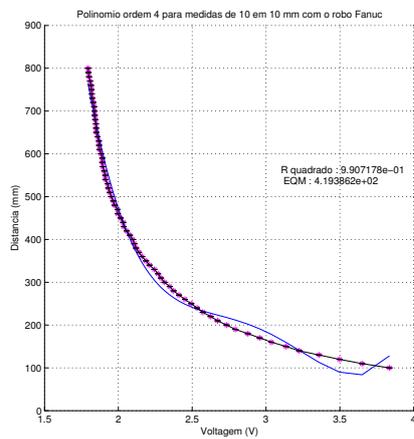
Figura 7.7: Curvas de calibração obtidas para sensor 6.



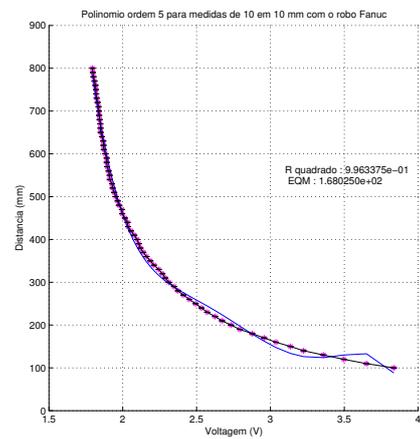
(a) Polinômio de ordem 2.



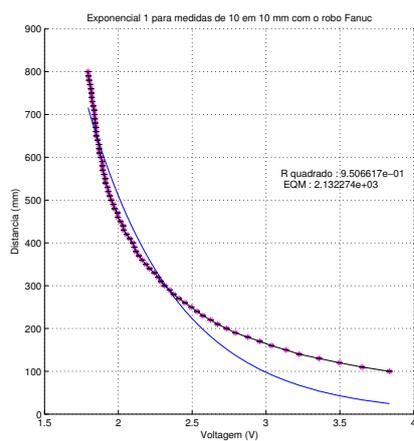
(b) Polinômio de ordem 3.



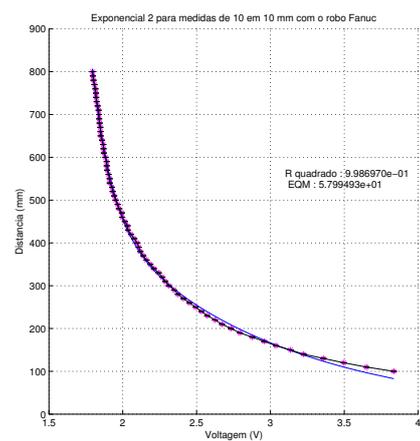
(c) Polinômio de ordem 4.



(d) Polinômio de ordem 5.

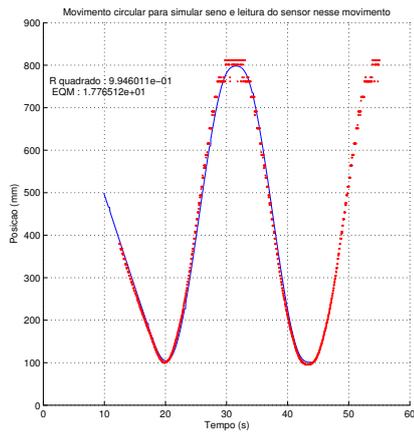


(e) Exponencial do tipo 1.

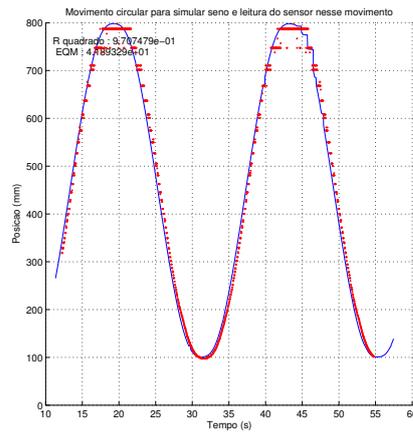


(f) Exponencial do tipo 2.

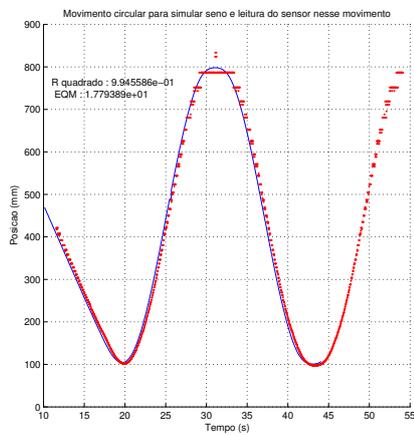
Figura 7.8: Curvas de calibração obtidas para sensor 7.



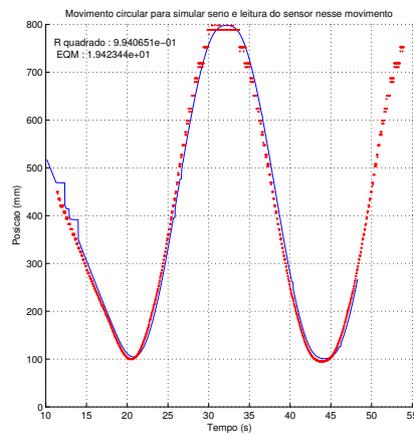
(a) Função sinusoidal, azul dados do robô Fanuc e a vermelho os dados do sensor 1.



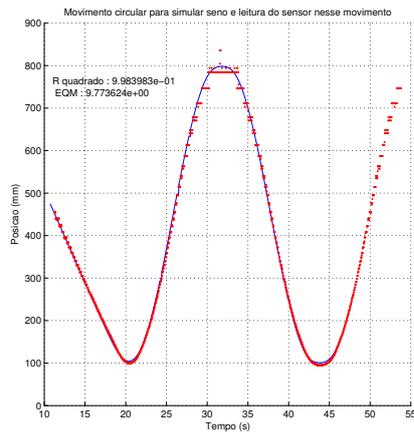
(b) Função sinusoidal, azul dados do robô Fanuc e a vermelho os dados do sensor 2.



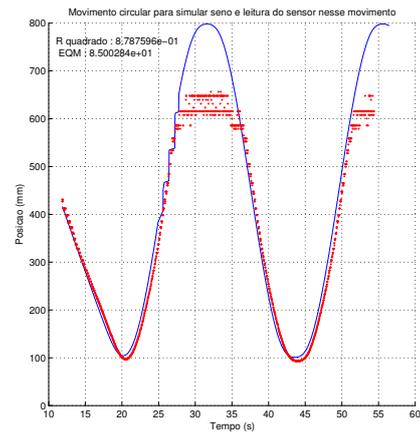
(c) Função sinusoidal, azul dados do robô Fanuc e a vermelho os dados do sensor 3.



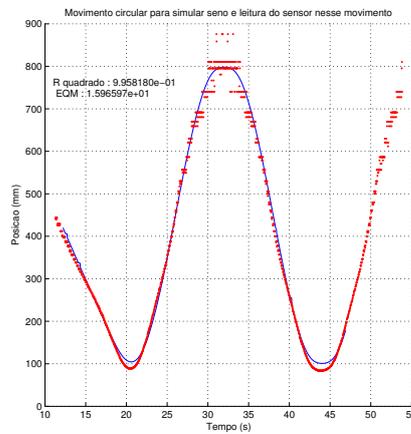
(d) Função sinusoidal, azul dados do robô Fanuc e a vermelho os dados do sensor 4.



(e) Função sinusoidal, azul dados do robô Fanuc e a vermelho os dados do sensor 5.



(f) Função sinusoidal, azul dados do robô Fanuc e a vermelho os dados do sensor 6.



(g) Função sinusoidal, azul dados do robô Fanuc e a vermelho os dados do sensor 7.

Figura 7.9: Valores gráficos obtidos para o teste da resposta com sinusóides dos restantes sensores.

