



Luís Filipe Pedras
Carrão

Sistema de visão para guiamento de AGV em
ambiente industrial





**Luís Filipe Pedras
Carrão**

**Sistema de visão para guiamento de AGV em
ambiente industrial**

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 Vítor Manuel Ferreira dos Santos, Professor Associado do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de Aveiro e de Abílio Manuel Ribeiro Borges, Professor Auxiliar Convidado do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de Aveiro.

O júri / The jury

Presidente / President

Prof. Doutor José Paulo Oliveira Santos

Professor Auxiliar da Universidade de Aveiro

Vogais / Committee

Doutor Procópio Silveira Stein

Investigador da Inria Grenoble Rhône-Alpes

Prof. Doutor Vítor Manuel Ferreira dos Santos

Professor Associado do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de Aveiro (orientador)

Agradecimentos / Acknowledgements

Gostaria de agradecer ao Professor Doutor Vítor Santos, pela orientação, o entusiasmo e motivação que sempre me transmitiu ao longo desta dissertação.

Agradeço ao Professor Abílio Borges, pelas opiniões e por toda a disponibilidade demonstrada.

Ao Jorge Almeida por toda a paciência e apoio prestado ao longo deste projeto.

Gostaria ainda de deixar um agradecimento a todos os meus amigos com os quais partilhei estes últimos anos.

Agradeço ainda à minha namorada, por todo o apoio, compreensão e paciência que teve para comigo ao longo do desenvolvimento deste projeto.

Finalmente, quero deixar um agradecimento especial a toda a minha família, em particular à minha mãe e à minha avó.

Palavras-chave

visão artificial; marcadores; guiamento; ambiente industrial; DataMatrix

Resumo

Este trabalho propõe um sistema de posicionamento utilizando visão artificial, baseada em marcadores, para guiamento em ambiente industrial.

Numa primeira instância foi determinado o tipo de informação que seria representada pelos marcadores, assim como de que forma esta seria interpretada. Posteriormente foi escolhido que tipo de marcadores existentes seriam os mais adequados para as condições da aplicação desejada.

De seguida foi utilizada uma biblioteca, de uso livre, para leitura de códigos *DataMatrix*, com a qual é possível descodificar e obter a posição dos marcadores na imagem.

Posteriormente, conhecendo a informação relativa à geometria dos marcadores tanto real como na imagem foram medidas as suas distâncias. Sabendo o seu posicionamento na imagem foram ainda calculados os ângulos entre estes e o eixo ótico da câmara.

Finalmente, utilizando a informação relativa a estas medições e sabendo a posição de apenas dois marcadores, foi possível calcular o posicionamento (X , Y e ϕ) do *AGV*, com recurso a um método híbrido entre trilateração e triangulação.

Os resultados foram aferidos com um sistema de medição baseado em laser.

Keywords

computer vision; visual landmarks; guidance; industrial environment; Data-Matrix

Abstract

This work proposes a positioning system, using computer vision, based on landmarks, for robot guidance in an industrial environment.

The first step was to determine what kind of information would be represented by the landmarks, as well as how it would be read. Then it was chosen which kind of existing landmarks would be the most adequate for the desired application.

On a second stage an open source library was used for *DataMatrix* decoding, which returns the landmark positions as well as the encoded data.

In sequence, by knowing the landmarks geometric information, it was possible to measure their distances and angles using the images.

Finally, using the measurements and by knowing the position of only two landmarks it was possible to calculate the AGV global positioning (X , Y and ϕ) using an hybrid method of trilateration and triangulation.

Results were compared with those of a laser range finder sensor.

Conteúdo

1	Introdução	1
1.1	Enquadramento	1
1.2	Descrição do problema	2
1.3	Objetivos principais	2
1.4	Plataforma de desenvolvimento	2
2	Revisão do Estado da Arte	5
2.1	Sistemas de localização para <i>AGVs</i> e similares	5
2.1.1	Localização por visão artificial	5
2.1.2	Guiamento por fio	6
2.1.3	Guiamento por fita	6
2.1.4	Guiamento por laser	7
2.1.5	Guiamento inercial	8
2.1.6	Sistemas de localização alternativos	8
2.2	Marcadores Visuais	9
2.2.1	Código de barras	9
2.2.2	Marcadores bidimensionais	10
2.3	Métodos de posicionamento em navegação	11
2.3.1	Trilateração	11
2.3.2	Triangulação	12
3	Sistema de localização	15
3.1	Caracterização dos marcadores	15
3.1.1	Representatividade dos marcadores	15
3.1.2	Seleção do tipo de marcadores	16
3.2	Sistema de aquisição de dados	18
3.2.1	Aquisição de imagem	18
3.2.2	Detecção e leitura dos marcadores	19
3.3	Posicionamento absoluto	21
3.3.1	Cálculo do centro e altura dos marcadores	21
3.3.2	Medição dos ângulos e distâncias aos marcadores	22
3.3.3	Cálculo da posição	23
3.3.4	Integração com o <i>ROS</i>	28

4	Experiências e Resultados	29
4.1	Método de validação experimental	29
4.2	Testes realizados	31
4.3	Resultados	35
4.3.1	Problemas identificados	46
4.3.2	Resultados melhorados	49
5	Conclusões e trabalho futuro	63
5.1	Conclusões gerais	63
5.2	Trabalho futuro	64

Lista de Tabelas

3.1	Tabela comparativa do espaço utilizado por cada uma das simbologias em análise.	17
4.1	Tabela comparativa da quantidade de medições que satisfaz a condição de erro no posicionamento inferior a 40 cm, para cada um dos ensaios realizados antes e após as melhorias efetuadas.	62
4.2	Tabela dos tempos de processamento, em milissegundos, dos módulos de detecção e de posicionamento para cada um dos ensaios realizados	62

Lista de Figuras

2.1	Representação esquemática da estrutura de um sistema de guiamento por fio	6
2.2	Exemplo de guiamento de um <i>AGV</i> usando banda magnética	7
2.3	Exemplo de guiamento por laser, onde pode ser observado o laser a incidir sobre os refletores colocados no ambiente circundante	7
2.4	Exemplo de guiamento inercial, sendo visíveis os ímanes embutidos no chão	8
2.5	Exemplo de código de barras. a) Segundo a norma europeia EAN-13; b) Segundo a norma norte americana UPC-A	10
2.6	Exemplos de códigos bidimensionais de uso livre	10
2.7	Exemplo da aplicação do método da Trilateração, utilizado na tecnologia <i>GPS</i> . À direita é visível a interseção de duas circunferências, com duas localizações possíveis. À Esquerda, com a adição de uma terceira circunferência é encontrada a localização exata	12
2.8	Exemplo de obtenção da localização por triangulação, onde R é a posição do robô, B_1 , B_2 e B_3 representam os pontos de referência e α_1 , α_2 e α_3 são os ângulos da orientação do robô relativamente a cada um dos pontos de referência	12
3.1	Exemplo de um <i>QR Code</i> e um <i>DataMatrix</i> , respectivamente. Ambos codificam "http://google.com" e apresentam células de iguais dimensões	17
3.2	Exemplo de correção da distorção de uma imagem com efeito "barril".	19
3.3	Representação da interação entre o módulo de aquisição de imagem (<i>usb_cam_reader</i>) e o módulo de correção da distorção (<i>image_proc</i>). É visível o envio da imagem e informação de calibração e após correção da distorção é enviada a imagem retificada.	19
3.4	Figura representativa da informação que é obtida do módulo de detecção e leitura dos marcadores, onde são visíveis os cantos marcados com círculos vermelhos e a descodificação representada como texto a verde.	20
3.5	Representação do cálculo do centro do marcador e de metade da sua altura h	21
3.6	Representação, vista de cima, da formação da imagem e das linhas de visão de dois marcadores.	22
3.7	Representação da imagem B , de um objeto A , segundo a perspectiva da câmara. Onde H é a altura do objecto, D é a sua distância à câmara, f é a distância focal e h é a altura do objecto na imagem.	23
3.8	Representação esquemática do cálculo da interseção entre duas circunferências.	23

3.9	Representação dos triângulos formados com o sistema de coordenadas pelos vetores P_0 a P_1 e P_2 a P_3	24
3.10	Representação dos ângulos formados desde o marcador M_1 até M_2 a partir de cada um dos pontos de interseção I_1 e I_2 , os quais apresentam a mesma magnitude mas sinais opostos.	25
3.11	Representação dos ângulos formados desde o marcador M_1 até M_2 a partir de cada um dos pontos de interseção I_1 e I_2 , os quais apresentam a mesma magnitude mas sinais opostos.	26
3.12	Representação esquemática da interação entre os diferentes módulos, desde a aquisição da imagem (<i>usb_cam_reader</i>), à detecção de marcadores (<i>datamatrix_detection</i>) até ao cálculo da posição (<i>datamatrix_calculations</i>)	28
4.1	<i>Hardware</i> utilizado na recolha de dados onde é visível o <i>laser SICK-LMS151</i> e a câmara <i>Logitech c310</i>	30
4.2	Representação esquemática da orientação do laser relativamente ao plano perpendicular ao marcador M.	31
4.3	Representação do desfasamento angular θ , entre os dados da câmara e os dados laser.	31
4.4	Imagens do LAR, onde é visível o ambiente caótico, como acontece em ambiente fabril.	32
4.5	Imagens do corredor do DEM, onde é visível o ambiente polido e organizado. Em a) está representado o ambiente original e em b) são visíveis os marcadores colocados.	32
4.6	Planta do LAR, onde está representado o sistema de coordenadas adotado, assim como os marcadores colocados, representados com uma circunferência vermelha.	33
4.7	Planta do quarto piso do DEM, onde está representado o sistema de coordenadas adotado, assim como os marcadores colocados, representados com uma circunferência vermelha.	33
4.8	Figura exemplo do estado das imagens adquiridas em movimento, onde se pode notar a imagem nitidamente desfocada.	34
4.9	Representação da trajetória seguida e dos marcadores utilizados em ambos os testes realizados, marcados pela seta verde e circunferências vermelhas respetivamente.	35
4.10	Distribuição do erro das distâncias medidas no primeiro ensaio realizado, onde cada barra corresponde a um intervalo de 2 centímetros. Em a) é visível a distribuição completa. Em b) é mostrado o intervalo com maior incidência do erro, contendo 99.3% do total dos dados obtidos com média 2.7 e desvio padrão 12.0.	36
4.11	Distribuição do erro das distâncias medidas no segundo ensaio realizado, onde cada barra corresponde a um intervalo de 2 centímetros. Em a) é visível a distribuição completa. Em b) é mostrado o intervalo com maior incidência do erro, contendo 99.7% do total dos dados obtidos com média 3.0 e desvio padrão 11.7.	36

4.12	Distribuição do erro da posição calculada para o primeiro ensaio realizado, onde cada barra corresponde a um intervalo de 3 centímetros. Em a) é visível a distribuição completa. Em b) é mostrado o intervalo com maior incidência do erro, contendo 99.2% do total dos dados obtidos.	37
4.13	Distribuição do erro da posição calculada para o segundo ensaio realizado, onde cada barra corresponde a um intervalo de 3 centímetros. Em a) é visível a distribuição completa. Em b) é mostrado o intervalo com maior incidência do erro, contendo 99.4% do total dos dados obtidos.	37
4.14	Representação visual das trajetórias obtidas no primeiro ensaio. Utilizando os dados da câmara, a vermelho e os dados <i>laser</i> , a verde.	38
4.15	Representação visual das trajetórias obtidas no segundo ensaio. Utilizando os dados da câmara, a vermelho e os dados <i>laser</i> , a verde.	38
4.16	Representação da trajetória seguida e dos marcadores utilizados em ambos os testes realizados, marcados pela seta verde e circunferências vermelhas respetivamente.	39
4.17	Distribuição do erro das distâncias medidas no primeiro ensaio realizado, onde cada barra corresponde a um intervalo de 2 centímetros. Em a) é visível a distribuição completa. Em b) é mostrado o intervalo com maior incidência do erro, contendo 99.2% do total dos dados obtidos com média 5.4 e desvio padrão 11.5.	40
4.18	Distribuição do erro das distâncias medidas no segundo ensaio realizado, onde cada barra corresponde a um intervalo de 2 centímetros. Em a) é visível a distribuição completa. Em b) é mostrado o intervalo com maior incidência do erro, contendo 99.9% do total dos dados obtidos com média 5.7 e desvio padrão 11.1.	40
4.19	Distribuição do erro da posição calculada para o primeiro ensaio realizado, onde cada barra corresponde a um intervalo de 3 centímetros. Em a) é visível a distribuição completa. Em b) é mostrado o intervalo com maior incidência do erro, contendo 99.4% do total dos dados obtidos.	41
4.20	Distribuição do erro da posição calculada para o segundo ensaio realizado, onde cada barra corresponde a um intervalo de 3 centímetros. Em a) é visível a distribuição completa. Em b) é mostrado o intervalo com maior incidência do erro, contendo 99.7% do total dos dados obtidos.	41
4.21	Representação visual das trajetórias obtidas no primeiro ensaio. Utilizando os dados da câmara, a vermelho e os dados <i>laser</i> , a verde.	42
4.22	Representação visual das trajetórias obtidas no segundo ensaio. Utilizando os dados da câmara, a vermelho e os dados <i>laser</i> , a verde.	42
4.23	Representação da trajetória seguida e dos marcadores utilizados em ambos os testes realizados, marcados pela seta verde e circunferências vermelhas respetivamente.	43
4.24	Distribuição do erro das distâncias medidas no primeiro ensaio realizado, onde cada barra corresponde a um intervalo de 2 centímetros. Em a) é visível a distribuição completa. Em b) é mostrado o intervalo com maior incidência do erro, contendo 98.0% do total dos dados obtidos com média 1.6 e desvio padrão 10.1.	44

4.25	Distribuição do erro das distâncias medidas no segundo ensaio realizado, onde cada barra corresponde a um intervalo de 2 centímetros. Em a) é visível a distribuição completa. Em b) é mostrado o intervalo com maior incidência do erro, contendo 97.7% do total dos dados obtidos com média -1.8 e desvio padrão 10.5.	44
4.26	Distribuição do erro da posição calculada para o primeiro ensaio realizado, onde cada barra corresponde a um intervalo de 3 centímetros. Em a) é visível a distribuição completa. Em b) é mostrado o intervalo com maior incidência do erro, contendo 98.6% do total dos dados obtidos.	45
4.27	Distribuição do erro da posição calculada para o segundo ensaio realizado, onde cada barra corresponde a um intervalo de 3 centímetros. Em a) é visível a distribuição completa. Em b) é mostrado o intervalo com maior incidência do erro, contendo 98.8% do total dos dados obtidos.	45
4.28	Representação visual das trajetórias obtidas no primeiro ensaio. Utilizando os dados da câmara, a vermelho e os dados <i>laser</i> , a verde.	46
4.29	Representação visual das trajetórias obtidas no segundo ensaio. Utilizando os dados da câmara, a vermelho e os dados <i>laser</i> , a verde.	46
4.30	Representação da interseção calculada entre dois marcadores. Onde a espessura da linha representa o erro associado à medição da distância e a área que se encontra sobreposta corresponde à incerteza da medição. Em a) temos dois marcadores muito próximos, em b) estes estão alinhados segundo a perspectiva da câmara e em c) encontram-se mais afastados, verificando-se uma melhoria significativa na incerteza.	47
4.31	Representação do posicionamento entre dois marcadores com um ângulo de 31.8°. A verde está representada a posição obtida pelo laser e a vermelho pela câmara.	48
4.32	Representação do posicionamento entre dois marcadores com um ângulo de 27.6°. A verde está representada a posição obtida pelo laser e a vermelho pela câmara.	48
4.33	Representação do posicionamento entre dois marcadores com um ângulo de 4.3°. A verde está representada a posição obtida pelo laser e a vermelho pela câmara.	48
4.34	Esquema representativo das melhorias implementadas. Seja <i>par</i> um par possível para dado número de marcadores n , M_1 e M_2 os dois marcadores que formam o par em análise, α_1 e α_2 os ângulos relativos a esses marcadores, P_j a posição para ao par de marcadores j e P a posição final para dado instante.	49
4.35	Distribuição do erro da posição calculada para o primeiro ensaio realizado, onde cada barra corresponde a um intervalo de 3 centímetros. Em a) esta é mostrada após as melhorias, contendo 100% do total dos dados obtidos. Em b) estão ainda representadas as trajetórias obtidas utilizando os dados da câmara, a vermelho e os dados <i>laser</i> , a verde.	50
4.36	Distribuição do erro da posição calculada para o segundo ensaio realizado, onde cada barra corresponde a um intervalo de 3 centímetros. Em a) esta é mostrada após as melhorias, contendo 99.8% do total dos dados obtidos. Em b) estão ainda representadas as trajetórias obtidas utilizando os dados da câmara, a vermelho e os dados <i>laser</i> , a verde.	51

4.37	Distribuição do erro da posição calculada para o primeiro ensaio realizado, onde cada barra corresponde a um intervalo de 3 centímetros. Em a) esta é mostrada após as melhorias, contendo 100% do total dos dados obtidos. Em b) estão ainda representadas as trajetórias obtidas utilizando os dados da câmara, a vermelho e os dados <i>laser</i> , a verde.	52
4.38	Distribuição do erro da posição calculada para o segundo ensaio realizado, onde cada barra corresponde a um intervalo de 3 centímetros. Em a) esta é mostrada após as melhorias, contendo 100% do total dos dados obtidos. Em b) estão ainda representadas as trajetórias obtidas utilizando os dados da câmara, a vermelho e os dados <i>laser</i> , a verde.	53
4.39	Distribuição do erro da posição calculada para o primeiro ensaio realizado, onde cada barra corresponde a um intervalo de 3 centímetros. Em a) esta é mostrada após as melhorias, contendo 100% do total dos dados obtidos. Em b) estão ainda representadas as trajetórias obtidas utilizando os dados da câmara, a vermelho e os dados <i>laser</i> , a verde.	54
4.40	Distribuição do erro da posição calculada para o segundo ensaio realizado, onde cada barra corresponde a um intervalo de 3 centímetros. Em a) esta é mostrada após as melhorias, contendo 100% do total dos dados obtidos. Em b) estão ainda representadas as trajetórias obtidas utilizando os dados da câmara, a vermelho e os dados <i>laser</i> , a verde.	55
4.41	Distribuição do erro da posição calculada para o primeiro ensaio realizado, onde cada barra corresponde a um intervalo de 3 centímetros. Em a) esta é mostrada após as melhorias, contendo 100% do total dos dados obtidos. Em b) estão ainda representadas as trajetórias obtidas utilizando os dados da câmara, a vermelho e os dados <i>laser</i> , a verde.	56
4.42	Distribuição do erro da posição calculada para o segundo ensaio realizado, onde cada barra corresponde a um intervalo de 3 centímetros. Em a) esta é mostrada após as melhorias, contendo 100% do total dos dados obtidos. Em b) estão ainda representadas as trajetórias obtidas utilizando os dados da câmara, a vermelho e os dados <i>laser</i> , a verde.	57
4.43	Distribuição do erro da posição calculada para o primeiro ensaio realizado, onde cada barra corresponde a um intervalo de 3 centímetros. Em a) esta é mostrada após as melhorias contendo 98.9% do total dos dados obtidos. Em b) estão ainda representadas as trajetórias obtidas utilizando os dados da câmara, a vermelho e os dados <i>laser</i> , a verde.	58
4.44	Distribuição do erro da posição calculada para o segundo ensaio realizado, onde cada barra corresponde a um intervalo de 3 centímetros. Em a) esta é mostrada após as melhorias, contendo 99.5% do total dos dados obtidos. Em b) estão ainda representadas as trajetórias obtidas utilizando os dados da câmara, a vermelho e os dados <i>laser</i> , a verde.	59
4.45	Distribuição do erro da posição calculada para o primeiro ensaio realizado, onde cada barra corresponde a um intervalo de 3 centímetros. Em a) esta é mostrada após as melhorias contendo 100% do total dos dados obtidos. Em b) estão ainda representadas as trajetórias obtidas utilizando os dados da câmara, a vermelho e os dados <i>laser</i> , a verde.	60

4.46	Distribuição do erro da posição calculada para o segundo ensaio realizado, onde cada barra corresponde a um intervalo de 3 centímetros. Em a) esta é mostrada após as melhorias, contendo 100% do total dos dados obtidos. Em b) estão ainda representadas as trajetórias obtidas utilizando os dados da câmara, a vermelho e os dados <i>laser</i> , a verde.	61
------	--	----

Capítulo 1

Introdução

1.1 Enquadramento

Com o aumento da competitividade, há uma crescente necessidade de encontrar métodos e equipamentos mais eficientes, com o objetivo de aumentar a produtividade e qualidade dos serviços prestados.

Um dos factores que muito afetam a produtividade e, portanto, a eficiência da produção, é a movimentação de materiais e componentes dentro do ambiente fabril, tarefa que apresenta um peso relevante nos custos totais de produção. Além disso, a não utilização dos equipamentos apropriados, seja na reposição de matéria prima, no transporte de material em processamento, ou no armazenamento de produto final, leva ao aumento de custos, tempo de produção e perdas de produto. Desta forma, revela-se de extrema importância o planeamento de rotinas de transporte eficazes e seguras, tal como o desenvolvimento de soluções adequadas e de baixo custo.

Neste sentido, e acompanhando a tendência crescente em automatizar as linhas de produção, surgiram os veículos com guiamento automático (*Automated Guided Vehicle*), frequentemente utilizados no transporte interno de materiais. Este tipo de veículo apresenta inúmeras vantagens relativamente ao método tradicional; os *AGV* são autónomos, utilizando baterias, o que permite que trabalhem continuamente, tornando-os assim muito mais eficientes; possibilitam o controlo de todas as operações, bem como dos materiais transportados; permitem que haja comunicação e coordenação entre si e com os restantes equipamentos, levando-os a estar no sitio certo à hora certa; são equipados com sensores para evitar colisões com outros obstáculos e operadores, reduzindo a incidência de acidentes pessoais e perdas de material [1, 2]. Existem vários tipos de *AGV*, conforme a aplicação a que esteja destinado: pode ser reboque, porta-paletes, empilhador, de carga única, entre outros [3]; no entanto, esta dissertação foca-se nos sistemas de guiamento e não no veículo em si.

"Atualmente os *AGV* são utilizados em quase todo o tipo de indústrias, incluindo da celulose, do papel, dos metais, dos jornais e na indústria de fabrico. O transporte de materiais como alimentos, têxteis ou de medicamentos em hospitais é também realizado." [4]

1.2 Descrição do problema

Os veículos com guiamento automático em ambiente industrial estão tradicionalmente ligados ao guiamento por fio (filo-guiados), ou por linhas ou bandas magnéticas colocadas no pavimento. Este tipo de solução apresenta vários problemas, nomeadamente quando há a necessidade de reconfiguração das rotas devido a alterações da disposição do chão de fábrica; há ainda problemas relativamente à deterioração da fita colocada sobre o pavimento, causada pela passagem de pessoas e equipamentos. Desta forma, torna-se necessário encontrar uma solução de guiamento alternativa, flexível e de baixo custo, que permita ultrapassar estes problemas. Nesse sentido, uma possível alternativa passa pelo guiamento com recurso à utilização de um sistema de visão artificial, baseado em marcadores, o qual possibilita a leitura à distância, dispensando a colocação de marcações no chão de fábrica e conseqüentemente reduzindo o seu desgaste. Esta abordagem permitirá ainda uma fácil alteração da disposição dos marcadores, facilitando desta forma a adição ou o rearranjo das rotas implementadas.

1.3 Objetivos principais

Esta dissertação tem como principal objetivo o desenvolvimento de um sistema alternativo de guiamento por visão artificial, baseado em marcadores, que permita a navegação de um *AGV* em ambiente industrial. Portanto, pretende-se obter a localização relativa do *AGV* no chão de fábrica em três dimensões (X, Y e orientação (ϕ)).

Para tal será necessário proceder à caracterização dos marcadores, que deverão ter dimensões não superiores às de uma folha A4 e determinar os afastamentos entre si, que deverá ser, no mínimo, de alguns metros. Será ainda estudado que tipo de informação deverão conter, como será representada e interpretada.

Finalmente, será necessário desenvolver *software* que permita a leitura e interpretação da informação contida nos marcadores, tal como o cálculo do posicionamento global do *AGV* com base na posição relativa aos marcadores.

1.4 Plataforma de desenvolvimento

Esta dissertação está integrada nos trabalhos levados a cabo pelo Laboratório de Automação e Robótica e, como tal, a plataforma de desenvolvimento de *software* é o *Robot Operating System (ROS)*, que permite a sua fácil utilização por parte de qualquer outro colaborador do laboratório para além de facilitar a interação com o *hardware*, entre outras potencialidades.

O *Robot Operating System (ROS)* é uma plataforma flexível de desenvolvimento de *software* para aplicações de robótica, que surgiu da necessidade de haver uma plataforma de colaboração, de uso livre, da parte da comunidade de investigadores da área da robótica. O *ROS* disponibiliza ferramentas, *drivers* e bibliotecas padrão que visam facilitar a comunicação de dados entre diferentes processos. Esta característica possibilita também a independência entre o *software* e o *hardware* utilizado [5].

O *ROS* oferece uma estrutura de organização modular, constituída por *packages*, que podem conter vários módulos de *software* destinados a realizar uma determinada tarefa. Como meio de comunicação entre os vários módulos, do mesmo ou de diferentes

packages, o *ROS* permite a criação de tópicos, nos quais são publicadas as mensagens desejadas. Estes podem posteriormente ser subscritos por outros módulos que terão acesso à informação ali publicada. Esta característica permite o desenvolvimento, de forma independente, de *software* de aquisição de dados e o seu processamento, ou a realização de qualquer outra tarefa de forma partilhada, assim como o desenvolvimento, em simultâneo, do mesmo projeto por parte de vários colaboradores.

Capítulo 2

Revisão do Estado da Arte

De forma a desenvolver um novo sistema de posicionamento para um *AGV* é necessário ter um conhecimento prévio das tecnologias existentes e atualmente implementadas. Nesse sentido é necessário estudar os sistemas existentes de localização de *AGVs* e similares, assim como a tipologia de marcadores visuais e por último os métodos de cálculo da localização em navegação.

2.1 Sistemas de localização para *AGVs* e similares

Atualmente existem várias soluções de guiamento para aplicação em *AGV*, apresentando algumas vantagens umas sobre as outras, desde a flexibilidade à precisão e também aos custos associados. Destas, as mais utilizadas em ambiente industrial passam pelo guiamento por fio, por banda magnética, por visão artificial, por laser e também o guiamento inercial.

2.1.1 Localização por visão artificial

Dentro desta classe existe o guiamento por características naturais, em que é feita uma aprendizagem prévia do ambiente circundante. Os dados são depois processados para extrair características únicas do ambiente, que são guardadas numa base de dados, juntamente com a posição e orientação da câmara. Posteriormente, em operação, é adquirida imagem da qual são extraídas as mesmas características do ambiente circundante. Estas características são comparadas com as presentes na base de dados, seja diretamente ou através de transformações espaciais que levem à melhor correspondência. Uma vez encontrada a correspondência entre imagens, é definida a localização [6].

Este tipo de solução não requer que sejam colocados marcadores, no entanto, obriga a uma aprendizagem do ambiente que é susceptível a modificações e requer um elevado nível de programação e custo computacional.

Nesta classe existe ainda um outro tipo de localização, que se baseia na deteção de marcadores visuais. Este tipo de algoritmos são especificamente desenhados para detetar padrões artificialmente criados e colocados no ambiente. Uma vez que as características dos marcadores a detetar são conhecidas, este tipo de localização não requer que seja feita uma aprendizagem prévia do meio circundante. No entanto, continua a ser necessária a criação de uma base de dados para determinar a localização da câmara relativamente a um referencial. Contudo, neste caso, a base de dados pode ser automaticamente criada,

ao guardar um número de identificação, associado a cada marcador, juntamente com as suas coordenadas. O número de identificação pode ser codificado pelo marcador, tal como a imagem de um código de barras representa um número [6].

Este método apresenta vantagens relativamente ao anteriormente descrito, nomeadamente a redução do custo computacional, melhoria na precisão e robustez ao ruído [6].

2.1.2 Guiamento por fio

O guiamento por fio tem sido o mais utilizado na indústria, devido à sua segurança e fiabilidade. Este sistema é mais simples e implica menos meios de programação que os alternativos, o que torna a sua implementação de baixo custo [7]. Este tipo de solução é aplicada através de fio condutor, colocado sob o chão, como se pode ver na figura 2.1.

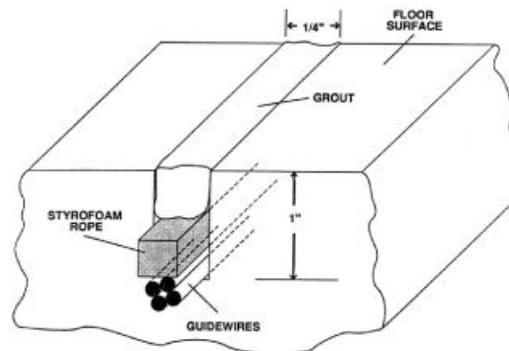


Figura 2.1: Representação esquemática da estrutura de um sistema de guiamento por fio [7].

Este, ao ser electrificado, cria um campo magnético com uma dada frequência, o qual é detetado e seguido continuamente pelo *AGV*. Esta tecnologia é no entanto pouco flexível, porque é difícil a alteração ou adição de rotas àquelas já existentes [7].

2.1.3 Guiamento por fita

Este tipo de guiamento é feito recorrendo a uma fita magnética, colada diretamente na superfície do chão, que é seguida pelo *AGV*, como pode ser observado na figura 2.2, não sendo necessário qualquer corte no chão, como acontece com o guiamento por fio.

Desta forma, esta solução é bastante mais flexível, tornando fácil a adição ou alteração das rotas e é simultaneamente a que apresenta melhor relação qualidade-preço [8]. Por outro lado, por estar à superfície, a fita encontra-se exposta à passagem de pessoas e equipamentos, podendo ficar danificada, o que, sendo este um método de guiamento contínuo, leva à paragem do *AGV*, assim como à necessidade de reparações periódicas [9].

De forma semelhante ao que acontece no guiamento por banda magnética, existem soluções, baseadas em visão artificial, onde é feita a sua substituição por fita colorida, ou onde é pintada uma linha apenas visível na gama ultravioleta [10].



Figura 2.2: Exemplo de guiamento de um *AGV* usando banda magnética [11].

2.1.4 Guiamento por laser

Em meados dos anos 80 surgiu o guiamento usando triangulação laser, representado na imagem 2.3. Neste tipo de solução são colocados alvos refletivos em pilares, paredes ou máquinas, em ambos os lados da trajetória, com um espaçamento de cerca de 6 a 15 metros entre si. A cada um dos alvos são atribuídas coordenadas X , Y conhecidas que são gravadas na memória do *AGV*. A bordo do *AGV* há um emissor e receptor laser rotativo. Quando o laser é reflectido por um alvo reconhecido a sua distância e ângulo são medidos automaticamente, e através do processamento de várias reflexões a cada momento, o *AGV* calcula o seu posicionamento. Posteriormente, o *AGV* compara a posição calculada com o mapa de coordenadas do trajeto pré-planeado guardado em memória e determina as instruções de direção enquanto continua ao longo da instalação [3].

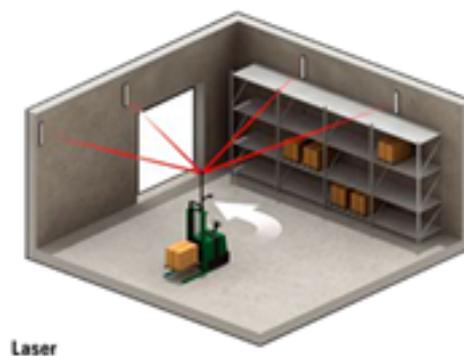


Figura 2.3: Exemplo de guiamento por laser, onde pode ser observado o laser a incidir sobre os refletores colocados no ambiente circundante [12].

Este tipo de solução tem a vantagem de tornar muito mais flexível a adição ou alterações nas rotas, pois basta colocar mais marcadores e adicionar a informação relativa às suas coordenadas aos dados na memória do *AGV*. Porém, possui algumas desvantagens, como o facto de ser mais cara que as referidas anteriormente e ser dificilmente implementada em zonas amplas, pois é necessária a existência de alvos refletores nas zonas circundantes. Para além disso, há a possibilidade de os alvos se encontrarem obstruídos ou de haver um desencontro entre estes e o laser, devido a irregularidades no terreno, o que provoca a paragem do veículo [9].

2.1.5 Guiamento inercial

Neste tipo de tecnologia os *AGVs* são equipados de um giroscópio para detetar pequenos desvios de direção, que são comparados com a rota planeada de forma a permitir ajustes na trajetória do *AGV*. Complementarmente, este sistema dispõe de pequenos ímanes, embutidos no chão da instalação, visíveis na imagem 2.4, aos quais são atribuídas coordenadas únicas, guardadas na memória do *AGV*. Estes ímanes são distribuídos com aproximadamente 8 metros de distância entre si e permitem que os erros acumulados pelo giroscópio sejam corrigidos de forma a manter o *AGV* na rota planeada [3].



Figura 2.4: Exemplo de guiamento inercial, sendo visíveis os ímanes embutidos no chão [12].

Este tipo de guiamento é mais versátil e também flexível, no entanto, é de difícil aplicação em instalações extensas e dependendo da precisão do sensor magnético poderá ser necessária a calibração da posição para diferentes veículos [12].

2.1.6 Sistemas de localização alternativos

Na literatura existem inúmeras soluções alternativas de localização em ambiente interior, no entanto, algumas serão apenas brevemente referenciadas pois fogem ao âmbito desta dissertação, tais como:

O posicionamento por radio-frequência que engloba quatro diferentes tipos de tecnologia: baseado em redes locais, que incluem tecnologias como *Wi-Fi*, *Ultra-Wideband*, *ZigBee* ou *Bluetooth*, onde é medida a direção ou ângulo de chegada, a intensidade ou o tempo de voo do sinal e obtida a posição por triangulação; com o auxílio de redes globais, onde são utilizadas tecnologias como *GPS* ou mesmo o sinal da rede de telemóvel ou da

emissão de televisão; localização por etiquetas *RFID* e por último, com recurso a Radar de rádio-frequências [6].

Outro tipo de solução passa pelo uso de ondas sonoras, numa tecnologia híbrida complementada com ondas de rádio-frequência. Existem ainda propostas baseadas em soluções mecânicas, utilizando células de carga [6].

No sentido de saber mais pormenores relativos às tecnologias referidas anteriormente, é aconselhada a leitura da revisão bibliográfica referida por [6].

2.2 Marcadores Visuais

Um marcador visual pode ser qualquer tipo de marca, mais ou menos complexa que possa ser identificada e reconhecida. Existem inúmeros tipos de marcadores visuais. Estes podem ir desde simples formas geométricas, até padrões mais complexos, a preto e branco, a cores ou até mesmo tridimensionais. Existem ainda marcadores padrão, abordados nesta dissertação, que permitem codificar alguma informação e podem ser uni-dimensionais ou bidimensionais.

2.2.1 Código de barras

O código de barras é um marcador uni-dimensional utilizado para codificar informação. Neste tipo de codificação cada caractere é representado por um padrão de barras negras, em fundo branco, com largura variável.

Para descodificar os códigos de barras são utilizados dispositivos que contém um fotosensor, responsável por converter o código de barras num sinal eléctrico. Posteriormente, é medida a largura relativa entre as barras e os espaços, descodificando os padrões nos caracteres correspondentes [13].

Os códigos de barras apresentam uma estrutura de codificação bem definida, com um caractere especial que representa o início do código, assim como outro que permite identificar o seu fim. Esta particularidade possibilita ainda ao interpretador detetar o código, assim como saber o sentido no qual está a ler [13].

Com a finalidade de tornar o código de barras mais robusto, algumas variantes podem incluir nas suas especificações um caractere que se destina à deteção de erros na leitura. Este é obtido mediante alguns cálculos, envolvendo os caracteres codificados, e é também incluído no código de barras, imediatamente antes do último caractere. Posteriormente, ao fazer uma leitura, o interpretador sabe, por comparação com o caractere de verificação, se o código foi lido corretamente ou não [13].

Existem inúmeras variantes desta simbologia que diferem pelas suas especificações técnicas: a largura das barras, a correspondência dos caracteres, o método de codificação, as especificações de verificação de erros na leitura, entre outras. Encontram-se ainda diferenças quanto ao tipo de caracteres que é possível codificar, algumas variantes permitem a codificação de caracteres alfa-numéricos, como é o caso do código 128 ou 39, enquanto que em outras apenas é possível a codificação de caracteres numéricos. Dentro desta última destacam-se as normas EAN-13, sigla para *European Article Number*, utilizada na marcação de bens de consumo em todo o mundo, assim como a norma UPC-A, sigla para *Universal Product Code*, que é maioritariamente utilizada na marcação dos produtos vendidos nos Estados Unidos da América e Canadá. No entanto, ambas as

normas são reconhecidas em todo o mundo, por questões de trocas comerciais. Estas encontram-se representadas na figura 2.5 [13].



Figura 2.5: Exemplo de código de barras. a) Segundo a norma europeia EAN-13; b) Segundo a norma norte americana UPC-A [13].

2.2.2 Marcadores bidimensionais

Existem inúmeras variantes de marcadores bidimensionais e algumas destas são soluções registadas, não podendo ser utilizadas livremente. No entanto, existem várias soluções de uso livre, nomeadamente o *Aztec Code*, o *DataMatrix*, o *MaxiCode*, o *PDF-417* e o *QR Code* [13], representados na figura 2.6. Destas variantes, as mais utilizadas, havendo inclusivamente uma massificação do seu uso em aplicações para fins comerciais e pessoais, são o *DataMatrix* e o *QR Code*, que serão consideradas, de agora em diante, como representativas da generalidade dos marcadores bidimensionais.

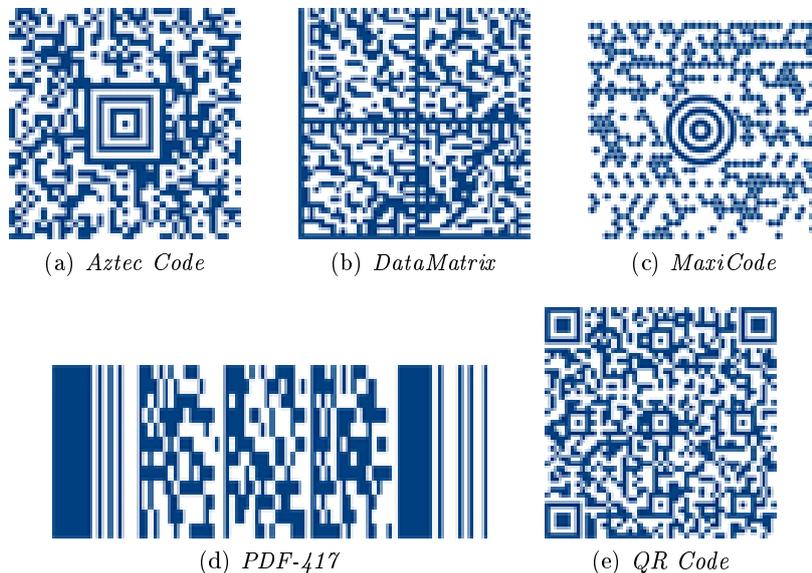


Figura 2.6: Exemplos de códigos bidimensionais de uso livre [13].

Atualmente, este tipo de marcadores pode facilmente ser lido por um scanner ou até mesmo por uma simples câmara de telemóvel [14]. Contém informação em duas dimensões, ao contrário dos códigos de barras convencionais, que são apenas lidos numa dimensão. Comparativamente aos marcadores uni-dimensionais, os marcadores bidimensionais apresentam uma capacidade de armazenamento de informação substancialmente

superior, podendo chegar, no caso do *QR Code*, a 7.089 caracteres apenas numéricos ou 4.296 alfa-numéricos, permitindo ainda a codificação de até 1.817 caracteres Japoneses Kanji/Kana. No caso do *DataMatrix* é possível codificar até 3.116 caracteres apenas numéricos ou 2.335 alfa-numéricos [15, 16].

Os códigos bidimensionais são bastante robustos; têm correção de erros, sendo possível a recuperação de dados mesmo quando uma parte substancial da sua imagem se apresenta distorcida ou até mesmo danificada. Podem ainda ser lidos com uma rotação, relativamente ao eixo perpendicular, de até 360 graus.

Estes marcadores possuem características específicas que permitem a sua identificação e leitura, nomeadamente a sua forma exterior, assim como algumas características que permitem determinar a sua direção e orientação [15, 16, 17].

2.3 Métodos de posicionamento em navegação

O posicionamento é uma questão fundamental em robótica móvel, pois um robô tem de se posicionar corretamente antes de realizar a maior parte das tarefas usuais.

Os métodos de posicionamento podem ser classificados em dois grupos principais: posicionamento relativo ou absoluto [18].

Posicionamento relativo

Uma das mais conhecidas técnicas de posicionamento relativo é a hodometria, que se baseia na medição do deslocamento relativamente a uma posição anteriormente conhecida. No entanto, este tipo de posicionamento requer que seja conhecida uma posição inicial, para além de apresentar falhas devido à acumulação de erros ou à perda da posição anterior quando há um reinício forçado do sistema. Um sistema de posicionamento absoluto é sempre necessário para recalibrar a posição do robô periodicamente. Portanto, os sistemas de posicionamento absoluto e relativo complementam-se um ao outro [18].

Posicionamento absoluto

Muitas das tecnologias de auxílio à navegação utilizadas atualmente, baseiam-se em sinais ativos, nomeadamente na navegação de navios e aviões, assim como alguns sistemas comerciais de localização de robôs. Este tipo de tecnologia varia de acordo com a forma de obtenção da localização absoluta, que pode ser por triangulação ou trilateração [19].

"Triangulação é o processo de determinar a posição e orientação de um robô com base em medições de ângulos, enquanto os métodos de trilateração envolvem a determinação da posição do robô com base em medições de distâncias"[18].

2.3.1 Trilateração

Este método de cálculo da localização, representado na figura 2.7, faz uso da distância a pontos conhecidos, utilizando a geometria de circunferências, para o cálculo da posição relativa.

Obtendo a distância relativamente a um ponto conhecido é possível marcar uma circunferência com raio correspondente à distância e centro no ponto referido. Porém, seria ainda indeterminada a localização, pois qualquer ponto da circunferência poderia corresponder ao posicionamento efetivo. É, portanto, necessário conhecer a distância a

outro ponto e, aplicando o mesmo método, sobram apenas dois pontos que coincidem com a interseção entre as duas circunferências. De seguida, para determinar qual das duas possibilidades corresponde à posição real, é utilizado um ponto adicional. Desta forma, é fácil perceber que é necessário conhecer a distância a, pelo menos, três pontos conhecidos. Esta tecnologia é aplicada no sobejamente conhecido sistema de posicionamento *GPS* [19].



Figura 2.7: Exemplo da aplicação do método da Trilateração, utilizado na tecnologia *GPS*. À direita é visível a interseção de duas circunferências, com duas localizações possíveis. À Esquerda, com a adição de uma terceira circunferência é encontrada a localização exata [20].

2.3.2 Triangulação

Neste método de localização existem três ou mais referências com posição conhecida, às quais são medidos os ângulos relativamente ao eixo longitudinal do veículo, como representado na figura 2.8. Dessa forma, podem ser calculadas as suas coordenadas x , y e ainda a orientação [19].

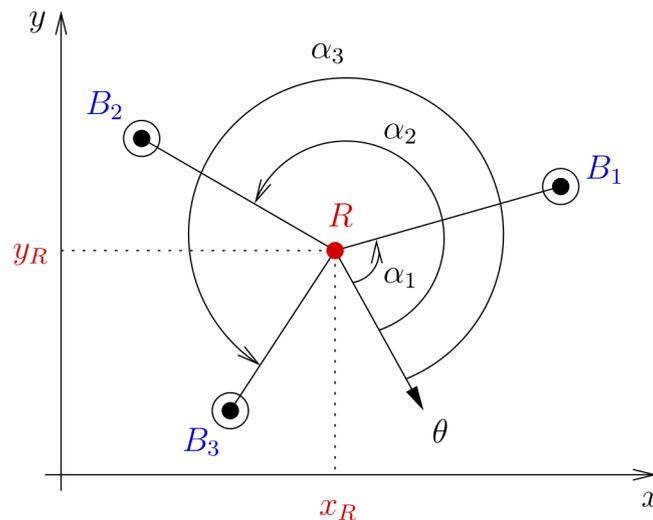


Figura 2.8: Exemplo de obtenção da localização por triangulação, onde R é a posição do robô, B_1 , B_2 e B_3 representam os pontos de referência e α_1 , α_2 e α_3 são os ângulos da orientação do robô relativamente a cada um dos pontos de referência [18].

"Devido à disponibilidade de sistemas de medição de ângulos, a triangulação emergiu como uma técnica vastamente utilizada, robusta, precisa e flexível. Outra vantagem da triangulação, relativamente à trilateração é que o robô consegue calcular a sua orientação para além das suas coordenadas, pelo que pode ser determinada a localização completa"[18].

O princípio da triangulação existe há muito tempo e entretanto foram desenvolvidos inúmeros métodos para resolver este problema. Uma revisão acerca dos métodos até então existentes foi elaborada por Cohen e Koss [21], onde foram classificados em quatro grandes grupos: triangulação geométrica, interseção geométrica de círculos, métodos iterativos e o método iterativo de *Newton-Raphson*. Os métodos mais populares de resolução do problema da triangulação pertencem ao segundo grupo. Os algoritmos pertencentes a este grupo, determinam o raio e o centro de duas de três circunferências que passam pelas referências e o robô, e posteriormente, é calculada a interseção entre esses dois círculos [18].

Atualmente existem vários algoritmos fiáveis para a resolução deste problema, nomeadamente os recentes métodos de Ligas [22] e o denominado *Three object Triangulation algorithm (ToTal)* por Pierlot e Droogenbroeck [18].

Capítulo 3

Sistema de localização

De forma a desenvolver o sistema de localização, numa primeira fase é necessário caracterizar o tipo de marcadores que serão utilizados como referência. Posteriormente, procede-se à aquisição de dados do ambiente circundante e à deteção e descodificação dos marcadores. Finalmente, utilizando os dados previamente adquiridos relativos aos marcadores é calculado o posicionamento do *AGV*.

3.1 Caracterização dos marcadores

Uma vez que se pretende o desenvolvimento de um sistema de visão artificial para guiamento de um *AGV* em ambiente industrial baseado em marcadores, é essencial proceder à caracterização dos mesmos. Portanto, será necessário definir a informação que estes deverão representar e de que forma esta será associada à sua posição, assim como o tipo de marcadores que serão utilizados e qual o posicionamento e distribuição que estes terão ao longo do percurso tomado pelo *AGV*.

3.1.1 Representatividade dos marcadores

No sentido de possibilitar a obtenção do posicionamento do *AGV*, relativamente ao referencial da implementação, é necessário que a cada marcador seja associada a informação correspondente às suas coordenadas, X e Y nesse mesmo referencial [19].

De acordo com Torres-Solis, Falk e Chau [6] uma possível solução passaria pela criação de uma base de dados onde seriam guardadas as coordenadas de cada marcador, juntamente com um número identificativo único. Este seria depois visualmente codificado em cada marcador, analogamente ao que acontece nos números codificados em códigos de barras. Posteriormente, a cada deteção de um marcador ser-lhe-iam atribuídas as coordenadas presentes na base de dados, correspondentes ao seu número identificativo.

Esta solução, apesar de válida, condicionaria a flexibilidade do sistema de guiamento, uma vez que seria necessário fazer a atualização da base de dados a cada alteração ou adição de marcadores. Para além disso, seria necessário criar e gerir a base de dados, o que aumentaria a complexidade do sistema.

Com o objetivo de simplificar e tornar a solução o mais flexível possível o ideal seria os marcadores conterem as próprias coordenadas, dispensando dessa forma a utilização de uma base de dados para fazer o posicionamento.

Mediante a conjuntura atual, no que concerne aos sistemas de informação, verificou-se que é hoje possível, e muito usual, a codificação de informação complexa, como é o caso da divulgação de eventos e *websites* sob a forma de códigos bidimensionais. Estes são facilmente descodificados através de um simples *smartphone*, sendo o único requisito que este possua uma câmara [14].

Dada a simplicidade com que atualmente se acede à informação codificada, e criando uma versão melhorada do proposto em [6], definiu-se que os marcadores irão codificar as suas próprias coordenadas, X e Y . Dessa forma será possível adicionar ou alterar rotas sem ser para tal necessário realizar qualquer operação sobre o *AGV*, o qual irá de imediato reconhecer os novos marcadores, calcular a sua localização e seguir a rota programada.

De notar que ambas as coordenadas têm de ser codificadas contendo o mesmo número de algarismos, possibilitando a sua distinção quando for feita a descodificação do marcador por parte do *software*.

3.1.2 Seleção do tipo de marcadores

Dada a natureza da informação que se pretende armazenar, foram considerados marcadores do tipo código de barras, *DataMatrix*, *QR Code*, *Aztec Code*, entre outros.

Sabendo que se pretende desenvolver um sistema de posicionamento baseado em visão artificial, foram considerados como fatores determinantes na seleção do tipo de marcadores a sua robustez, a quantidade de informação, a facilidade e versatilidade de leitura e a fácil deteção de erros.

Adicionalmente, uma vez que se pretende fazer uma leitura da informação codificada à maior distância possível, evidencia-se a necessidade de estes apresentarem células unitárias de grandes dimensões e consequentemente uma elevada densidade de informação.

No que concerne à robustez, os marcadores uni-dimensionais permitem detetar erros de leitura, descartando-a, ao passo que os marcadores bidimensionais apresentam correção de erros, podendo ser lidos com sucesso mesmo quando danificados. Posto isto, foram apenas considerados os marcadores bidimensionais.

Mediante um estudo dos vários tipos de marcadores bidimensionais existentes, foram selecionados dois como potenciais candidatos, uma vez que ambos são amplamente utilizados, quer na indústria, quer em aplicações de uso pessoal [14]. Este facto é extremamente relevante, pois por serem muito utilizados existem já muitas ferramentas que facilitam a tarefa de criar e descodificar este tipo de marcadores, para além de se manterem em constante evolução. Deste modo foram considerados o *DataMatrix* e o *QR Code*.

No sentido de se escolher entre os restantes dois candidatos foi necessário avaliar qual dos dois responde melhor aos fatores considerados determinantes.

Começando por uma perspectiva histórica, o *DataMatrix* foi desenvolvido em 1989 e uniformizado pela *National Aeronautics and Space Administration (NASA)*, pelo Departamento de Defesa dos Estados Unidos da América e por grandes indústrias como da electrónica, farmacêutica, entre outras. Por sua vez o *QR Code* foi desenvolvido mais tarde, em 1994, pela japonesa *Denso Wave Corporation* com apenas uma característica única, codificar facilmente caracteres japoneses *Kanji* e *Kana* [23].

No que concerne à eficiência do espaço utilizado, pode ler-se em [23] que um comité independente da *Consumer Electronics Association R9 Automatic Data Capture* realizou uma comparação em que se concluiu que o *DataMatrix* é espacialmente mais

eficiente que todas as outras simbologias bidimensionais. Uma vez que as tabelas apresentadas no artigo acima referido não são completamente fiáveis, foi feito um estudo onde foram comparados ambos os tipos de código contendo a mesma informação. Este está representado na tabela 3.1. Pode ainda ser visto um exemplo gráfico na figura 3.1.

Tabela 3.1: Tabela comparativa do espaço utilizado por cada uma das simbologias em análise.

Mensagem codificada	<i>QR Code</i>	<i>DataMatrix</i>	Espaço poupado
http://lars.mec.ua.pt/	25 × 25	22 × 22	23%
http://www.ua.pt/dem/	25 × 25	20 × 20	36%
http://google.com	25 × 25	18 × 18	48%
11119999	21 × 21	12 × 12	67%

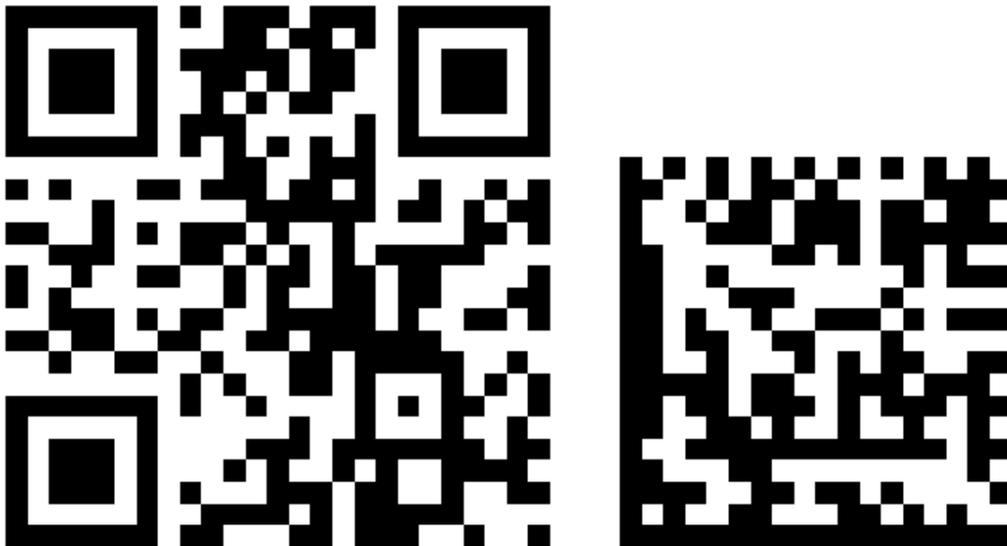


Figura 3.1: Exemplo de um *QR Code* e um *DataMatrix*, respectivamente. Ambos codificam "<http://google.com>" e apresentam células de iguais dimensões [23].

Corroborar-se desta forma o referido no parágrafo anterior, mostrando que, para estes casos, se verifica que o *DataMatrix* é espacialmente mais eficiente que o *QR Code*. No último exemplo da tabela são mostradas possíveis coordenadas de um marcador. Admitindo que estas são codificadas com uma precisão de centímetros, torna-se evidente que, com 8 caracteres pode ser mapeada uma nave industrial com até 100 metros de largura e comprimento. Para estes dados observou-se que o *DataMatrix* reduz o espaço utilizado em 67%. O que, dada a aplicação desejada, permite que as células unitárias tenham dimensões superiores, como desejado.

Ainda segundo a referência anterior, pode ler-se que o mesmo comité chegou à conclusão que o *DataMatrix* é amplamente utilizado na indústria, quer no Japão, na Europa e nos Estados Unidos da América, o que assegura a sua contínua evolução. Por outro lado, o mesmo não acontece com o *QR Code*.

Por todos estes factos decidiu-se que o *DataMatrix* é a simbologia a ser adotada para o desenvolvimento dos marcadores do sistema de guiamento.

3.2 Sistema de aquisição de dados

Uma vez caracterizados os marcadores a utilizar, procede-se para o sistema de aquisição dos dados relativos aos marcadores.

Numa primeira instância é necessário fazer a aquisição da imagem, a correção da distorção e por último a deteção e leitura dos marcadores.

3.2.1 Aquisição de imagem

A aquisição da imagem foi feita com recurso a uma *webcam Logitech c310*, que permite a captura de vídeo com uma resolução de até 1280×960 . Por ser uma câmara de uso pessoal, portanto de muito baixo custo, a sua qualidade não é a melhor, principalmente em movimento, situação em que a imagem perde significativamente a nitidez.

No sentido de adquirir a imagem, inicialmente foi utilizado o *driver usb_cam*, integrado no *ROS*. Porém apenas foi possível a sua utilização com a *webcam* integrada do computador. Dessa forma, por também não existir nenhum módulo de aquisição de imagem desenvolvido anteriormente no LAR, foi necessário criar um para esta finalidade.

Por estar integrado nos trabalhos do LAR, o módulo, denominado *usb_cam_reader*, foi desenvolvido com o objetivo de ser o mais genérico possível, possibilitando dessa forma a sua utilização por parte de outros projetos, existentes ou futuros.

Por este motivo foi feito um esforço no sentido de generalizar o módulo de aquisição de imagem, assim como de facilitar a calibração e correção da distorção.

Desta forma, o módulo desenvolvido utiliza a biblioteca *OpenCV* para fazer a captura da imagem, faz também uso das potencialidades do *ROS* para publicar a imagem, juntamente com o ficheiro de calibração da câmara, caso este exista. O módulo criado é parametrizável, sendo possível selecionar o nome do ficheiro de calibração e o índice identificador correspondentes à câmara com a qual se pretende adquirir os dados.

Calibração e correção da distorção

A calibração da câmara foi feita utilizando o módulo *camera_calibration* disponibilizado no *ROS* e um padrão em xadrez, de acordo com as instruções presentes em [24].

Foi também criado um ficheiro *launch* que visa facilitar o processo de calibração da câmara. Utilizando parâmetros, que podem ser facilmente alterados, é possível definir o nome do ficheiro e a resolução da câmara para a qual será feita a calibração. Por fim, terão de ser alterados os argumentos de entrada da função, relativos ao xadrez utilizado, que são o número e dimensão, em metros, das quadriculas interiores.

Uma vez calibrada a câmara, o módulo de aquisição carrega o ficheiro de calibração e adquire a imagem com a resolução nele definida, publicando ambos num tópico pré-definido.

Posteriormente é feita a correção da distorção da imagem, utilizando o módulo *image_proc* [25]. Este recebe a imagem e o ficheiro de calibração publicados e após

corrigir a distorção, publica a imagem retificada. Na figura 3.2 é apresentado o resultado típico da correção da distorção, sendo neste caso evidente a correção do efeito "barril".

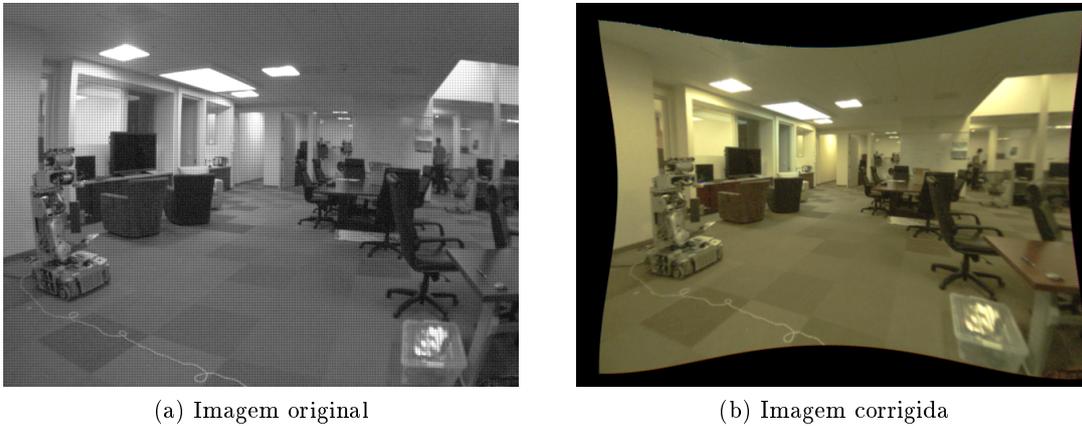


Figura 3.2: Exemplo de correção da distorção de uma imagem com efeito "barril" [25].

Uma representação esquemática da interação entre os módulos de aquisição e correção da distorção pode ser vista na figura 3.3.

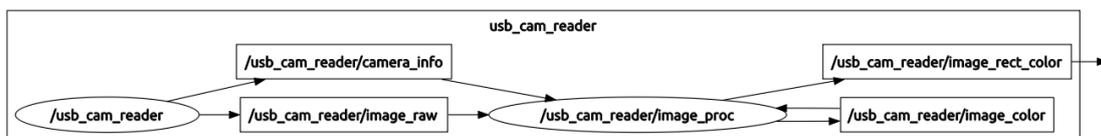


Figura 3.3: Representação da interação entre o módulo de aquisição de imagem (*usb_cam_reader*) e o módulo de correção da distorção (*image_proc*). É visível o envio da imagem e informação de calibração e após correção da distorção é enviada a imagem retificada.

3.2.2 Detecção e leitura dos marcadores

De forma a tirar o máximo partido da escolha dos marcadores, foi realizada uma pesquisa no sentido de verificar a existência de bibliotecas de uso livre, que permitissem a deteção e leitura de códigos *DataMatrix*.

Como resultado desta pesquisa foram encontradas duas bibliotecas, ambas de uso livre, sendo estas a *libdmtx* [26] e a *ZXing* [27]. Destas a primeira foi desenvolvida em linguagem *C*, que é totalmente compatível com *C++*, por outro lado a segunda foi desenvolvida em linguagem *Java*. Adicionalmente, verificou-se que a biblioteca *libdmtx* possui uma documentação relativamente organizada, o que facilita a sua utilização e compreensão. Pelos motivos referidos foi esta a biblioteca utilizada para a deteção e leitura dos marcadores.

A biblioteca acima referida é constituída de algumas funções, assim como de quatro estruturas de dados principais:

1. *DmtxImage*, é a estrutura de dados que herda as propriedades e um ponteiro dos dados da imagem original;
2. *DmtxDecode*, esta estrutura detém os valores de parametrização do processo de descodificação da imagem. Esta deve ser única para cada imagem a descodificar;
3. *DmtxRegion*, define uma região com quatro linhas, as quais podem estar em qualquer orientação e os seus vértices não têm de apresentar ângulos retos. Esta estrutura contém, entre outra informação, as coordenadas de potenciais códigos *DataMatrix*, as quais podem ser acedidas pelo programa principal;
4. *DmtxMessage*, contém a mensagem descodificada após ser feita a leitura da região detetada.

Esta biblioteca permite pesquisar por uma região potencialmente candidata de conter um código *DataMatrix*. Após fazer uma deteção, é feita uma tentativa de descodificação dessa região. Caso a deteção esteja correta é devolvida a mensagem correspondente ao código lido. Nesta fase, acedendo à informação da região detetada, é possível obter as coordenadas do marcador descodificado. Caso a região não contenha um marcador, nada será devolvido na mensagem descodificada. Em ambos os casos é possível repetir o procedimento descrito, partindo sempre da região anterior até que nenhuma seja encontrada.

No sentido de não tornar a procura por marcadores na imagem num processo demasiado demorado, esta biblioteca permite definir um tempo máximo de pesquisa por cada nova região candidata que foi considerado 80 milissegundos.

Uma descrição mais detalhada da utilização da biblioteca *libdmtx* pode ser encontrada em [26].

Utilizando esta biblioteca como descrito anteriormente, é possível fazer a leitura dos marcadores, assim como obter as coordenadas dos seus três vértices, como representado na figura 3.4.

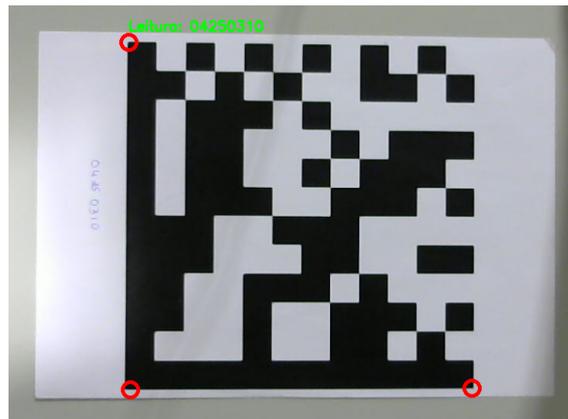


Figura 3.4: Figura representativa da informação que é obtida do módulo de deteção e leitura dos marcadores, onde são visíveis os cantos marcados com círculos vermelhos e a descodificação representada como texto a verde.

Para esta tarefa, foi criado um módulo *ROS* que subscree a imagem adquirida. Por motivos de otimização esta é reduzida a uma banda central, correspondente a metade

da imagem original, zona onde estarão situados os marcadores. Este módulo tem como função principal fazer a deteção e leitura dos marcadores. A cada marcador detetado esses dados são inseridos num vector criado para o efeito.

Finalmente, após uma análise completa de toda a imagem, o vector, que agora contém a informação relativa à deteção de todos os marcadores, é publicado no ambiente *ROS*, de forma a ser posteriormente efetuado o cálculo da posição do *AGV*.

3.3 Posicionamento absoluto

Uma vez adquiridos os dados relativamente aos marcadores detetados na imagem, segue-se para o cálculo do posicionamento absoluto do *AGV*, em coordenadas $(X, Y$ e $\phi)$.

Nesta fase, é necessário obter medições que permitam utilizar técnicas de posicionamento, como a triangulação e/ou trilateração, portanto, os ângulos e/ou as distâncias aos marcadores, respetivamente.

Validação da deteção

Numa primeira fase é feita uma verificação do número de algarismos descodificados, que terá de ser par, caso isso não se verifique os dados relativos a essa leitura são apagados. Caso se verifique a condição anterior é feita a separação dos algarismos em coordenadas x e y e estas são guardadas num vector de pontos 2D.

3.3.1 Cálculo do centro e altura dos marcadores

Como foi referido anteriormente, a informação codificada nos marcadores corresponde às coordenadas do seu centro. É também sabido que, para calcular o posicionamento, as medições terão de ser realizadas relativamente a uma posição de coordenadas conhecidas, ou seja, ao centro do marcador. Por este motivo, uma vez conhecidas as coordenadas da deteção dos marcadores, referentes aos seus vértices, são calculadas as coordenadas e a altura do seu centro, como representado na figura 3.5.

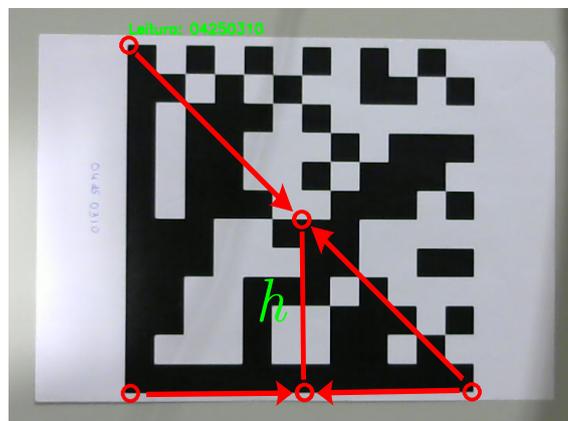


Figura 3.5: Representação do cálculo do centro do marcador e de metade da sua altura h .

Deste modo, as coordenadas do centro do marcador são obtidas pela média entre os vértices superior esquerdo e inferior direito. Por sua vez, para o cálculo da altura, é calculado o dobro da distância entre o ponto central e o ponto médio entre os vértices inferiores do marcador.

3.3.2 Medição dos ângulos e distâncias aos marcadores

Admitindo que os marcadores se encontram à altura da câmara e que o eixo horizontal da imagem é paralelo ao plano de movimentação do *AGV*, é possível calcular o ângulo relativo (α) entre o eixo ótico e o marcador, assim como a distância a que este se encontra.

Ângulo aos marcadores

Conforme a figura 3.6, sendo u a distância, em pixels, entre o centro da imagem e o centro do marcador segundo o eixo horizontal e f a distância focal da câmara, pode dizer-se que o valor de α é calculado de acordo com a equação [28]:

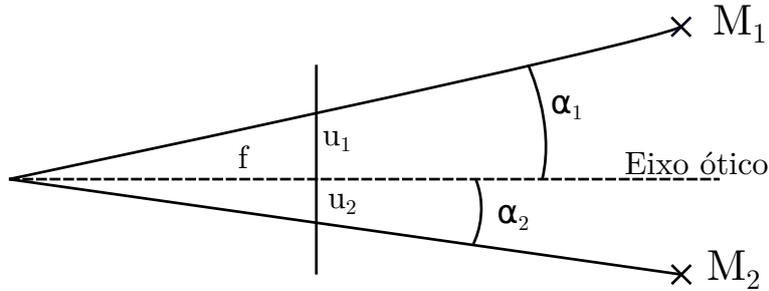


Figura 3.6: Representação, vista de cima, da formação da imagem e das linhas de visão de dois marcadores.

$$\alpha_i = \arctan(u_i/f) \quad (3.1)$$

No entanto, é sabido que para valores pequenos de α se pode aproximar a equação 3.1 para:

$$\alpha_i = u_i/f \quad (3.2)$$

Comparando as equações 3.1 e 3.2, para ângulos de α próximos dos 20° , verificou-se um desvio de aproximadamente 1° .

É importante reter que a distância u foi calculada a partir do centro da imagem, ou seja, para marcadores do lado esquerdo da imagem o valor do ângulo α é positivo.

Distância aos marcadores

A distância ao marcador foi calculada tendo por base a sua altura conhecida, a qual não sofre distorção, pela perspectiva, ao longo do eixo horizontal da câmara.

Assumindo que, de acordo com a figura 3.7, A é um marcador, H e D são a sua altura e distância à câmara, respetivamente. Pode-se observar ainda que B é a projeção do marcador, h é a sua altura na imagem e f a distância focal da câmara. Desta forma,

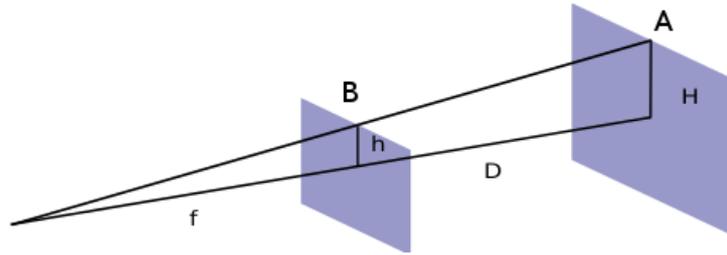


Figura 3.7: Representação da imagem B , de um objeto A , segundo a perspectiva da câmara. Onde H é a altura do objecto, D é a sua distância à câmara, f é a distância focal e h é a altura do objecto na imagem.

pela semelhança entre triângulos, é possível estabelecer a seguinte relação entre as suas dimensões:

$$\frac{H}{D} = \frac{h}{f} \quad (3.3)$$

Resolvendo a equação anterior em ordem à distância no mundo real D , obtém-se:

$$D = \frac{H}{h} \times f \quad (3.4)$$

3.3.3 Cálculo da posição

Uma vez calculados os ângulos e as distâncias a cada um dos marcadores detetados, segue-se agora o cálculo da posição do AGV .

Numa primeira abordagem foi aplicado o princípio da trilateração, porém utilizando apenas dois marcadores. Como representado na figura 3.8, com duas distâncias a pontos conhecidos, foram calculadas as coordenadas de ambas as interseções das circunferências.

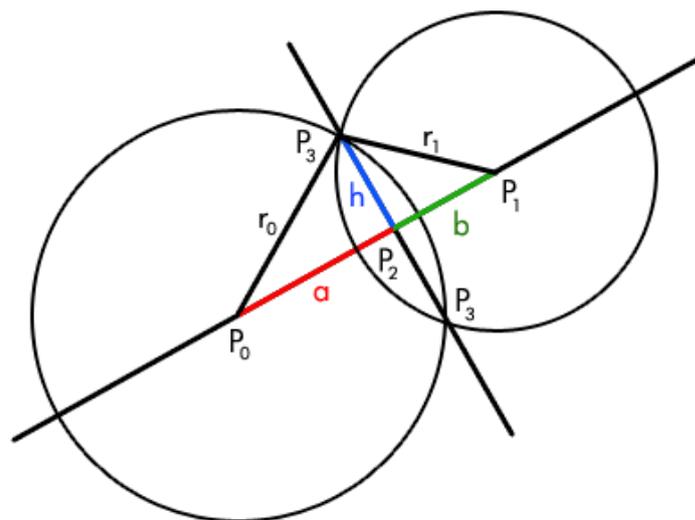


Figura 3.8: Representação esquemática do cálculo da interseção entre duas circunferências.

Para tal foi calculada a distância d entre os centros das circunferências, segundo:

$$d = \sqrt{(x_1 - x_0)^2 + (y_1 - y_0)^2} \quad (3.5)$$

Neste ponto são feitas verificações quanto à existência de solução para a interseção.

Caso a distância entre os centros seja maior que a soma dos raios das circunferências não há interseção uma vez que estas estão demasiado distantes entre si:

$$d > r_0 + r_1 \quad (3.6)$$

Por outro lado, caso a distância seja inferior ao valor absoluto da subtração entre os raios das circunferências então uma está contida na outra.

$$d < |r_0 - r_1| \quad (3.7)$$

Nesta fase, caso seja confirmada a existência de interseção entre as circunferências é possível escrever:

$$a^2 + h^2 = r_0^2 \quad e \quad b^2 + h^2 = r_1^2 \quad (3.8)$$

De acordo com a figura 3.8 é possível observar que $d = a + b$. Desta forma, ao igualar as equações 3.8, substituindo b e resolvendo a equação em ordem a a temos:

$$a = \frac{r_0^2 - r_1^2 + d^2}{2d} \quad (3.9)$$

Olhando para a figura acima referida, sabemos que d é a norma do vector entre P_0 e P_1 e que $\frac{P_1 - P_0}{d}$ é o seu versor, o qual multiplicado pelo comprimento a resulta no vector entre P_0 e P_2 . Desta forma é fácil perceber que:

$$P_2 = P_0 + a \frac{P_1 - P_0}{d} \quad (3.10)$$

É certo que, para qualquer caso, $\overrightarrow{P_2P_3}$ é sempre perpendicular a $\overrightarrow{P_0P_1}$. Por esse motivo o ângulo formado por $\overrightarrow{P_2P_3}$ com o eixo das ordenadas é sempre idêntico ao formado por $\overrightarrow{P_0P_1}$ com o eixo das abcissas. Dessa forma, como se pode ver pela figura 3.9, representativa dos triângulos formados pelos segmentos de reta h e d com o sistema de coordenadas, pode-se afirmar que, pela semelhança entre triângulos:

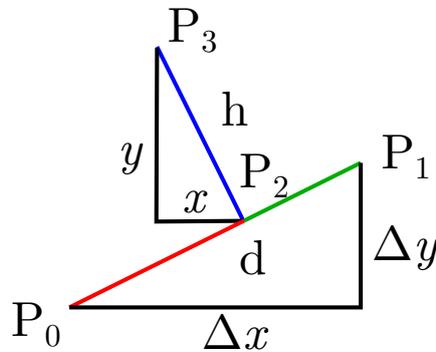


Figura 3.9: Representação dos triângulos formados com o sistema de coordenadas pelos vetores P_0 a P_1 e P_2 a P_3 .

$$\frac{\Delta y}{d} = \frac{x}{h} \quad e \quad \frac{\Delta x}{d} = \frac{y}{h} \quad (3.11)$$

Resolvendo as equações anteriores em relação a x e y obtém-se o deslocamento segundo esses mesmos eixos que o ponto P_3 toma relativamente a P_2 , logo, para os dois pontos P_3 , temos:

$$P_{3x} = P_{2x} \pm h \frac{\Delta y}{d} \quad e \quad P_{3y} = P_{2y} \mp h \frac{\Delta x}{d} \quad (3.12)$$

Segundo o principio da trilateração, de forma a ser possível determinar qual das duas interseções corresponde à correta localização do *AGV*, teria de haver mais um marcador detetável.

No entanto, observou-se que utilizando uma solução híbrida, entre trilateração e triangulação, seria possível determinar qual das duas interseções corresponde à verdadeira localização do *AGV*.

É fácil perceber que as duas interseções encontradas anteriormente são o espelho entre si, relativamente a uma reta que passa pelo centro de ambas as circunferências. Desta forma, como se pode ver pela figura 3.10, verificou-se que caso a câmara esteja direcionada para um dos marcadores, o ângulo desta relativamente ao segundo marcador será exatamente o simétrico em cada uma das interseções.

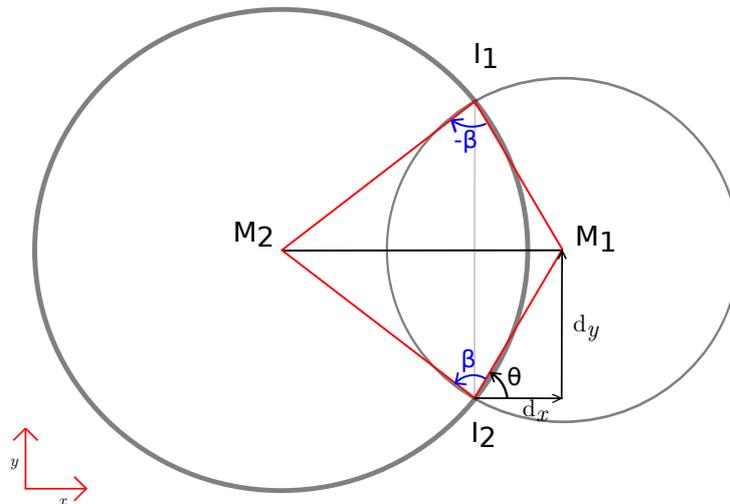


Figura 3.10: Representação dos ângulos formados desde o marcador M_1 até M_2 a partir de cada um dos pontos de interseção I_1 e I_2 , os quais apresentam a mesma magnitude mas sinais opostos.

Por serem simétricos, os valores dos ângulos obtidos não são relevantes, bastando apenas a informação relativa ao sentido de rotação para ser possível distinguir as interseções e determinar qual corresponde à correta localização do *AGV*. No sentido de implementar matematicamente a distinção das interseções, foi utilizado o produto externo entre vetores. Para tal, são determinados os vetores entre um dos pontos de interseção e cada um dos marcadores e, de seguida, é determinado o produto externo com origem num dos marcadores. Este procedimento é repetido para o ponto de interseção restante, tendo o mesmo marcador como origem para o cálculo do produto externo.

No entanto, sabe-se que o resultado obtido da operação anterior não é na realidade um ângulo, não tendo a sua amplitude qualquer significado físico para o problema. Portanto, este vetor é dividido pela sua norma. Desta forma obtém-se um vetor unitário, ou versor, cujo sinal indica o sentido de rotação do ângulo β , de acordo com a regra da mão direita. Por se tratar de um problema a 2D, o versor terá sempre direção segundo o eixo perpendicular a ambos os vetores, como se pode ver pela figura 3.11, ou seja, apenas a sua componente segundo \hat{k} será não nula. Desta forma o sentido de rotação, representado por Sr , é igual ao valor numérico desta componente do versor.

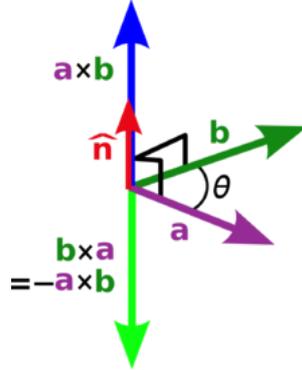


Figura 3.11: Representação dos ângulos formados desde o marcador M_1 até M_2 a partir de cada um dos pontos de interseção I_1 e I_2 , os quais apresentam a mesma magnitude mas sinais opostos [29].

De uma forma mais simples, este valor serve como indicativo, para uma dada posição, do lado em que é observado um marcador relativamente ao outro, isto é, à sua esquerda ou direita.

De uma forma genérica, de acordo com a figura 3.10, em que o marcador de origem do produto externo considerado foi M_1 , temos:

$$\overrightarrow{I_j M_1} = M_1 - I_j \quad (3.13)$$

$$\overrightarrow{I_j M_2} = M_2 - I_j \quad (3.14)$$

$$Sr_j = \frac{\overrightarrow{I_j M_1} \times \overrightarrow{I_j M_2}}{|\overrightarrow{I_j M_1} \times \overrightarrow{I_j M_2}|} \hat{k} \quad (3.15)$$

Aplicando o descrito anteriormente, para cada um dos pontos de interseção, obtemos:

$$Sr_1 = -1 \quad (3.16)$$

$$Sr_2 = 1 \quad (3.17)$$

Após fazer a distinção entre os pontos de interseção, é possível determinar qual corresponde à localização do *AGV*. Para tal, basta subtrair o valor do ângulo medido ao marcador que foi considerado a origem do produto externo ao valor do segundo marcador. Mais uma vez, como apenas consideramos o sentido de rotação, este valor é dividido

pelo seu módulo. A este valor chamou-se Sr_{AGV} e, para o caso da figura calcula-se da seguinte forma, onde α_{M_x} é o ângulo α medido pela câmara ao marcador M_x :

$$Sr_{AGV} = \frac{\alpha_{M_2} - \alpha_{M_1}}{|\alpha_{M_2} - \alpha_{M_1}|} \quad (3.18)$$

Caso seja considerado o marcador M_2 como a origem do produto externo, basta trocar M_1 com M_2 nas equações 3.15 e 3.18.

Finalmente, por comparação entre os valores obtidos no sentido de rotação observado pelo AGV e por ambas as hipóteses, é possível determinar a correta localização do AGV .

Nesta fase, para completar o posicionamento do AGV , falta apenas determinar a sua orientação (ϕ). Nesse sentido, é calculado o ângulo, relativamente ao sistema de coordenadas, entre a sua posição e um marcador, ao qual é posteriormente subtraído o ângulo medido ao respetivo marcador.

Ainda de acordo com a figura 3.10, admitindo que o AGV se encontra na posição marcada como I_2 e tomando como referência o marcador M_1 , temos:

$$d_x = x_{M_1} - x_{I_2} \quad (3.19)$$

$$d_y = y_{M_1} - y_{I_2} \quad (3.20)$$

$$\theta = \arctan(d_y/d_x) \quad (3.21)$$

$$\phi = \theta - \alpha_{M_1} \quad (3.22)$$

Desta forma verificou-se que, com uma solução híbrida, usando as distâncias e os ângulos a dois marcadores conhecidos, é possível obter o posicionamento (X , Y e ϕ) de um AGV .

Múltiplos marcadores

Uma vez obtida a posição utilizando dois marcadores é necessário tratar os dados excedentes da melhor forma. Deste modo, de forma a não desperdiçar informação disponível, quando são detetados mais que dois marcadores, é calculado o posicionamento do AGV para cada par possível. Seja n o número de marcadores, o número de pares possíveis P pode-se calcular da seguinte forma:

$$P(n) = \sum_{i=1}^{n-1} (n - i) \quad (3.23)$$

De seguida é feita uma média aritmética de todas as posições obtidas sendo o resultado a posição considerada.

3.3.4 Integração com o ROS

No sentido de proceder ao cálculo do posicionamento absoluto, explicado acima, foi criado um módulo ROS, denominado *datamatrix_calculations_node*. Este subscrive a informação proveniente da câmara, ou seja, o ficheiro de calibração, de onde é extraída a distância focal, e a imagem, que é apenas utilizada para obter uma confirmação visual da deteção dos marcadores. Este módulo pode ainda utilizar uma planta do local onde é feito o posicionamento, de forma a ser possível ter uma percepção visual da posição obtida.

É ainda subscrita a informação relativa à deteção dos marcadores, publicada pelo módulo *datamatrix_detection_node*, a partir da qual é calculado o posicionamento do AGV. É possível visualizar uma representação esquemática da interação entre os módulos na figura 3.12 onde é de destacar a mensagem criada para o envio da informação relativa à deteção dos marcadores.

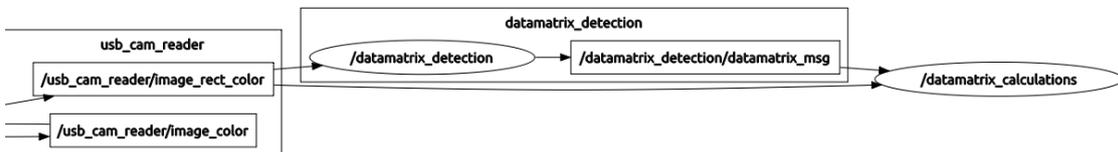


Figura 3.12: Representação esquemática da interação entre os diferentes módulos, desde a aquisição da imagem (*usb_cam_reader*), à deteção de marcadores (*datamatrix_detection*) até ao cálculo da posição (*datamatrix_calculations*)

Foi ainda criado um ficheiro *launch*, o qual tem como objetivo lançar todos os processos necessários ao cálculo do posicionamento, ou seja, o módulo de aquisição de imagem, juntamente com a correção da distorção e ainda os módulos de deteção dos marcadores e de cálculo do posicionamento. Neste ficheiro é ainda possível parametrizar dados relativos à altura dos marcadores e ao seu comprimento, ambos em metros, assim como ao ficheiro da planta que se pretende carregar. Assim como é possível a parametrização dos dados do módulo de aquisição da imagem relativos à câmara utilizada.

Capítulo 4

Experiências e Resultados

Uma vez desenvolvido o sistema de localização do *AGV* é necessário adquirir resultados e fazer testes em ambiente real. Desta forma é possível analisar e discutir os resultados obtidos e validar, ou não, a solução proposta. Nesse sentido é necessário encontrar forma de comparar os resultados com o valor "real".

Posteriormente serão feitos seis testes, quatro levados a cabo no LAR e dois no quarto piso do Departamento de Engenharia Mecânica.

4.1 Método de validação experimental

De forma a ser possível a validação dos resultados obtidos por um qualquer sistema, é necessário que haja um método de obtenção dos dados credível, com o qual possa ser comparado o sistema em análise.

Neste caso, tratando-se de um sistema de posicionamento, de forma a ter um termo de comparação dos resultados obtidos, seria necessário conhecer a posição real, em cada momento, no sistema de coordenadas definido. No entanto, uma vez que não há uma forma de obter essa informação diretamente, foi utilizado um *laser SICK-LMS151*, juntamente com a câmara utilizada, como se pode ver na figura 4.1.

O *laser SICK-LMS151* utiliza raios laser para fazer a medição das distâncias aos objetos que se encontram a 270° em seu redor, com uma resolução angular de 0.50° . Os dados são adquiridos à sua volta num plano 2D em coordenadas polares, sendo a posição determinada sob a forma de distância e direção.

A aquisição de dados é feita com uma frequência de rotação de 50 Hz e tem um alcance de até 50 metros, detetando objetos com 10% de refletividade a 18 metros de distância [30]. De forma a aceder à informação adquirida pelo *laser*, uma vez que os dados estão sob a forma de coordenadas polares, é necessário conhecer o ângulo para o qual se pretende saber a distância medida.

Ao ser feita a deteção de dois ou mais marcadores pela câmara, é feito o posicionamento do *AGV*. Simultaneamente, utilizando os ângulos medidos a cada um dos marcadores, é possível aceder às distâncias medidas pelo *laser* a esses mesmos marcadores. Dessa forma, é possível obter o posicionamento medido pelo laser de forma semelhante ao que é feito utilizando as distâncias medidas pela câmara. Este valor, proveniente dos dados adquiridos pelo *laser*, irá ser considerado o valor real, com o qual será comparado o valor calculado pelo sistema desenvolvido.



Figura 4.1: *Hardware* utilizado na recolha de dados onde é visível o *laser SICK-LMS151* e a câmara *Logitech c310*.

De forma a garantir a correspondência entre a medição do laser e a real distância aos marcadores, é necessário garantir o paralelismo entre o plano de aquisição do laser e o plano de movimentação do *AGV*. Para tal, foi utilizada a ferramenta visual *rviz*, integrada no *ROS*, a qual permite visualizar todos os pontos adquiridos pelo laser. Complementarmente, este foi colocado à mesma altura de um pino cónico. Desta forma, realizando uma rotação no sentido descendente, foi possível orientar o laser de forma a ser visível o topo do pino nos dados adquiridos. Este método apresenta baixa precisão, porém, de acordo com a figura 4.2, verificou-se que para uma orientação θ de 5° a 10 metros de distância se obtém um erro na medição de 3,8 centímetros.

Finalmente, para garantir a correspondência entre os dados do laser e da câmara é necessário conhecer o desfazamento angular entre estes, representado na figura 4.3. Nesse sentido foi utilizada a ferramenta visual *rviz*. Desta forma, em certas situações, é possível identificar o ponto dos dados laser correspondente ao centro de um dado marcador. Nesse caso é possível determinar o desfazamento comparando o ângulo medido pela câmara e pelo laser a esse marcador.

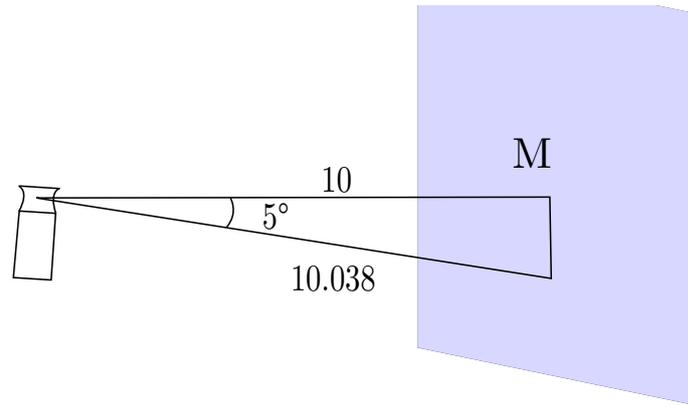


Figura 4.2: Representação esquemática da orientação do laser relativamente ao plano perpendicular ao marcador M.

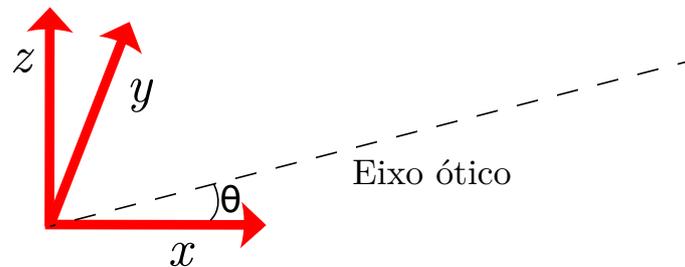


Figura 4.3: Representação do desfasamento angular θ , entre os dados da câmara e os dados laser.

4.2 Testes realizados

No sentido de avaliar a solução para o posicionamento do *AGV* foram feitos alguns testes em dois ambientes distintos. Inicialmente num ambiente mais caótico semelhante ao que se encontra num ambiente fabril, levado a cabo no Laboratório de Automação e Robótica e posteriormente num ambiente mais polido e organizado, realizado no corredor do terceiro piso do Departamento de Engenharia Mecânica (DEM). Nas figuras 4.4 e 4.5 estão representados os ambientes do LAR e do corredor do DEM, respetivamente.

Para ambos os testes foi definido um sistema de coordenadas local, assim como os locais a colocar os marcadores. Estes estão representados na figura 4.6 e 4.7, referentes ao posicionamento no LAR e no corredor do DEM, respetivamente.

Posteriormente foram criados os marcadores contendo as coordenadas, em centímetros, medidas com uma fita métrica, dos locais marcados relativamente à origem definida. É ainda de referir que, uma vez que não é possível codificar números negativos, o sistema de coordenadas tem, em qualquer situação, de ser definido de forma a conter todo o ambiente no seu quadrante positivo.

Para a realização dos testes foram criados ficheiros *bag*, nos quais é guardada a informação publicada no *ROS* pelos meios de aquisição de dados, neste caso os dados da câmara e do *laser*. Esta informação pode posteriormente ser reproduzida no ambiente

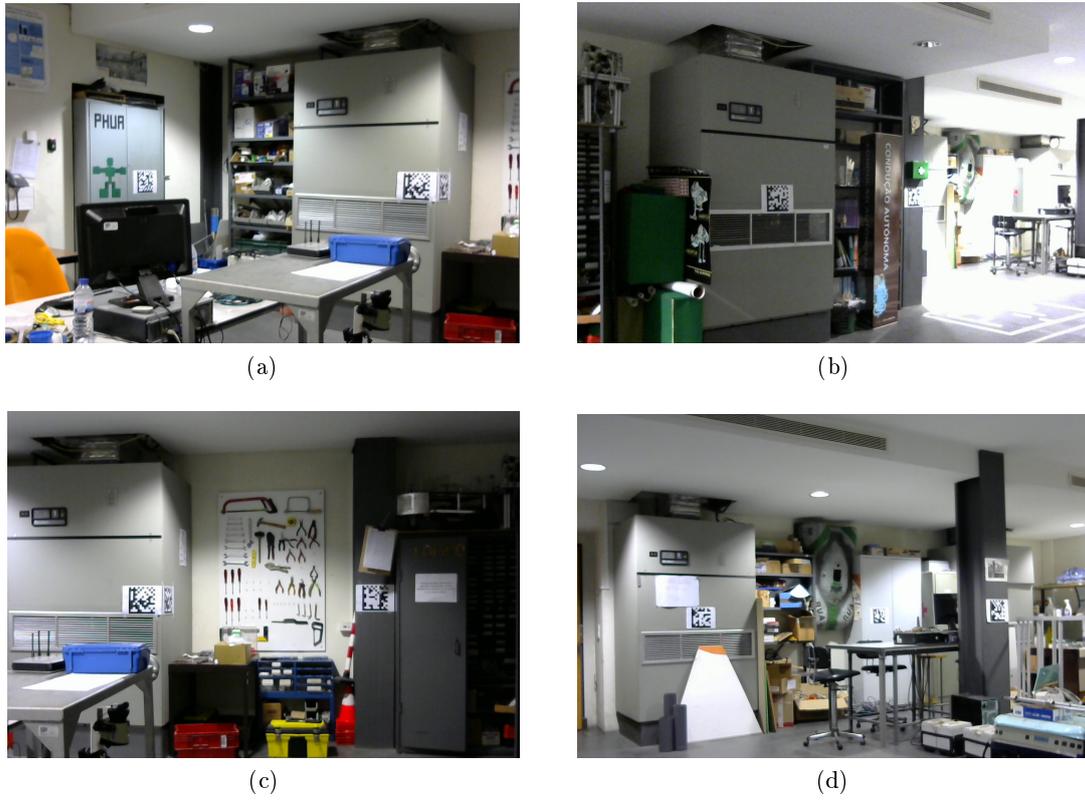


Figura 4.4: Imagens do LAR, onde é visível o ambiente caótico, como acontece em ambiente fabril.



Figura 4.5: Imagens do corredor do DEM, onde é visível o ambiente polido e organizado. Em a) está representado o ambiente original e em b) são visíveis os marcadores colocados.

ROS, simulando assim a experiência em tempo real. Desta forma é possível a repetibilidade da mesma experiência as vezes que forem desejadas, o que permite a comparação de vários algoritmos ou diferentes tipos de *hardware*, assim como efetuar alguns ajustes.

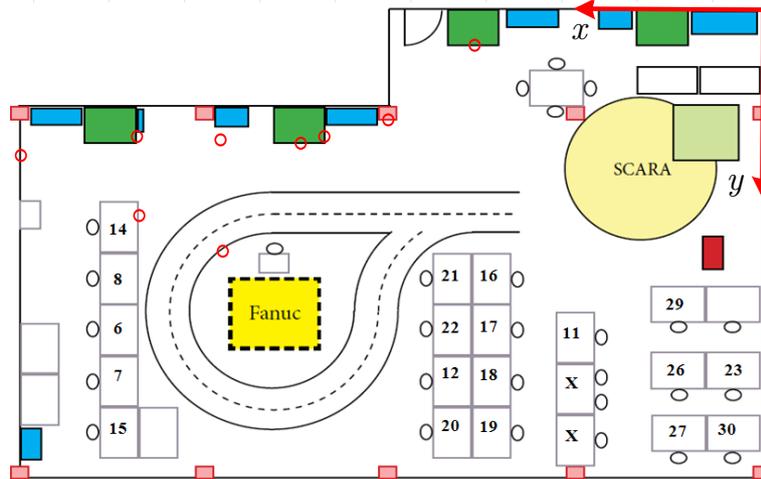


Figura 4.6: Planta do LAR, onde está representado o sistema de coordenadas adotado, assim como os marcadores colocados, representados com uma circunferência vermelha.

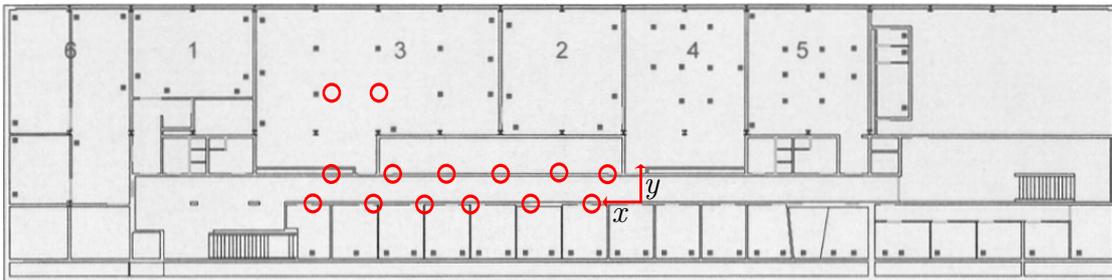


Figura 4.7: Planta do quarto piso do DEM, onde está representado o sistema de coordenadas adotado, assim como os marcadores colocados, representados com uma circunferência vermelha.

Teste em movimento

Num primeiro teste, o *hardware* foi colocado sobre um carrinho, com o qual foi feito um percurso, seguindo a pista em volta da zona do *Fanuc*, marcada na figura 4.6 pela zona a tracejado. Por esse motivo, de forma a ficarem alinhados, os marcadores foram colocados nas zonas previstas, à altura da montagem experimental, de aproximadamente 1.10 metros.

No entanto, como já era esperado, este teste não permitiu retirar dados passíveis de serem analisados, pois estes foram pesadamente influenciados pelo *hardware* utilizado. Isto deveu-se ao facto de, por muito lentamente que o percurso fosse realizado, a câmara apresentar uma imagem desfocada, como se pode ver na figura 4.8. Efeito causado devido ao movimento, quer da trajetória em si quer das oscilações sentidas no carrinho, o que afetou a deteção e a correta obtenção dos dados relativos à geometria dos marcadores detetados. Estes resultados já eram esperados, uma vez que a câmara utilizada, apesar de apresentar boa resolução, não está preparada para adquirir imagem em movimento.

Por outro lado, este teste, apesar de não permitir a obtenção de resultados quantitativos credíveis, permitiu concluir que a biblioteca de deteção dos *DataMatrix* é adequada



Figura 4.8: Figura exemplo do estado das imagens adquiridas em movimento, onde se pode notar a imagem nitidamente desfocada.

para a aplicação, uma vez que, apesar das circunstâncias, foram feitas deteções de marcadores apresentando uma orientação relativamente ao eixo ótico bastante acentuada.

Por não ter apresentado resultados conclusivos este teste foi apenas realizado no LAR.

Teste em regime estacionário

Um segundo tipo de teste foi efetuado com o objetivo de eliminar a influência do *hardware* utilizado. Nesse sentido, foi simulado um processo dinâmico, no qual a aquisição de dados foi feita em modo estático utilizando um tripé. Para tal, foram adquiridos dados e posteriormente foi feito um pequeno deslocamento incremental de 10 centímetros, intercalado com nova aquisição de dados em modo estático. Desta forma é possível representar o movimento efetuado sem ser sentida a influência do *hardware* utilizado.

Utilizando as plantas disponibilizadas, é ainda possível marcar o posicionamento medido e ter uma boa percepção visual do movimento efetuado. No entanto, sabendo que as plantas são apenas uma representação aproximada da disposição real, estas não apresentam uma correspondência rigorosa do posicionamento real. Para além disso é difícil relacionar a marcação no mapa com a trajetória real, caso esta seja irregular. Contudo, no sentido de tornar mais credível a avaliação visual da trajetória calculada relativamente à real, alguns testes foram realizados em linha reta. Desta forma foi possível utilizar a figura para ter uma boa percepção visual do posicionamento calculado, uma vez que,

mesmo que não haja coerência dimensional, uma reta no ambiente real também será representada na figura como tal.

Neste sentido foram realizados seis testes em regime estacionário, quatro no LAR e os restantes dois no corredor do DEM.

Dos quatro testes realizados no lar dois foram efetuados segundo uma trajetória retilínea e outros dois com uma curva inicial com 90° de amplitude seguida de uma trajetória retilínea.

Por sua vez, os restantes dois testes, realizados no corredor, foram efetuados em linha recta e posteriormente foi feita uma rotação de 90° para o interior do LAR.

4.3 Resultados

De modo a proceder à análise dos resultados obtidos será utilizado o método de validação descrito no capítulo 4.1. Ao longo desta secção serão apresentados os resultados obtidos relativamente à localização e distâncias medidas, assim como uma representação gráfica contendo a sobreposição do posicionamento obtido através dos dados da câmara e do laser para cada um dos testes realizados.

No que toca ao posicionamento, os resultados apresentados correspondem à distância entre a posição real e a obtida pelos dados da câmara. Já no que concerne às distâncias, são apresentados os erros da medição obtida pela câmara relativamente ao valor medido pelo laser.

Segundo trajetória retilínea no LAR

Nas figuras 4.10, 4.11 e 4.12, 4.13, são apresentadas as distribuições do erro na medição das distâncias e posição, obtidos pelo sistema proposto em ambos os testes realizados no LAR, segundo uma trajetória retilínea, representada na figura 4.9. Nas figuras 4.14 e 4.15, são representadas as posições obtidas ao longo de ambos os testes, onde é possível observar a sobreposição entre a trajetória obtida pela câmara e pelo *laser*.

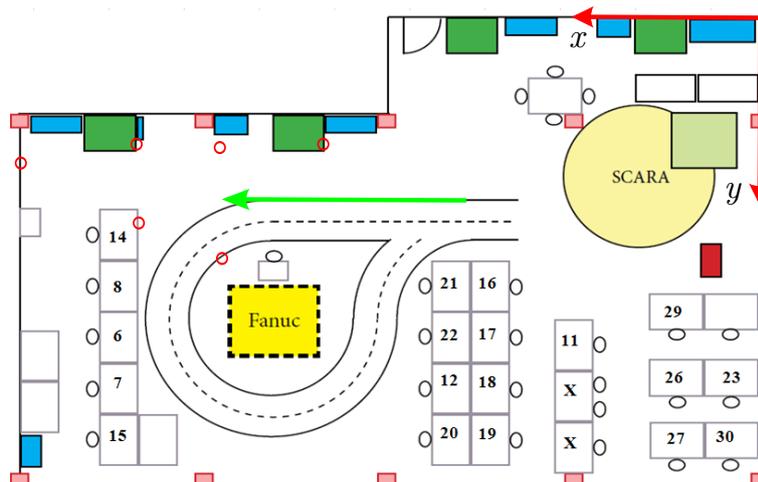


Figura 4.9: Representação da trajetória seguida e dos marcadores utilizados em ambos os testes realizados, marcados pela seta verde e circunferências vermelhas respetivamente.

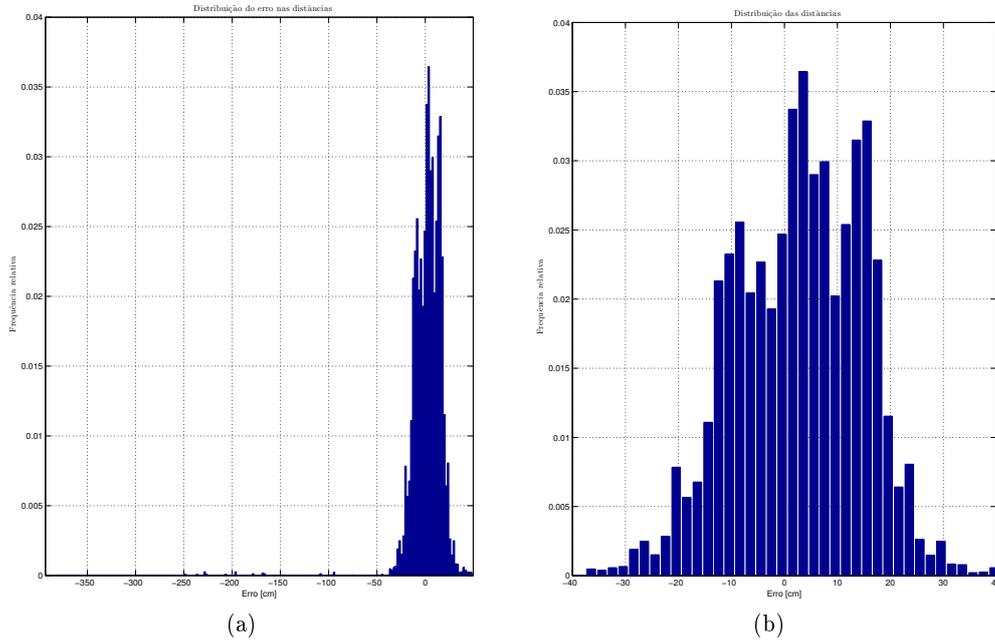


Figura 4.10: Distribuição do erro das distâncias medidas no primeiro ensaio realizado, onde cada barra corresponde a um intervalo de 2 centímetros. Em a) é visível a distribuição completa. Em b) é mostrado o intervalo com maior incidência do erro, contendo 99.3% do total dos dados obtidos com média 2.7 e desvio padrão 12.0.

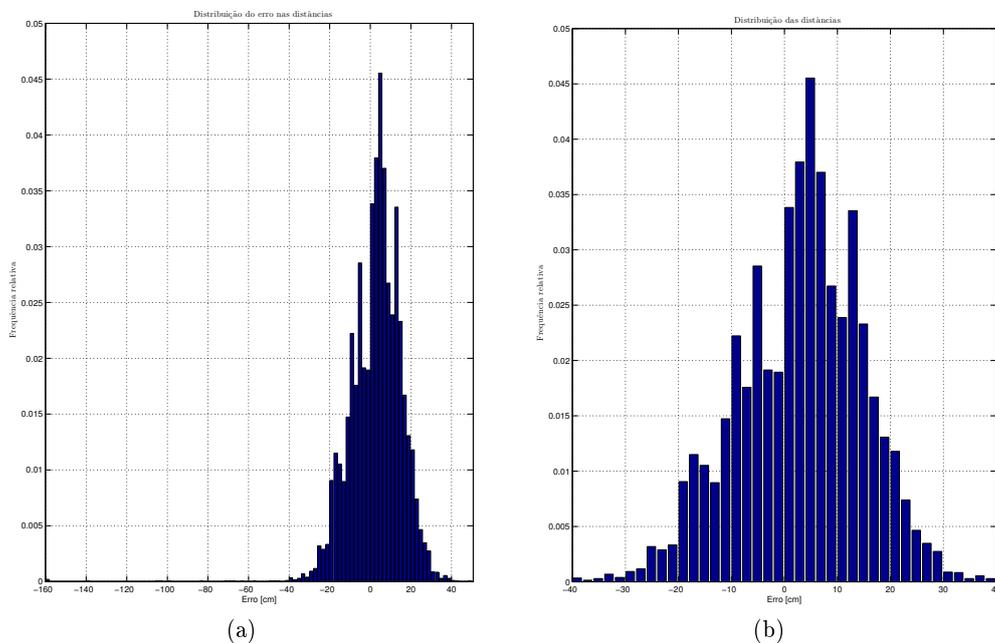


Figura 4.11: Distribuição do erro das distâncias medidas no segundo ensaio realizado, onde cada barra corresponde a um intervalo de 2 centímetros. Em a) é visível a distribuição completa. Em b) é mostrado o intervalo com maior incidência do erro, contendo 99.7% do total dos dados obtidos com média 3.0 e desvio padrão 11.7.

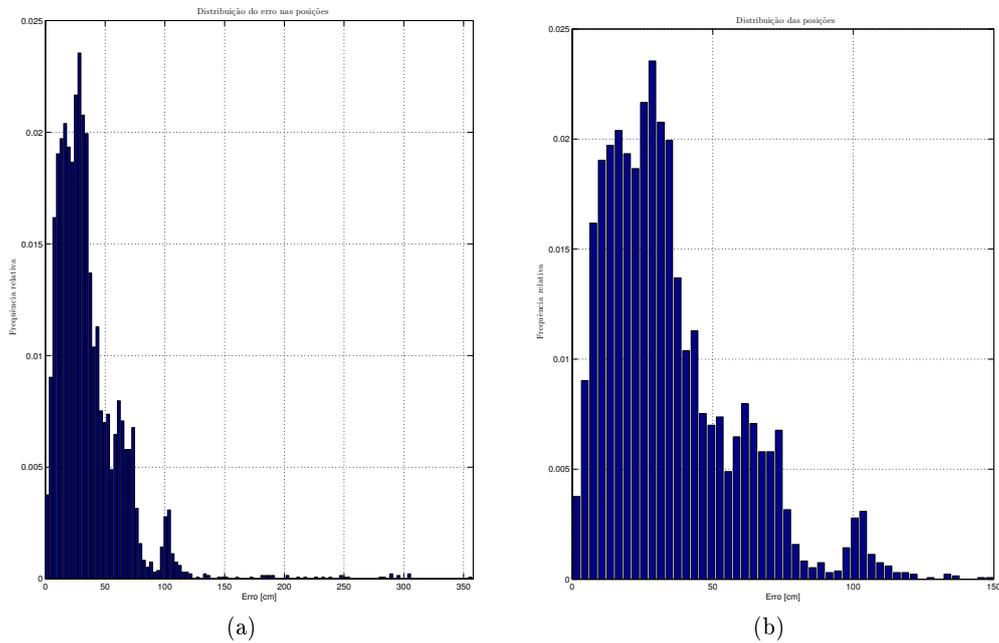


Figura 4.12: Distribuição do erro da posição calculada para o primeiro ensaio realizado, onde cada barra corresponde a um intervalo de 3 centímetros. Em a) é visível a distribuição completa. Em b) é mostrado o intervalo com maior incidência do erro, contendo 99.2% do total dos dados obtidos.

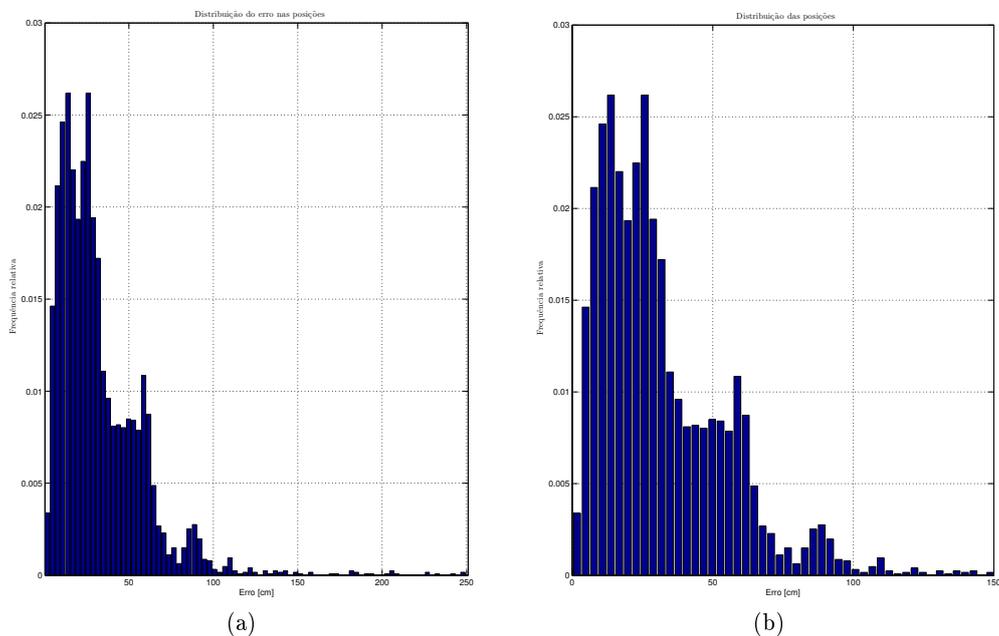


Figura 4.13: Distribuição do erro da posição calculada para o segundo ensaio realizado, onde cada barra corresponde a um intervalo de 3 centímetros. Em a) é visível a distribuição completa. Em b) é mostrado o intervalo com maior incidência do erro, contendo 99.4% do total dos dados obtidos.

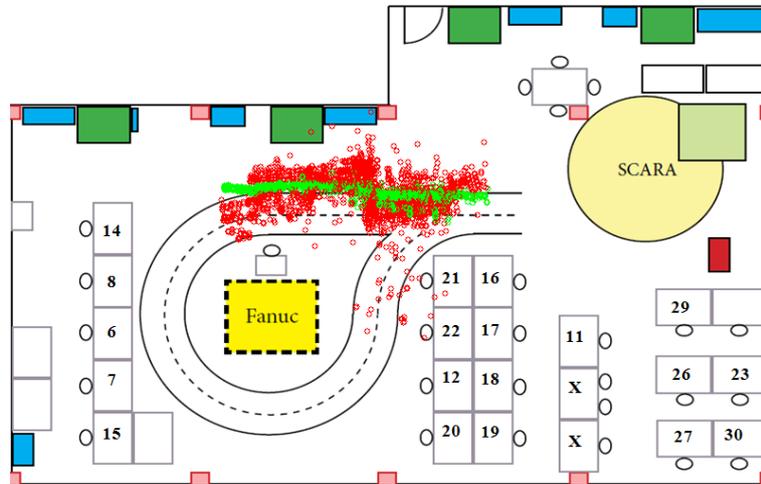


Figura 4.14: Representação visual das trajetórias obtidas no primeiro ensaio. Utilizando os dados da câmara, a vermelho e os dados *laser*, a verde.

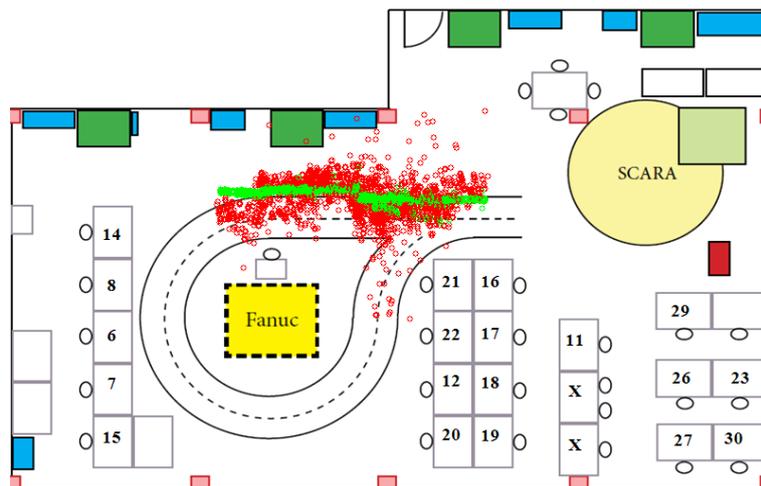


Figura 4.15: Representação visual das trajetórias obtidas no segundo ensaio. Utilizando os dados da câmara, a vermelho e os dados *laser*, a verde.

Observando as representações gráficas do posicionamento obtido tanto pelos dados da câmara como pelos dados laser, consegue-se facilmente reconhecer a existência de duas fases distintas, que separam aproximadamente a meio o percurso efetuado.

Numa fase inicial da trajetória calculada é possível observar um pequeno desvio relativamente à trajetória efetuada, assim como é notória a presença de ruído, tanto ao nível de pequenas oscilações como de posições completamente fora do contexto da trajetória realizada (*outliers*).

Já numa segunda fase é visível uma trajetória mais próxima da realizada, assim como a drástica diminuição de ruído, resultando assim numa trajetória melhor definida e representativa da realizada.

Após investigação deste problema, com recurso à identificação e observação das imagens adquiridas que o originaram, foi possível atribuir a sua causa ao facto de, devido à perspectiva de visualização da câmara, serem detetados pares de marcadores com uma distância angular muito reduzida entre si. Para além deste problema foi ainda detetada a existência de pares de marcadores com posições muito próximas, que afetam também negativamente a posição calculada.

Os problemas acima identificados serão abordados mais detalhadamente na secção 4.3.1.

Segundo trajetória com secção curvilínea no LAR

De seguida são apresentados os resultados relativamente aos ensaios levados a cabo no LAR, segundo uma trajetória contendo uma secção inicial curvilínea seguida de um troço retilíneo, representada na figura 4.16.

Desta forma, nas figuras 4.17, 4.18 e 4.19, 4.20 está representada a distribuição do erro para as distâncias medidas e posições calculadas em cada um dos ensaios.

Nas figuras 4.21 e 4.22, é ainda apresentada uma visualização das posições calculadas ao longo de cada um dos ensaios realizados, onde é possível observar a sobreposição entre a trajetória obtida pela câmara e pelo *laser*.

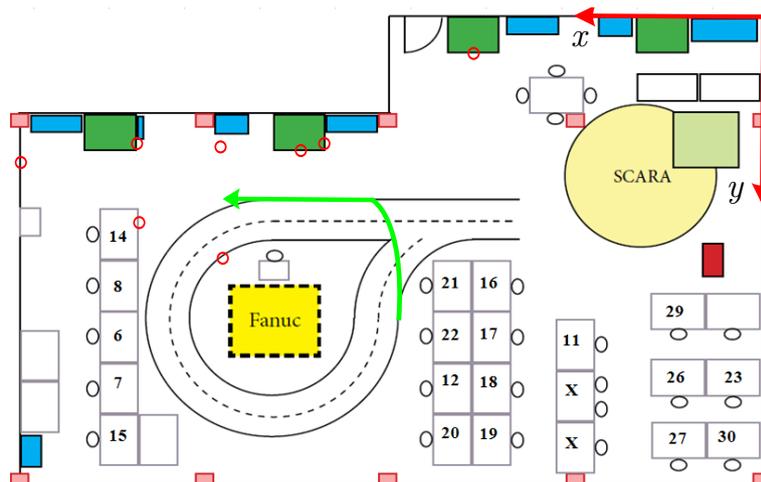


Figura 4.16: Representação da trajetória seguida e dos marcadores utilizados em ambos os testes realizados, marcados pela seta verde e circunferências vermelhas respetivamente.

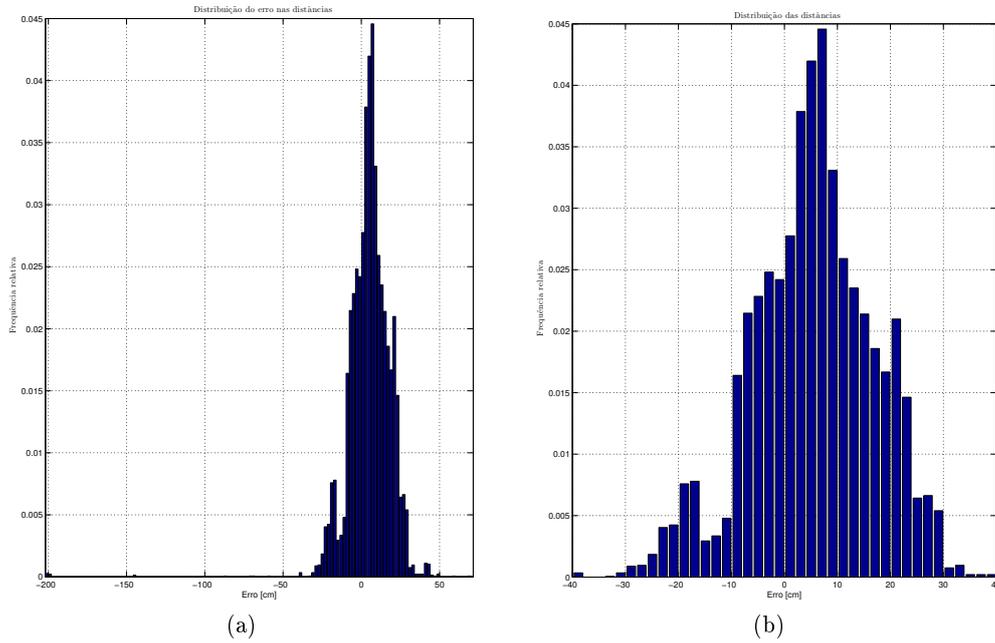


Figura 4.17: Distribuição do erro das distâncias medidas no primeiro ensaio realizado, onde cada barra corresponde a um intervalo de 2 centímetros. Em a) é visível a distribuição completa. Em b) é mostrado o intervalo com maior incidência do erro, contendo 99.2% do total dos dados obtidos com média 5.4 e desvio padrão 11.5.

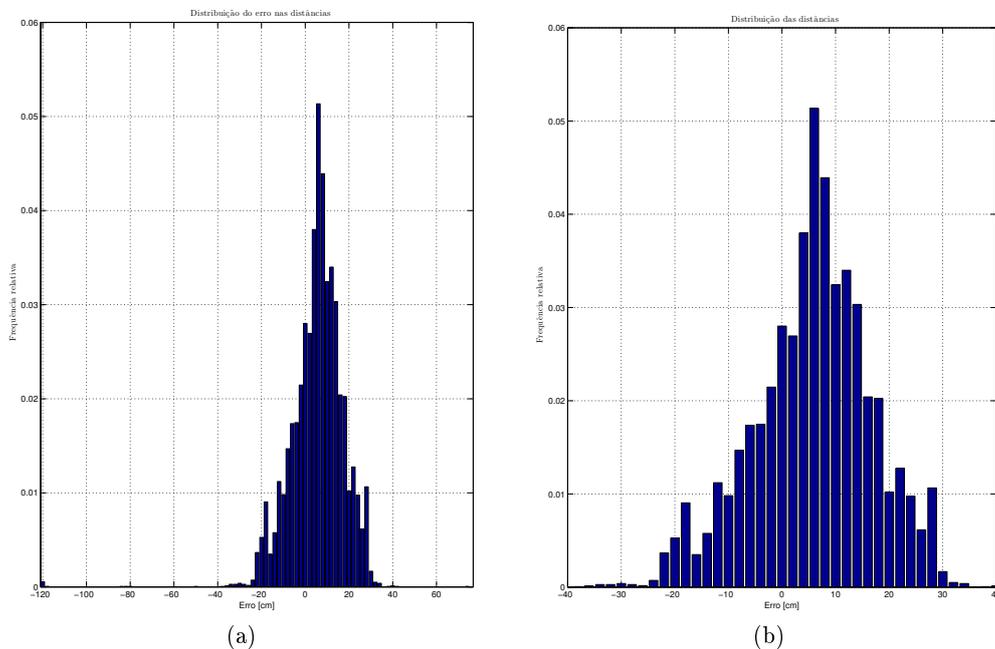


Figura 4.18: Distribuição do erro das distâncias medidas no segundo ensaio realizado, onde cada barra corresponde a um intervalo de 2 centímetros. Em a) é visível a distribuição completa. Em b) é mostrado o intervalo com maior incidência do erro, contendo 99.9% do total dos dados obtidos com média 5.7 e desvio padrão 11.1.

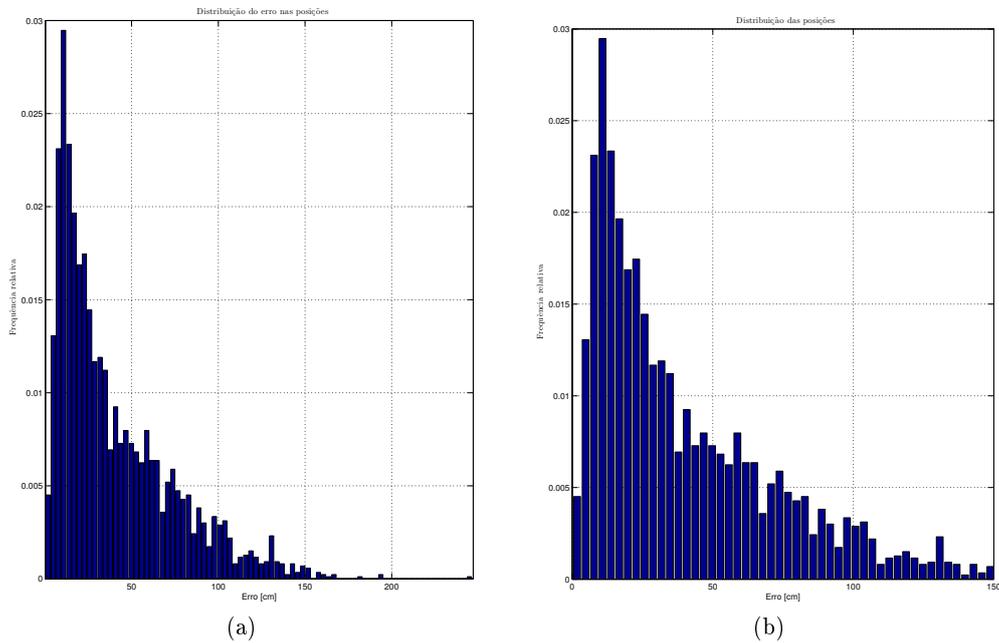


Figura 4.19: Distribuição do erro da posição calculada para o primeiro ensaio realizado, onde cada barra corresponde a um intervalo de 3 centímetros. Em a) é visível a distribuição completa. Em b) é mostrado o intervalo com maior incidência do erro, contendo 99.4% do total dos dados obtidos.

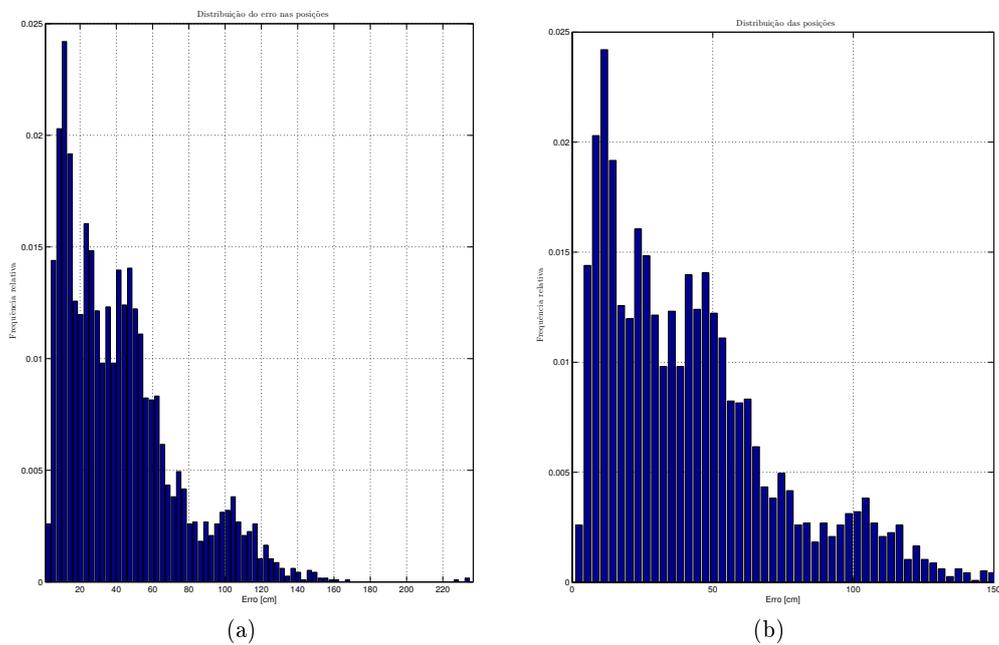


Figura 4.20: Distribuição do erro da posição calculada para o segundo ensaio realizado, onde cada barra corresponde a um intervalo de 3 centímetros. Em a) é visível a distribuição completa. Em b) é mostrado o intervalo com maior incidência do erro, contendo 99.7% do total dos dados obtidos.

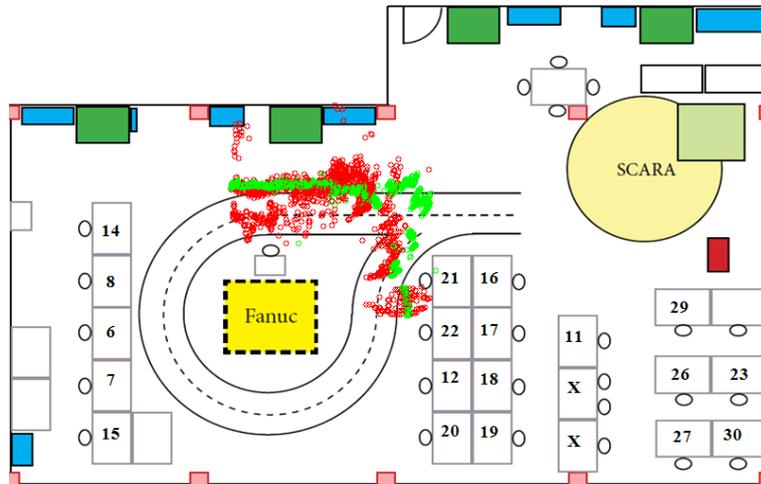


Figura 4.21: Representação visual das trajetórias obtidas no primeiro ensaio. Utilizando os dados da câmara, a vermelho e os dados *laser*, a verde.

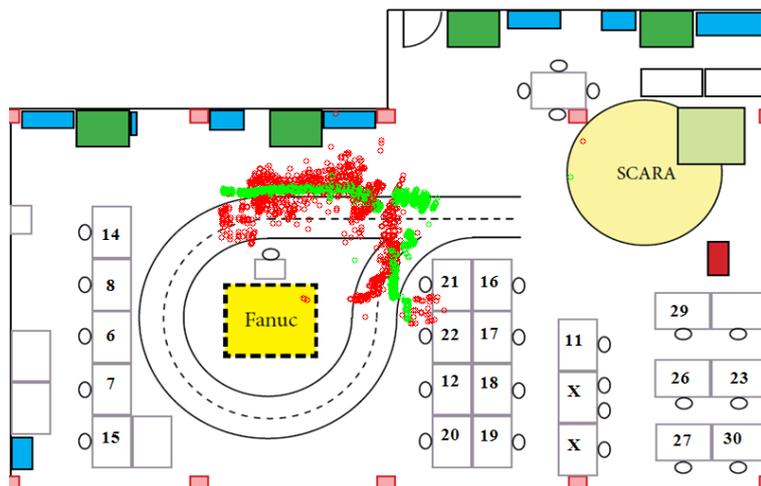


Figura 4.22: Representação visual das trajetórias obtidas no segundo ensaio. Utilizando os dados da câmara, a vermelho e os dados *laser*, a verde.

Observando as representações das posições calculadas, para cada um dos ensaios efetuados é possível, tal como no caso anterior, identificar duas fases distintas da trajetória percorrida.

Numa primeira fase, é possível identificar a secção curvilínea da trajetória. No entanto, pode-se observar que o posicionamento efetuado é muito inconstante e apresenta muito ruído.

Mesmo no segundo ensaio, onde foram observados menores níveis de ruído, denota-se que a trajetória representada não é totalmente fiel à realizada, contendo uma zona completamente fora do contexto real, nomeadamente nos dados do laser. Desta forma, estes dados não devem ser considerados.

Mais uma vez, após investigação da problemática observada com recurso às imagens adquiridas, foi possível identificar a origem do problema descrito. Desta vez foi detetada a existência de uma reduzida distância entre a posição dos pares de marcadores, o que leva a um elevado erro no cálculo da interseção entre as circunferências.

A reduzida distância entre marcadores deve-se à necessidade de uma elevada densidade destes na zona da curva, uma vez que se trata de uma trajetória realizada em direção a uma parede que está muito próxima, bloqueando o alcance de visão da câmara, o que reduz a largura do ambiente presente na imagem adquirida.

Desta forma é impossível a realização deste tipo de trajetória nas condições referidas, uma vez que, devido à reduzida largura adquirida na imagem, provocado pela proximidade da parede, é impossível adquirir imagens contendo dois ou mais marcadores sem que estes estejam muito próximos entre si.

Segundo trajetória no corredor do DEM

Por último são apresentados os resultados relativamente aos ensaios levados a cabo no corredor do DEM, segundo uma trajetória, representada na figura 4.23, contendo uma secção final com uma alteração da direção de 90° relativamente à orientação inicial.

Nas figuras 4.24, 4.25 e 4.26, 4.27 está representada a distribuição do erro para as distâncias medidas e posições calculadas em cada um dos ensaios, respetivamente.

Nas figuras 4.28 e 4.29, é ainda apresentada uma visualização das posições calculadas ao longo de cada um dos ensaios realizados, onde é possível observar a sobreposição entre a trajetória obtida pela câmara e pelo laser.

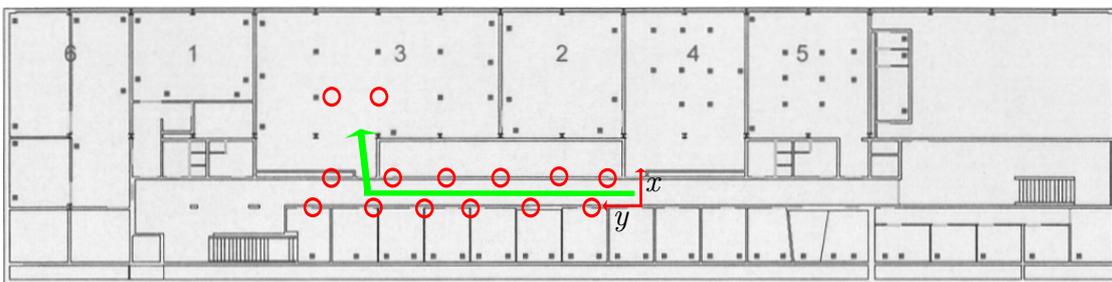


Figura 4.23: Representação da trajetória seguida e dos marcadores utilizados em ambos os testes realizados, marcados pela seta verde e circunferências vermelhas respetivamente.

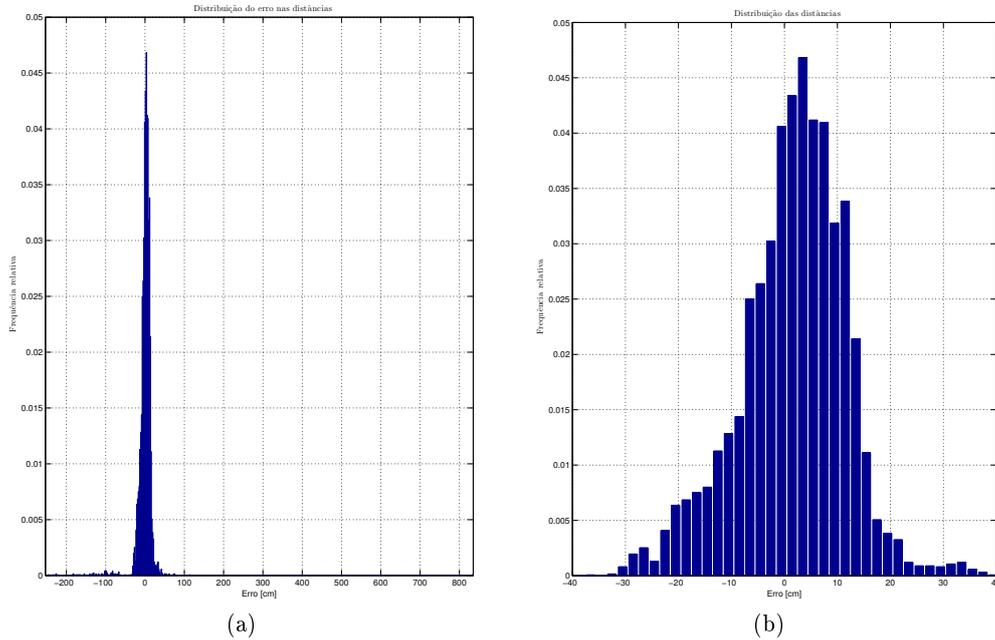


Figura 4.24: Distribuição do erro das distâncias medidas no primeiro ensaio realizado, onde cada barra corresponde a um intervalo de 2 centímetros. Em a) é visível a distribuição completa. Em b) é mostrado o intervalo com maior incidência do erro, contendo 98.0% do total dos dados obtidos com média 1.6 e desvio padrão 10.1.

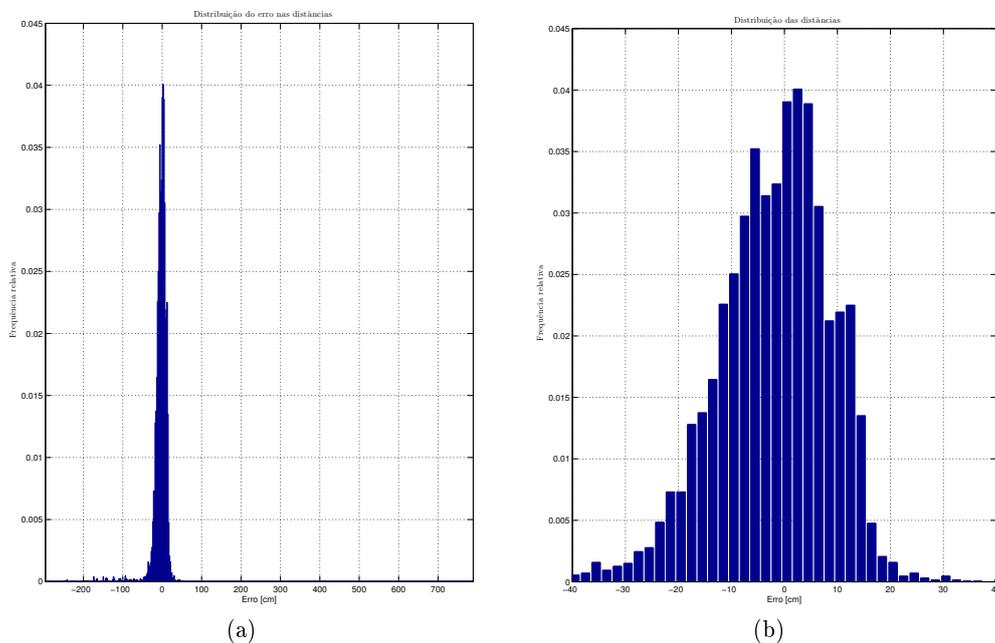


Figura 4.25: Distribuição do erro das distâncias medidas no segundo ensaio realizado, onde cada barra corresponde a um intervalo de 2 centímetros. Em a) é visível a distribuição completa. Em b) é mostrado o intervalo com maior incidência do erro, contendo 97.7% do total dos dados obtidos com média -1.8 e desvio padrão 10.5.

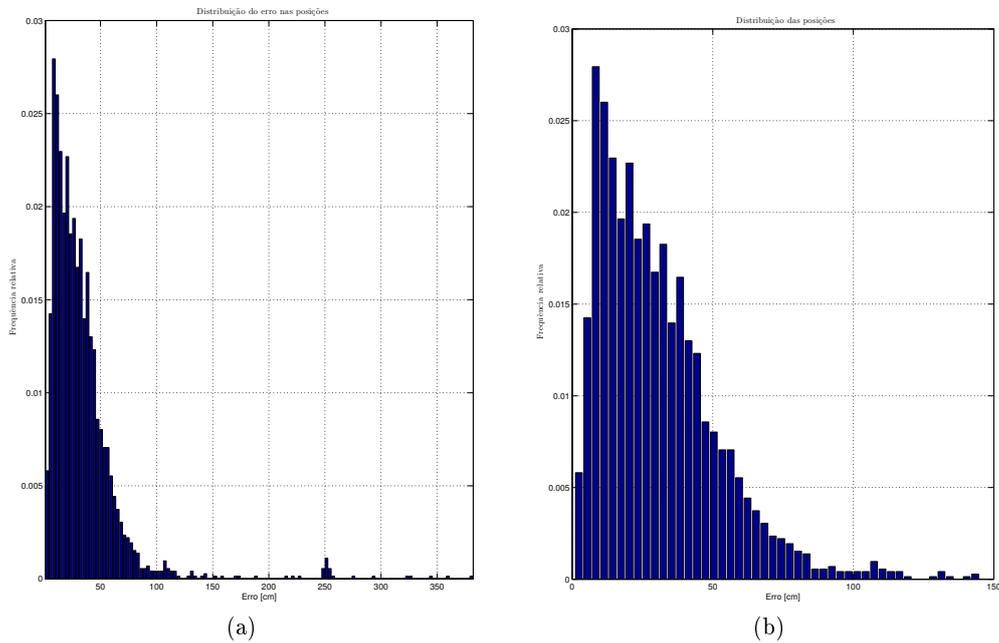


Figura 4.26: Distribuição do erro da posição calculada para o primeiro ensaio realizado, onde cada barra corresponde a um intervalo de 3 centímetros. Em a) é visível a distribuição completa. Em b) é mostrado o intervalo com maior incidência do erro, contendo 98.6% do total dos dados obtidos.

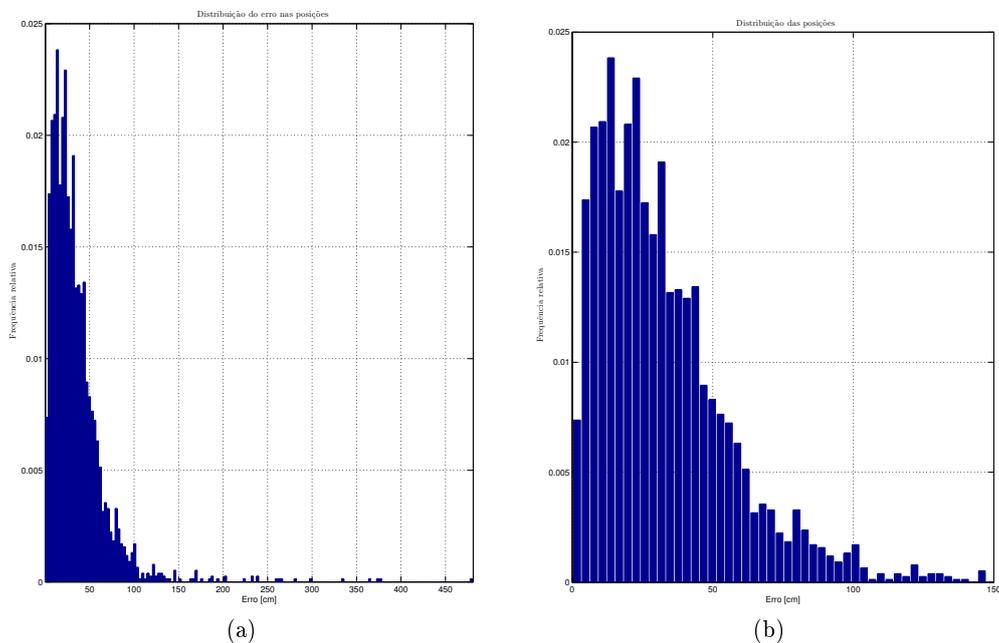


Figura 4.27: Distribuição do erro da posição calculada para o segundo ensaio realizado, onde cada barra corresponde a um intervalo de 3 centímetros. Em a) é visível a distribuição completa. Em b) é mostrado o intervalo com maior incidência do erro, contendo 98.8% do total dos dados obtidos.

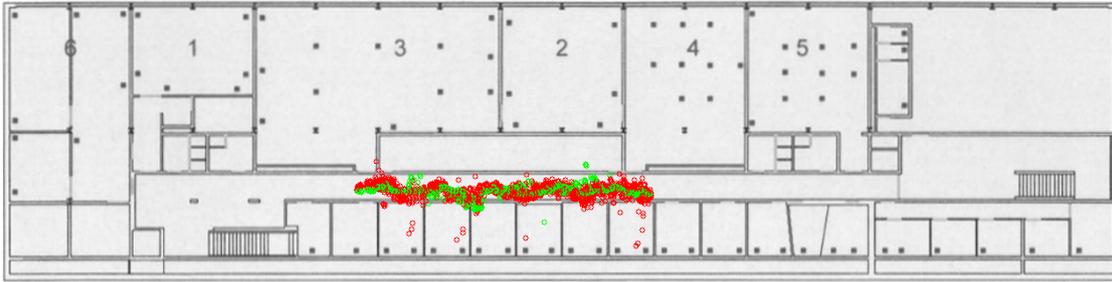


Figura 4.28: Representação visual das trajetórias obtidas no primeiro ensaio. Utilizando os dados da câmara, a vermelho e os dados *laser*, a verde.

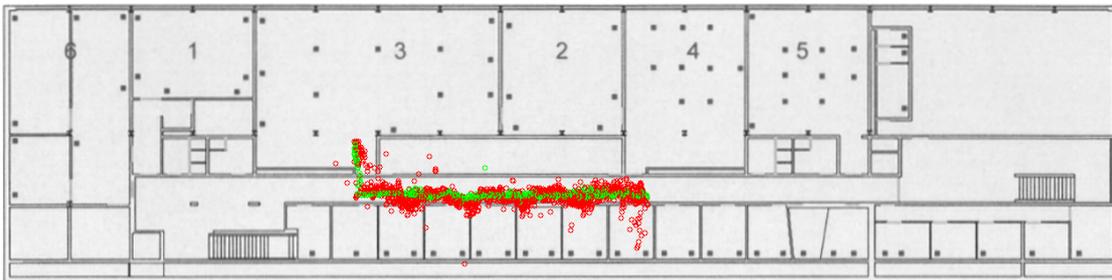


Figura 4.29: Representação visual das trajetórias obtidas no segundo ensaio. Utilizando os dados da câmara, a vermelho e os dados *laser*, a verde.

Observando o último ensaio realizado no DEM, provou-se que é possível realizar uma mudança de direção com o sistema proposto. Para tal, propõe-se que esta seja feita num movimento unicamente rotativo, não contendo qualquer alteração na posição. Desta forma é possível realizar a rotação mantendo uma posição conhecida durante o processo, o que exclui a necessidade de colocar marcadores em direções diferentes às do movimento de translação desejado. Nesse sentido apenas é necessário garantir que seja possível a localização do *AGV* na posição de rotação, em cada uma das direções em que se efetuam movimentos de translação.

O método acima proposto permite ainda ultrapassar alguns problemas relativos à qualidade de aquisição da imagem e consequentemente da câmara, uma vez que não é necessário calcular o posicionamento enquanto é feito o movimento de rotação, situação propícia ao surgimento de imagens fortemente desfocadas.

4.3.1 Problemas identificados

No decorrer da secção anterior foram identificadas algumas situações problemáticas no cálculo do posicionamento, nomeadamente a proximidade real e angular entre marcadores.

No primeiro caso é fácil compreender que para dois marcadores muito próximos estes estarão também praticamente à mesma distância. Desta forma, ao calcular a interseção das circunferências por eles formadas observa-se uma grande incerteza no posicionamento, originada pelo erro na medição das distâncias. No limite, duas circunferências com a mesma posição e raio interseccionam-se num número infinito de soluções.

De forma a combater este problema foram descartados todos os pares de marcadores

com distância entre si inferior a 1 metro.

O segundo problema identificado é de mais difícil compreensão, no entanto, seguindo o mesmo princípio explicado para o caso anterior e observando a figura 4.30, torna-se fácil perceber que a área da interseção entre as circunferências aumenta com a diminuição do ângulo aparente entre os marcadores, logo aumenta também a incerteza no posicionamento.

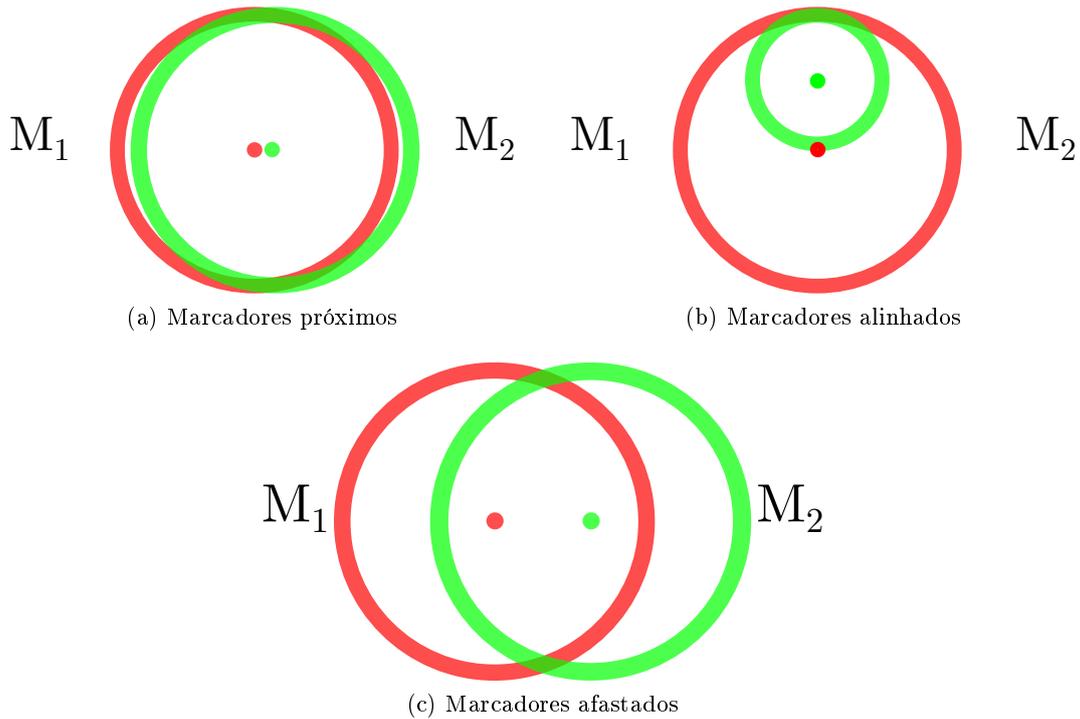


Figura 4.30: Representação da interseção calculada entre dois marcadores. Onde a espessura da linha representa o erro associado à medição da distância e a área que se encontra sobreposta corresponde à incerteza da medição. Em a) temos dois marcadores muito próximos, em b) estes estão alinhados segundo a perspectiva da câmara e em c) encontram-se mais afastados, verificando-se uma melhoria significativa na incerteza.

A ocorrência deste efeito foi demonstrada experimentalmente. Para tal, foi escolhida uma posição fixa no LAR, assim como 3 marcadores, dois deles próximos e o terceiro mais afastado, segundo a perspectiva da câmara. Com esses marcadores foi feito o posicionamento, para cada um dos três pares possíveis, dando um exemplo para um ângulo grande, intermédio e pequeno representados nas figuras 4.31, 4.32 e 4.33, respetivamente.

De forma a eliminar estes problemas foram descartados todos os pares de marcadores com uma distância angular inferior a 15° , sendo os restantes pares utilizados para fazer o cálculo do posicionamento.

De forma a implementar as melhorias mencionadas, foi alterado o algoritmo para que seja feito o teste, para cada par de marcadores considerados, da distância e ângulo mínimos entre si. De acordo com a figura 4.34, a cada deteção, para um dado número de marcadores (n), são testadas as condições para cada par possível e caso se verifiquem é calculada a posição para esse par. Posteriormente é feita uma média entre as posições

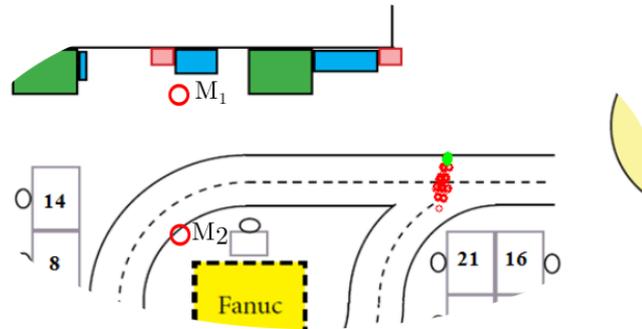


Figura 4.31: Representação do posicionamento entre dois marcadores com um ângulo de 31.8° . A verde está representada a posição obtida pelo laser e a vermelho pela câmara.

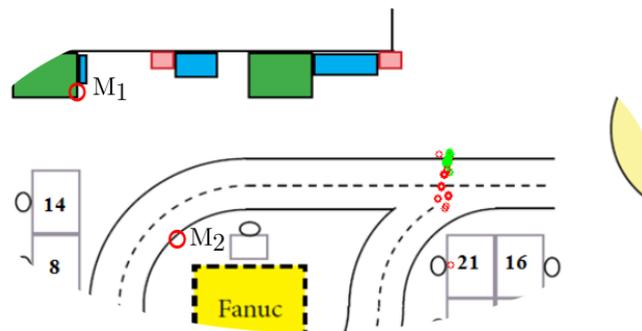


Figura 4.32: Representação do posicionamento entre dois marcadores com um ângulo de 27.6° . A verde está representada a posição obtida pelo laser e a vermelho pela câmara.

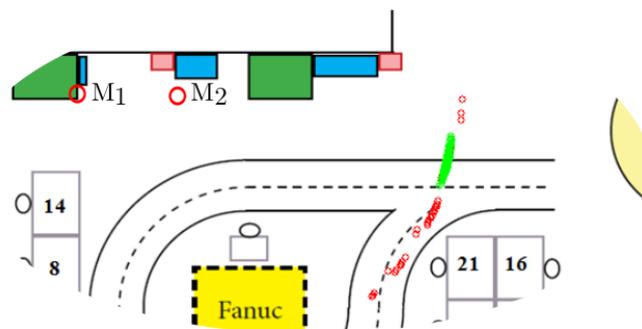


Figura 4.33: Representação do posicionamento entre dois marcadores com um ângulo de 4.3° . A verde está representada a posição obtida pelo laser e a vermelho pela câmara.

obtidas de cada par distinto para obter a posição para esse dado instante.

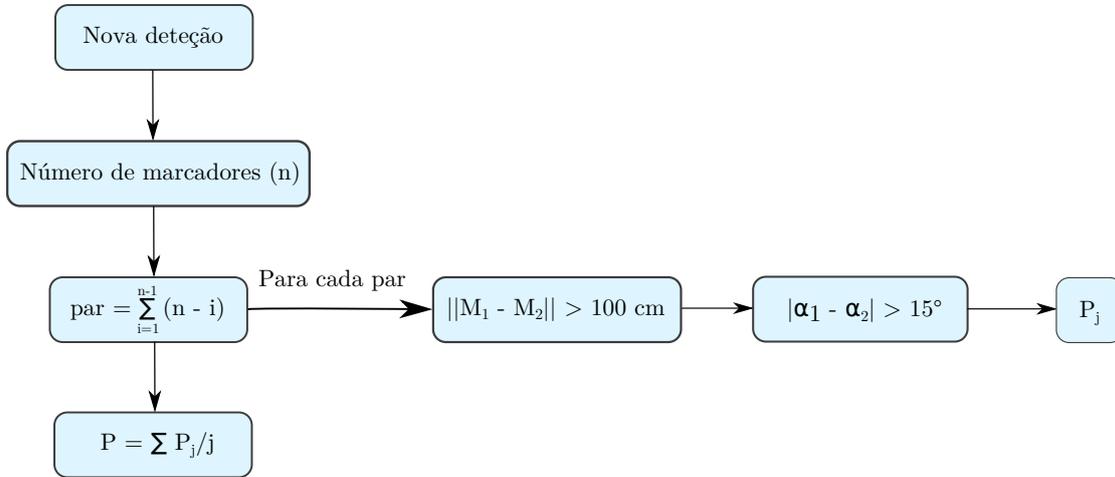


Figura 4.34: Esquema representativo das melhorias implementadas. Seja par um par possível para dado número de marcadores n , M_1 e M_2 os dois marcadores que formam o par em análise, α_1 e α_2 os ângulos relativos a esses marcadores, P_j a posição para ao par de marcadores j e P a posição final para dado instante.

Posteriormente, numa segunda melhoria, sabendo que os ensaios foram realizados por incrementos em modo estático, foram acumuladas todas as posições calculadas em cada situação estática e efetuada a sua média, de forma a ser apenas considerada uma posição por cada situação real. Desse modo, seja P_i a última posição calculada e P a considerada, para cada posição real, temos:

$$P = \frac{P_i + P_{i-1} + P_{i-2} + \dots + P_2 + P_1}{i} \quad (4.1)$$

Esta aproximação, aplicada tanto para os dados da câmara como do laser, foi efetuada pois devido à natureza dos ensaios realizados, onde foi feita a aquisição de forma interrompida, é possível fazer a correspondência dos dados sabendo o tempo decorrido entre estes, sendo as medições mais próximas em tempo correspondentes à mesma posição real.

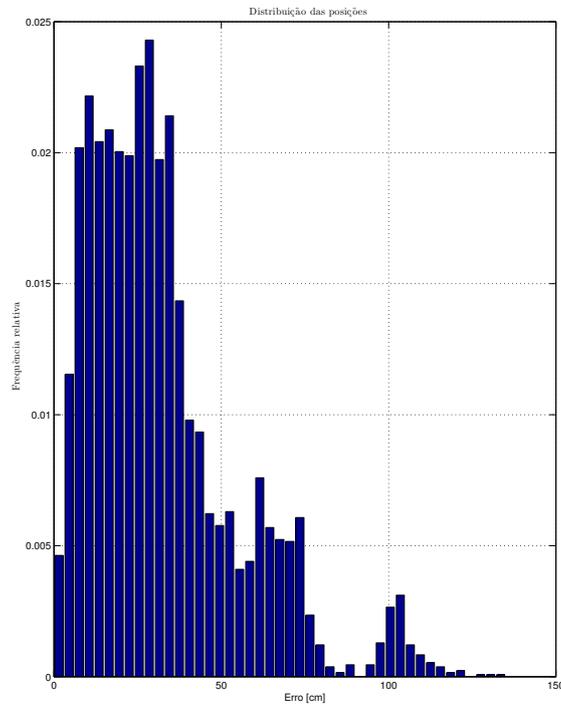
4.3.2 Resultados melhorados

Uma vez que foram detetados problemas no algoritmo até agora utilizado e após aplicadas as melhorias referidas anteriormente, são agora apresentados os novos resultados corrigidos, referentes aos mesmos ensaios descritos anteriormente.

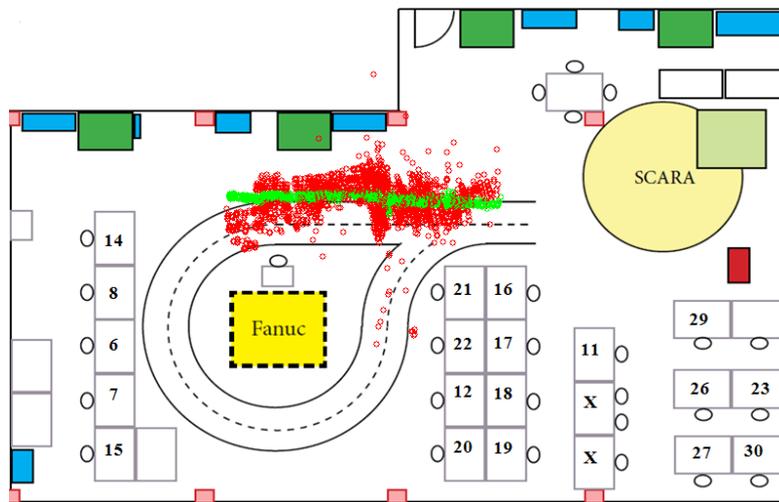
As melhorias implementadas não apresentam alterações significativas na distribuição do erro das distâncias medidas, uma vez que apenas são descartados valores, não havendo qualquer alteração nas medições efetuadas. Por esse motivo, apenas serão mostrados os dados relativos à posição calculada, ou seja, a visualização das posições calculadas e a distribuição do seu erro, assim como uma comparação entre os resultados antes e depois da melhoria efetuada.

Segundo trajetória retilínea no LAR

Após aplicadas as melhorias, os resultados obtidos para ambos os ensaios realizados no LAR segundo uma trajetória retilínea estão representados nas figuras 4.35 e 4.36, respectivamente.

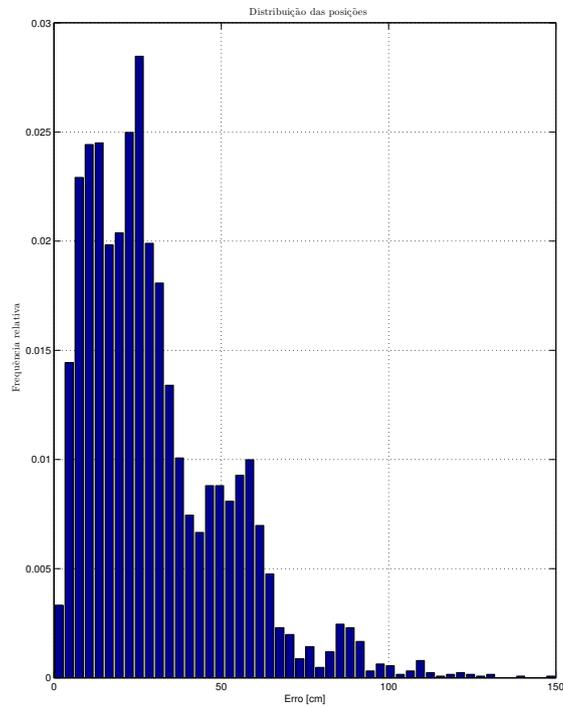


(a)

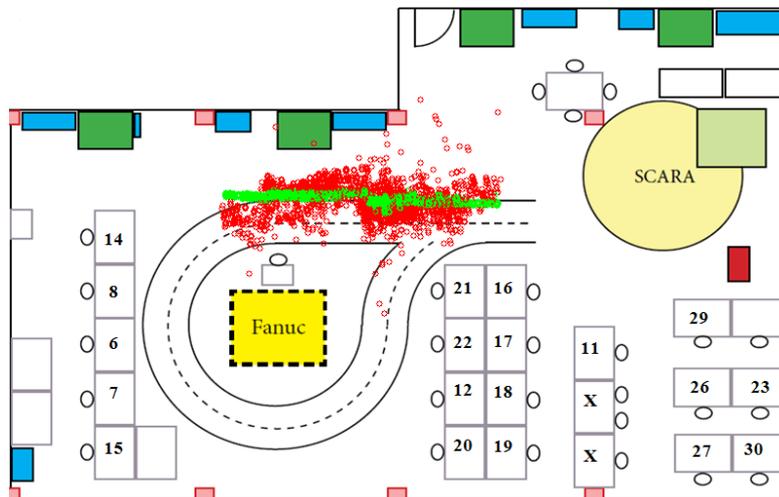


(b)

Figura 4.35: Distribuição do erro da posição calculada para o primeiro ensaio realizado, onde cada barra corresponde a um intervalo de 3 centímetros. Em a) esta é mostrada após as melhorias, contendo 100% do total dos dados obtidos. Em b) estão ainda representadas as trajetórias obtidas utilizando os dados da câmara, a vermelho e os dados *laser*, a verde.



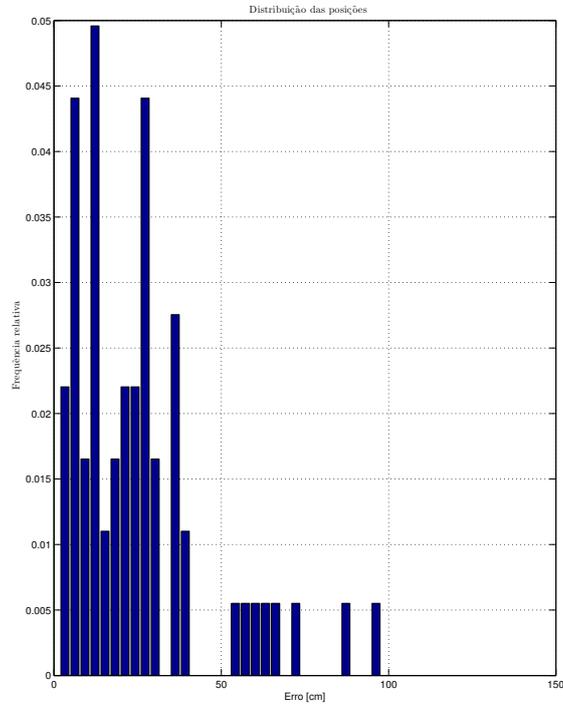
(a)



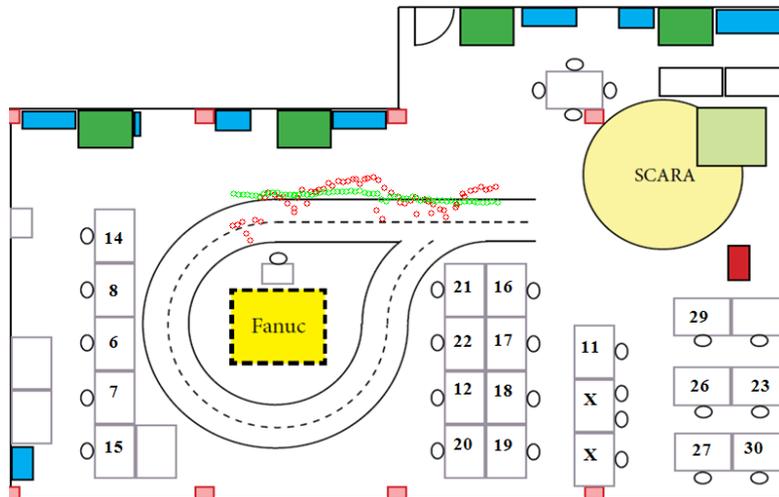
(b)

Figura 4.36: Distribuição do erro da posição calculada para o segundo ensaio realizado, onde cada barra corresponde a um intervalo de 3 centímetros. Em a) esta é mostrada após as melhorias, contendo 99.8% do total dos dados obtidos. Em b) estão ainda representadas as trajetórias obtidas utilizando os dados da câmara, a vermelho e os dados *laser*, a verde.

A média, para cada posição estática, dos resultados melhorados, para ambos os ensaios realizados no LAR segundo uma trajetória retilínea estão representados nas figuras 4.37 e 4.38, respectivamente.

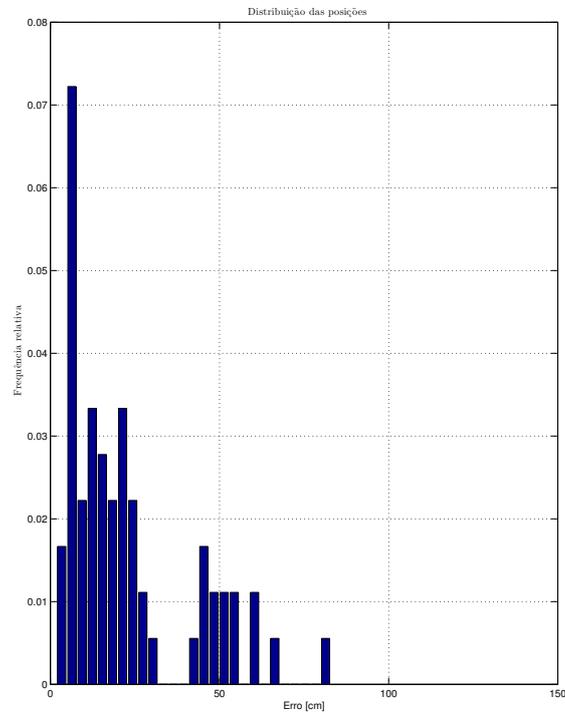


(a)



(b)

Figura 4.37: Distribuição do erro da posição calculada para o primeiro ensaio realizado, onde cada barra corresponde a um intervalo de 3 centímetros. Em a) esta é mostrada após as melhorias, contendo 100% do total dos dados obtidos. Em b) estão ainda representadas as trajetórias obtidas utilizando os dados da câmara, a vermelho e os dados *laser*, a verde.



(a)

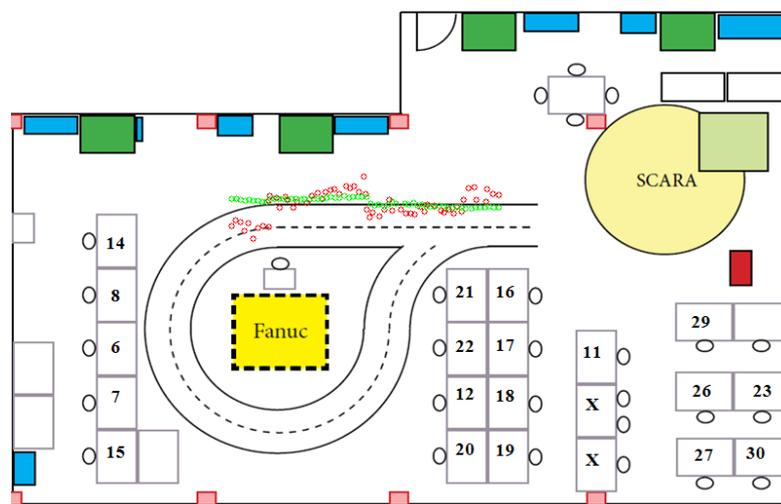
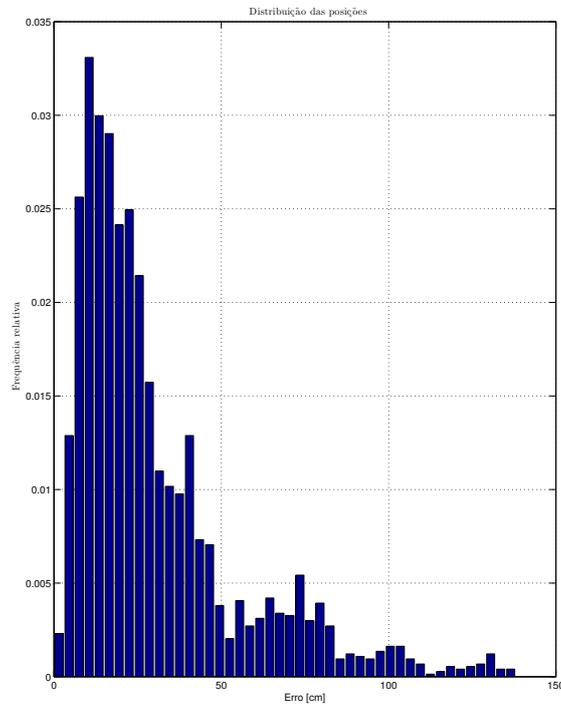


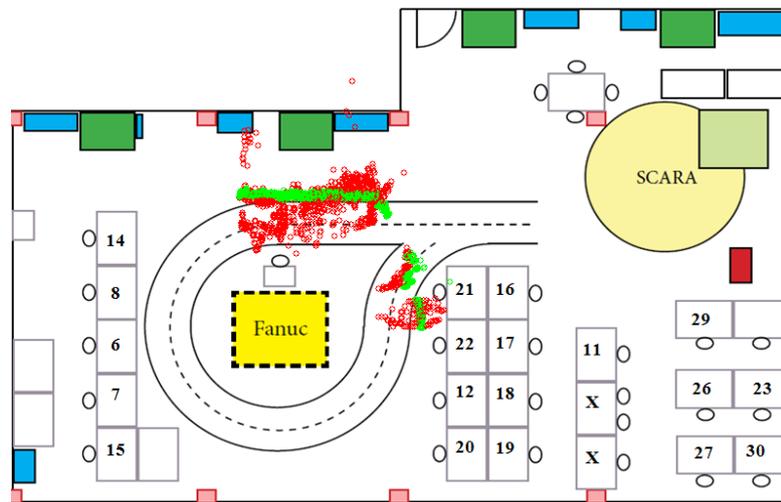
Figura 4.38: Distribuição do erro da posição calculada para o segundo ensaio realizado, onde cada barra corresponde a um intervalo de 3 centímetros. Em a) esta é mostrada após as melhorias, contendo 100% do total dos dados obtidos. Em b) estão ainda representadas as trajetórias obtidas utilizando os dados da câmara, a vermelho e os dados *laser*, a verde.

Segundo trajetória com secção curvilínea no LAR

Os resultados melhorados para ambos os ensaios realizados no LAR segundo uma trajetória contendo uma secção inicial curvilínea seguida de um troço retilíneo estão representados nas figuras 4.39 e 4.40, respetivamente.

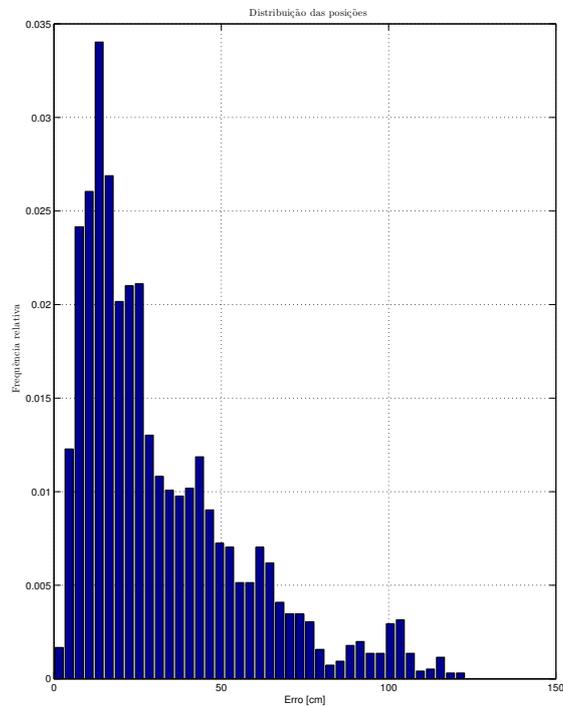


(a)

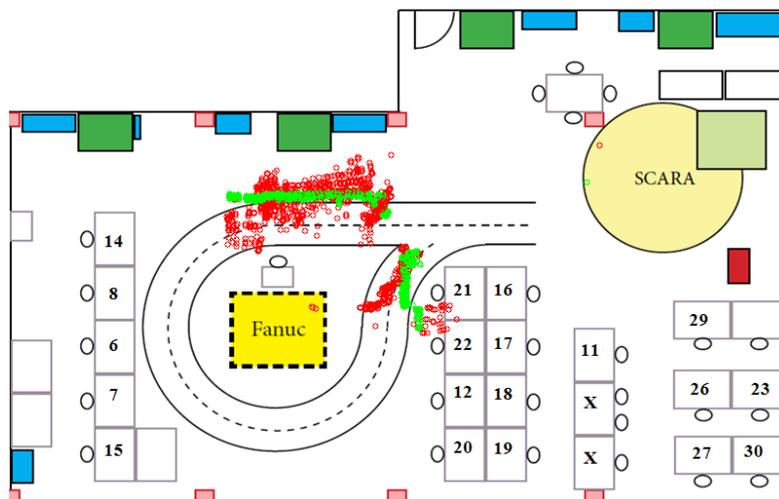


(b)

Figura 4.39: Distribuição do erro da posição calculada para o primeiro ensaio realizado, onde cada barra corresponde a um intervalo de 3 centímetros. Em a) esta é mostrada após as melhorias, contendo 100% do total dos dados obtidos. Em b) estão ainda representadas as trajetórias obtidas utilizando os dados da câmara, a vermelho e os dados *laser*, a verde.



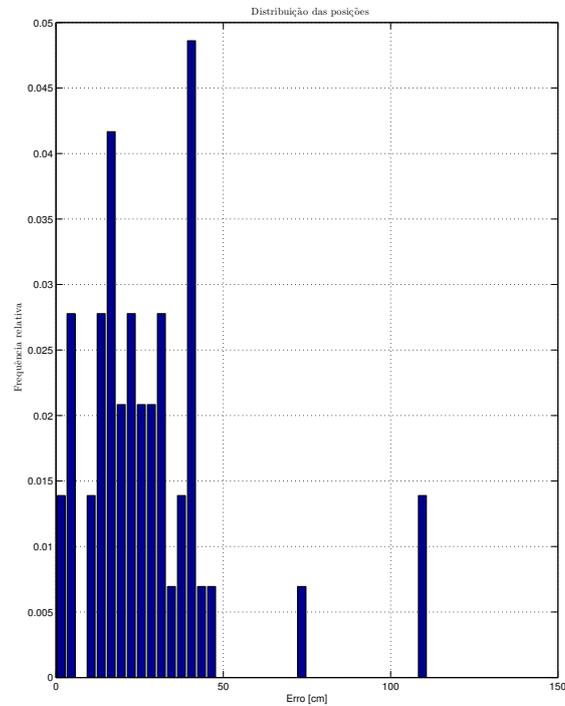
(a)



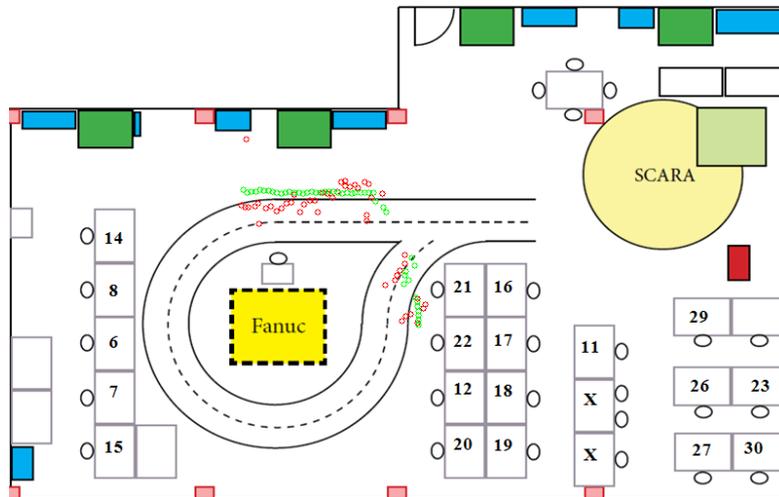
(b)

Figura 4.40: Distribuição do erro da posição calculada para o segundo ensaio realizado, onde cada barra corresponde a um intervalo de 3 centímetros. Em a) esta é mostrada após as melhorias, contendo 100% do total dos dados obtidos. Em b) estão ainda representadas as trajetórias obtidas utilizando os dados da câmara, a vermelho e os dados *laser*, a verde.

A média, para cada posição estática, dos resultados melhorados, para ambos os ensaios realizados no LAR segundo uma trajetória contendo uma secção inicial curvilínea seguida de um troço retilíneo estão representados nas figuras 4.41 e 4.42, respetivamente.

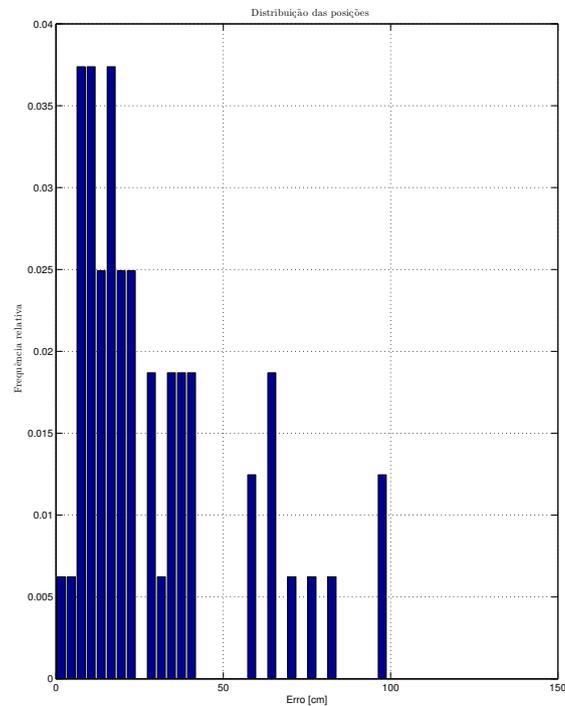


(a)

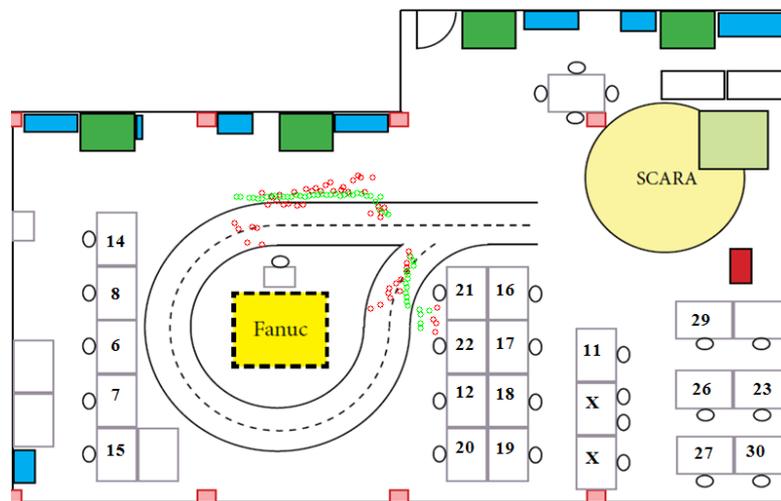


(b)

Figura 4.41: Distribuição do erro da posição calculada para o primeiro ensaio realizado, onde cada barra corresponde a um intervalo de 3 centímetros. Em a) esta é mostrada após as melhorias, contendo 100% do total dos dados obtidos. Em b) estão ainda representadas as trajetórias obtidas utilizando os dados da câmara, a vermelho e os dados *laser*, a verde.



(a)

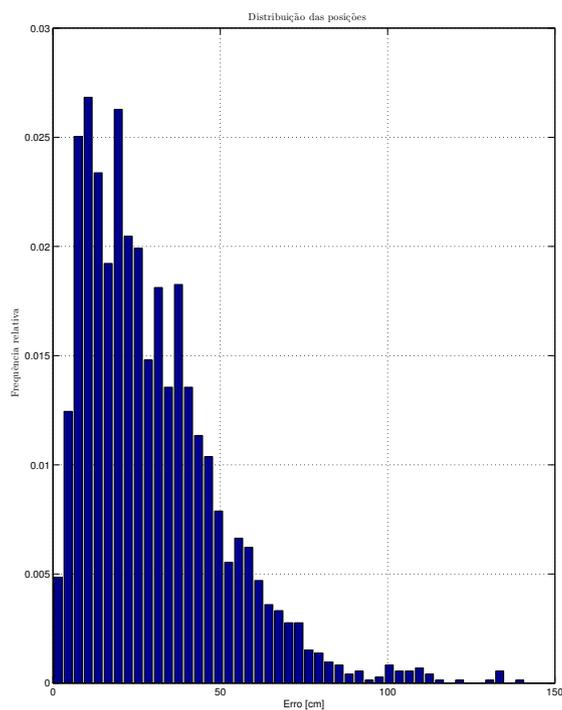


(b)

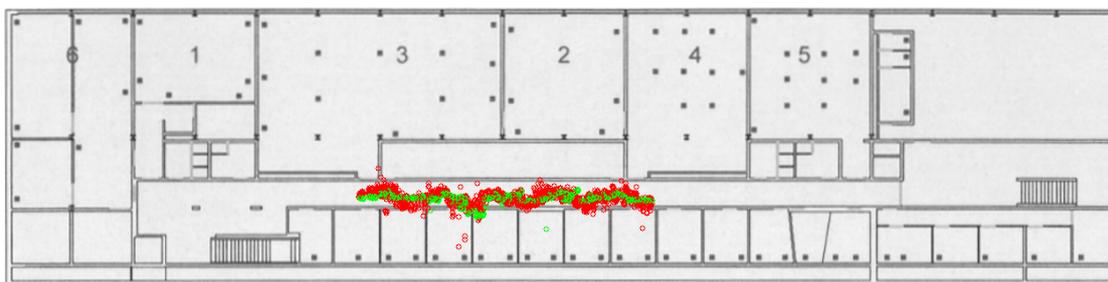
Figura 4.42: Distribuição do erro da posição calculada para o segundo ensaio realizado, onde cada barra corresponde a um intervalo de 3 centímetros. Em a) esta é mostrada após as melhorias, contendo 100% do total dos dados obtidos. Em b) estão ainda representadas as trajetórias obtidas utilizando os dados da câmara, a vermelho e os dados *laser*, a verde.

Segundo trajetória no corredor do DEM

Por último os resultados melhorados relativamente a ambos os ensaios levados a cabo no corredor do DEM, segundo uma trajetória contendo uma secção final com alteração da direção de 90° relativamente à orientação inicial são apresentados nas figuras 4.43 e 4.44.

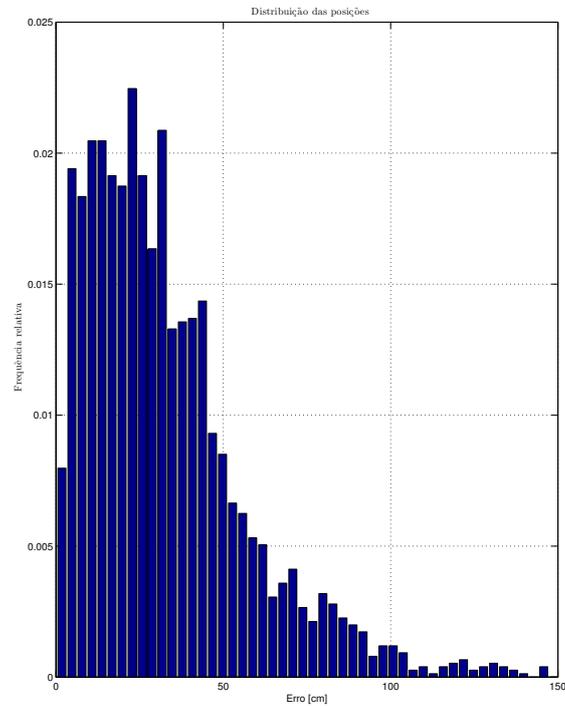


(a)

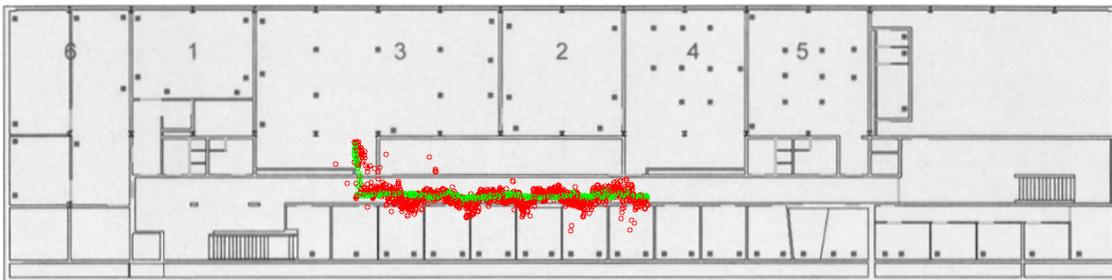


(b)

Figura 4.43: Distribuição do erro da posição calculada para o primeiro ensaio realizado, onde cada barra corresponde a um intervalo de 3 centímetros. Em a) esta é mostrada após as melhorias contendo 98.9% do total dos dados obtidos. Em b) estão ainda representadas as trajetórias obtidas utilizando os dados da câmara, a vermelho e os dados *laser*, a verde.



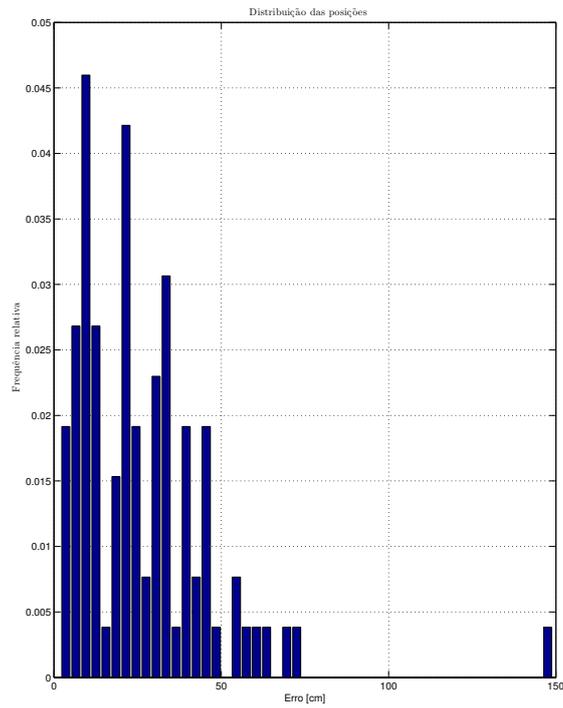
(a)



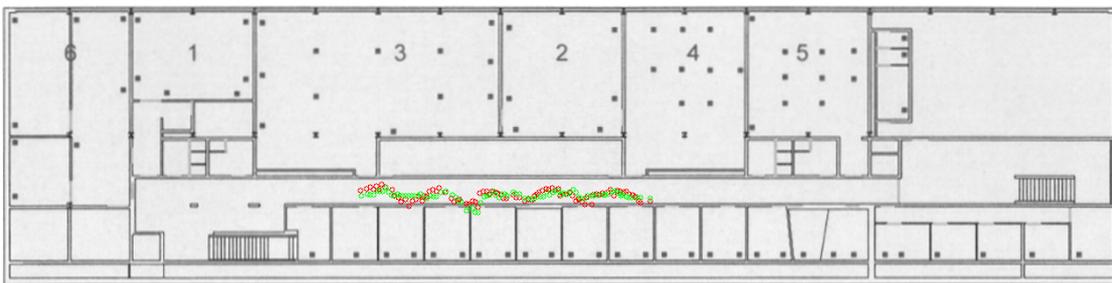
(b)

Figura 4.44: Distribuição do erro da posição calculada para o segundo ensaio realizado, onde cada barra corresponde a um intervalo de 3 centímetros. Em a) esta é mostrada após as melhorias, contendo 99.5% do total dos dados obtidos. Em b) estão ainda representadas as trajetórias obtidas utilizando os dados da câmara, a vermelho e os dados *laser*, a verde.

A média, para cada posição estática, dos resultados melhorados relativamente a ambos os ensaios levados a cabo no corredor do DEM, segundo uma trajetória contendo uma secção final com alteração da direção de 90° relativamente à orientação inicial são apresentados nas figuras 4.45 e 4.46.

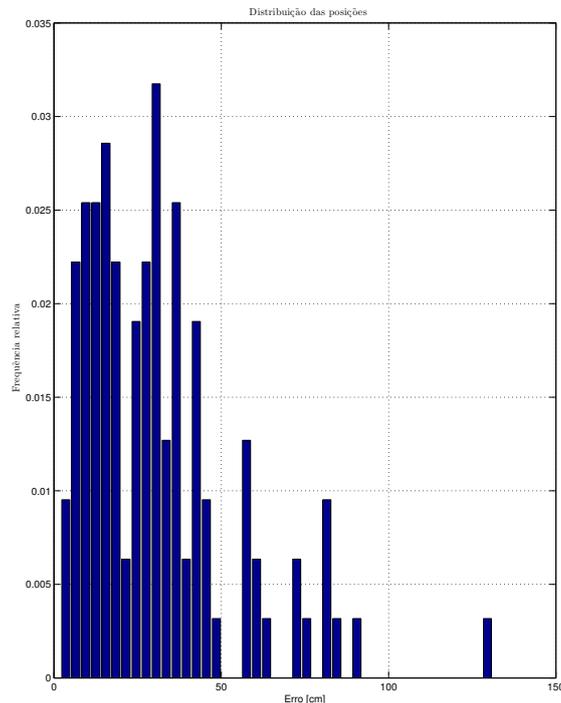


(a)

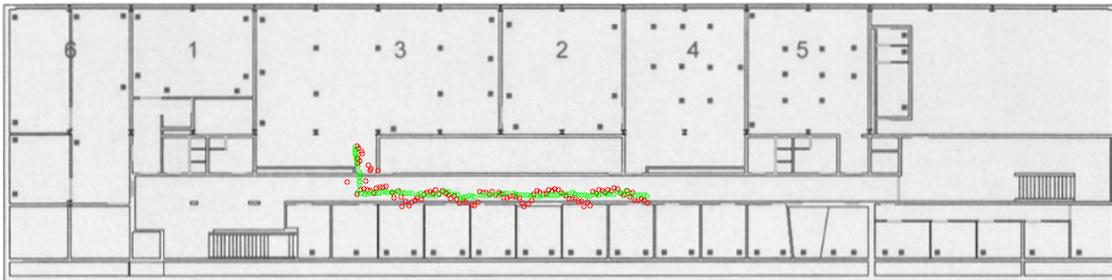


(b)

Figura 4.45: Distribuição do erro da posição calculada para o primeiro ensaio realizado, onde cada barra corresponde a um intervalo de 3 centímetros. Em a) esta é mostrada após as melhorias contendo 100% do total dos dados obtidos. Em b) estão ainda representadas as trajetórias obtidas utilizando os dados da câmara, a vermelho e os dados *laser*, a verde.



(a)



(b)

Figura 4.46: Distribuição do erro da posição calculada para o segundo ensaio realizado, onde cada barra corresponde a um intervalo de 3 centímetros. Em a) esta é mostrada após as melhorias, contendo 100% do total dos dados obtidos. Em b) estão ainda representadas as trajetórias obtidas utilizando os dados da câmara, a vermelho e os dados *laser*, a verde.

Observando os resultados referentes aos ensaios realizados no LAR é possível verificar que a distribuição do erro da posição apresenta características de uma distribuição bimodal. Esta incidência do erro está, em parte, relacionada com a zona final da trajetória realizada, onde é possível observar um anormal deslocamento da posição calculada pela câmara relativamente à real. Este problema deve-se à existência de uma pequena inclinação no solo verificada naquela zona da trajetória, alterando a altura da câmara relativamente aos marcadores, o que influencia severamente as medições efetuadas.

No sentido de comparar quantitativamente a qualidade da solução e a magnitude das melhorias efetuadas, e uma vez que se trata de um ambiente industrial, por norma amplo, foram considerados aceitáveis valores de erro na posição de até 40 centímetros.

Nessas condições, é apresentada na tabela 4.1 a percentagem de medições, para cada ensaio realizado, em que se verifica a condição anterior antes e após a aplicação das melhorias, tendo sido verificada uma melhoria em todos os tipos de trajetória efetuados no posicionamento, em média, de 13%.

Tabela 4.1: Tabela comparativa da quantidade de medições que satisfaz a condição de erro no posicionamento inferior a 40 cm, para cada um dos ensaios realizados antes e após as melhorias efetuadas.

			Antes da melhoria	Depois da melhoria	Com a média
LAR	Reta	Ensaio 1	68.3%	73.2%	85.7%
		Ensaio 2	71.5%	73.9%	77.4%
	Curva	Ensaio 1	61.3%	75.9%	78.0%
		Ensaio 2	53.8%	69.7%	78.2%
DEM	Curva	Ensaio 1	72.3%	74.0%	82.2%
		Ensaio 2	69.3%	69.4%	74.8%
		Valor médio	66.4%	72.7%	79.4%

Com o intuito de verificar se a solução proposta poderá ser viável em movimento, determinou-se o tempo de processamento médio, em milissegundos, do módulo de deteção dos marcadores assim como do módulo de cálculo da posição para cada um dos ensaios realizados.

Desta forma, de acordo com a tabela 4.2 concluí-se claramente que é o módulo de deteção dos marcadores quem limita a velocidade de processamento, tendo uma frequência em média de aproximadamente 11.2 Hz.

Tabela 4.2: Tabela dos tempos de processamento, em milissegundos, dos módulos de deteção e de posicionamento para cada um dos ensaios realizados

			Módulo de Deteção	Módulo de Posicionamento
LAR	Reta	Ensaio 1	89.7 ms	2.89 ms
		Ensaio 2	89.6 ms	2.82 ms
	Curva	Ensaio 1	89.9 ms	2.78 ms
		Ensaio 2	89.6 ms	3.00 ms
DEM	Curva	Ensaio 1	89.2 ms	2.73 ms
		Ensaio 2	89.6 ms	2.87 ms
		Valor médio	89.6 ms	2.85 ms

É ainda possível concluir que, para um veículo que se desloque com velocidade de 1 m/s, sabendo que 79.4% das medições são consideradas aceitáveis, este estará perdido no máximo 0.206 segundos, o que equivale a 20.6 centímetros de deslocamento. Para além disso, caso haja marcadores visíveis é feita uma deteção a cada 90 ms o que equivale a 9 centímetros de deslocamento entre cada deteção sucessiva.

Capítulo 5

Conclusões e trabalho futuro

5.1 Conclusões gerais

Após concluído o trabalho e alcançados os objetivos iniciais, é possível concluir que, de uma forma geral, o sistema de visão artificial desenvolvido é uma solução viável para o guiamento em ambiente industrial.

Uma vez que foi possível alcançar bons resultados, dado o *hardware* disponível, prevê-se que, com a utilização de uma câmara adequada à aplicação, a solução desenvolvida seja viável para o posicionamento em movimento contínuo, dado que 79.4% das localizações efetuadas se encontram num raio de 40 cm da posição real, valor considerado aceitável e que poderá vir a melhorar. Não devemos esquecer no entanto que estes resultados foram adquiridos com base na média dos valores calculados, por estarmos perante uma situação estática. Por esse motivo, para o posicionamento em movimento seria necessário aplicar, por exemplo, um filtro preditor de Kalman de forma a eliminar os *outliers*.

No que toca às trajetórias testadas, verificou-se a impossibilidade de efetuar uma trajetória curvilínea nas proximidades de uma parede, devido à diminuição da área captada pela câmara, impossibilitando a deteção de dois marcadores que cumpram o requisito de distância mínima entre si.

Particularmente, no que toca à obtenção do posicionamento, este verificou-se possível com apenas dois marcadores visíveis, ao contrário da maioria dos métodos de posicionamento conhecidos, que necessitam de pelo menos três marcadores detetáveis. Desta forma é possível fazer o posicionamento mais frequentemente e com maior qualidade, uma vez que para mais marcadores visíveis há redundância de informação. Para além disso, com o aumento de marcadores detetáveis aumentam os pares utilizados no posicionamento, aumentando a qualidade da medição. É também possível concluir que o método de cálculo do posicionamento utilizado é bastante robusto, pois as condições necessárias à sua aplicação são sempre verificadas, ainda que o conceito matemático aplicado seja bastante simples.

Por outro lado, no que toca à biblioteca de deteção dos marcadores pode-se afirmar que esta preenche os requisitos necessários para fazer o guiamento, uma vez que permite fazer o posicionamento, num computador vulgar, com uma frequência de até 11.2 *Hz*. Para além disso, foi possível detetar os marcadores quando colocados de um lado e de outro da trajetória distanciados num intervalo entre 3.5 a 4.4 metros entre si.

Resta também a conclusão de que tanto o algoritmo de posicionamento como a biblioteca utilizada para a deteção dos marcadores são viáveis, havendo no entanto alguma

incerteza no cálculo das distâncias, cujas fontes podem ser muito variadas, uma vez que a distância é calculada com base nas dimensões do marcador na imagem, que podem variar com fatores externos como as condições de iluminação. Para o cálculo das distâncias foi ainda assumido que os marcadores se encontram perfeitamente alinhados com o eixo horizontal da câmara e em posição perpendicular ao plano do solo, o que é muito difícil de garantir em todas as situações, pois seria necessário que todos os marcadores e a câmara se encontrassem exatamente à mesma altura e que o chão fosse perfeitamente plano. Verifica-se também a existência de erro sistemático, que pode ser devido à não coincidência entre a origem dos referenciais da câmara e do laser.

Finalmente, mas não menos importante, o sistema desenvolvido é de muito baixo custo, uma vez que o único investimento necessário é a aquisição de uma câmara e a criação de marcadores, que podem ser impressos em simples folhas de papel com tamanho A4.

5.2 Trabalho futuro

Uma vez concluída esta parte do trabalho seria interessante ver o sistema ganhar alguma robustez, por exemplo pela integração de um sistema complementar de posicionamento relativo, seja por hometria ou com recurso a um giroscópio. Desta forma seria possível estimar o posicionamento aproximado em situações de deteção de um único marcador, ou até mesmo em situações em que não seja possível qualquer deteção.

De forma a colmatar a falha existente no posicionamento em trajetória curvilínea, poderiam ser utilizados sistemas multi câmara direcionados de forma a abranger uma maior área em redor do *AGV*. Outra possível solução seria a utilização de sistemas ativos de procura de marcadores, que poderiam procurar de forma inteligente, direcionando a câmara para a zona final da curva, onde a probabilidade de haver marcadores é muito elevada.

No sentido de aumentar a precisão do sistema desenvolvido seria de considerar a implementação de uma solução baseada em fusão sensorial, utilizando visão artificial conjuntamente com outro tipo de solução que permita a medição de distâncias com maior precisão, como é o caso dos sistemas de *laser*. Nesse sentido, seria proveitoso utilizar as funcionalidades da visão artificial na deteção e leitura dos marcadores, assim como no cálculo do ângulo relativo. Uma vez detetados, seria enviado um pedido de medição das distâncias na direção do marcador.

Outro sistema possível seria a utilização de um sistema estéreo para a medição da distância aos marcadores. Uma vez que o grande desafio dos sistemas de visão estéreo é a correspondência entre pontos no par de imagens, aplicando a deteção e leitura de marcadores em ambas as imagens este problema seria facilmente ultrapassado, pois a correspondência entre o centro do mesmo marcador em ambas as imagens seria efetuada de forma automática. Dessa forma, com a correspondência entre o centro do marcador efetuada seria apenas necessário proceder ao cálculo da sua distância.

Referências

- [1] J. de Souza and R. Royer, “IMPLANTAÇÃO DE UM SISTEMA AGV-VEÍCULO GUIADO AUTOMATICAMENTE UM ESTUDO DE CASO,” in *XXXIII Encontro Nacional de Engenharia do Produto*, (Salvador, BA, Brasil), 2013.
- [2] Wikilivros, “Logística/Movimentação de materiais/Introdução.” http://pt.wikibooks.org/wiki/Logística/Movimentação_de_materiais/Introdução, Visitado em Maio de 2014.
- [3] S. Automation, “AGVS Basics.” <http://www.agvsystems.com/agvs-basics/basics-agvs/>, Visitado em Abril de 2014.
- [4] V. Kumar and R. Mall, “Study and analysis of automatic material handling system 1,” *VSRD International Journal of Mechanical, Civil, Automobile and Production Engineering*, vol. III, no. Ix, pp. 357–360, 2013.
- [5] ROS, “About ROS.” <http://www.ros.org/about-ros/>, Visitado em Maio de 2014.
- [6] J. Torres-Solis, T. Falk, and T. Chau, “A review of indoor localization technologies: towards navigational assistance for topographical disorientation,” *Ambient Intelligence*, pp. 51–84, 2010.
- [7] C. Inc., “Wire Guidance.” <http://www.wireguidance.com/>, Visitado em Abril de 2014.
- [8] D. Webb, “Automatic Guided Vehicles.” http://www.daifukuwebb.com/wp-content/uploads/2013/03/Bul-3075_Webb_AGV_General_Brochure.pdf, Visitado em Abril de 2014.
- [9] S. Automation, “AGV-AGC Vehicle Navigation.” <http://www.agvsystems.com/wp-content/uploads/2013/02/Nav.pdf>, Visitado em Abril de 2014.
- [10] E. A. Inc., “Egemin Navigation System on Robot.” http://www.egeminusa.com/pages/software/agvs_ensor.html, Visitado em Abril de 2014.
- [11] Robotec, “Building a Magnetic Track Guided AGV.” <http://www.robotec.com/index.php/applications/how-to/278-building-a-magnetic-track-guided-agv>, Visitado em Abril de 2014.
- [12] Transbotics, “Guidance/Navigation.” <http://www.transbotics.com/learning-center/guidance-navigation/>, Visitado em Maio de 2014.

- [13] M. E. Corporation, “Barcode Basics.” <http://www.mecsw.com/info/info.html>, Visitado em Maio de 2014.
- [14] P. Schmidmayr, M. Ebner, and F. Kappe, “What’s the power behind 2D barcodes? : Are they the foundation of the revival of print media?,” *I-KNOW '08 and I-MEDIA '08 : International Conferences on Knowledge Management and New Media Technology*, 2008.
- [15] J. Rouillard, “Contextual QR Codes,” in *Computing in the Global Information Technology, 2008. ICCGI'08. The Third International Multi-Conference on*, pp. 50–55, IEEE, July 2008.
- [16] G. T. global language of business, “GS1 DataMatrix.” http://www.gs1.org/docs/barcodes/GS1_DataMatrix_Introduction_and_technical_overview.pdf, Visitado em Maio de 2014.
- [17] B. coder, “Data Matrix Barcode.” <http://barcode-coder.com/en/datamatrix-specification-104.html>, Visitado em Maio de 2014.
- [18] V. Pierlot and M. Van Droogenbroeck, “A New Three Object Triangulation Algorithm for Mobile Robot Positioning,” *IEEE Transactions on Robotics*, pp. 1–12, 2014.
- [19] J. Borenstein, H. R. Everett, L. Feng, and D. Wehe, “Mobile robot positioning: Sensors and techniques,” *Journal of Robotic Systems*, vol. 14, pp. 231–249, Apr. 1997.
- [20] Tecmundo, “Como funciona o GPS.” <http://www.tecmundo.com.br/gps/2562-como-funciona-o-gps-.htm>, Visitado em Maio de 2014.
- [21] C. J. Cohen and F. V. Koss, “Comprehensive study of three-object triangulation,” in *Applications in Optical Science and Engineering* (W. J. Wolfe and W. H. Chun, eds.), pp. 95–106, International Society for Optics and Photonics, May 1993.
- [22] M. Ligas, “Simple Solution to the Three Point Resection Problem,” *Journal of Surveying Engineering*, vol. 139, pp. 120–125, Aug. 2013.
- [23] Semacode, “Choosing the best 2D barcode format for mobile apps.” 2006.
- [24] ROS, “How to Calibrate a Monocular Camera.” http://wiki.ros.org/camera_calibration/Tutorials/MonocularCalibration, Visitado em Março de 2014.
- [25] ROS, “Image Proc.” http://wiki.ros.org/image_proc?distro=hydro, Visitado em Março de 2014.
- [26] M. Laughton, “Libdmtx.” <http://www.libdmtx.org/>, Visitado em Fevereiro de 2014.
- [27] S. Owen, “ZXing.” <https://github.com/zxing/zxing>, Visitado em Fevereiro de 2014.
- [28] C. B. Madsen and C. S. Andersen, “Optimal landmark selection for triangulation of robot position,” *Robotics and Autonomous Systems*, vol. 23, pp. 277–292, July 1998.

-
- [29] Wikipédia, “Produto vetorial.” http://pt.wikipedia.org/wiki/Produto_vetorial, Visitado em Março de 2014.
- [30] SICK, “LMS100/111/120/151 Laser Measurement Systems,” Documento número 8012471/T763/2009-07-28.