



**Carlos Manuel
Ribeiro Cabral**

**Navegação em ambientes exteriores através da adaptação de
uma plataforma Robótica Móvel**

**DOCUMENTO
PROVISÓRIO**



**Carlos Manuel
Ribeiro Cabral**

**Navegação em ambientes exteriores através da adaptação de
uma plataforma Robótica Móvel**

Dissertação apresentada à Universidade de Aveiro para cumprimento dos requisitos necessários à obtenção do grau de Mestre em Engenharia Mecânica, realizada sob a orientação científica do Dr. Vitor M. F. Santos, Professor Auxiliar do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de Aveiro

resumo

Este trabalho descreve um processo de intervenção mecânica efectuada na plataforma Robuter de forma a habilitá-la a navegar em ambientes exteriores com alguns limites de irregularidade. Essa irregularidade contempla sobretudo passeios de calçada e mosaico, incluindo também lancis de baixo perfil e outras formações típicas transitáveis num Campus como o da Universidade de Aveiro. Além da intervenção mecânica no robô, é também abordada uma solução de navegação que conta com percepção local e global, usando para o efeito os sensores a bordo e um sistema comercial de GPS de baixo custo.

São indicados estudos desenvolvidos, ferramentas e métodos de localização usando o laser de um robô móvel em ambientes semi-estruturados. Neste caso o ambiente estudado foi a passadeira pedonal do Campus da Universidade de Aveiro Nesta passadeira temos como pontos de referência pilares circulares e rectangulares.

A partir da representação espacial e bidimensional obtida através do laser é possível fazer o reconhecimento e extracção de padrões predefinidos como sejam as características geométricas dos pilares em questão.

Assim todo o trabalho baseou-se no desenvolvimento de algoritmos que garantem com um elevado grau de fiabilidade, a detecção de pilares com geometria circular ou rectangular através das características que um aglomerado de pontos apresente. Os algoritmos garantem a extracção e identificação dos padrões predefinidos em ambientes extremamente ruidosos onde se encontram elementos dinâmicos como sejam as pessoas e outros elementos que não fazem parte do modelo teórico, sendo assim possível fazer a localização do robô num modelo parcial do campus.

abstract

This work describes a mechanical procedure made upon a Robuter mobile platform in order to enable it to navigate in outdoor environments with some limited degree of ground irregularity. That irregularity accounts for paved areas and low profile ground steps and typical human pathways in the Campus of the University of Aveiro. Besides the mechanical intervention on the robô, a solution for navigation is also proposed both using global and local perception, using the robô on-board sensors, namely laser and sonar, and also a low cost GPS receiver.

Some studies, tools and methods of localization using a laser of a mobile robô in semi-structured environments are indicated. In this case the environment in question was a pathways in the Campus of the University of Aveiro. In the pathway we have has a reference points, circular and rectangular pillars.

From spatial an bi-dimensional representation gave by laser it's possible to make the recognition and extraction of predefined patterns as geometric attributes of the pillars in question.

So all the work was based in the development of algorithms that assure with a high level of friability the detection of pillars with circular or rectangular geometry through the characteristics that an agglomerate of points presents.

In extremely noisy atmospheres where they are dynamic elements as people and other elements walking thought, that doesn't belong to the theoretical model, algorithms guarantee the extraction and identification of the pre-defined patterns, being like this possible to do the location of the robô in a partial model of the campus.

Índice

Índice.....	1
Lista de abreviaturas.....	2
Lista de figuras.....	2
1- Enquadramento / Introdução.....	3
1.1- Origem do termo “Robot”.....	3
1.2- Tipos de robôs.....	4
1.3- Objectivos do trabalho.....	5
2- State of the art.....	7
2.1- Introdução.....	7
2.2- Técnicas e Métodos de navegação.....	8
3- Metodologias.....	10
3.1- Intervenção Mecânica.....	10
3.2- Integração do sistema GPS.....	14
3.3- Algoritmos de interpretação sensorial.....	15
4- Resultados.....	79
5- Conclusões.....	80
6- Apêndices.....	81
7- Lista de referências.....	87

Lista de abreviaturas

AGV - Automated Guided Vehicle
GPS - Global Positioning System

Lista de figuras

1- Enquadramento / Introdução

1.1- Origem do termo “Robot”

Este documento tem como objectivo descrever todo o trabalho de desenvolvimento de ferramentas ao nível de hardware e software que permitam a um robô móvel navegar num espaço exterior pré-definido.

Antes de mais refere-se que o termo português usado para “robot” é “robô”. Mas, o que é um robô?

O escritor Checo Karel Čapek é geralmente a pessoa a quem é dado o crédito de cunhar a palavra robô (embora se suspeite que o foi o seu irmão Josef a pessoa que sugeriu tal termo). A palavra robô é derivada de uma palavra checa, “*robota*” que significa trabalhos forçados, mão-de-obra, escravos ou servos. A origem do termo robô como hoje ainda é usado pode ser encontrado num livro de ficção científica e uma peça escrita pelo próprio Čapek. O título do livro é *Valka s Mloky* mais conhecido em inglês como *War with the Newts*, a guerra com as salamandras, e a peça intitulada *R.U.R. (Rozuma Univerzalni Roboti)*, também conhecido em inglês como *Rozum's Universal Robots*, a sabedoria dos robôs universais. Nesta peça um dos temas principais abordados é a desumanização do homem numa civilização tecnológica.

O termo “Robotics” (Robótica), simplesmente significa a ciência que estuda, trabalha ou desenvolve os robôs. Ou seja, mais uma vez se põe questão o que é efectivamente um robô? Existem diferentes tipos de respostas. Irei dividi-las em duas categorias:

- Os robôs da ficção científica
- A definição de engenharia atribuída a robôs

Provavelmente os robôs mais conhecidos da ficção científica são o C3PO e o R2D2 da série “Star Wars”. Robôs servindo e até salvando heróis são comuns em séries de ficção científica. Algumas vezes também aterrorizam seres humanos como é o caso do “Terminator”, que são considerados os “maus” da ficção científica. Mas, já nos anos 40 houve um autor Americano (nascido na Rússia) de séries de ficção científica, chamado Issac Asimov. Ele foi conhecido e reconhecido pelos prémios Hugo e Nébulas por muito trabalhos de ficção científica. Dos mais conhecidos inclui-se, *I Robot* (1950), *The Foundation Trilogy* (1951-52), *Foundation's Edge* (1982), and *The Gods Themselves* (1972).

A palavra robótica foi deste modo usada pela primeira vez numa curta história publicada em 1942, *I Robot*, colecção de varias historias que foi publicada em 1950. Asimov definiu três leis consideradas as mais interessantes e duradouras descrições de um bom robô na ficção científica, “As Três Leis da Robótica”.

1. Um robô nunca pode prejudicar, ferir e injuriar um ser humano, ou, por inacção permita que um ser humano seja prejudicado.
2. Um robô deve obedecer sempre aos seres humanos, a não ser que esta viole a regra anterior 1.
3. Um robô deve sempre proteger a sua existência e integridade sem nunca violar as regras 1 e 2

Em termos de engenharia tem-se varias definições para robô sendo umas das mais conhecidas do “Robot Institute of America”, 1979, “A reprogrammable, multifunctional manipulator designed to move material, parts, tools, or specialized devices through various programmed motions for the performance of a variety of tasks”. O mesmo será dizer que é um manipulador multi-funcional, programável, projectado para mover materiais, componentes, ferramentas ou dispositivos especiais através de movimentos programáveis variáveis para a execução de uma variedade de tarefas.

Esta definição gera contestação entre alguns autores sendo considerada como incorrecta porque não existe nenhum tipo de percepção, ou tomada de decisão, simplesmente este tipo de

máquinas de acordo com determinadas entradas geram saídas específicas. Apesar de serem interessantes e algumas serem bastante complexas, estas não podem ser consideradas como robôs.

Se utilizarmos um dicionário obtém como definição para o termo robô, uma máquina ou um autómato, por vezes de configuração que imita a humana, capaz de se mover ou de realizar certas tarefas, que inicialmente eram inculcadas ao homem, bem como aprender a interagir com o seu meio.

Em resumo, um robô não é mais que uma máquina programável com um determinado nível de percepção e inteligência que se adapta e interage com o ambiente que está inserido podendo este ser mais ou menos complexo de modo a realizar as mais diversas tarefas que geralmente seriam efectuadas pelo ser humano.

1.2- Tipos de robôs

Os robôs podem-se dividir em dois grandes grupos:

- Robôs fixos
- Robôs móveis

Os robôs chamados fixos são caracterizados por uma limitação que é a sua mobilidade. Entre estes engloba-se os manipuladores, ou robôs industriais. Usualmente são constituídos por elos e juntas de modo a posicionar e orientar a ferramenta. Este tipo de robôs estão implementados em grande escala na indústria onde se tem como objectivo principal o aumento da rentabilidade, garantindo padrões de qualidade e repetibilidade controlados e bem definidos.

Os robôs móveis têm como característica principal a sua mobilidade, ou seja, têm a capacidade de se moverem sem a intervenção directa humana. Uma larga aplicação a nível industrial de robôs móveis são os casos específicos dos AGVs (Automated Guided Vehicle) que em termos genéricos seguem um cabo indutivo. Existem também outro tipo de robôs móveis que não utilizam caminhos predefinidos, mas podem-se mover porque interagem com o ambiente que os rodeia. Este tipo de robôs trazem novos desafios sendo largamente usados na investigação científica, com o objectivo de serem aplicadas em situações práticas.

Este tipo de veículos móveis são ainda subdivididos em, robôs móveis de interiores (indoors) e robôs móveis de exteriores (outdoors). O objectivo em ambos é o mesmo, se deslocarem e realizarem tarefas interagindo com o ambiente, mas a forma e os recursos usados para tal variam um pouco ao nível da locomoção e da percepção.

O primeiro robô móvel de interiores foi desenvolvido em 1950 por W. Grey Walter usando tecnologia analógica, onde o seu principal objecto seria o de o robô de mover sem colidir com nenhum objecto [1]. Aplicações em ambientes exteriores também começaram a surgir mas de uma forma mais discreta devido ao maior número de problemas adjacentes. Alguns factores como os ambientes serem mais estruturados, a topologia do terreno mais regular, o conforto de trabalhar em ambiente laboratorial foram motivos suficientes para que desenvolvimento e a investigação em ambientes exteriores fossem ficando para trás em relação aos ambientes interiores.

O “boom” na investigação de robôs móveis de exteriores começou na década de 80. Na designada robótica de campo e de serviço (Service and Field Robotics), as aplicações em ambientes exteriores representam uma linha fundamental e de crescente envolvimento. Está-se a falar em trabalho desenvolvido nas áreas mais diversas, como em aplicações na agricultura, floresta, exploração mineira, transporte em fábricas, como ainda em operações de resgate em cenários de desastres, na detecção e remoção de minas em cenários de guerra, entre outros. Fala-se de um sistema robótico que garante mobilidade, onde os desafios de navegação assumem um papel de destaque [1], tanto ao nível da percepção e tratamento da informação para a tomada de decisões, mas também, e hoje em dia numa expressão mais marcada, as questões de locomoção devido ao relevo.

De facto, a questão da morfologia do terreno implica preocupações muito diversas, e soluções universais são muito difíceis de conseguir, seja em termos mecânicos, de comando e até de autonomia energética. Muitos investigadores têm vindo assim a desenvolver grandes esforços

para desenvolver robôs e em tentar encontrar soluções específicas para diferentes campos de aplicações situações morfológicas. Resta, por enquanto, a resignação de confinar as especificações de um relevo particular, e nele desenvolver as soluções e métodos de navegação requeridos para uma determinada aplicação.

1.3- Objectivos do trabalho

No presente trabalho que aqui se descreve adoptou-se o Campus da Universidade de Aveiro como a área de intervenção sendo a aplicação que lhe está subjacente um embrião de um sistema autónoma de vigilância ou de transporte. Apesar do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de Aveiro ter vindo a desenvolver a alguns anos trabalhos de navegação, estes são em ambientes interiores e usam para tal uma plataforma robótica original da *Robosoft*, a *Robuter*. Também nesta unidade de investigação se verifica o caso de todo o trabalho de investigação começar em primeiro lugar em ambientes interiores seguindo a tendência já descrita. Mas, o trabalho desenvolvido essencialmente ao nível de integração de diferentes elementos sensoriais perspectivam um alargamento do campo de aplicação desta plataforma para ambientes exteriores.

Divide-se o trabalho em duas partes distintas, uma a questão física do robô, ou seja, nível estrutural da plataforma e outra de navegação que tem a ver com a parte de escolha, integração de sensores e desenvolvimento de soluções e algoritmos de percepção, localização e locomoção.

Tem-se como objectivo criar a estrutura necessária de forma a permitir que a plataforma robótica *Robuter III* navegue em ambientes exteriores onde a topologia do terreno não é regular como num laboratório mas sim em terrenos que apresentem alguma irregularidade como é o caso da passadeira pedonal do Campus da Universidade de Aveiro.

A descrição do estudo e da intervenção mecânica realizada na plataforma robótica (*Robuter III*) já existente foi o primeiro passo a ser realizado, seguida da definição dos constrangimentos cinemáticos e dinâmicos da solução. Questões de concepção ao nível da rigidez da estrutura, potência disponível são abordadas.

Após a intervenção mecânica no robô, é abordada uma solução de navegação que levará em conta com dois tipos de percepção, local e global dependendo do tipo de sensores em questão.

Para localização local pode-se utilizar diferentes tipos de sensores como é o caso do laser, ultra-sons, acelerómetros até mesmo a odometria, mas somente alguns serão utilizados. O laser neste tipo de ambientes tem de assentar em pressupostos de existência de uma estruturação mínima, como é o caso do espaço onde se propôs a realização deste trabalho, e da qual se deverá tirar o máximo partido.

Para localização global recorre-se ao GPS (Global Positioning System). O recurso à localização global por GPS torna-se posteriormente imprescindível para garantir uma maior autonomia e facilidade de especificação das missões a atribuir a um sistema autónomo desta natureza. Este sistema está actualmente a ser usado nas mais diferentes áreas oferecendo níveis de precisão variáveis entre os 20 metros e 1 centímetro. É claro que o aumento de precisão reflecte um aumento de custos dos equipamentos. O objectivo é ter um sistema que garanta a maior precisão (entre os 3 e os 20 metros), mas essencialmente económica, de forma a referenciar o robô relativamente a elementos fixos de grande porte, como por exemplo edifícios, de modo a auxiliar algumas tomadas de decisão. Uma das tarefas foi desenvolver ferramentas que permitam a aquisição de dados sensoriais no caso do GPS, assim como a interpretação sensorial dos mesmos para a navegação.

Em resumo, este trabalho tem como objectivo propor uma solução de navegação autónoma de um robô numa parte relevante do Campus Universitário de Santiago tirando partido de algumas das propriedades topográficas e arquitectónicas. O recurso a sistemas globais de localização e soluções e comportamentos locais de navegação para lidar com a locomoção imediata no espaço e seus obstáculos. Fazer e conceber as adaptações necessárias para habilitar a plataforma robótica *Robuter III* a navegar nos espaços em causa. Por fim usando os sensores já existentes, e outros a integrar, desenvolver e aplicar algoritmos básicos de navegação para a solução proposta.

Em seguida apresenta-se o capítulo, State of the art, onde se apresentaram diferentes abordagens de diferentes autores sobre a problemática da navegação em ambientes exteriores. O objectivo é fazer-se um apanhado global das soluções implementadas de forma a justificar a aplicação e o enquadramento dos métodos escolhidos e aplicados ao longo deste trabalho. Posteriormente tem-se mais três capítulos, o das metodologias, dos resultados e conclusões.

No capítulo das metodologias apresenta-se em primeiro lugar a adaptação mecânica efectuada no robô, desde a sua concepção, à sua análise estrutural, implementação, e definição dos constrangimentos cinemático e dinâmicos que advêm desta modificação. Depois o estudo da viabilidade, selecção e implementação da navegação usando um sistema de localização absoluta o GPS. Com este estudo desenvolvido passa-se à parte de aquisição de dados sensoriais no exterior para simulação da solução de navegação, estudo e desenvolvimento *off-line* de algoritmos de interpretação sensorial para a navegação.

No capítulo dos resultados apresentam-se como o seu nome indica os resultados dos métodos e soluções desenvolvidas no capítulo anterior.

Por fim no capítulo das conclusões faz-se um pequeno apanhado daquilo que foi realizado o que poderia e deve ser feito para o desenvolvimento do projecto global de navegação no Campus da Universidade de Aveiro.

2- State of the art

2.1- Introdução

Robôs móveis são equivalentes a aplicações robóticas industriais onde a mobilidade é um factor requerido. São aplicações do tipo onde não é possível trazer o trabalho ao robô. A propriedade essencial de um robô móvel é a sua capacidade de se mover sem actuação directa do homem e realizar trabalho de uma forma automática ou por tele-operação.

Para além dos robôs móveis estarem em constante desenvolvimento, são também usados em algumas aplicações há décadas. São diversos os factores que motivam o seu desenvolvimento, como é o caso da exploração espacial, onde se tem como objectivo inspeccionar outros planetas ou outros elementos celestiais. Aplicações militares têm também motivado os investigadores para o desenvolvimento de novas soluções de forma a garantir uma maior integridade humana. Aplicações industriais imergiram por volta dos anos 60. AGV's em particular, seguindo um cabo indutivo ganharam uma grande aceitação. Mas, alguns robôs móveis foram construídos para fins puramente científicos. Usualmente os investigadores têm sempre algumas aplicações práticas em mente. Aplicações em florestas, agricultura, exploração mineira, transporte e operações de resgate são as mais comuns.

O primeiro robô móvel foi desenvolvido nos anos 50, por whisky Walter. Era um robô de interiores que usava uma tecnologia analógica. O desenvolvimento de computadores digitais fez com que fosse possível o desenvolvimento das capacidades de um robô móvel. Um dos primeiros robôs controlados por um computador foi desenvolvido por *Standard Ressorci Institute*. Outro dos bem conhecidos e pioneiros robôs móveis de interiores foi Pilarte I e o Sentara.

Como já foi referido era natural que a investigação dos robôs moveis tivesse começado e sido amplamente desenvolvido em ambientes interiores. Ambientes interiores estruturados são mais fáceis e confortáveis de trabalhar que os ambientes exteriores. Muito trabalho já foi realizado neste tipo de ambientes, onde as soluções encontradas continuam a trazer novos desafios. Mas, gradualmente as aplicações em ambientes exteriores também começaram a imergir. Bem cedo, nos anos 70 a também a investigação em ambientes exteriores com fins civis surgiu, sendo um dos pioneiros o robô Cart (Moravec, 1977).

Um grande desenvolvimento na área de investigação de robôs móveis de ambientes exteriores deu-se na década de 80. Verificou-se que nas primeiras experiências realizadas que poder computacional era extremamente reduzido. Somente após o desenvolvimento rápido dos microprocessadores no fim dos anos 80 começou a ser possível aumentar este poder computacional. Claro que o poder computacional não era tudo mas foi sensivelmente em paralelo se desenvolveram alguns sensores, como é o caso do giroscópio de fibra óptica a um preço moderado, câmaras de vídeo e sensores de distância. Muitos trabalhos e projectos imergiram, com resultados considerados promissores, mas aplicações civis na vida real usando robôs móveis ainda são raras.

Aspectos de segurança, fiabilidade e até financeiros são os principais factores de levam ao abrandamento e a aceitação deste tipo de soluções. A tecnologia ainda não se apresenta num estado de maturidade, apresentando-se um pouco prematura. Actualmente o poder computacional já não é posto em causa, mas sim factores relacionados com a sensorização. Encontrar os sensores próprios para uma determinada aplicação continua a ser um problema, isto porque convém nunca esquecer que existem limites e restrições financeiras para os projectos a desenvolver. Por outro lado, sistemas de visão de grandes capacidades a nível de rapidez e resolução são cada vez mais comuns, mas surge o problema da interpretação dos dados. Algoritmos de detecção que garantam um grande nível de fiabilidade em situações extremas de luminosidade e condições ambientais adversas ainda são praticamente inexistentes. Para ultrapassar este tipo de limitações pode-se usar outro tipo de sensores com seja o laser que garante medições em situações difíceis. Contudo, estes também precisam de bons algoritmos e software de análise robustos para a detecção dos obstáculos. Posteriormente neste trabalho apresentam-se alguns métodos e técnicas utilizados para se fazer a localização do robô usando dados laser.

Em praticamente todos os casos, um robô móvel é mais dispendioso e necessita de mais recursos que uma máquina operada manualmente para fazer o mesmo tipo de trabalho, devido ao desenvolvimento algo prematuro em que se encontram este tipo de soluções.

2.2- Técnicas e Métodos de navegação

Os sistemas autónomos auto-guiados, mais conhecidos por AGV's, tiveram desde sempre uma grande aceitação. O tipo de navegação implícito nestes sistemas garantem um elevado nível de fiabilidade, dependendo esta somente de questões tecnológicas. Verifica-se que são sistemas essencialmente direccionados para ambientes fechados ou seja ambientes interiores. Garantem pouca flexibilidade e sendo necessário um pré-planeamento de toda uma unidade fabril.

A necessidade de libertar o robô alargando a sua área de intervenção, induz novos desafios essencialmente ao nível da navegação e tomada de decisão.

Apresenta-se em seguida o que se entende por navegação:

Phillip McKerrow, 1993

A navegação é a ciência de dirigir o curso de um robô móvel à medida que este percorre o ambiente (terra, mar ou ar).

Leonard e Durrant-Whyte, 1992

Navegar é saber:

Onde estou?

Para onde vou?

Como posso lá chegar?

A resposta a estas três perguntas anteriores define o conceito genérico de navegação para qualquer área, onde é necessário primeiro saber a localização da posição actual, depois o chamado alvo / "target", ou seja, local para onde se quer ir. Entretanto é necessário definir o método de chegar a esse mesmo alvo, fazendo um planeamento local ou global.

A maioria das tarefas induzidas a um robô móvel especialmente de exteriores requer uma representação interna do ambiente. O mesmo será dizer que é necessário criar um mapa que descreva o ambiente de forma aos objectivos ou a tarefas impostas sejam cumpridas. Com um mapa será possível fazer o planeamento de uma determinada missão de modo a localizar e direccionar o robô em direcção ao alvo.

Tipos e formas diferentes de representação são usados como mapas. Por exemplo, um mapa com uma lista de caminhos, trajectórias ou movimentos possíveis. Diagramas de Voronoi, que são mapas que descrevem o espaço livre num determinado ambiente. Ou aqueles que fazem uma representação dinâmica do ambiente com são as grelhas de ocupação.

Em ambas as fases de "Saber onde estou?" e "Para onde vou?" é necessário definir qual o sistema de guiamento/posicionamento disponível. Os sistemas baseados em sistemas de guiamento fixos (AGVs) têm como principal desvantagem a delimitação à priori de todo o percurso, não garantindo grande flexibilidade. Outros sistemas baseados na percepção de marcas especiais no ambiente permitem obter o posicionamento ou localização do robô durante o próprio movimento.

Antes de mais será necessário estimar a posição do robô, porque em primeiro lugar é necessário referenciar este em relação a um sistema de coordenadas pré-definido. Em segundo lugar porque a execução de uma trajectória pré-calculada depende do conhecimento da posição actual e por fim porque ao longo de um processo de navegação existem diferentes tipos de erros acumulados que resultam numa distorção efectiva da posição real em relação à estimada.

2.2.1- Sistemas de Posicionamento

Existem essencialmente dois tipos principais de posicionamento, os relativos e os absolutos. Existe também os mistos que são aqueles que utilizam ambos.

Nos sistemas de posicionamento relativo (Dead-reckoning) a obtenção da posição actual com base no conhecimento de valores anteriores da posição e da evolução física de grandezas associadas ao movimento do sistema móvel. São, na realidade, sistemas de posicionamento incremental.

Diferentes formas de posicionamento são utilizadas para se obter a referenciarão do robô segundo um determinado sistema de coordenadas que serão à posteriori referidos. (A completar...)

2.2.2- Planeamento de Caminhos

Após se saber onde o robô se encontra, ou seja após o processo de localização será necessário fazer o planeamento de forma se cumprir o plano ou a tarefa pretendida. Algumas técnicas serão apresentadas com o objectivo de se traçar uma linha de desenvolvimento que mais se adequa ao caso em questão. (A completar...)

3- Metodologias

Neste capítulo descreve-se inicialmente o processo de intervenção mecânica efectuado na plataforma Robuter de forma a habilitá-la a navegar em ambientes exteriores com alguns limites de irregularidade. Essa irregularidade contempla sobretudo passeios de calçada e mosaico, incluindo também lancis de baixo perfil e outras formações típicas transitáveis num Campus como o da Universidade de Aveiro.

Além da intervenção mecânica no robô, é também abordada uma solução de navegação que conta com percepção local e global, usando para o efeito os sensores a bordo e um sistema comercial de GPS de baixo custo. Apresenta-se com pormenor o estudo de viabilidade e integração de um sistema GPS.

São indicadas, diferentes abordagens para a resolução do problema de navegação assim como as suas vantagens e desvantagens. Referem-se métodos de localização baseados em modelos mistos globais e parciais que representam o ambiente de navegação.

Por fim descrevem-se técnicas e soluções encontradas para a interpretação sensorial onde se analisam métodos e extracção e identificação de elementos chave para a localização local do robô.

3.1- Intervenção Mecânica

Nas aplicações em ambientes exteriores são extremamente relevantes os problemas de navegação, incluindo naturalmente a percepção e o tratamento da informação para a tomada de decisões mas, também, e hoje em dia numa expressão mais marcada, as questões de locomoção devido ao relevo. De facto, a questão da morfologia do terreno implica preocupações muito diversas e soluções universais são muito difíceis de conseguir, seja em termos mecânicos, de comando e até de autonomia energética. Algumas pesquisas têm feito grandes esforços para desenvolver robôs para os mais diferentes campos de aplicação, e em certos casos, algo arrojados.

Resta, por enquanto, a resignação de confinar as especificações de um relevo particular, e nele desenvolver as soluções e métodos de navegação requeridos para uma determinada aplicação.

No presente caso adoptou-se o Campus da Universidade de Aveiro (Figura 1) e aplicação que lhe está subjacente é o embrião de um sistema autónomo de vigilância ou de transporte.



Figura 1 – Vista parcial do Campus da Universidade de Aveiro onde se pretende efectuar navegação autónoma.

O espaço dos laboratórios é adequado à plataforma robótica original da Robosoft, a Robuter, mas o relevo dos espaços exteriores leva à necessidade de adaptar mecanicamente a Robuter para navegação neste tipo de ambiente. A Robuter (Figura 2) tem boas capacidades em termos de mobilidade e navegação, mas é inadequada para a navegação em pavimentos onde não haja

elevada regularidade. A falta de regularidade provocaria vibrações em toda a estrutura e, por conseguinte, risco de danos nos componentes mais sensíveis a bordo (sensores, circuitos e contactos eléctricos, etc.).

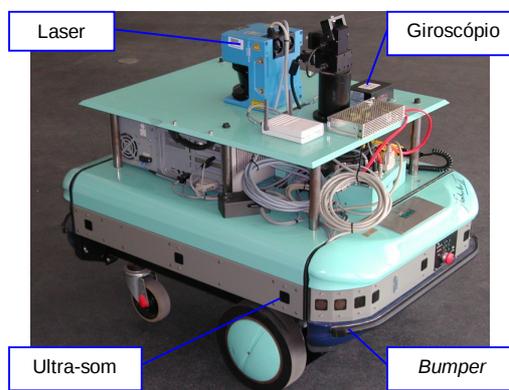


Figura 2 – Robuter original e alguns dos seus sensores.

Para não interferir estruturalmente no robô e permitir que continuasse possível usá-lo em todos os ambientes onde provar funcionar (interiores e exteriores), começou-se por estudar o uso de uma plataforma acoplável.

A plataforma em causa, desenvolvida no âmbito de outro trabalho, designada por RobuCar e que se ilustra na Figura 3, teria como particularidade permitir o acoplamento do robô de uma forma automática. O robô subiria para cima da plataforma de uma forma autónoma, e posteriormente guiá-la-ia como se fosse ele próprio a mover-se. Esta plataforma permitiria ultrapassar o problema das irregularidades do pavimento já que estava dotada de suspensão nas quatro rodas. A transmissão seria por atrito e haveria todo um procedimento para o robô entrar e sair da estrutura.

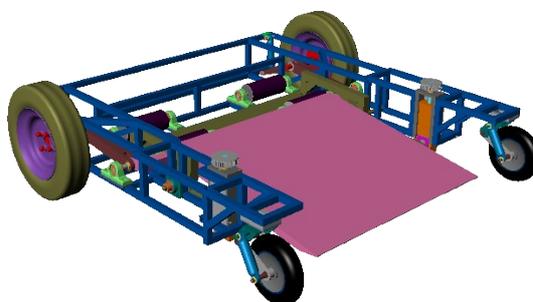


Figura 3 – Plataforma para acoplamento automático: RobuCar.

Efectuou-se um estudo de viabilidade e verificou-se que havia dois tipos principais de problemas, os de construção e os de funcionalidade e aplicabilidade que dificultariam a evolução célere deste projecto.

Nos problemas de construção do RobuCar destaca-se a complexidade (número de peças e tipologia da estrutura), custo e tempo de produção. Alguns elementos, como a estrutura base de suporte, braços de suspensão traseira, rolos de tracção e os sistemas elevatórios são de grande exigência a nível construtivo devido às especificações impostas pelas necessárias capacidades de navegação e também por questões de segurança. Assim, o nível de exigência construtivo desta estrutura não implica somente um custo elevado mas também um tempo de construção muito longo, não permitindo que se pudesse obter um sistema de navegação pronto para os breves prazos estipulados à partida.

Nas questões de funcionalidade e aplicabilidade refere-se a preocupação de capacidade de locomoção, da manobrabilidade e da autonomia do sistema Robuter-RobuCar. O projecto tem algumas especificações construtivas especiais como o facto da estrutura dever ser passiva e dever permitir o movimento nos dois sentidos. Por outro lado, a transmissão tem de ser feita de

forma independente em cada uma das rodas motrizes, e para permitir o guiamento do robô o sistema de tracção é feito por atrito, contando-se com o peso do robô para assegurar o contacto sem deslizamentos. A impossibilidade de modelar rigorosamente este sistema traz algumas reservas em relação à sua capacidade de locomoção, ou seja, não se pode afirmar se a potência transmitida pelo robô será suficiente para que o conjunto se desloque num terreno irregular com alguma inclinação e quais os materiais mais adequados para os rolos de transmissão do movimento. Dadas as dimensões e o peso previsível da estrutura, a eficiência energética seria também um problema a considerar e a solução poderia tornar-se dispendiosa.

Uma solução alternativa seria fazer uma intervenção mecânica no próprio robô. Dotá-lo de suspensão levaria a que o processo de transformação fosse muito complexo, o que levaria, mais uma vez, a tempos e custos elevados. Para minimizar todos estes aspectos, decidiu-se utilizar somente rodas pneumáticas de forma a absorverem a maior parte das vibrações induzidas pela irregularidade do pavimento. Naturalmente, dada a rigidez da plataforma, grandes irregularidades no piso não serão completamente compensadas com as rodas pneumáticas que poderão não garantir um apoio permanente de todas as quatro no solo – essa deve ser, portanto, uma situação a procurar evitar durante a navegação.

Assim, foi necessário fazer um estudo exaustivo da estrutura do robô original, tendo-se analisado em termos mecânicos qual a solução mais viável e implicações desta intervenção no futuro. Com o objectivo de manter as características de locomoção do robô foi necessário implementar dois sistemas distintos, um para as rodas traseiras e outro para as rodas dianteiras ou, em rigor, um para as rodas motrizes e outro para as rodas livres, como se descreve de seguida.

Para adaptação das rodas motrizes foi necessário implementar um novo sistema de suporte, basicamente uma extensão dos eixos que vêm dos motores. Com as restrições das disponibilidades do mercado relativamente às rodas, o sistema foi modelado e dimensionado estruturalmente usando Solidworks e Cosmosworks. Dadas as novas dimensões das rodas, foi necessário aumentar o braço de suporte. Esse aumento leva à geração de um momento flector muito elevado na extremidade do acoplamento entre este conjunto e o robô (Figura 4).

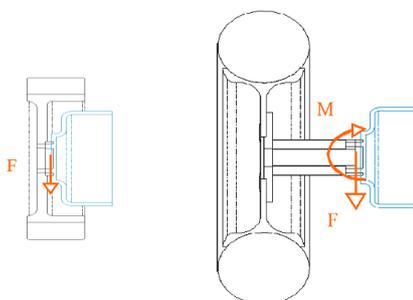


Figura 4 – Representação esquemática das forças e dos binários envolvidos.

A solução para diminuir os efeitos passou pela interposição de um rolamento axial para minimizar os efeitos referidos (Figura 5).

Outra consequência de se aumentar o diâmetro da roda e assim colocá-la na parte de fora da estrutura é o facto de poder vir a interferir sobre um sensor ultra-som cujas leituras deverão depois ser lidas com as devidas precauções.

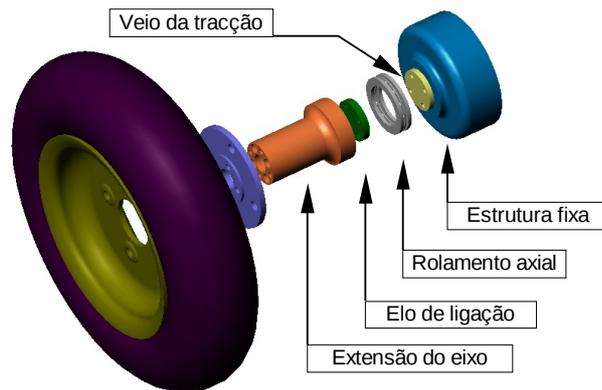


Figura 5 – Sistema para adaptação das rodas motrizes.

Em relação às rodas motrizes, o sistema de adaptação das rodas livres tinha uma limitação adicional dado que o robô terá de continuar a apresentar um comportamento semelhante ao original. Na realidade, não seria possível conceber uma solução para as rodas motrizes de forma independente das rodas livres dado que seria necessário ultrapassar alguns pormenores construtivos para garantir a funcionalidade e estabilidade de todo o conjunto.

Mais uma vez procurou-se usar material disponível comercialmente, ou seja, as rodas são componentes “standard” de catálogo. Algumas pequenas peças foram desenhadas para fazer o acoplamento entre as rodas e os apoios do robô (Figura 6).

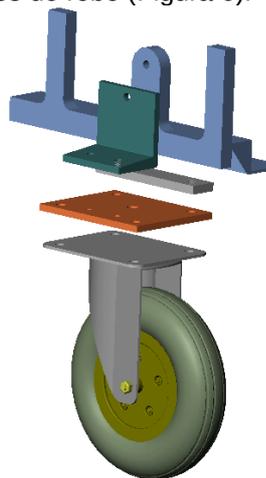


Figura 6 – Sistema para adaptação das rodas livres.

Os desenhos técnicos da intervenção do sistema de adaptação das rodas motrizes e livres efectuados encontram-se em apêndices.

O resultado final da intervenção mecânica apresenta-se na Figura 7, onde aliás se pode fazer uma observação comparativa com o sistema inicial. A altura do robô em relação ao solo aumentou cerca de 8 cm e a largura aumentou cerca de 22 cm, o que não implica alterações muito significativas no processo de navegação.

É importante referir que estas transformações não implicaram nenhuma alteração na plataforma robótica, ou seja, todos os componentes utilizam somente apoios já existentes, nem sequer furações ou soldaduras foram requeridas na estrutura da Robuter. Isto significa que a qualquer momento se pode repor a situação original.

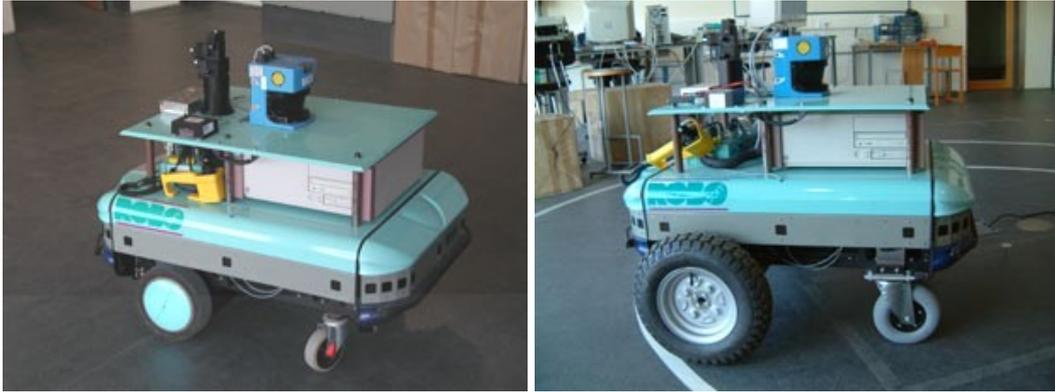


Figura 7 – Robuter antes e depois da intervenção mecânica.

3.2- Integração do sistema GPS

A transformação efectuada na Robuter foi apenas o primeiro passo concluído. Implementar a navegação no exterior é o passo seguinte e, devido à sua complexidade, decidiu-se prosseguir por etapas. Em primeiro lugar definiu-se um objectivo concreto de tarefa que se pode resumir do seguinte modo: “efectuar um percurso entre dois edifícios do Campus ao longo do caminho coberto normalmente usado pelos peões”. Na verdade, para realizar esta missão, o sistema de navegação tem de se localizar face aos edifícios e seguir um caminho definido entre eles. A via mais óbvia será seguir a passadeira coberta ladeada de pilares a intervalos quase regulares, e que dá grande parte da volta junto à maioria dos edifícios, como se pode ver na planta da Figura 8.

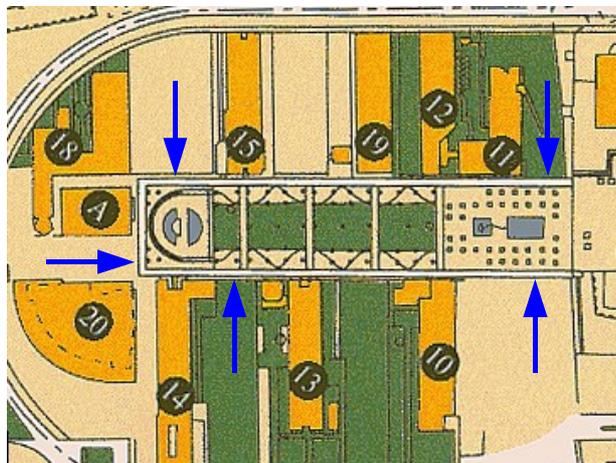


Figura 8 – Planta parcial do Campus da Universidade de Aveiro onde se assinala a passadeira a percorrer.

Devido às dimensões e características do ambiente em causa, a melhor forma de se conseguir ter uma percepção global do ambiente será utilizar o sistema GPS. Este sistema está actualmente a ser usado nas mais diferentes áreas oferecendo níveis de precisão variáveis entre os 20 metros e 1 centímetro! É claro que o aumento de precisão reflecte um aumento dos custos dos equipamentos. Por questões de contenção e recurso a equipamentos mais comuns, foi necessário escolher uma solução economicamente mais acessível. O receptor seleccionado foi o modelo *SporTrak Pro* da Magellan (Figura 9) que garante compatibilidade com os sistemas pseudo-diferenciais, WAAS (Wide Area Augmentation System) e EGNOS (European Geostationary Navigation Overlay Service), americano e europeu respectivamente. Isso pode implicar referenciar o robô no Campus não com precisão do centímetro, mas sim com precisões da ordem dos 3 a 20

metros. Assim, a localização global do robô com esta incerteza dentro do Campus Universitário, numa acção de navegação, só pode ter a aspiração de referenciar o robô relativamente aos edifícios e auxiliar em algumas tomadas de decisão.



Figura 9 – Receptor GPS da Magellan com ligação por RS232.

A integração deste sistema GPS foi realizada através de código C para uma ligação RS232. Procedeu-se ao estudo do protocolo NMEA geralmente utilizado por este tipos de sistemas de localização de forma a extrair a informação mais relevante necessária para se poder fazer a localização de uma forma global, como é o caso da latitude e longitude.

Para além limitada precisão na localização com um receptor GPS desta natureza, ainda existe o problema da dificuldade da captação dos próprios sinais debaixo da passadeira (Figura 10) onde navega o robô, e que é uma questão forçosamente a contornar, como se explica adiante.



Figura 10 – Passadeira de interligação entre os departamentos.

Uma das formas de se contornar o problema da perda de sinal para o GPS sob a passadeira será levar o robô a sair fora dela e aí captar os sinais para estimar a sua posição.

A detecção local do ambiente assume aqui um papel preponderante, pois será necessário escolher o lado e a abertura “adequada” entre formações (pilares) para entrar e sair da passadeira. Na realidade, o robô não poderá escolher uma direcção aleatória para entrar ou sair da passadeira. Normalmente só poderá utilizar um dos lados para este procedimento dado que o outro não tem saída, e apresenta inclusive grandes riscos para integridade do robô e do equipamento a bordo. Uma das formas de detectar o lado de saída será pela identificação das formações dos pilares, que, como se pode ver na Figura 16 e Figura 17, apresentam dois tipos de formações diferentes, um rectangular e o outro cilíndrico e que poderá vir a ser uma distinção útil para a navegação.

No capítulo seguinte apresenta-se algoritmos para interpretação sensorial para a localização local do robô.

3.3- Algoritmos de interpretação sensorial

Diferentes tipos de abordagens poderiam ser utilizadas de forma a tentar simplificar a análise sensorial e garantir a navegação do robô no ambiente em causa.

Apesar de o ambiente em causa ser um ambiente exterior, apresenta um certo nível de estruturação que será utilizado na localização e na tomada de decisão do robô durante um processo de navegação. Em primeiro lugar parte-se do pressuposto que todo o processo de navegação será realizado com o robô será debaixo da passadeira. O objectivo é fazer com que o robô se desloque entre dois departamentos utilizando o corredor existente sendo necessário fazer um pré-planeamento do caminho.

Por questões de referência no pré-planeamento haverá a necessidade de se ter percepção local e global no sistema que é o Campus. Para a percepção e navegação local utilizar-se-á essencialmente o laser e o sonar, e para a navegação global o sistema GPS descrito no capítulo anterior.

As questões de navegação globais dependem somente da possibilidade ou não de se captarem os sinais dos satélites. Como já foi referido a referenciarão global robô quando este se encontra por debaixo da passadeira pode não ser possível devido ao número insuficiente de satélites disponíveis no horizonte. Poderá ser necessário a implementação de uma solução local que faça com que o robô se aproxime de uma das partes laterais, ou até mesmo sair do corredor de forma a aumentar o "campo de visão" do GPS e assim ser possível o cálculo das coordenadas.

A navegação local ao contrário da anterior não depende somente da capacidade de captação de dados de um determinado elemento sensorial, mas depende da forma como se faz a captação e análise dos dados. Dos sensores disponíveis na plataforma, os mais indicados para este tipo de navegação local são o laser, os ultra-sons e o sistema de odometria.

A odometria sendo um sistema incremental leva a que os erros cresçam indiscriminadamente e sem controlo não sendo considerado uma solução por si só. Poderá ser útil quando complementado com outros, como é o caso do laser quando da utilização de algoritmos predictivos.

O objectivo será o de garantir que o robô se desloque sempre dentro da passadeira. Pode-se ver na Figura 11 um exemplo mais pormenorizado de como é constituída a passadeira.

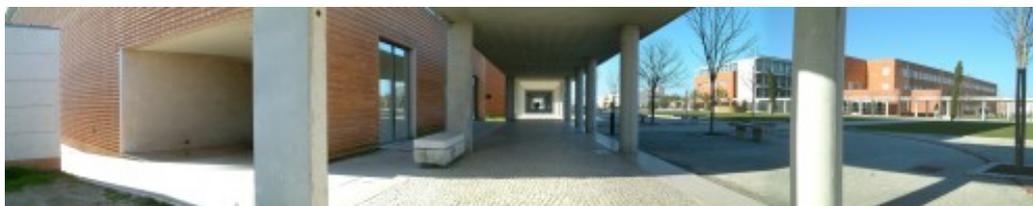


Figura 11 – Imagem panorâmica da passadeira (local de navegação do robô).

A passadeira é constituída por uma cobertura sendo esta suportada por pilares. Os pilares de suporte têm geometrias diferentes, apresentando-se por exemplo no lado esquerdo pilares com geometria rectangular e do lado direito pilares com geometria circular de acordo com a Figura 11, ou vice-versa. Estes pilares estão distribuídos ao longo de toda a passadeira de uma forma não muito regular, ou seja, existem diferentes distanciamentos entre os pilares de acordo com a distribuição dos edifícios ao longo desta parte do Campus. Para se ter uma ideia global construiu-se o modelo completo de toda a zona de intervenção (Figura 12 e Figura 13).

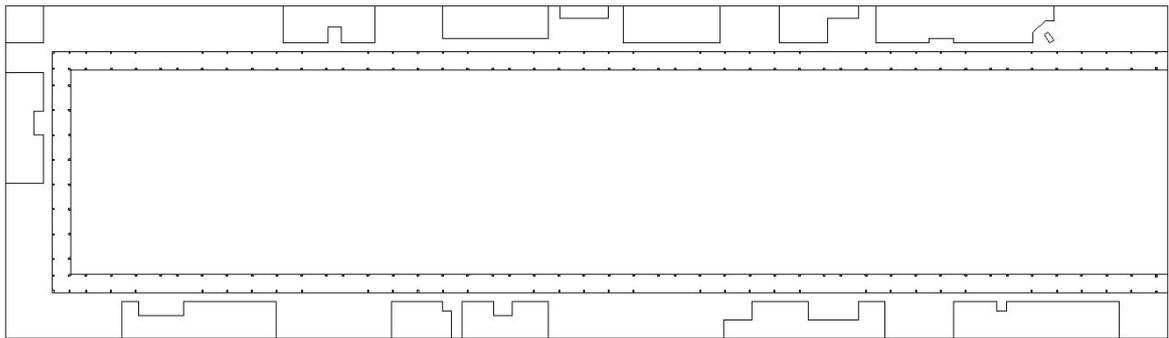


Figura 12 – Modelo global da zona de intervenção do robô no Campus Universitário

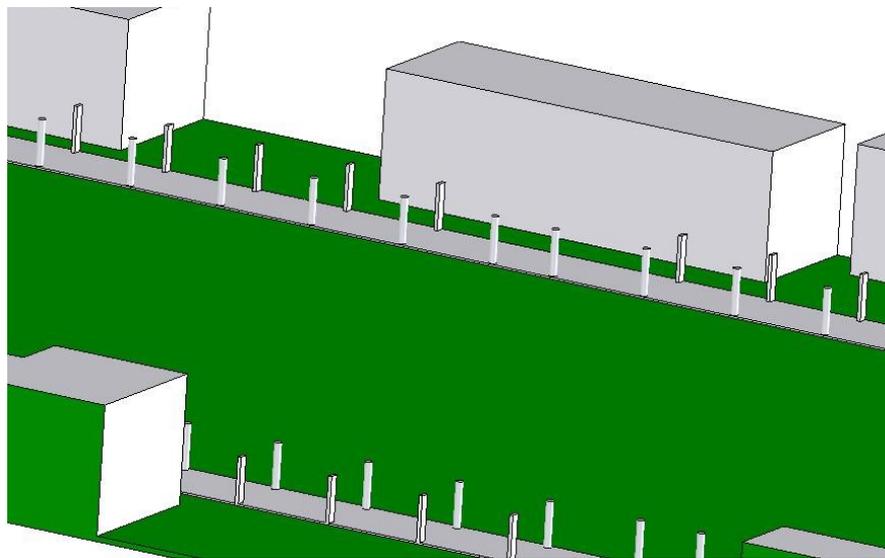


Figura 13 – Modelo tridimensional parcial da passadeira onde se ilustram os pilares sem a cobertura

Dadas as características típicas dos distanciómetros ultra sónicos, grande largura de feixe, baixa velocidade de propagação e reduzida distancia máxima não é o mais indicado a sua utilização neste caso a não ser a de evitar obstáculos e prevenir acidentes.

A flexibilidade e a qualidade e a rapidez dos dados laser fazem com que este seja o mais indicado de entre os disponíveis sensores para se fazer todo o processo de navegação local.

O laser disponível é da marca Sick modelo LMS 200 (Figura 14) que apresenta em termos genéricos as seguintes características:

Gama	Máximo 150 m	
Gama (sem reflexões suplementares)	Até 30 m	
Gama com reflectividade mínima 1.8%	4 m	
Resolução	10 mm	
Erro Estatístico	±15 mm (mm-resolution) ±4 cm (cm-resolution)	Gama 1 a 8 m Reflectividade: 10%-10000% Gama 8 to 20 m Reflectividade: 30%-10000%
Resolução angular	100° Scan: 0.25°/0.5°/1° 180° Scan 0.5°/1°	

	(configurável através de software)
Tempo de resposta	52/26/13 ms (dependendo da resolução angular)
Interface	RS-422
Temperatura ambiente de operação	0 a 50 °C



Figura 14 – Laser Sick LMS 200

Ao longo deste trabalho utilizou-se o laser com uma resolução angular de 0.5° numa abertura de 180° e um alcance máximo de 8 m a uma taxa de varrimento máximo de 17 Hz. Com o laser será assim possível a extracção e identificação de determinadas características do ambiente.

O nível de estruturação do ambiente em causa permite diferentes abordagens de captação e análise de dados. A forma mais intuitiva e provavelmente a mais fácil (em questão de análise dados obtidos) de ser implementada seria utilizar a cobertura para garantir que o robô navegue sempre dentro da passadeira. Para que este tipo de solução fosse implementada seria necessário que o laser estivesse virado para cima. Na passadeira onde o robô se deslocará haverá constantemente a presença de obstáculos dinâmicos, pessoas que circulam na passadeira. Deste modo a detecção destes obstáculos ficaria comprometida. Por outro lado quando fosse necessário chegar a um determinado objectivo este iria depender da resolução dos dados obtidos pelo sistema GPS, pois é a única forma de garantir a localização do robô ao longo de toda a passadeira. O laser somente servia para orientar o robô dentro dessa mesma passadeira.

A implementação do algoritmo de análise dos dados seria relativamente simplista porque seria necessário extrair um determinado tipo de padrão (Figura 15) e garantir a sua posição em relação a este.

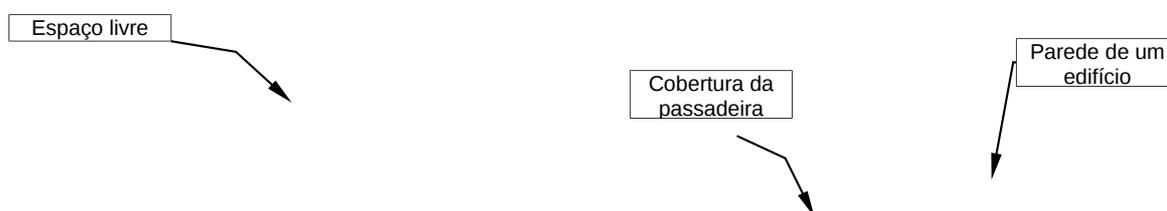


Figura 15 – Exemplo de um scan laser representando a cobertura da passadeira

A alternativa é colocar o laser na horizontal e “olhar para a frente”. Tem-se como objectivo utilizar os pilares de suporte da cobertura da passadeira como referencia de forma a o robô se orientar dentro da mesma. Este tipo de solução permite também a detecção e identificação de

obstáculos não pertencentes ao modelo para garantir maior segurança para robô e para as pessoas que circulam nessa mesma passadeira.

A definição do modelo neste caso será muito importante. A utilização de um modelo global (Figura 12) de todo o campo de intervenção não seria a mais indicada para este caso, porque a representação de um modelo desta dimensão implicaria a criação de uma base de dados muito grande exigindo um esforço computacional extremamente elevado. Após a análise de toda a zona de intervenção verificou-se que se poderia tirar partido de uma certa regularidade e repetibilidade na disposição dos pilares de suporte da cobertura. Decompôs-se o modelo global em modelos parciais permitindo a localização do robô em relação a cada um destes.

Em suma, o objectivo é arranjar uma estratégia de trabalho de forma a conseguir que o robô se localize e navegue de uma forma autónoma. Para que o robô possa navegar de uma forma autónoma será necessário em primeiro lugar ter-se uma estimativa inicial da posição do robô. Esta estimativa inicial é dividida em duas componentes, uma global onde se referencia o robô em relação a um ponto predefinido no Campus universitário e outra local onde se localiza o robô dentro da passadeira pedonal. A localização global do robô será efectuada recorrendo a um sistema GPS, enquanto que a localização local será efectuada usando o laser.

Em seguida apresenta-se o todo o processo necessário para que e utilizando o laser se já possível localizar-se localmente, desde a captura à análise dos dados obtidos.

3.3.1- Aquisição de dados sensoriais

Um primeiro conjunto de observações foi feito num ambiente que se procurou não ter ainda pessoas a circular, de forma a garantir o menor ruído e permitir uma melhor análise de determinadas características do ambiente. Na captura de dados usando o scan laser utilizou-se uma resolução angular de 0.5° ao longo de 180° , ou seja, com 360 pontos, com um alcance máximo de 8 metros. Simultaneamente fez-se a aquisição de dados GPS e um filme para posterior acompanhamento da análise dos dados. Nesta captura percorreu-se num sentido todo o percurso que será passível de o robô efectuar ao longo de um qualquer processo de navegação com o objectivo de se ter como base de estudo uma amostra representativa de todo o ambiente. Apresenta-se um exemplo na Figura 16 e Figura 17 dos dados obtidos.

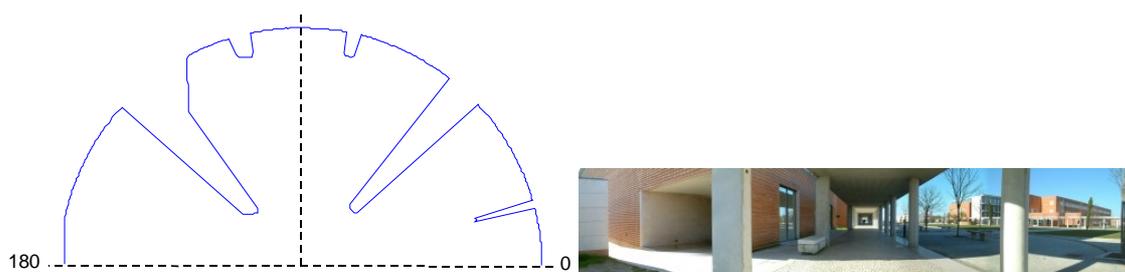


Figura 16 – Exemplo de padrão polar de medições laser e uma imagem panorâmica da mesma cena.

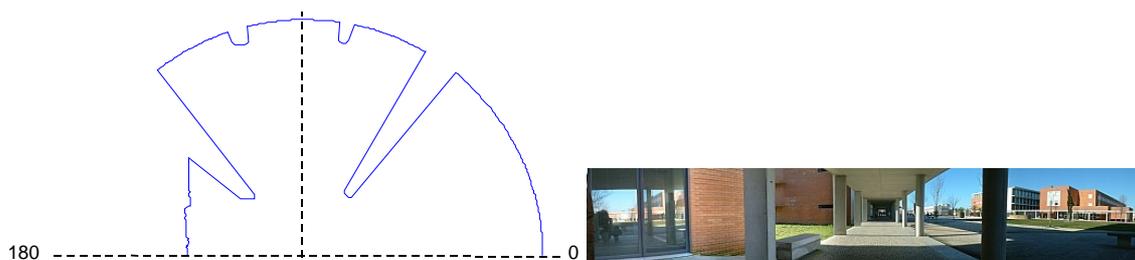


Figura 17 – Exemplo de padrão de medições laser num caso onde havia um edifício próximo na esquerda.

No trabalho de análise e procura de soluções desenvolvido posteriormente foram utilizados estes dados considerando que estes seriam representativos.

Com o objectivo de validar as soluções encontradas fez-se posteriormente mais uma captura de dados. Nesta tentou-se suscitar algumas situações que poderiam comprometer a funcionalidade dos métodos implementados. A robustez e a fiabilidade dos métodos usados foi assim posta em análise com a presença de elementos dinâmicos como sejam pessoas a circular e estáticos pessoas paradas com o objectivo de distorcer o modelo. Para além de se introduzirem novos elementos aos dados estes também foram obtidos a um nível espacial um pouco mais elevado devido a algumas alterações efectuadas na posição do laser. Todos os restantes parâmetros mantiveram-se com a excepção da velocidade de aquisição dos dados laser que neste caso aumentou de uns aproximados 4 a 5 scans por segundo para 17 scans/seg colocando em causa a para além da robustez e da fiabilidade a eficiência dos métodos.

3.3.2- Técnicas de localização

A chave que qualquer sistema robótico móvel é a precisão da estimativa da posição, ou seja, a configuração do robô (x,y,θ) em relação ao seu sistema de global ou local de coordenadas. Neste capítulo tem-se como objectivo de apresentar as técnicas utilizadas para a obtenção da localização do robô a partir da comparação dos dados obtidos como o modelo pré-estabelecido.

Para estimar a posição do robô quando se compara os dados adquiridos com o modelo desenvolvido, utilizam-se em termos genéricos dois tipos de análise, que são o “iconic methods” e o “feature-based methods”.

O primeiro método, “iconic methods” usa directamente os dados laser com o objectivo de minimizar a discrepância destes com o modelo. O mesmo será dizer que este método tem como objectivo tentar encaixar os dados laser no modelo do ambiente e assim estimar a posição inicial do robô.

No segundo método, “feature-based” não se usa todos os dados do laser directamente mas tem-se como objectivo fazer a extracção elementos (“features”) como é o caso de segmentos de recta, cantos ou contornos de forma a identificar e associar estes aos respectivos elementos do modelo.

Apresentam-se em seguida quais as técnicas e algoritmos utilizados para cada uns destes métodos, assim como os resultados obtidos.

3.3.3- Iconic methods

Um das formas mais simples de implementar um método desta natureza (“iconic methods”) é desenvolver uma plataforma de simulação e comparar esta com os dados adquiridos.

No modelo parcial considerado definiu-se a área mais provável de navegação do robô. Essa área foi posteriormente dividida não se levando em consideração nenhum critério em especial, somente bom senso. Tentou-se ao máximo reduzir o tamanho da malha considerada mas de forma a não ser computacionalmente muito exigente (Figura 18).

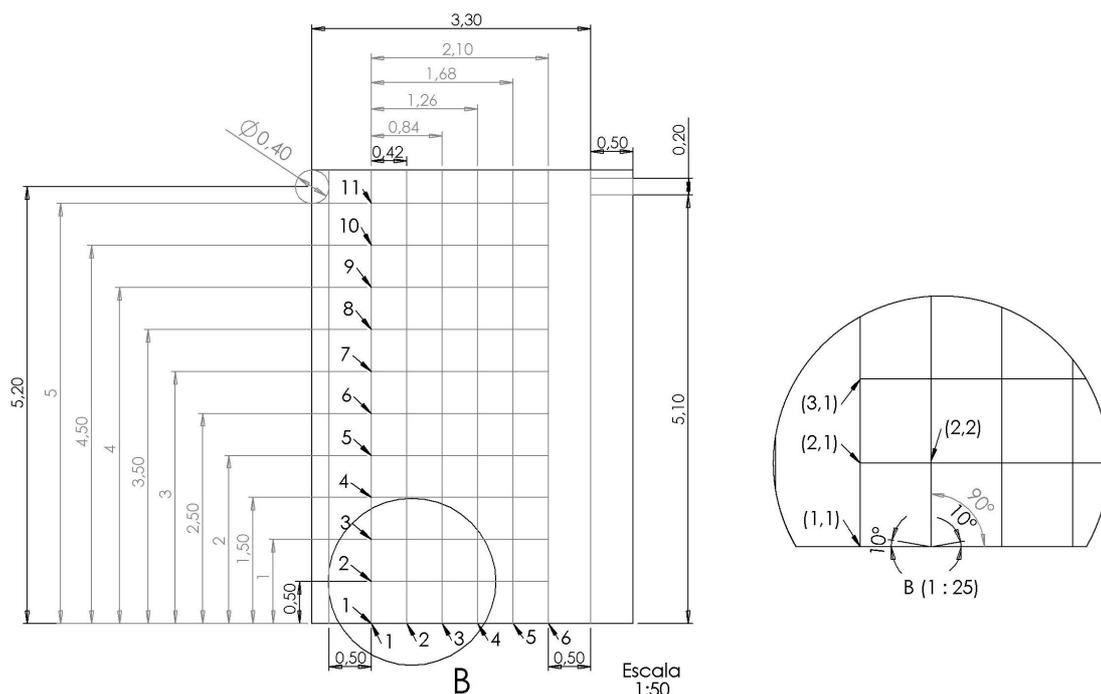


Figura 18 – Representação esquemática da grelha definida no modelo parcial

Foi realizada a simulação do scan para cada posição do robô em 3 orientações distintas para compensar ligeiros desalinhamentos durante a navegação do robô. Ou seja inicialmente considerou-se que o robô só poderia navegar dentro da região delimitada e que este não apresentaria desvios de orientação muito elevados (inferiores a 30°)

Criou-se uma base de dados que serviu de base para fazer o match dos dados do scan simulado com os dados do scan reais.

Como o processo de busca não era muito eficiente foi feita uma análise da superfície de evolução do erro ao longo de toda a área a ser avaliada de forma a se conseguir arranjar uma linha de tendência de forma a acelerar o processo de busca do local onde a diferença entre o erro dos scans real e simulado seja mínima. Verificou-se que a superfície tem uma forma inconstante variando de forma muito aleatória tendo em diferentes sítios mínimos locais que poderiam comprometer algum tipo de análise a efectuar (Figura 19).

Pensou-se então implementar o algoritmo do Cox que tem por objectivo encontrar uma congruência de forma a minimizar ou seja encaixar todos os pontos do scan no ambiente. O que se verificou foi que este método não é o mais adequado sendo na minha opinião um método mais de ambientes interiores onde cada ponto do scan tem um local no ambiente de trabalho correspondente, o que não se verifica neste caso. Existem pontos no scan que não fazem parte do ambiente em causa trazendo graves implicações na implementação e extração de resultados não se conseguindo fazer o match na maior parte dos casos.

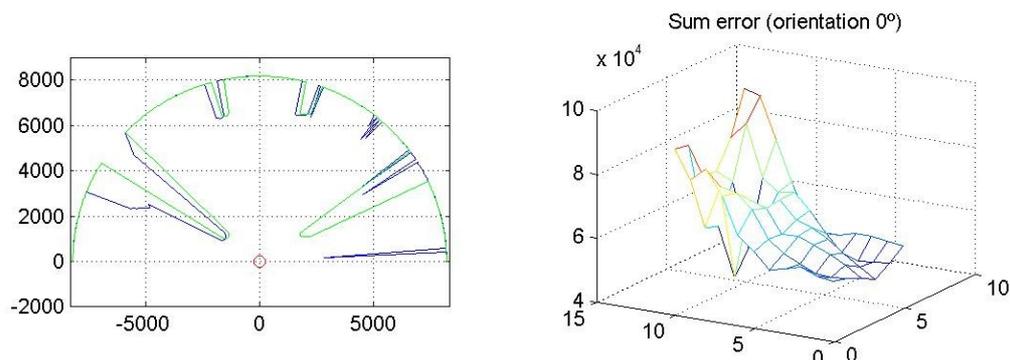


Figura 19 – Representação espacial do scan 384 e correspondente superfície de tendência

Foi utilizado primeiramente o método dos mínimos quadrados, que consistia em calcular a distância euclidiana entre dois pontos correspondentes, ou seja calcula-se a distância entre sucessivos pontos que têm a mesma orientação. Compara-se por exemplo o ponto com orientação com o ângulo de 10° do scan real, com o ponto da mesma orientação, 10° para o scan simulado.

Apesar de não restarem dúvidas que o ponto encontrado seria aquele de entre os quais o erro global seria mínimo, verificou-se que a estimativa da posição inicial utilizando este método, não era bem o que se esperava, já que em alguns casos se obtiveram erros muito elevados, da ordem de um metro (Figura 20).

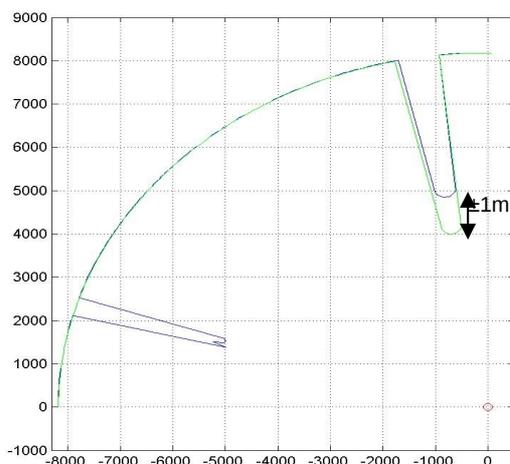


Figura 20 – Scan que apresenta o menor valor entre as distâncias quadráticas entre o scan real (azul) e o scan teórico baseado no modelo (verde)

Não é ordem de grandeza que é muito elevada para uma primeira estimativa inicial, mas de acordo com a discretização feita do modelo utilizado o erro máximo que se deveria obter não poderia ser maior que 0.5 metros (Figura 21) segundo um determinado eixo de coordenadas.

Figura 21 – Representação esquemática da região de erro admissível

Mais uma vez reporta-se para a figura do scan anterior onde se chama a atenção ao desfasamento entre os dois pilares que ultrapassa em muito o valor que era esperado não se encontrando na região delimitada a cinzento da figura anterior. A explicação para o facto do valor mínimo do erro global não se encontrar dentro da região delimitada advêm das diferentes contribuições de peso dos erros individuais. O mesmo será dizer que, quanto maior for o erro entre dois pontos correspondentes, mais elevada é a sua influencia, já que este ainda é elevado ao quadrado, no valor final do calculo do erro global.

Para contornar este aspecto decidiu-se não levar em consideração erro quadrático individual na quantificação do erro global. Apesar dos resultados obtidos melhorarem significativamente ainda se verificava a mesma tendência do caso anterior, onde a contribuição dos pesos individuais não era relativa mas dependia da sua dimensão levando a uma estimativa da posição inicial com erro acima do esperado. De forma a confirmar o facto de que os maiores erros têm maior peso no valor final do erro global apresenta-se em seguida pertencentes ao scan real nº 45.

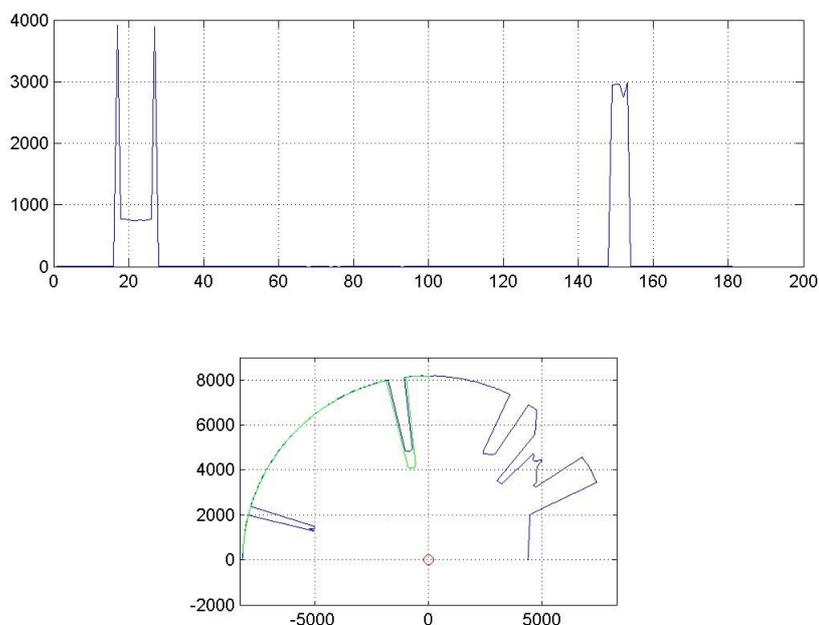


Figura 22 – Representação gráfica do valor do erro e correspondente representação espacial obtido entre o scan real testado e o scan teórica que minimiza o erro global obtido ($\text{Erro}_{\text{global}}=30448 \text{ mm}$)

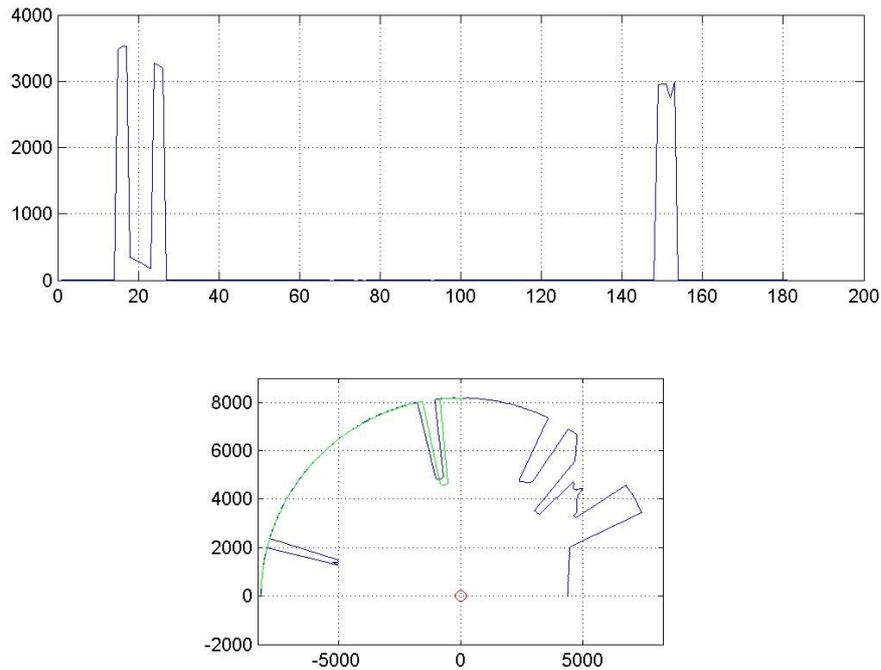


Figura 23 – Representação gráfica do valor do erro e correspondente representação espacial obtido entre o scan real testado e o scan teórica que corresponde à melhor aproximação considerada (Erro_{global}=37611 mm)

O que se verifica por uma comparação visual entre estes dois conjuntos de gráficos é que no segundo caso temos um ajuste mais perfeito entre os dois scan, logo um menor erro na estimativa da posição inicial. Mas, esta análise não vem de encontro com os resultados obtidos em termos do valor do erro global. Isto leva a concluir que este critério de análise de estimativa da posição inicial não é indicado para este caso.

Todos os elementos externos que não são levados em conta no modelo simulado têm sempre a mesma contribuição no valor final do erro. Pode-se observar este aspecto no comportamento dos gráficos da evolução do erro, quando se avalia este entre os 140° e os 160°. Ainda da análise destes gráficos se verifica que o erro global é maior no segundo caso porque existe um maior desfasamento de orientação, concluindo-se assim que um pequeno erro de orientação leva a grandes erros entre pontos correspondentes e uma maior contribuição final do erro global.

Algumas soluções foram apontadas para tentar eliminar esta tendência, uma delas foi limitar todos os valores de erro a um valor máximo. Neste caso foi considerado 652 mm equivalente à distância entre o centro e ponto mais afastado na região de erro, de forma a atribuir um peso menos significativo a todos os erros que ultrapassem este valor.

Mais uma vez a avaliação da qualidade dos resultados obtidos foram feitos de um modo visual e qualitativo e não quantitativo, já que não é possível por uma simples análise do valor global do erro classificar se a estimativa é boa ou má (Figura 24). Considerou-se que uma estimativa era boa se com método se identifica-se de uma forma correcta os pilares e se o erro de posição obtido através destes estivesse dentro dos valores esperados (secção da grelha de ocupação).

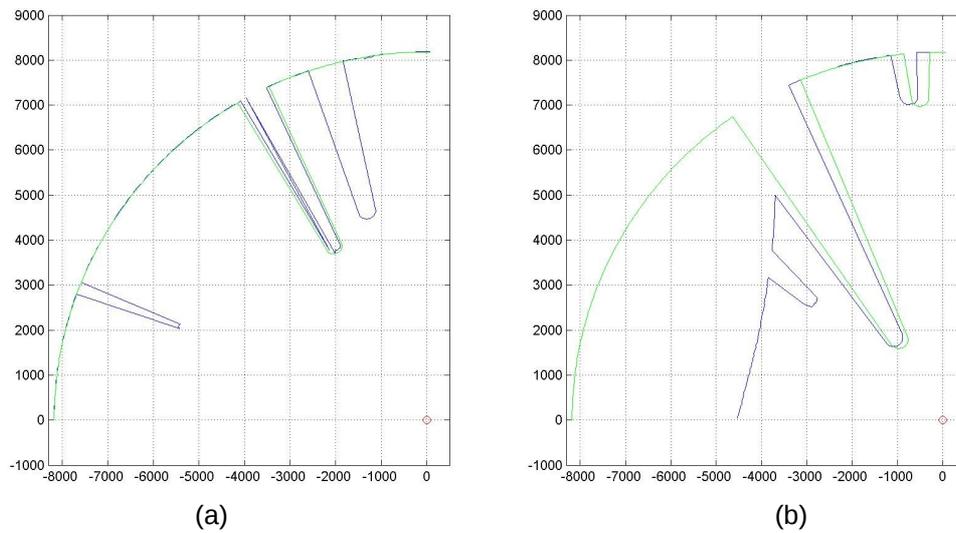


Figura 24 – Esquema para comparação da qualidade da estimativa usando o erro global médio para o caso (a) erro_global_medio=65.47 Estimativa errada (confusão com pessoa); (b) erro_global_medio=458.10 Estimativa certa

Dos 1169 scans reais testados de acordo com o modelo, 38 falharam na estimativa da posição inicial do robô, ou seja, somente 3.25% de todas as medidas testadas dão uma estimativa errada da posição do robô. Afirma-se ainda que a maioria destas falhas devem-se essencialmente ao facto haver pessoas a deslocarem-se na passadeira e assim se fazerem passar por pilares.

Até então afirmou-se que com o método que usa o erro nominal limitado se conseguia garantir um perfeito ajuste dos dois scans, garantindo-se que o erro da estimativa da posição inicial era controlada e dentro de uma região limite pré-definida. Mas isto não pode ser afirmado porque existem efectivamente casos em que o ajuste obtido que minimiza o erro não implica que o robô se encontre dentro da região definida. Ou seja, somente se pode garantir que o resultado obtido é aquele que apresenta o menor erro entre os diferentes pontos dos dois scans em consideração.

Para provar tal apresenta-se o estudo do seguinte caso:

Fez-se a simulação de um scan numa posição pré estabelecida onde se sabe efectivamente onde se encontra o robô. Posteriormente este scan vai ser comparado com as posições pré-estabelecida (pontos azuis na Figura 25) de forma a encontrar aquele que minimiza o erro entre os dois.

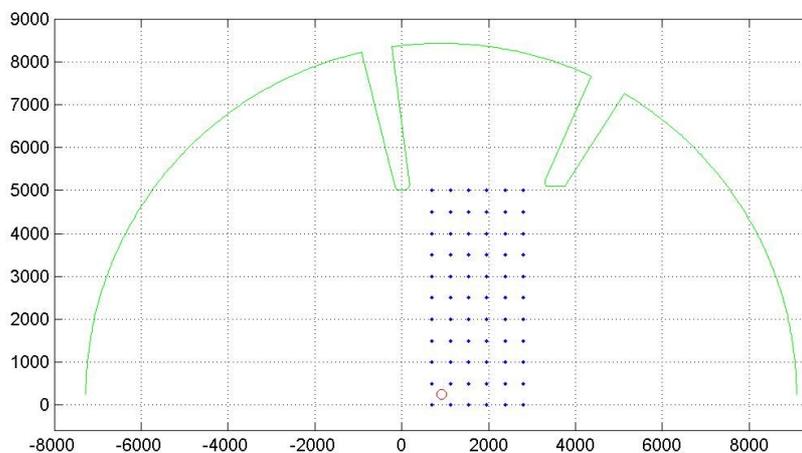


Figura 25 – Representação do scan que vai ser testado a sua posição real e os pontos de comparação de scans.

Figura 26 – Representação em pormenor da posição inicial real do scan de teste.

Como se verifica da análise da Figura 26 seriam quatro as soluções prováveis para a estimativa da posição inicial pois este ponto encontra-se na região limite definida. Como é simples constatar de todos os pontos da grelha que serão avaliados, mas somente podem ser solução os pontos 1, 2, 7 ou 8. Contudo após aplicação do método, o resultado para o problema em causa foi o ponto 3.

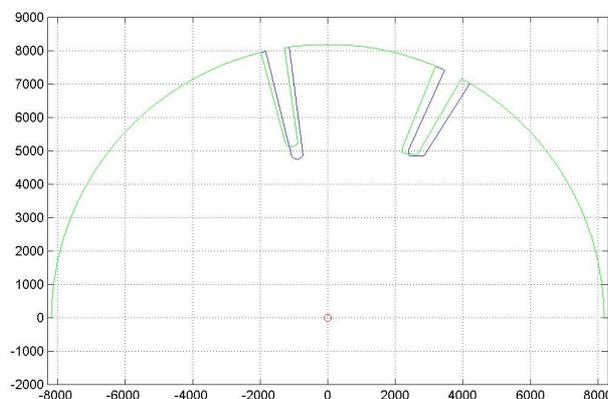


Figura 27 – Resultado obtido na utilização do método de comparação dos scans

De acordo com a Figura 27 e uma apreciação visual verificamos que a solução encontrada aparenta ser a ideal apesar do pequeno erro ajusta-se bem à situação. De facto isso não é verdade pois o erro para a estimativa inicial da posição neste caso é de 677.8 mm, valor este muito acima do valor máximo admissível.

Figura 28 – Figura representativa da posição inicial e real do robô (ponto a laranja), quatro pontos prováveis para a solução deste caso (pontos a cinzento 1,2,7,8) e a solução obtida pela implementação do método descrito (ponto 3 a azul)

Como em todos os casos anteriores fazia-se uma avaliação visual da qualidade do resultado obtido, não é possível estimar quais destes é que são verdadeiramente aceitáveis porque não se sabe posição real do robô em cada um desses scans, não sendo possível deste modo quantificar o valor do erro de posição.

Assim se conclui que com o método da força bruta utilizado e descrito até então, consegue-se obter um bom ajuste visual entre os pontos dos dois scans, mas não existe forma de quantificar o erro da estimativa da posição inicial obtida.

Após isto o próximo passo será tentar outro método de extracção de features do scan de forma a identificar um pilar redondo e quadrado para que somente depois se estimar com toda a certeza a posição.

3.3.4- Feature-based methods

O objectivo será então analisar somente os “dados que interessam”, ou seja, aqueles que representam algo físico. O primeiro passo é assim tentar extrair features de scan de forma a identificar pilares circulares e rectangulares que vai servir como pontos de referência para a localização e navegação do robô usando a triangulação. Para tal será necessário pelo menos a detecção de dois pilares.

Neste método de “feature-based” ter-se-á como objectivo inicial a segmentação dos dados laser para posterior análise e identificação.

3.3.4.1- Segmentação

Diferentes tipos e técnicas são utilizados para fazer a segmentação de um scan laser. O método utilizado o chamado método do gradiente foi idealizado e ajustado a este caso devido à sua simplicidade e também devido aos resultados que se obtêm. Este método do gradiente tem como objectivo identificar possíveis “features” (objectos/elementos) de scans. Será importante lembrar que os scans utilizados são scan reais capturados anteriormente em coordenadas polares.

O método baseia-se em calcular o gradiente entre duas distâncias consecutivas para posterior avaliação de descontinuidades. Neste critério é necessário definir um limite para que seja considerado uma descontinuidade, ou seja um possível elemento a analisar. Neste caso o valor limite foi 250 mm, por se considerar que este será o valor mínimo do gradiente para o que seja possível identificar um dos pilares de referência que são os pilares circulares com 400 mm de diâmetro.

Apresenta-se em resumo o com os elementos necessários para se identificarem possíveis objectos para posterior identificação:

1. Calcular o gradiente entre duas distâncias consecutivas
2. Definir um limite máximo para que um gradiente seja considerado descontinuidade
3. Identificação de “features”:
 - 3.1. Todo o objecto começa por um gradiente positivo,
 - 3.2. e acaba num gradiente negativo
 - 3.3. Só é considerado se a seguir a um gradiente positivo vier um negativo, rejeitando-se se houver dois gradientes positivos ou negativos consecutivos.

O método descrito tem determinadas particularidades ou propriedades que podem impedir a perfeita identificação dos objectos. Um dos exemplos será apresentado em seguida (Figura 29). Pode-se observar que o scan representado no espaço cartesiano na parte superior e o gráfico do gradiente na parte inferior. Todos os objectos que obedecem às características descritas anteriormente estão representados com um ponto vermelho que identifica o início e o fim de cada objecto identificado. Verifica-se que todos os possíveis elementos são identificados de uma forma regular e “ideal”, ou seja, o início e o fim detectado são os reais pontos de início e fim do objecto, excepto o ultimo caso que se pode ver em pormenor na Figura 30.

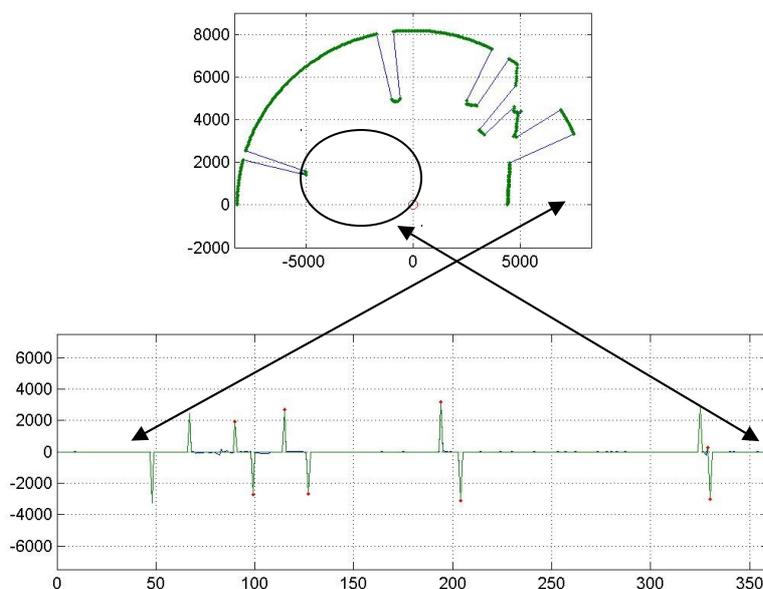


Figura 29 – Representação de um scan e correspondente gráfico de gradiente obtido.

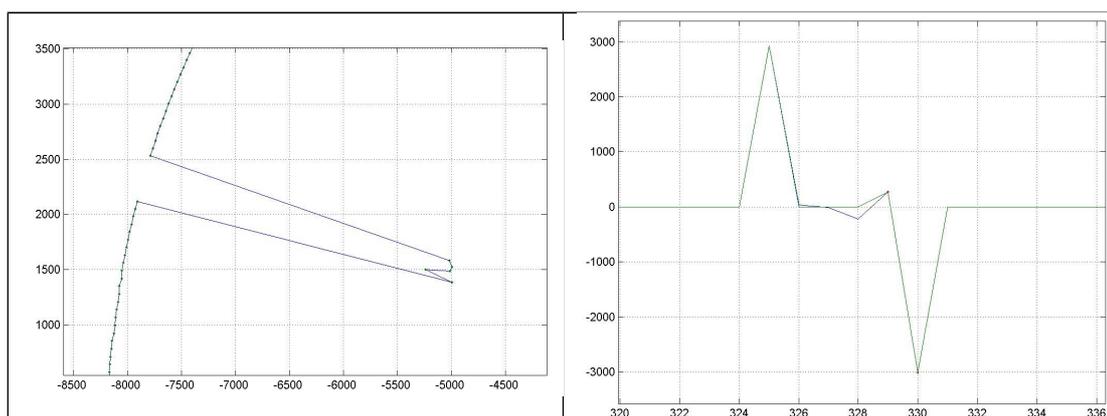


Figura 30 – Representação de um caso particular onde não é detectado toda a largura do objecto podendo mesmo ser eliminado.

Neste caso particular existe um gradiente positivo e negativo com a mesma ordem de grandeza que leva à identificação de um objecto com uma largura muito superior ao que se obtém aplicando o método descrito anteriormente. Este facto advém essencialmente de este objecto não ser regular tendo gradientes muito elevados, superiores ao valor limite definido anteriormente. Na realidade este caso representa o conjunto de uma árvore e sua respectiva estaca de suporte, ou seja na realidade este conjunto de medidas não identifica somente um objecto mas sim dois.

Esta situação particular não é um problema no âmbito deste trabalho porque não se pretende identificar todos os objectos do scan, mas somente encontrar os pilares de referência que têm uma forma bem definida. Contudo este exemplo serve ilustrar alguns problemas que podem advir do uso deste método em outro tipo de aplicações.

A outra situação crítica acontece quando a direcção do feixe do scan do laser está quase paralelo à superfície maior do pilar rectangular como se ilustra na Figura 31 as duas linhas a verde.

Figura 31 – Situação crítica de detecção e definição das extremidades de pilares rectangulares

O que se verifica neste caso de detecção de uma pilar rectangular é que a detecção através do método do gradiente tem uma grande probabilidade de somente identificar o objecto a partir do ponto numero 3 da figura anterior. Isto deve-se ao facto do gradiente entre os pontos 1-2 e os pontos 2-3 ser maior que o limite máximo estipulado anteriormente. O que se verifica neste tipo de situações é que o objecto é detectado com base somente numa superfície, logo induz perda de informação sobre o elemento a detectar.

Será que isto é crítico? Talvez não, porque nestas situações deste caso particular deve existir mais informação disponível, ou seja o laser deve detectar mais pilares que podem compensar a perda de informação que advém desta situação.

Ilustra-se em seguida um exemplo desta situação num scan real.

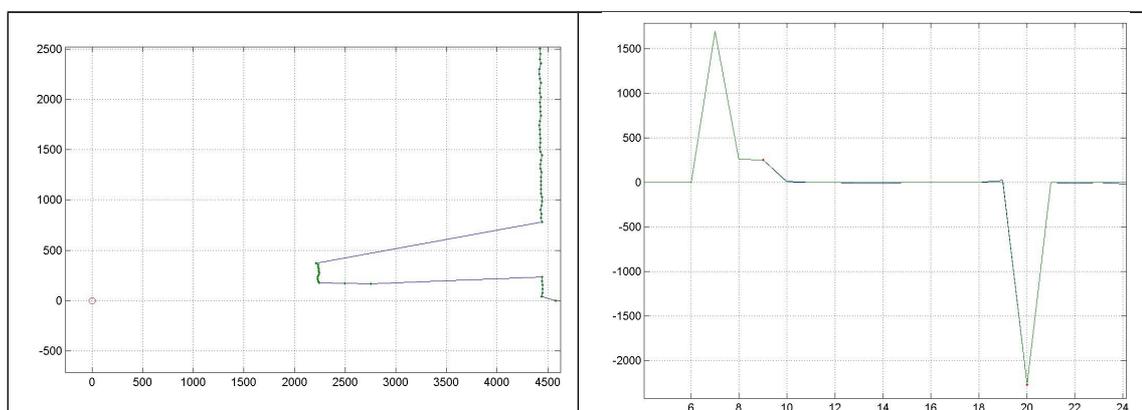


Figura 32 – Exemplo onde são rejeitados os dois primeiros pontos do pilar devido ao seu gradiente ser maior que 250mm.

Apesar do método do gradiente basear-se num princípio muito simples obtêm-se bons resultados na extracção de elementos passíveis de serem testados posteriormente para identificação. Não se justifica aqui esta afirmação em termos numéricos porque este método não é susceptível a falhas na identificação das discontinuidades porque este método somente depende de uma variável, que é o valor mínimo do gradiente para ser considerado discontinuidade podendo este trazer algumas limitações à aplicação do método em diferentes aplicações.

Limitações do método:

Uma das maiores limitações neste método é a detecção de pequenas features quando estas estão encostadas a grandes superfícies. Verificou-se que é muito difícil ou praticamente impossível identificar um pilar se existirem painéis encostados a estes porque não é verificada a

condição de descontinuidade por não existir um gradiente suficientemente grande para ser considerado obstáculo, como é o caso que se ilustra na Figura 33. Este scan foi obtido em frente ao futuro Departamento de Civil que se encontra em construção.

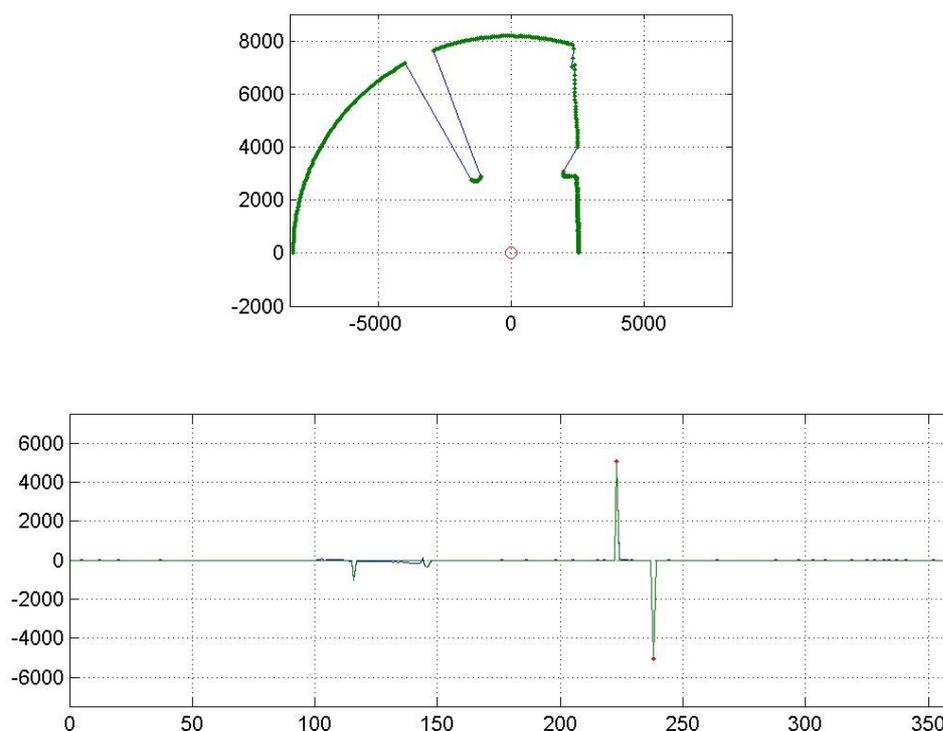


Figura 33 – Ilustração do problema de identificação de um pilar quando está encostado a barreiras de vedação.

Assim podemos constatar que este método é limitativo porque está somente preparado para fazer a detecção de elementos isolados, ou seja, que se destaquem do resto que se encontra à sua volta. Um destes exemplo é o caso anterior exposto e outro caso será aquele quando não se visualiza o objecto na totalidade. Esta caso acontece muitas vezes quando estamos a passar pelo objecto mas já não o conseguimos ver na totalidade.

Posteriormente este método de segmentação foi adaptado para o caso de detecção de pilares rectangulares, porque é necessário extrair as features que se encontram encostadas aos painéis laterais como acontece na Figura 33.

Em suma, o objectivo desta análise é dividir o scan em elementos para posterior análise e identificação dos pilares que serviram de base para navegação. Seguidamente utilizar-se-à os elementos detectados anteriormente para posterior classificação se estes obedecerem a determinadas regras.

3.3.4.2- Detecção de pilares circulares

No método do gradiente considerou-se que o elemento era definido pelo ponto a seguir ao primeiro gradiente positivo encontrado (Δr_5), (6) e pelo ponto anterior ao gradiente negativo (Δr_8), (8) como se ilustra na Figura 34.

Figura 34 – Representação esquemática da definição de um elemento usando o método dos gradientes.

Como os pilares circulares apresentam características invariantes com a distância e com a orientação, por exemplo o seu diâmetro, tem-se como objectivo realizar um teste para estimar a largura do elemento. Este teste consiste em estimar qual a largura do elemento através do número de pontos e da sua distância média de forma a comparar esta com a largura de elementos conhecidos (pilares circulares), de forma a eliminar todos os elementos que não cumpram certos requisitos de largura.

Figura 35 – Representação esquemática da detecção de um pilar circular usando um laser

A largura estimada do objecto pode ser dada por:

$$\text{largura}_{\text{est}} = r_{\text{médio}} \times \sin(\phi) \times n_i$$

$\text{largura}_{\text{est}}$ – largura estimada

$r_{\text{médio}}$ – distância média aos pontos de intercepção

ϕ - ângulo entre feixes laser

n_i – pontos de intercepção

Podem ser considerados candidatos se a relação entre a largura estimada e a largura efectiva do pilar for aproximadamente um:

$$\frac{\text{largura}_{\text{est}}}{400} ; 1$$

Durante os testes realizados com este método verificou-se que o valor obtido aquando da identificação de diferentes pilares circulares poderia ter um erro da ordem dos $\pm 15\%$. Este valor é considerado como bastante elevado porque a permissividade deste intervalo implicará uma enorme percentagem de falsas detecções. Com o objectivo de diminuir o valor da tolerância máxima permitida refinando deste modo o resultado deve-se substituir o valor de comparação, 400 mm, por um valor que dependa da distância a que o objecto se encontra em relação ao laser ao qual se dá o nome de largura visível.

A largura visível é uma função da distância a que o laser se encontra, sendo mais propriamente definida como a distancia entre os dois pontos tangentes à circunferência que resultam da intercepção entre os feixes laser e a circunferência. Para o desenvolvimento da equação da largura visível em função da distância a que o laser se encontra apenas precisa de saber a distância do laser ao ponto tangente (D) e o raio do pilar circular. A distancia do laser ao ponto tangente (D) é considerado como a média das distâncias dos dois extremos do elemento em questão. Logo existe no resultado final um determinado valor de erro associado, por um erro não quantificado aquando da definição do valor de D.

Apresenta-se o gráfico da variação da largura visível pelo laser em função da distância a que este se encontra do objecto.

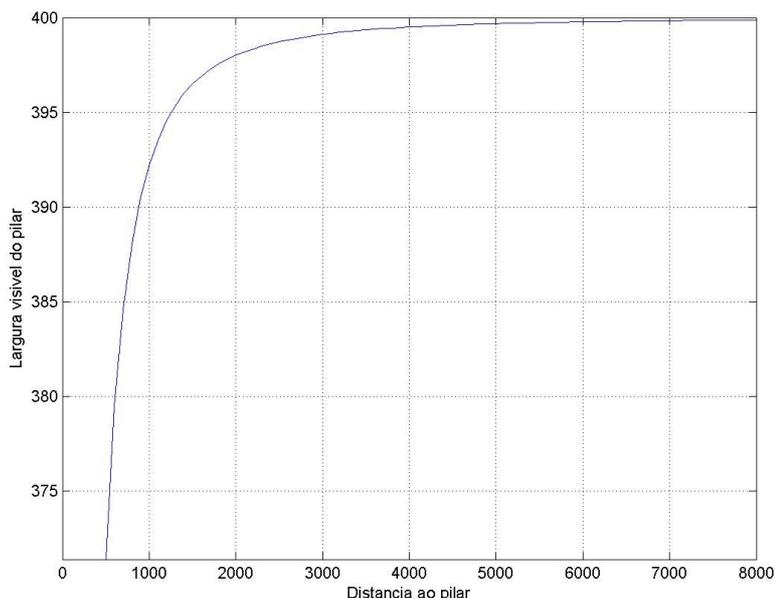


Gráfico 1 – Representação da variação da largura visível do pilar em função da distância do laser

Verifica-se para valores muito próximos, o valor da largura visível diminui drasticamente, podendo ter alguma influência dos dados, enquanto que para distâncias superiores a 2 metros o erro pode ser considerado insignificante (Gráfico 1). Esta alteração não implicará grandes modificações nos resultados.

Ainda com o objectivo de melhorar o resultado final é necessário primeiro calcular qual a largura visível ideal através da formulação anterior usando para tal a distancia máxima da media dos extremos obtida do conjunto de distancias pertencentes ao elemento em causa.

Posteriormente calcula-se através da distância máxima e do ângulo da abertura entre dois feixes do laser o arco entre dois pontos consecutivos. Dividindo a largura visível por o arco obtemos o numero de pontos que será possível definir neste espaço. Truncando o valor ao numero inteiro mais próximo e voltando a multiplicar este pelo arco obtemos um valor estimado final do tamanho que é visível por o laser quando este se encontra a uma determinada distancia de um pilar circular.

Resumindo:

- 1- Calcular o L (largura) através da distância media entre os dois extremos do elemento e do raio do pilar circular
- 2- Calcular o ARC através da distância media entre os dois extremos do elemento e do ângulo de abertura do laser (0.5°)
$$\text{ARC} = \text{dist_med} * 0.5 * \pi / 180$$
- 3- Dividir L por ARC para calcular o número de pontos N
- 4- Truncar o número de ponto ao menor elemento inteiro N_t
- 5- Calcular novo L através do número de ponto truncado N_t e do ARC
$$L = N_t * \text{ARC}$$

Algumas melhoras foram verificadas mas não se conseguem quantificar. No entanto, o valor do intervalo de erro parece que se tem de manter para se continuar a ter resultados fiáveis ou melhor para não eliminarmos os elementos que andamos à procura.

Com um único objectivo de identificação e triagem dos dados tentou-se uma nova abordagem onde se utiliza o ângulo de abertura total γ e a distância mínima D_{\min} .

Figura 36 – Representação da nomenclatura utilizada no desenvolvimento das equações

Inicialmente estimou-se qual é que seria o erro máximo de D_{\min} quando temos uma incerteza máxima de orientação de metade do ângulo entre dois feixes laser consecutivos.

Logo o erro que pode advir se o D considerado não for o D_{\min} :

$$\begin{cases} d = D \cdot \sin(\phi / 2) \\ E = r - r_1 = r - \sqrt{r^2 - d^2} \end{cases}$$

Desenvolvendo pode-se obter que o erro E máximo é dado por:

$$E_{\max} = r - \sqrt{r^2 - (D \cdot \sin(\phi / 2))^2}$$

No gráfico seguinte apresenta-se a evolução do erro máximo E_{\max} em função da distância D.

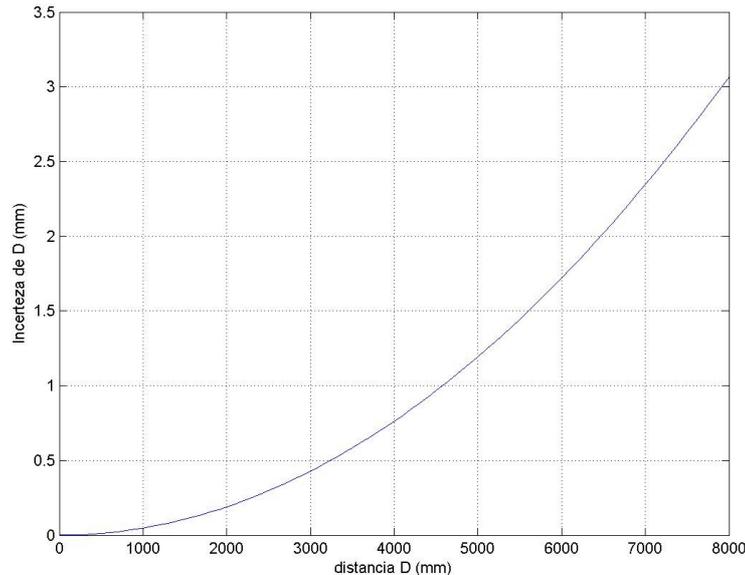


Gráfico 2 – Representação da evolução do erro E em função da distância D a que ele se encontra do laser.

Da análise do Gráfico 2 pode-se concluir que o valor do erro para uma determinada distancia tem um valor muito pequeno. Considerando o caso mais crítico quando a distancia entre os dois elementos é maior o que acontece aos 8 metros, verifica-se que o erro máximo terá um valor de aproximadamente 3.1 mm.

Desenvolvimento da equação da largura estimada L_E em função do D_{\min} e do ângulo de abertura entre os dois extremos do elemento γ :

- Equação da recta 1:

$$y - y_0 = m \cdot (x - x_0)$$

$$y = m \cdot (x - x_0) + y_0$$

$$y = \operatorname{tg}\left(-\frac{\gamma}{2} + 90^\circ\right) \cdot x - \operatorname{tg}\left(-\frac{\gamma}{2} + 90^\circ\right) \cdot x_0 + y_0$$

Sabe-se que passa no ponto $x_0 = 0$, $y_0 = -(D_{\min} + r)$ levando a:

$$y = \operatorname{tg}\left(-\frac{\gamma}{2} + 90^\circ\right) \cdot x - (D_{\min} + r)$$

- Equação da circunferência centrada na origem é dada por:

$$x^2 + y^2 = r^2$$

- Deste modo a intercepção da recta com a circunferência centrada na origem vem dada por:

$$\begin{cases} y = \operatorname{tg}\left(-\frac{\gamma}{2} + 90^\circ\right) \cdot x - (D \min + r) \\ x^2 + y^2 = r^2 \end{cases}$$

Em termos genéricos, $\begin{cases} y = m \cdot x + b \\ x^2 + y^2 = r^2 \end{cases}$

$$x^2 + (m \cdot x + b)^2 = r^2$$

$$x^2 + m^2 \cdot x^2 + 2 \cdot m \cdot x \cdot b + b^2 - r^2 = 0$$

$$(1 + m^2) \cdot x^2 + 2 \cdot m \cdot b \cdot x + b^2 - r^2 = 0$$

As soluções da equação quadrática anterior são os pontos de intercepção. Como o ângulo a testar é sempre positivo e a cota do ponto inicial y_0 negativa implica que a intercepção que os interessa é o ponto onde o x tem uma cota menor. Isto deve-se essencialmente ao sistema de coordenadas adoptado.

Deste modo obtemos que a largura estimada será dada por

$$L_E = 2 \cdot x$$

Figura 37 – Representação física dos parâmetros usados no calculo da largura estimada

Equação da largura real L usando a distancia euclidiana entre os dois pontos extremos:

$$L = \sqrt{(x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2}$$

Convém mais uma vez relembrar que um objecto pode ser definido por um número par ou impar de pontos, havendo no primeiro caso a probabilidade de existir um maior erro de orientação e subsequentemente um erro entre o L_E (largura estimada) e o L (distancia euclidiana entre os dois extremos do elemento).

Figura 38 – Representação física dos parâmetros usados no calculo da largura real

Muito importante referir que no código não foram usados os pontos extremos porque não se garantia na maioria dos casos a intercepção entre a recta e a circunferência optando-se por utilizar os pontos imediatamente depois de iniciar o elemento e o ponto imediatamente antes de acabar esse mesmo elemento.

Depois de se definir o L_E (estimado) e o L (real) fez-se a comparação entre ambos, ou seja criou-se um critério para avaliação de candidato a pilar circular:

$$\frac{L}{L_E} \text{ (Critério de semelhança)}$$

A largura estimada calculada é considerada como valor de referência, sendo o resultado 1 se os valores forem iguais. Após análise exaustiva dos dados (1553 scans) obteve-se a seguinte distribuição:

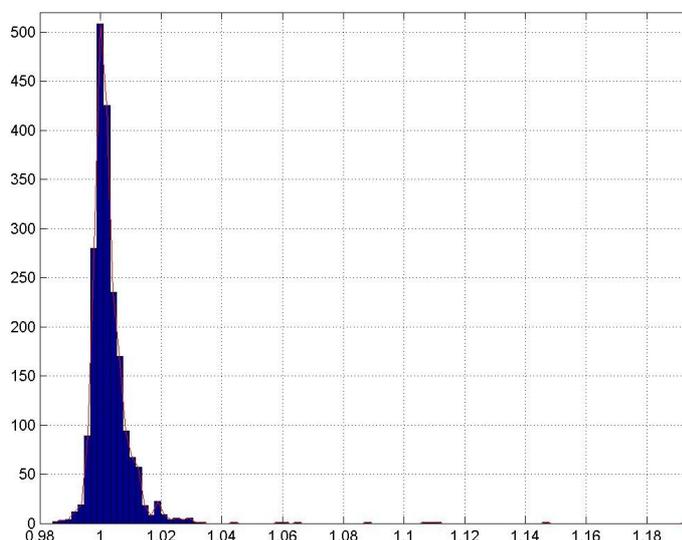


Figura 39 – Distribuição do critério de semelhança em pilares circulares em 1553 scans.

Para uma distribuição Normal ou Gaussiana, com o desvio padrão pode-se saber qual a probabilidade de ocorrência de uma medida.

Intervalo	Probabilidade
$[x_m - \sigma, x_m + \sigma]$	68%
$[x_m - 2\sigma, x_m + 2\sigma]$	95.4%
$[x_m - 3\sigma, x_m + 3\sigma]$	99.7%

Neste caso não se pode afirmar que a distribuição é Guassiana. Pode-se considerar que os dados são representativos o que leva a concluir que a distribuição obtida é representativa já que leva em consideração um universo com inúmeros scan recolhidos em ambiente real de navegação. Assim,

- Média de $L/L_E (x_m)$: **1.0030**
- Desvio padrão (σ): **0.0091**
- $2 \times \sigma = 0.0182 \Rightarrow 98.2943\%$
- $3 \times \sigma = 0.0273 \Rightarrow 99.4152\%$

Deste modo pode-se classificar os objectos segundo a sua largura de forma a poderem ser considerados como candidatos a pilares circulares. De forma a rejeitar o menor número de

candidatos a pilares circulares considerou-se o intervalo de $\pm 3 \times \sigma$ (desvio padrão) em relação à média.

Após a triagem usando o método anterior foi implementado o algoritmo que usa a esfera de Riemann para saber qual a melhor circunferência que os pontos de cada elemento representam. Este método implementado que usa a esfera de Riemann será chamado ao longo de todo este trabalho como o método de Riemann. O método baseia-se no seguinte.

Tendo diferentes pontos de uma circunferência dados por $P = \{ (x_1, y_1), \dots, (x_n, y_n) \}$, devemos então esperar a definição de um centro (a, b) e um raio r de acordo com a seguinte equação:

$$(x - a)^2 + (y - b)^2 = r^2$$

Então tem-se como medida do erro $(x_i - a)^2 + (y_i - b)^2 - r^2$. Para evitar ter-se erros negativos usou-se o erro quadrático que vem dado por:

$$E(a, b, r) = \sum_{i=1}^N \left[(x_i - a)^2 + (y_i - b)^2 - r^2 \right]^2$$

Para o cálculo do mínimo erro dever-se-á calcular as primeiras derivadas da função $E(a, b, r)$ em ordem a a , b e r . Verifica-se que as derivadas são cúbicas o que vai trazer dificuldades na resolução das mesmas sendo necessário o recurso a um método iterativo para resolução das mesmas. Os métodos iterativos podem ser lentos dependendo da resolução pretendida, para além de poder-se ter problemas de convergência para além de ser necessário sempre uma estimativa inicial. Assim procurou-se outro método que fosse linear de forma a não ser necessário definir condições de convergência nem ser necessária nenhuma estimativa inicial. O método usando a esfera Riemann torna o processo linear que pode ser resolvido de uma forma directa e eficaz sem ser necessário o recurso a métodos iterativos. O objectivo deste método será representar todas as medidas do espaço bidimensional na esfera de Riemann. Como se sabe da análise complexa as circunferências e as rectas no plano são representadas em círculos na esfera de Riemann. Pode-se verificar que uma círculo na esfera de Riemann define um plano, concluindo-se assim que existe correspondência entre círculos e linhas no plano e planos no espaço ou seja num ambiente tridimensional.

Tendo pontos (R_i, ϕ_i) no plano é representado como o ponto (x_i, y_i, z_i) na esfera de Riemann por:

$$(x_i, y_i, z_i) = \left(\frac{R_i \cdot \cos(\phi_i)}{1 + R_i^2}, \frac{R_i \cdot \sin(\phi_i)}{1 + R_i^2}, \frac{R_i^2}{1 + R_i^2} \right)$$

ou ainda se usar-se os pontos em coordenadas cartesianas tem-se que:

$$\begin{cases} X_i = R_i \cdot \cos(\phi_i) \\ Y_i = R_i \cdot \sin(\phi_i) \end{cases}$$

substituindo na equação anterior obtém-se:

$$(x_i, y_i, z_i) = \left(\frac{X_i}{1 + R_i^2}, \frac{Y_i}{1 + R_i^2}, \frac{R_i^2}{1 + R_i^2} \right)$$

O plano no espaço é definido por quatro parâmetros $\{c, n_1, n_2, n_3\}$, onde $n^T = (n_1, n_2, n_3)$ é o vector normal unitário e c é designado como a distancia do plano à origem. O ajuste de um plano no espaço a um numero de N medidas na esfera de Riemann é definido como o mínimo de:

$$S = \sum_{i=1}^N (c + n_1 \cdot x_i + n_2 \cdot y_i + n_3 \cdot z_i)^2 = \sum_{i=1}^N d_i^2$$

Não esquecendo a restrição de $n_1^2 + n_2^2 + n_3^2 = 1$. Então o objectivo é minimizar a soma das distâncias quadráticas d_i^2 dos pontos ao plano. Então isto será resolvido, primeiro resolvendo $\partial S / \partial c = 0$. Obtém-se:

$$c = -n^T \cdot \bar{r}$$

com $\bar{r}^T = (\bar{x}, \bar{y}, \bar{z})$, onde \bar{r} pode ser interpretado como o vector médio dos dados, com $\bar{x} = \sum_{i=1}^N x_i / N$, $\bar{y} = \sum_{i=1}^N y_i / N$ e $\bar{z} = \sum_{i=1}^N z_i / N$. Omitindo um factor constante não importante N, o custo da função S pode ser agora escrita como:

$$S = n^T \cdot A \cdot n$$

onde

$$A = \frac{1}{N} \cdot \sum_{i=1}^N (r_i - \bar{r}) \cdot (r_i - \bar{r})^T,$$

e $r_i^T = (x_i, y_i, z_i)$. A matriz A não é mais que a matriz de covariâncias das medidas. Ou seja, é a matriz onde temos o valor das variâncias (o quadrado do desvio padrão) directas e cruzadas:

$$\begin{bmatrix} \sigma_{xx}^2 & \sigma_{yx}^2 & \sigma_{zx}^2 \\ \sigma_{xy}^2 & \sigma_{yy}^2 & \sigma_{zy}^2 \\ \sigma_{xz}^2 & \sigma_{yz}^2 & \sigma_{zz}^2 \end{bmatrix} \text{ onde } \sigma^2 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2$$

O vector n que minimiza S é o vector próprio da matriz A correspondente ao menor valor próprio. Depois de se ter determinado o vector normal n , c pode ser directamente encontrado pela equação anterior $c = -n^T \cdot \bar{r}$. Deste modo temos todos os parâmetros necessários para que possamos definir os parâmetros da circunferência que melhor se ajusta aos pontos definidos, com o centro (u_0, v_0) e o raio de curvatura ρ definidos por:

$$u_0 = -\frac{n_1}{2 \cdot (c + n_3)},$$

$$v_0 = -\frac{n_2}{2 \cdot (c + n_3)},$$

$$\rho^2 = \frac{n_1^2 + n_2^2 - 4 \cdot c \cdot (c + n_3)}{4 \cdot (c + n_3)^2}.$$

Somente existe uma singularidade quando $c = -n_3$, que leva ao limite o surgimento de uma linha recta. Para encontrar um critério de triagem dos dados de forma a obter-se somente os pilares circulares, analisaram-se 1553 scans onde se identificou em cada um deles quais eram os efectivos pilares circulares. Com o valor do raio da circunferência estimado pelo método de Riemann, fez-se uma representação desta distribuição.

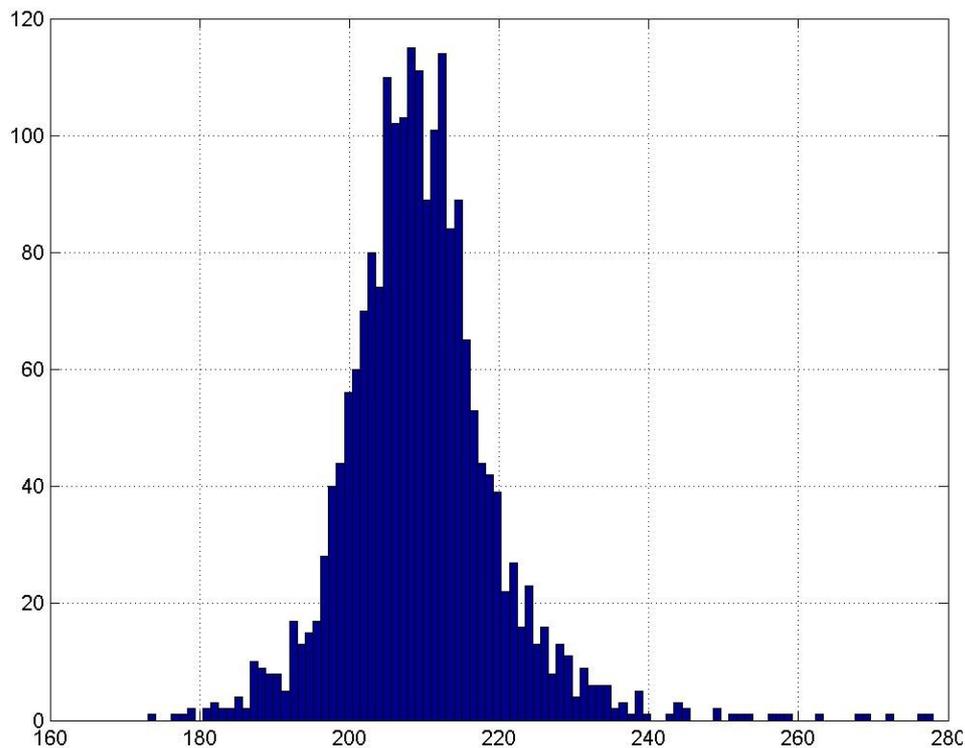


Figura 40 – Distribuição do raio calculado a partir do método de Riemann em 1553 scans

- Média do raio: **209.5557** - $2 \times \sigma = 20.2894 \Rightarrow 95.0171\%$
- Desvio padrão (σ): **10.1447** - $3 \times \sigma = 30.4341 \Rightarrow 98.8276\%$

Quando se obteve a partir do método de Riemann um raio médio de 209.5557 achou-se estranho este valor já que era previsto este ser mais aproximado de 200. O que se pode tirar da análise da distribuição anterior é que isto não se trata de um erro aleatório mas sim um erro sistemático das medidas.

Fizeram-se alguns testes onde se modificaram os dados capturados considerando que estes deveriam ter um erro sistemático nas suas medidas. Assim testou-se para um conjunto aleatório de scans vários conjuntos de medidas onde se impôs erros de -50, -30, -10, 0, 10, 30, 50 em cada um dos 360 dados de cada scan. Como era de esperar a diminuição do valor das medidas, ou seja, quanto menor fosse o erro imposto mais o valor médio do raio da circunferência se aproxima dos 200 mm. Pode-se ver na tabela seguinte que quando é subtraído a todas as medidas 50 mm o raio médio obtido tem o valor de 205.1912 mm.

Erro imposto	-50	-30	-10	0	10	30	50
Raio médio	205.19	206.89	208.80	209.77	210.74	212.69	214.66

Para evitar e eliminar a suspeição de que existe um erro sistemático associado às medidas dever-se-ia calibrar o laser. Em relação aos resultados obtidos da análise da distribuição verifica-se que apesar de este método minimizar as distâncias médias quadráticas a uma circunferência os parâmetros como seja o valor do raio podem diferir em mais de 15% do valor do raio de referência quando utilizamos um intervalo com $\pm 3\sigma$.

Em seguida analisou-se quais os motivos para o processo falhar como por exemplo quando o processo detectou elementos que não eram circulares mas classificou-os como tal. Verificou-se que alguns casos não são testados pelo Riemann pois já tinham sido rejeitados anteriormente porque não obedeciam ao critério de largura e noutros verificou-se que não passavam no teste de triagem onde o raio obtido pelo método de Riemann encontra fora do limite estipulado.

Para refinar mais o método é necessário quantificar a qualidade do ajuste da recta aos pontos. Ou seja, um coeficiente semelhante ao coeficiente de correlação para o caso de uma recta.

O método que se apresenta em seguida é chamado o pseudo-coeficiente de correlação. Neste caso calcula-se a distância usando a normal à tangente da circunferência que intercepta o ponto, ou seja, calcula-se a distância de cada ponto à circunferência. Fazendo a média quadrática de todos eles obtém-se o valor que vai servir como o valor de referencia. O valor médio das distancias entre os pontos e a circunferência não pode ser maior que um determinado valor que neste caso considerou-se o valor 6.5.

Figura 41 – Representação esquemática da distância dos pontos à circunferência usada no método do pseudo-coeficiente de correlação

Para se tentar eliminar mais elementos vai-se implementar um método de triagem de forma a garantir que o objecto tem de ter uma determinada largura para ser considerado pilar, porque até então o teste de largura que foi efectuado não era um teste de largura mas sim um teste dos pontos terem uma determinada disposição que garantem que podem definir uma determinada circunferência com determinados parâmetros ou seja raio 200mm.

de

O método seguinte será classificado como o teste efectivo de largura. Neste teste vai ser usado como parâmetro de comparação o ângulo de abertura entre os extremos que definem um elemento. Ou seja, para ser um pilar circular tem o ângulo de abertura estar compreendido entre dois valores assim como este vai variar em função da distância a que o elemento se encontra do robô. Sabendo somente a distancia mínima ao elemento e o numero de pontos que definem esse mesmo elemento podemos obter o seguinte:

$$r = (D_{\min} + r). \sin(\gamma / 2)$$

$$\sin(\gamma / 2) = \frac{r}{D_{\min} + r}$$

$$\gamma = 2 \times \arcsin\left(\frac{r}{D_{\min} + r}\right)$$

Figura 42 – Esquema de apoio para o desenvolvimento da equação do teste efectivo de largura

Assim tem-se a fórmula para calcular o valor do ângulo ideal estimado. Mas na realidade pode acontecer que haver um erro no cálculo do ângulo real em relação ao anteriormente estimado devido ao ângulo de abertura do feixe laser. Pode na pior das situações acontecer o que se apresenta na Figura 43.

Figura 43 – Representação esquemática da situação extrema que origina o maior erro angular

A situação mais crítica acontece quando a linha a azul, que representa o feixe laser, se aproxima da linha laranja, mas sempre sem interceptar o elemento. Isto implica que no limite o erro angular será de um grau (na realidade não é porque o feixe tem um determinado cone de abertura). Comparar-se o ângulo ideal estimado (mais ou menos 1º), com o ângulo que efectivamente se obtém no scan. Todos os elementos que saírem fora deste intervalo serão assim rejeitados mesmo antes de se fazer o teste do ajustamento dos pontos usando o método de Riemann.

Apesar de se considerar que com método de triagem o pseudo-coeficiente de correlação se quantificava a qualidade do ajuste dos pontos à circunferência obtidas, procurou-se outro método que pudesse ser ainda mais eficiente. Este método usa o real coeficiente de correlação da circunferência quando esta é representada no plano complexo.

Deve-se em atenção que o coeficiente de correlação que se vai obter tem relação directa com a recta logarítmica que minimiza a distancia quadrática media. Deste modo não se pode afirmar que existe uma relação directa entre a circunferência obtida pelo método de Riemann e o coeficiente de correlação obtido pela linearização da circunferência no espaço complexo, mas este pode ser considerado com uma referência para qualificar o ajuste dos pontos à recta.

Uma circunferência pode ser escrita por:

$$z = r.e^{j\theta} \text{ com } 0 \leq \theta \leq 2\pi$$

se $z = a + bj$ e logaritmando obtemos:

$$\ln(r.e^{j\theta}) = \ln(a + bj)$$

$$\ln(r) + \ln(e^{j\theta}) = \ln(a + bj) \text{ com } 0 \leq \theta \leq 2\pi$$

Após este desenvolvimento podemos ter o seguinte exemplo:

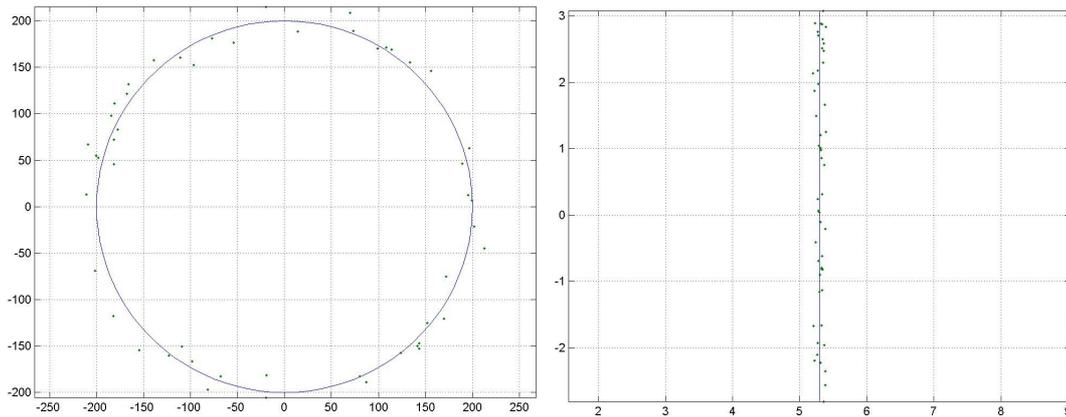


Figura 44 – Do lado esquerdo apresenta-se a circunferência e uma distribuição de pontos até 20% de erro; do lado direito podemos ver a linearização de uma circunferência usando o método descrito anteriormente.

Após a transformação verificou-se que se poderia calcular um coeficiente de correlação entre os pontos e a recta da figura mais à direita. Surge então um problema que é o cálculo do coeficiente de correlação para uma recta desta natureza que é vertical, ou seja para qualquer valor de Y o valor de X é sempre o mesmo. Isso não vem de encontro à definição de coeficiente de correlação impossibilitando assim o cálculo deste.

O Coeficiente de correlação é a quantidade que nos dá a qualidade do ajuste usando os mínimos quadrados dos dados originais. Segundo o método dos mínimos quadrados a recta que melhor se ajusta a um determinado conjunto de pontos é dada por:

$$y = a + b.x \text{ onde o } b \text{ é dado por}$$

$$b = \frac{n \sum xy - \sum x \sum y}{n \sum x^2 - (\sum x)^2}$$

Mas também pode-se escrever que:

$$x = a' + b'.y \text{ onde o } b' \text{ é dado por}$$

$$b' = \frac{n \sum xy - \sum x \sum y}{n \sum y^2 - (\sum y)^2}$$

onde o coeficiente de correlação r^2 é dado por:

$$r \equiv \sqrt{b.b'} = \frac{n \sum xy - \sum x \sum y}{\sqrt{[n \sum x^2 - (\sum x)^2][n \sum y^2 - (\sum y)^2]}}$$

Assim é necessário fazer uma transformação de rotação em todos os pontos para então se calcular o coeficiente de correlação correspondente.

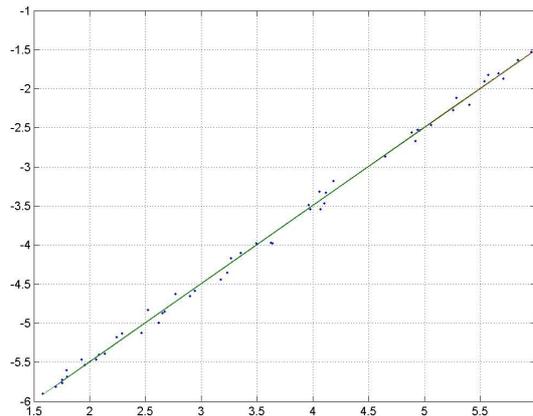


Figura 45 – Rotação dos pontos da circunferência linearizados para o cálculo do coeficiente de correlação.

Neste caso obteve-se um coeficiente de correlação de 0.9972, concluindo-se assim que a qualidade de ajuste da recta aos pontos é bastante boa, ou seja os pontos são representativos de uma circunferência de raio $r = 200$ neste caso e centro na origem. Mas, recuando um pouco ao início da descrição deste método afirma-se que o coeficiente de correlação que se vai obter tem relação directa com a recta que minimiza a distancia quadrática media. O que se põe agora em questão é, será a recta obtida pela linearização da circunferência obtida pelo método de Riemann corresponde à mesma recta que minimiza a distancia quadrática media dos pontos linearizados? A resposta é não mas para analisar-se melhor este caso apresenta-se um exemplo em seguida.

Primeiro temos uma circunferência ideal. A partir desta circunferência acharam-se pontos com 20% de erro obedecendo este a uma distribuição normal. Com estes pontos foi-se calcular pelo método da esfera de Riemann qual a circunferência que melhor se ajustava aos pontos.

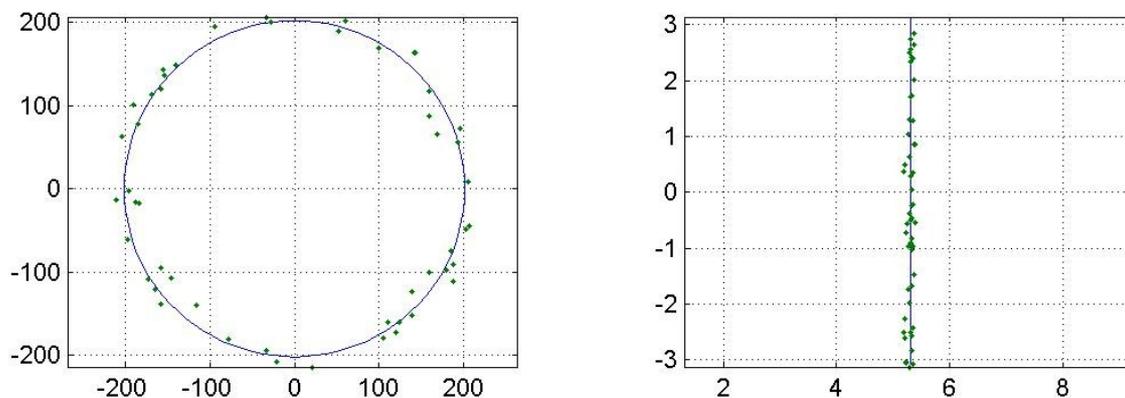


Figura 46 – Do lado esquerdo apesar de não estar bem visível temos uma circunferência a azul obtida pelo método de Riemann onde o centro tem as coordenadas (1.0265, 3.1408) e raio 201.6101. Do lado direito podemos ver os mesmos pontos e a circunferência linearizada.

Com os parâmetros da circunferência obtidos pelo Riemann, linearizou-se tanto os pontos com ruído, como a circunferência como se pode ver na figura anterior. Achou-se o coeficiente de correlação dos pontos e obteve-se $r^2=0.9971$. Mas a questão estava em saber se a recta à qual este coeficiente de correlação corresponde é a mesma recta que foi obtida pelo método de Riemann.

O que se obteve foi duas rectas distintas com as equações $y=0.9798x-7.7348$ para a recta que minimiza a distancia media quadrática aos pontos e $y=1.0000x-7.5043$ para a recta obtida pela linearização da circunferência obtida pelo método de Riemann. Assim podemos concluir que o coeficiente de correlação obtido não corresponde à circunferência de Riemann.

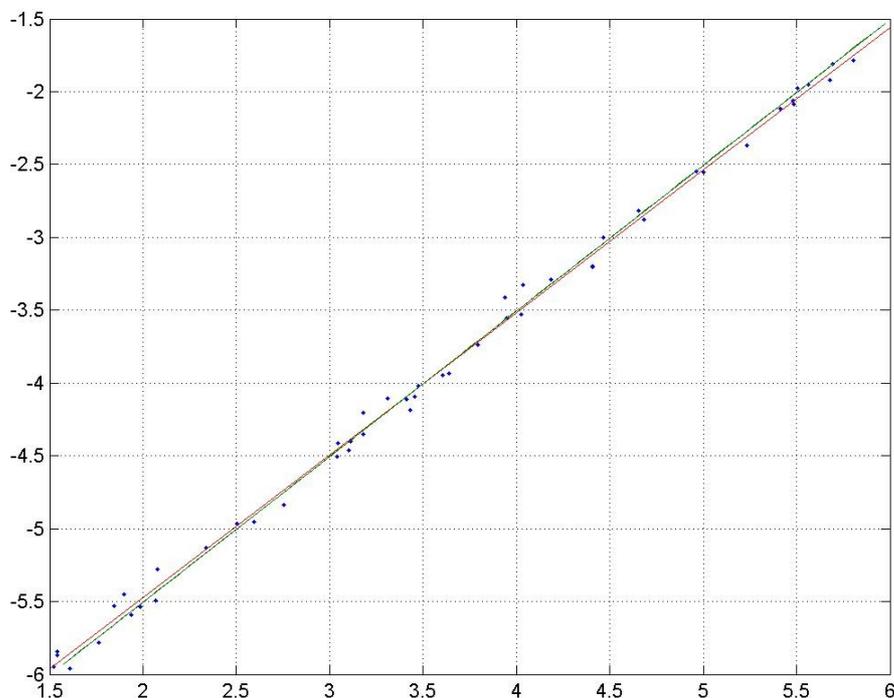


Figura 47 – Representação das duas rectas, a recta a vermelho obtida da circunferência de Riemann e a recta a verde obtida pela minimização da distância quadrática (ou seja pelo método da regressão linear).

Um motivo porque a recta obtida pelo método da regressão linear não é a mesma que obtida pelo método de Riemann é porque esta pode não representar uma circunferência. Ou seja quando se tem uma circunferência e se lineariza a mesma, obtém-se uma recta precisamente vertical. Para se poder fazer a regressão linear teve de fazer uma rotação. A rotação efectuada neste caso foi de 45° , o que significa que a recta obtida pelo método de Riemann tem uma inclinação de 45° , ou seja qualquer circunferência após a linearização e rotação apresenta-se no plano como uma recta com 45° de inclinação. Mas, se fizermos a regressão linear dos pontos também no mesmo plano verificamos que o resultado não é precisamente uma recta com 45° de inclinação. O que se pode concluir é que seria então impossível com a recta obtida aplicar-lhe as transformações inversas para se obter uma circunferência, ou seja esta recta não representa precisamente uma circunferência.

Outro problema que poderá surgir é a linearização segundo o mesmo método para as rectas. No exemplo que se apresenta em seguida utilizou-se uma recta aleatória onde se logaritimizaram os seus pontos e o resultado obtido foi o seguinte:

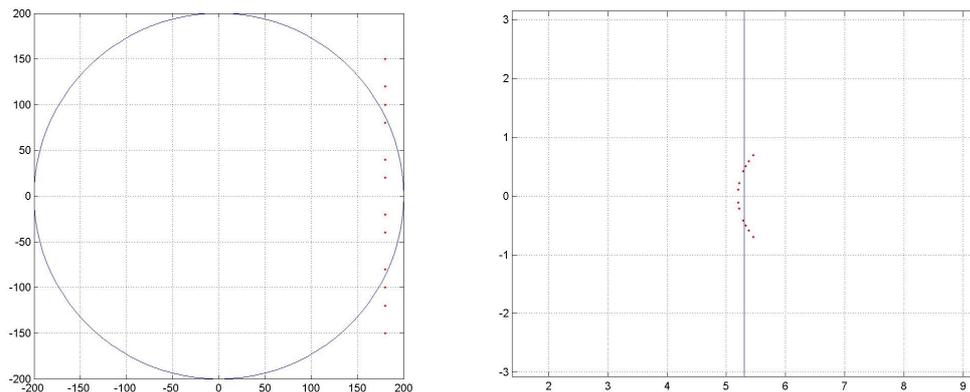


Figura 48 – Do lado esquerdo um exemplo hipotético de 12 pontos e sua respectiva circunferência, do lado direito pode-se ver os mesmos pontos e a circunferência linearizados.

O que se verifica neste caso é que os pontos da recta quando logaritizados, ou seja, quando aplicamos o mesmo processo de linearização que aplicado à circunferência, são representados de uma forma não circular, induzindo um valor para o coeficiente de correlação inferior ao obtido no caso anterior. O coeficiente de correlação encontrado para este caso foi $r^2 = 0.8647$, valor tão baixo que nos leva a excluir este possível pilar. Mais uma vez é importante referir que este resultado representa a qualidade destes pontos em relação a uma recta que minimiza a distancia quadrática media, que é uma recta diferente da obtida da linearização da circunferência que melhor se ajusta a este caso (figura seguinte).

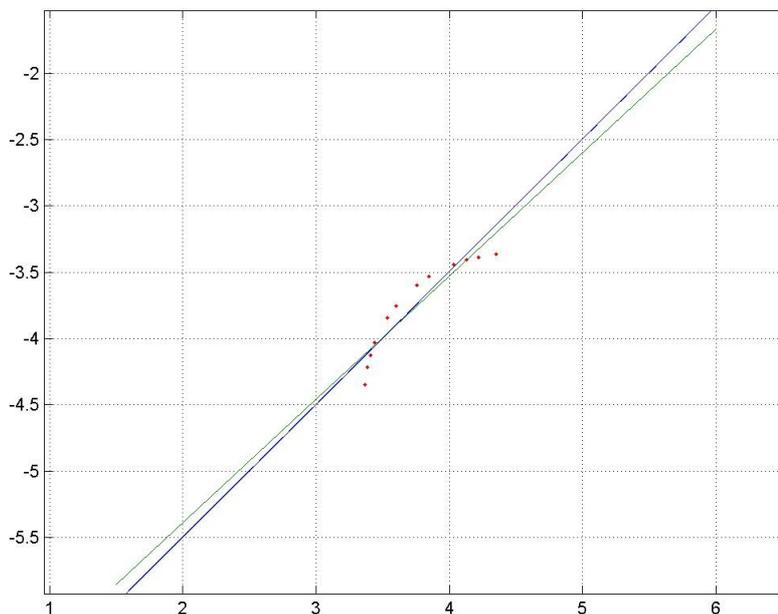


Figura 49 – A recta a azul foi obtida da linearização da circunferência e a verde obtida pelo método da regressão linear.

Considerando que o método do coeficiente de correlação para classificar e eliminar pilares circulares parece é viável. O objectivo seguinte será no universo de amostras que temos (1654 scans), identificar visualmente e adquirir os coeficientes de correlação respectivos para termos a distribuição da variação dos coeficiente de correlação de pilares circulares. Em simultâneo vai-se adquirir também o chamado pseudo-coeficiente de correlação que não é mais que o valor médio

da distancia quadrática dos pontos à circunferência obtida pelo método da esfera de Riemann para os mesmos pilares circulares para posterior comparação e escolha do melhor método.

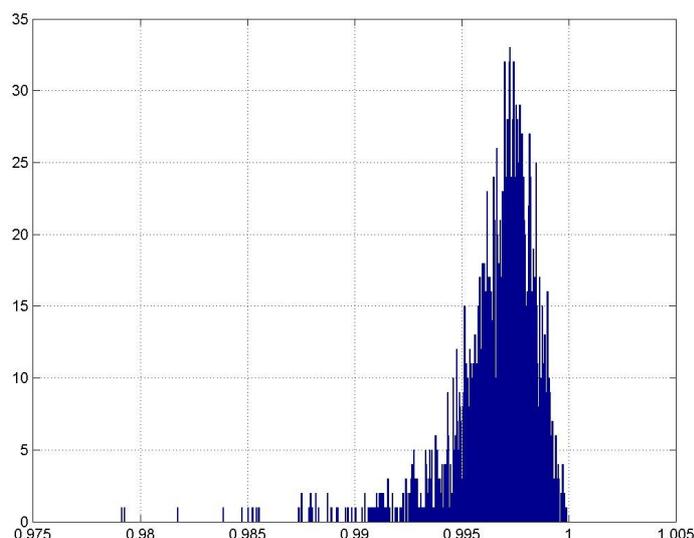


Figura 50 – Distribuição do coeficiente de correlação aquando da linearização da circunferência para os pilares circulares em 1553 amostras.

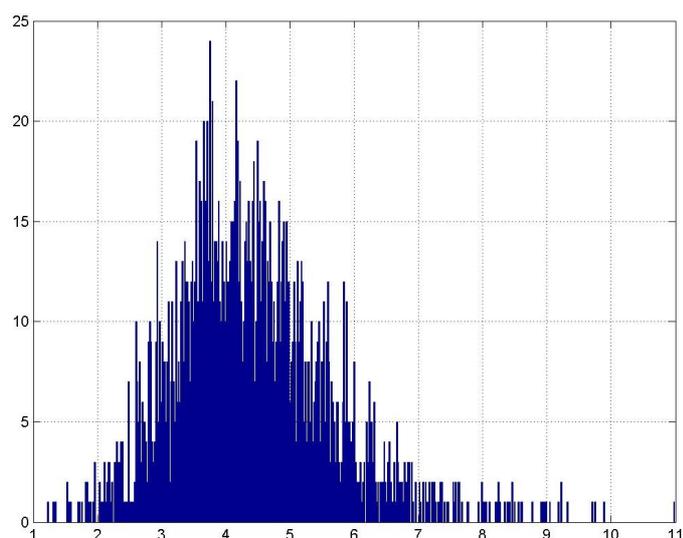


Figura 51 – Distribuição do pseudo-coeficiente de correlação (ou seja media quadrática dos erros) aquando da linearização da circunferência para os pilares circulares em 1553 amostras.

Considerando que as distribuições obtidas são representativas já que estas fazem parte de um universo de 1553 amostras reais, pode-se encontrar um intervalo que minimize a rejeição de pilares circulares em ambos os casos para posterior comparação de forma a encontrar o método mais eficiente.

O objectivo seguinte vai ser identificar e classificar todos os elementos que passam em todos os testes de triagem (raio da circunferência menor que a media dos pontos e o raio da circunferência estar dentro de um determinado intervalo). Será assim possível representar a distribuição para pilares circulares e não circulares, de forma a otimizar o valor que vai servir de classificação dos pilares, de forma a rejeitar o menor número de pilares possível e o maior número de elementos que não sejam pilares.

A matriz resultante da análise de identificação dos pilares e elementos que não são pilares é constituída por: 1ª coluna - representa o critério de semelhança descrito em cima; 2ª coluna - o coeficiente de correlação; 3ª coluna - pseudo-coeficiente de correlação (ou seja a distancia media quadrática); 4ª coluna – indicação se é ou não pilar circular (1- pilar circular, 0- não é pilar circular).

A distribuição dos valores dos coeficientes e dos pseudo-coeficientes de correlação para os pilares circulares e os outros elementos que não o são apresentam-se em seguida:

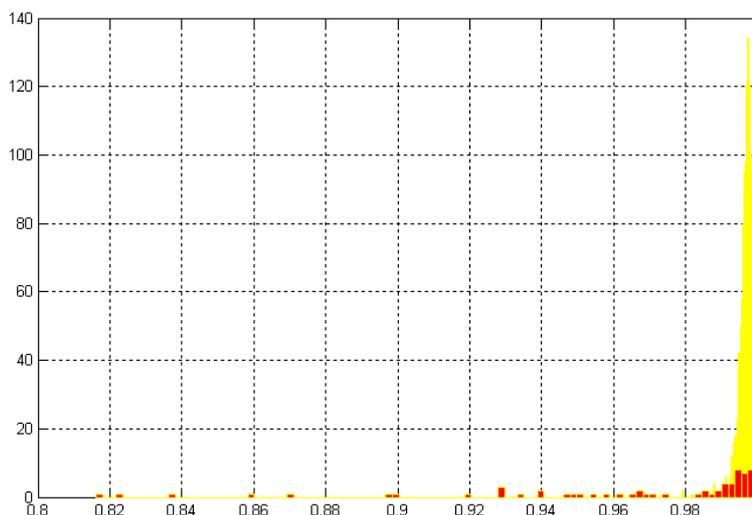


Figura 52 – Histograma onde se apresenta os coeficientes de correlação. A amarelo a distribuição dos pilares circulares e a vermelho a distribuição dos que não são pilares circulares.

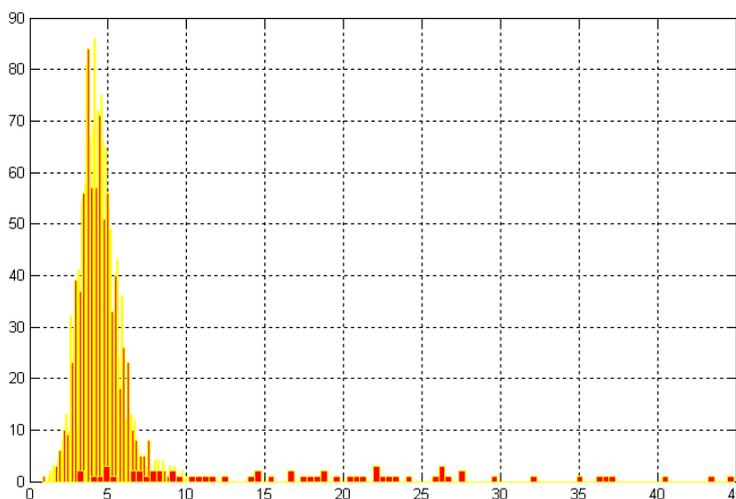


Figura 53 – Histograma onde se apresenta os pseudo-coeficientes de correlação. A amarelo e vermelho (traços finos) a distribuição dos pilares circulares e a vermelho (traços largos) a distribuição dos que não são pilares circulares.

O que se pode concluir por uma simples análise visual é que a distribuição para os coeficiente de correlação para os elementos não pilares circulares é muito semelhante à distribuição dos elementos que são pilares circulares. Já no histograma anterior podemos verificar que a distribuição para os pseudo-coeficientes de correlação para os elementos não pilares circulares é diferentes à distribuição dos elementos que são pilares circulares, estando os seus valores mais espaçados.

Daqui se pode concluir que é preferível escolher o segundo método como mais um método para triagem de forma a eliminar o maior número de elementos não pilares circulares possível. Para justificar esta afirmação apresentam-se os dados numéricos referentes aos casos apresentados:

Valores Limites	Numero daqueles que são <u>eliminados</u> se tivermos em conta os limites descritos ao lado	Total de scans em cada um dos casos	Percentagem de scans que podem ser considerados a preto a % de pilares circulares detectados e a vermelho % de elementos não pilares que vão ser considerado como tal
Coeficiente de correlação 0.98	num_coef_v = 2	Total=1951	99.897%
	num_coef_f = 26	Total=63	37=>58.730%
Pseudo-coeficiente de correlação 9.8	num_coef_v = 2	Total=1951	99.897%
	num_coef_f = 43	Total=63	20=>31.746%

Coeficiente de correlação 0.9935	num_coef_v = 110	Total=1951	94.361%
	num_coef_f = 40	Total=63	23=>36.507%
Pseudo-coeficiente de correlação 6.5	num_coef_v = 109	Total=1951	94.413%
	num_coef_f = 55	Total=63	8=>12.698%

- num_coef_v – numero de coeficientes verdadeiros (pilares circulares)
- num_coef_f – números de coeficientes de falsos pilares circulares

Aquilo que pareceu melhor foi escolher o pseudo-coeficiente de 10 porque neste caso não se eliminavam pilares (verdadeiros), e conseguia-se eliminar um grande número de pilares falsos.

É difícil encontrar outro método de identificação de pilares circulares restando como a ultima solução a comparação das coordenadas do centro das circunferências obtidas com os seus respectivos centros do modelo parcial. Se as condições de posição coincidirem com as do modelo aceita-se o scan para posterior localização, senão rejeita-se o scan em questão.

Após toda a análise anterior dos pilares circulares foi realizado mais um teste real no ambiente em causa para se poder validar todos os métodos até então aplicados e tentar quantificar a eficácia da identificação dos pilares circulares. Neste caso temos uma diferença em relação à primeira captura, pois o laser está mais alto.

Neste caso analisaram-se manualmente cada scan classificando os pilares circulares como bons ou maus. Assim o resultado da análise dos 3215 scans realizados encontram-se num ficheiro onde temos uma matriz de classificação dos pilares detectados com a seguinte forma:

- 1ªcoluna – critério de semelhança L/Le
- 2ªcoluna – raio da circunferência obtida pelo método de Riemann
- 3ªcoluna – coeficiente de correlação dos pontos linearizados
- 4ªcoluna – pseudo-coeficiente de correlação (distancia da média quadrática dos pontos à circunferência obtida)
- 5ªcoluna – classificação se é ou não pilar circular (1-pilar circular; 2-não é pilar circular)
- 6ªcoluna – numero do scan

Após o processo de classificação verificou-se que havia 101 scans onde não era detectado nenhum pilar circular. Para se certificar que não era erro do processo de classificação analisaram-se cada um destes casos individualmente. Concluiu-se que nos scans em causa não havia pilares circulares para detectar de modo que se pode afirmar que não houve falha no processo de detecção destes mesmos pilares.

Para além dos 101 scans onde não foi detectado nenhum pilar circular porque não havia nenhum para detectar, ainda existem mais 16 scans onde também não existem pilares circulares para detectar mas existem outros elementos que são classificados como tal. Assim podemos concluir que num universo de 3215 scans somente existem 17 scans onde a informação obtida pode estar completamente errada. A afirmação anterior não implica que nos outros scans não possa haver erros na classificação de pilares circulares, mas pelo menos temos a garantia que um dos identificados corresponde a um real pilar circular.

Em seguida faz-se a análise dos restantes scans onde foram detectados pilares circulares de modo a tentar minimizar tanto os erros de classificação dos pilares como a rejeição dos pilares efectivos. O objectivo seguinte será assim fazer uma análise distinta para os pilares verdadeiros e outra para os falsos pilares e comparar ambos e assim maximizar a eficiência de todo o processo de identificação.

Análise para os pilares verdadeiros:

- L/Le ou seja o chamado critério de semelhança:

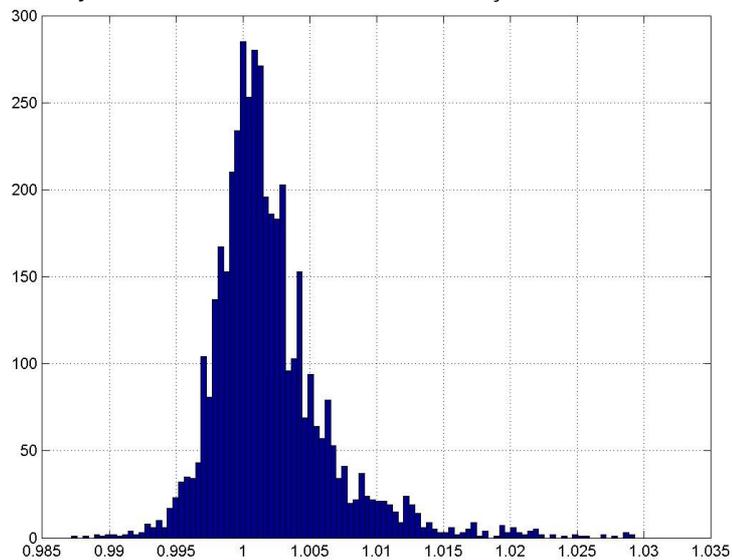


Figura 54 – Distribuição do critério de semelhança em pilares circulares

- Média de $L/L_E (X_m)$: **1.0020**
- Desvio padrão (σ): **0.0044**
- $2 \times \sigma = 0.0089 \Rightarrow 94.9226\%$
- $3 \times \sigma = 0.0132 \Rightarrow 98.1785\%$

- Raio estimado obtido pela esfera de Riemann:

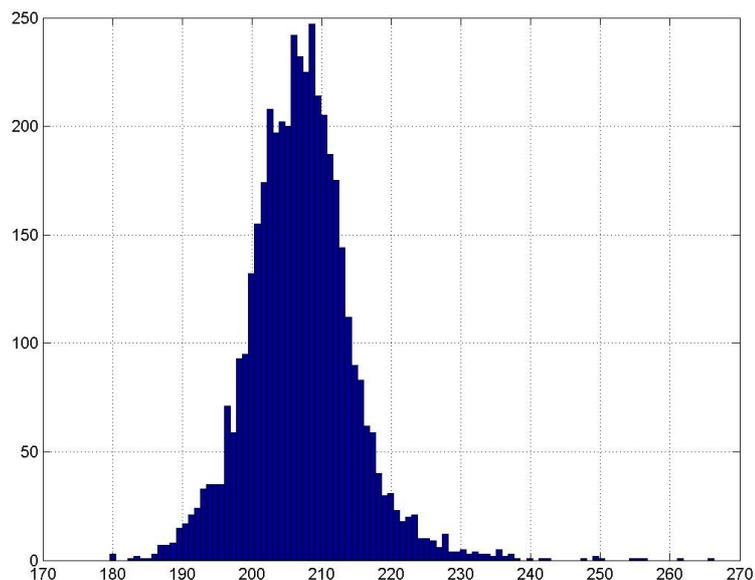


Figura 55 – Distribuição do raio obtido pelo método da esfera de Riemann em pilares circulares

- Média do Raio (x_m): **207.0892**

- Desvio padrão (σ): **7.6218**

- $2 \times \sigma = 15.2436 \Rightarrow 95.0137\%$

- $3 \times \sigma = 22.8654 \Rightarrow 98.8843\%$

- Coeficiente de correlação dos pontos linearizados

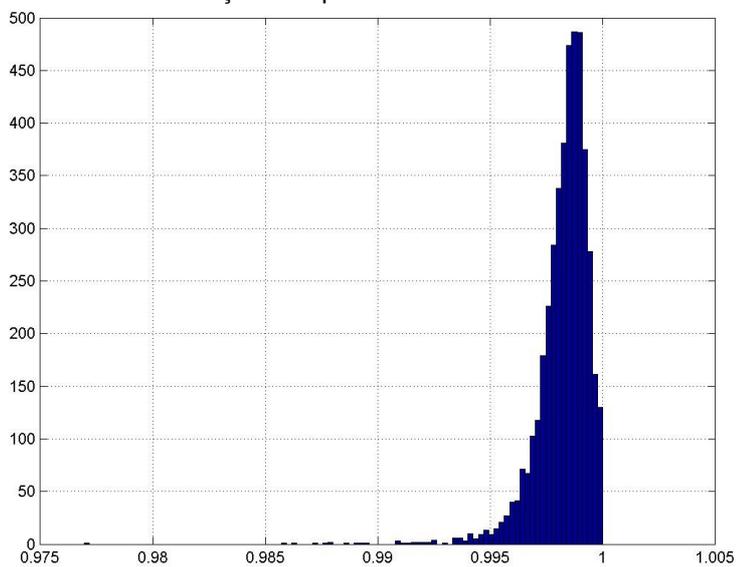


Figura 56 – Distribuição do coeficiente de correlação dos pontos linearizados

- Média do Raio (x_m): **0.9982**

- Desvio padrão (σ): **0.0013**

- $2 \times \sigma = 0.0026 \Rightarrow 96.8807\%$

- $3 \times \sigma = 0.0039 \Rightarrow 98.6111\%$

- Pseudo-Coefficiente de correlação (distância média quadrática dos pontos à circunferência encontrada)

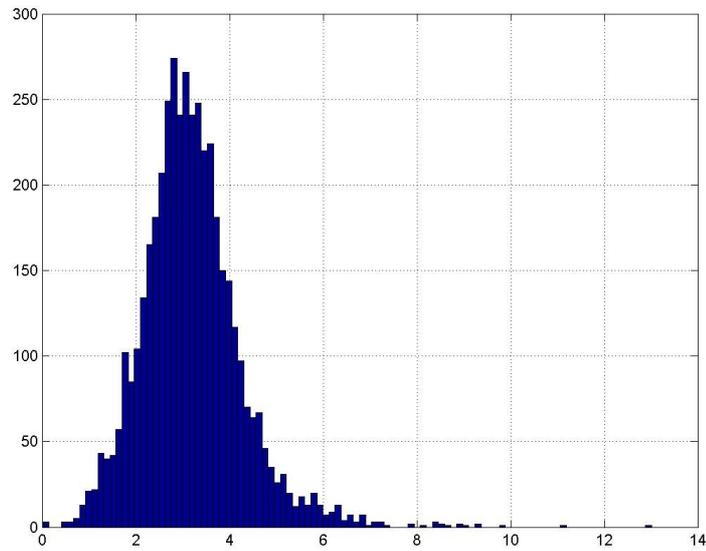


Figura 57 – Distribuição do pseudo-coeficiente de correlação

- Média do Raio (x_m): **3.1920**
- Desvio padrão (σ): **1.0709**
- $2 \times \sigma = 2.1418 \Rightarrow 95.4235\%$
- $3 \times \sigma = 3.2127 \Rightarrow 98.9754\%$

Análise para os pilares falsos:

- L/L_E ou seja o chamado critério de semelhança:

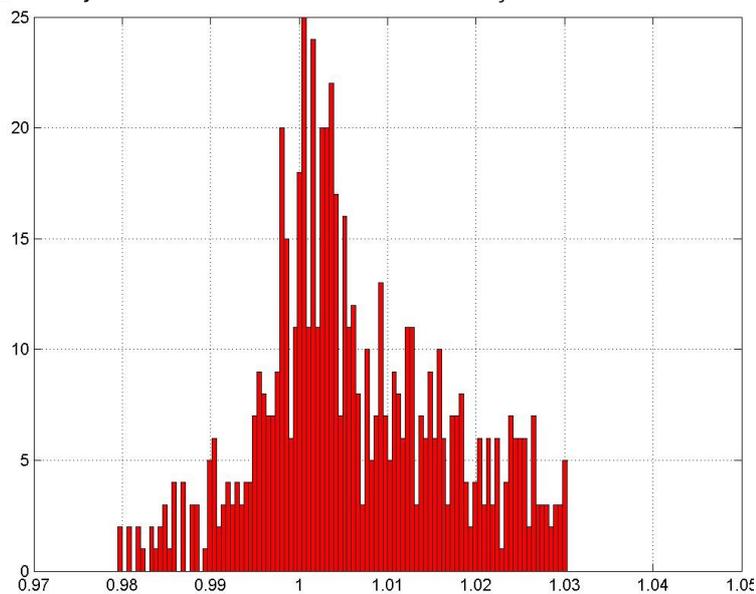


Figura 58 – Distribuição do critério de semelhança em pilares circulares

- Média de L/L_E (x_m): **1.0062**

- Desvio padrão (σ): **0.0106**
- $2 \times \sigma = 0.0212 \Rightarrow 94.7853\%$
- $3 \times \sigma = 0.0319 \Rightarrow 100\%$

- Raio estimado obtido pela esfera de Riemann:

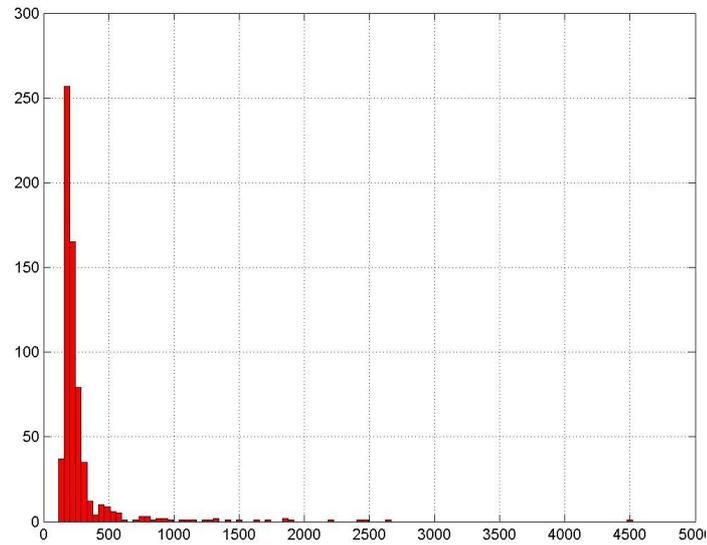


Figura 59 – Distribuição do raio obtido pelo método da esfera de Riemann em pilares circulares

- Média do Raio (x_m): **287.1656**
- Desvio padrão (σ): **320.1818**
- $2 \times \sigma = 640.3637 \Rightarrow 96.7791\%$
- $3 \times \sigma = 960.5455 \Rightarrow 97.5460\%$

- Coeficiente de correlação dos pontos linearizados

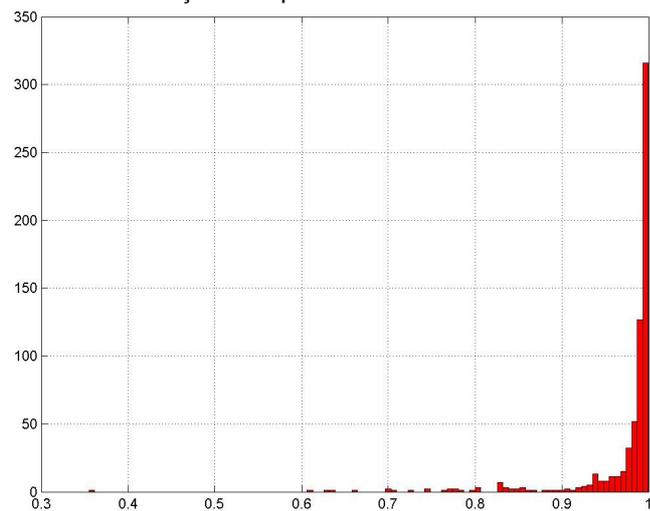


Figura 60 – Distribuição do coeficiente de correlação dos pontos linearizados

- Média do Raio (x_m): **0.9738**
- Desvio padrão (σ): **0.0587**

- $2 \times \sigma = 0.1174 \Rightarrow 94.3252\%$
- $3 \times \sigma = 0.1762 \Rightarrow 97.2393\%$

- Pseudo-Coefficiente de correlação (distância média quadrática dos pontos à circunferência encontrada)

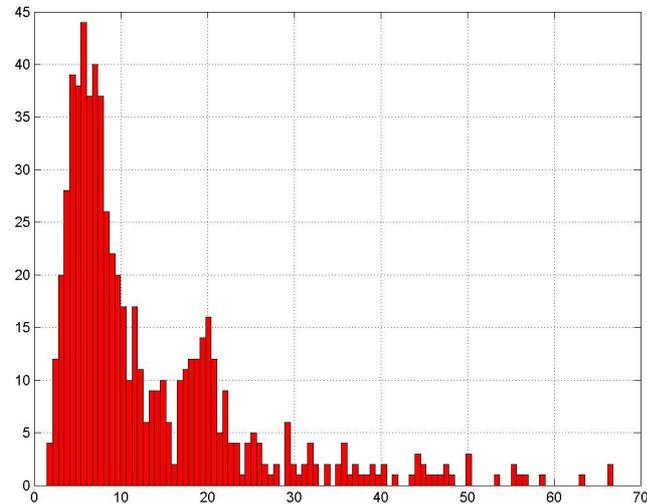


Figura 61 – Distribuição do pseudo-coeficiente de correlação

- Média do Raio (x_m): **13.1007**
- Desvio padrão (σ): **11.1195**
- $2 \times \sigma = 22.2389 \Rightarrow 94.0184\%$
- $3 \times \sigma = 33.3584 \Rightarrow 97.5460\%$

Como o objectivo é encontrar os valores limites para fazer a triagem dos dados que minimizem a eliminação de pilares verdadeiros e maximizem a rejeição dos falsos pilares representa-se em seguida a comparação entre as distribuições.

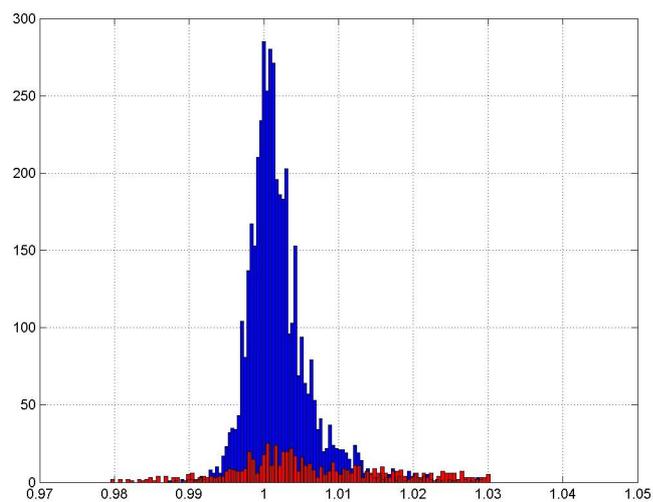


Figura 62 – Comparação das distribuições do critério de semelhança (azul - pilares verdadeiros; vermelho - pilares falsos)

Na figura 30, onde se representa a distribuição do critério de semelhança verifica-se que este método de triagem não conseguirá eliminar muito dos falsos pilares devido à forma das duas distribuições. Assim pode-se usar o intervalo obtido $x_m \pm 3\sigma$, ou seja, $[1.0020 \pm 3 * 0.0089]$ de forma a garantir a detecção de 98.18% dos pilares verdadeiros.

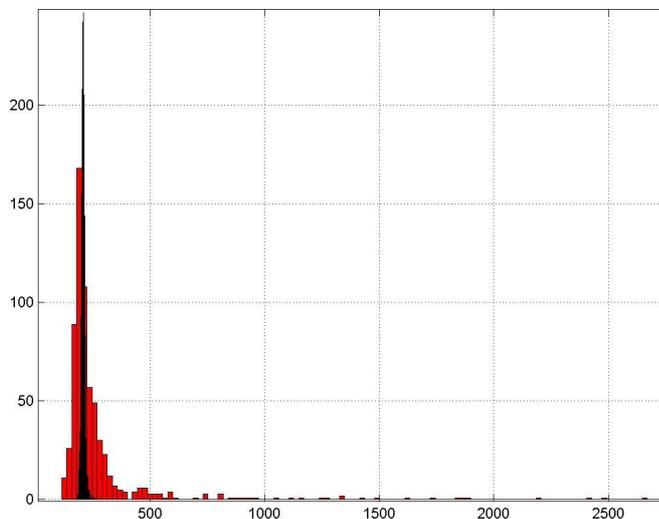


Figura 63 – Comparação das distribuições do raio obtido pelo método da esfera de Riemann (preto - pilares verdadeiros; vermelho - pilares falsos)

O valor do raio obtido pelo método da esfera de Riemann, de acordo com a figura 31 pode eliminar muitos dos falsos pilares detectados. Assim mais uma vez o intervalo a usar para fazer a triagem será $x_m \pm 3\sigma$, ou seja, $[207.09 \pm 3 * 7.6218]$ de forma a garantir a detecção de 98.88% pilares verdadeiros.

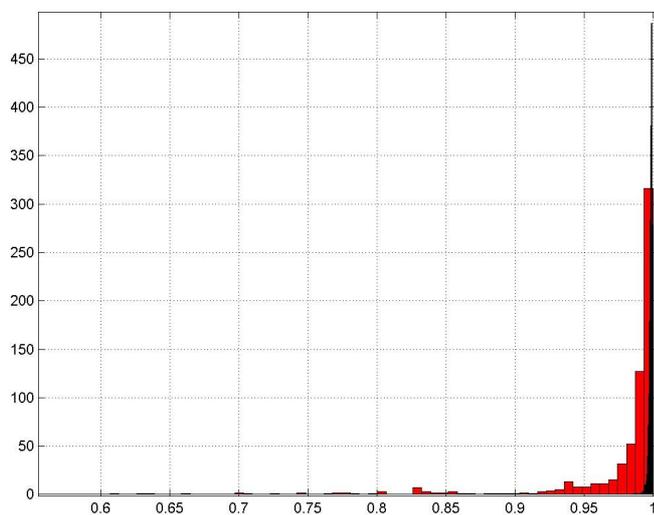


Figura 64 – Comparação das distribuições do coeficiente de correlação dos pontos linearizados (pretos - pilares verdadeiros; vermelho - pilares falsos)

Em relação às distribuições do coeficiente de correlação verifica-se que estas têm a mesma tendência não se conseguindo eliminar um grande número de pilares não circulares. Como este coeficiente de correlação também não representa o real valor do coeficiente dos pontos em relação à circunferência obtida pelo método da esfera de Riemann não vai ser usado como método de triagem de pilares circulares.

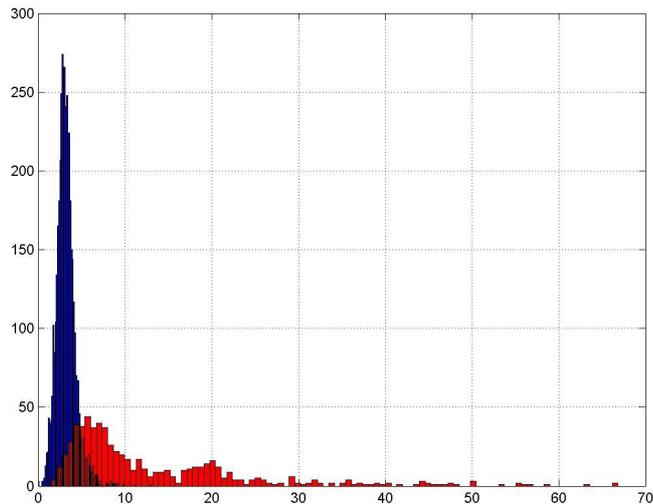


Figura 33 – Comparação das distribuições do pseudo-coeficiente de correlação dos pontos (azul - pilares verdadeiros; vermelho - pilares falsos)

Por fim tem-se o método do pseudo-coeficiente de correlação que não representa mais que o valor da distância média quadrática dos pontos à circunferência encontrada pelo método da esfera de Riemann. O que se verifica da análise visual da figura 33 é que com este método é possível eliminar um grande número de falsos pilares já que as duas distribuições se encontram um pouco desfasadas. Assim também neste caso se usará $x_m \pm 3\sigma$, ou seja, $[3.1920 \pm 3 * 1.0709]$ de forma a garantir a detecção de 98.98% pilares verdadeiros.

3.3.4.3- Detecção de pilares rectangulares

Para a detecção dos pilares rectangulares também se usou os dados da segunda captura de dados. Assim a primeira coisa que se fez neste caso de detecção de pilares rectangulares foi começar o processo de detecção todo do zero, ou seja, tem-se como objectivo pegar novamente nos dados originais calcular de novo o gradiente e com base neste extrair os candidatos a features. O que se pode afirmar é que esta abordagem esta muito longe de ser óptima porque já se deveria levar em conta as features que se identificaram com o método anterior de detecção de pilares circulares e não se fazer o teste novamente se são ou não pilares rectangulares.

Aparte disso descreve-se o que foi feito para se proceder à identificação de candidatos a features rectangulares. Inicialmente foi necessário modificar um pouco o método de segmentação de um scan completo de forma a garantir uma maior percentagem de identificação de pilares rectangulares.

O principal problema para a alteração deste método de segmentação foi a existência de painéis de delimitação de obras que se encontram encostados os pilares rectangulares. O problema é que de acordo com o método do gradiente usado para a detecção de pilares circulares todos os pilares rectangulares que se encontrem encostados aos painéis de protecção e delimitação das obras em curso não eram detectados como se pode ver no exemplo seguinte.

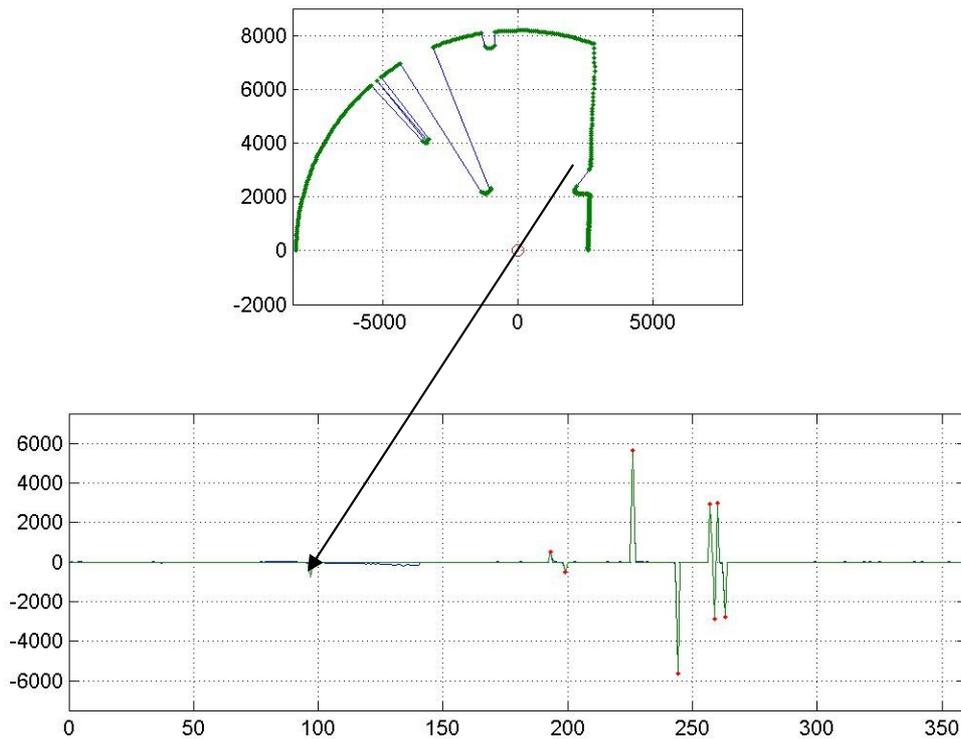


Figura 65 – Esquema representativo do scan e respectiva distribuição do gradiente do scan 242 da segunda captura de dados.

Este caso representa um scan onde existe painéis delimitativos de uma obra que se encontram encostados a um pilar circular fazendo com que o método de segmentação não identifique o possível candidato a pilar ou seja a possível feature. Em mais pormenor pode-se descreve-se em seguida porque é que o método em causa não detecta a possível feature.

Figura 66 – Esquema representativo a) do lado esquerdo a segmentação de uma feature devido a esta se encontrar isolada e b) do lado direito a não segmentação da feature por se encontrar encostada em painéis.

O que se pode verificar na figura em cima do lado esquerdo é que segundo o método do gradiente esta feature era detectada devido a esta se encontrar isolada permitindo que os critérios usados no método do gradiente sejam cumpridos. Para ser considerado um candidato a feature seria necessário existir um gradiente positivo seguido de um gradiente negativo de uma determinada ordem de grandeza o que se verifica no caso mais à esquerda. Pode se verificar que entre o ponto 2 e 3 existe um gradiente de uma dimensão onde se pode considerar que poderá ser o início de uma feature. Já no caso mais à direita isto já não se verifica porque o valor do gradiente mínimo para ser considerado não é atingido ou seja a distancia entre o ponto 2 e 3 da figura da direita não é suficientemente grande para ser considerado uma descontinuidade e um possível candidato a feature.

O problema deste tipo de abordagem pode não ser muito critico quando este tipo de situações ocorre no meio de um scan, mas é fatal quando acontece a situação do scan da figura antes da anterior que onde os painéis de protecção começam numa extremidade do scan.

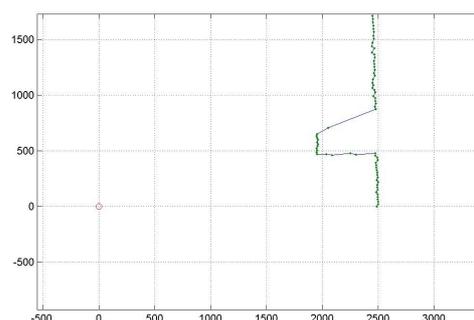
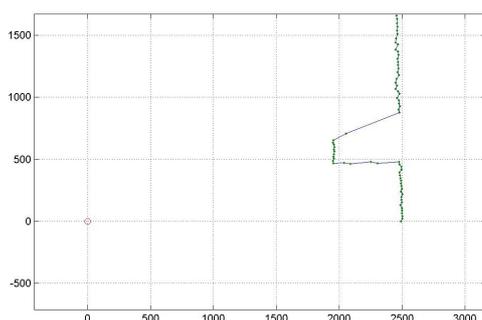
A solução encontrada para esta caso foi considerar no método do gradiente que o primeiro e o último valor de gradiente eram respectivamente um gradiente positivo e um negativo. Apesar de neste método ignorarmos o valor do primeiro e ultimo gradiente não vamos mudar significativamente os resultados. Se impusermos um gradiente positivo logo no ponto inicial podem surgir varias situações:

1 - Se o gradiente real era positivo e foi considerado também como positivo mas com outro valor não altera o resultado final independentemente do valor do próximo gradiente que surja porque o objectivo é definir somente onde começa e acaba a feature.

2 - Se o gradiente real era negativo e foi considerado como positivo pode acontecer o caso de nos gradientes seguintes aparecer outro negativo o que vai fazer com que haja a definição de uma feature o que é correcto. Também pode acontecer o caso de a seguir ao gradiente ao considerado gradiente positivo venha outro positivo, o que implicará que o anterior será ignorado.

3 - Por fim pode acontecer se não existe gradiente real inicial, este ser considerado gradiente positivo. Esta é a situação que se representa em cima e que vai permitir então extrair uma feature para posterior análise.

Se os pontos em cima explicam a razão de ter um gradiente positivo no início do scan esses mesmos pontos também explicam a razão de se ter de considerar o último gradiente como negativo. A título representativo apresenta-se em baixo o que é considerado feature utilizando este método.



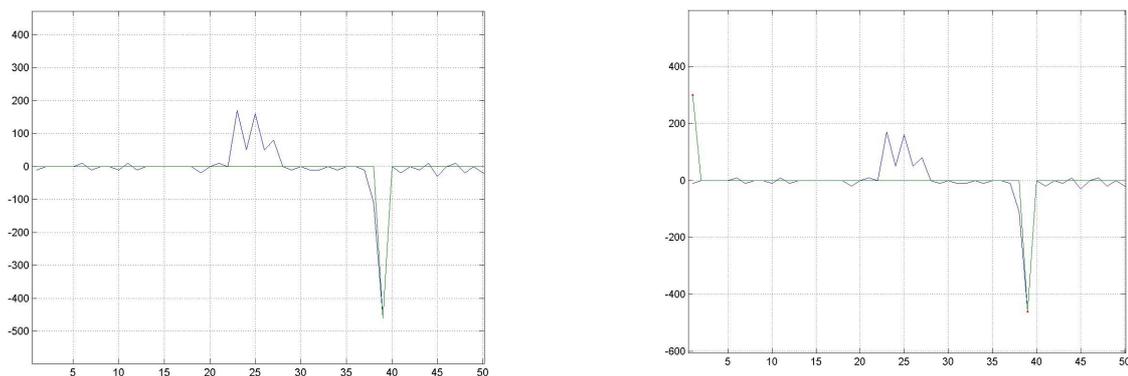


Figura 67 – Scan 248 do lado esquerdo apresenta-se o método do gradiente usado até então e do lado direito o resultado da introdução do valor do gradiente positivo inicial.

Logo neste caso vai ser considerado uma feature desde o início do scan até ser encontrado o primeiro gradiente negativo o que garante a detecção do pilar que se encontra no scan. Após esta alteração na segmentação para se seja possível a detecção do maior número de pilares possível, ou seja diminuir a rejeição de pilares passou-se à identificação efectiva dos pilares rectangulares.

Inicialmente como no caso anterior faz-se uma pequena triagem das features que só têm um ponto a definir a sua largura eliminando-se estes, ficando com os efectivos candidatos a pilares rectangulares.

O método de identificação de pilares rectangulares passa por dividir inicialmente a feature em segmentos de recta para posterior identificação. O método para dividir a feature em vários segmentos de recta baseia-se em primeiro unir os pontos extremos do elemento com uma recta. Após a definição da recta é necessário calcular a distância de cada uma dos pontos pertencentes ao elemento a essa mesma recta. Define-se um limite máximo de desfasamento que podemos obter e vai-se verificar se algum valor de distancia obtido é maior que esse limite. Se for acha-se o máximo e divide-se o segmento inicial em dois. Volta-se a calcular a distância de cada um dos pontos ao segmento e volta-se também a testar o valor máximo do desfasamento. Se o valor máximo pré-estabelecido for ultrapassado volta-se a dividir de novo o segmento, mas se esse valor não for atingido considera-se que temos uma recta bem definida. Isto só é possível implementar em software usando para tal uma função recursiva.

Descrição breve do algoritmo implementado: ...

Com este processo cada feature para posterior análise. Nesta análise tem-se como objectivo verificar se a feature em causa cumpre determinados requisitos de forma a esta ser considerada um pilar circular.

O primeiro passo foi assim calcular o declive de cada um dos segmentos de recta resultantes para se calcular o ângulo entre dois consecutivos. Deve-se lembrar que estes segmentos de recta são definidos somente pelos seus pontos extremos. O que verificou foi que o valor do ângulo obtido encontrava-se dentro de um intervalo relativamente grande havendo diferenças de ângulos entre o teórico e o real superiores a 10° . Como este método só leva em consideração os extremos desprezando os elementos restantes, pensou-se em fazer inicialmente uma regressão linear com os pontos que definem um segmento de recta e posteriormente comparar os seus declives para que o erro final obtido diminui-se.

Analisando todo o universo de amostras da segunda captura de dados o resultado obtido foi o seguinte, já que se classificou os elementos detectados como sendo os efectivos ou não pilares rectangulares aos quais se armazenaram também algumas das principais características que vão servir para classificação e identificação dos pilares rectangulares. Assim tem-se uma matriz com a seguinte estrutura:

1ª Coluna – ângulo entre as rectas definidos pelos pontos extremos

2ª Coluna – ângulo entre as rectas obtidas por regressão linear de todos os pontos

- 3ª Coluna – comprimento do menor segmento ou seja distância euclidiana entre os dois extremos
- 4ª Coluna – comprimento do maior segmento
- 5ª Coluna – numero do scan em questão
- 6ª Coluna – classificação visual e manual dos pilares rectangulares (1-pilar verdadeiro / 2-pilar falso)

Antes de ser feita a classificação dos pilares foram impostas algumas regras e limites logo a partida como é o caso de serem necessários pelo menos três pontos para que o segmento de recta possa ser considerado como tal. Ainda foi necessário estipular um intervalo para o ângulo e para o comprimento dos segmentos a encontrar de forma a eliminar o maior número de pilares falsos. Deste modo foi considerado que os valores dos ângulos obtidos na coluna 1 tinham de estar compreendidos entre 65° e 105°, assim como o segmento menor entre 100 e 300 mm e o segmento maior entre 425 e 575. A escolha dos valores e amplitude dos intervalos não obedecem a nenhuma regra simplesmente foram obtidos ou considerados através do bom senso.

Mas para que a definição dos intervalos que servem para fazer a triagem dos verdadeiros pilares rectangulares representa-se em seguida a distribuição dos respectivos valores que se encontram na matriz global:

1º Caso – ângulo entre as rectas definidas pelos pontos extremos

Verifica-se que neste caso como somente se utiliza os pontos extremos de um segmento que representa um conjunto de pontos existe informação que é ignorada. Mas os resultados obtidos foram os seguintes:

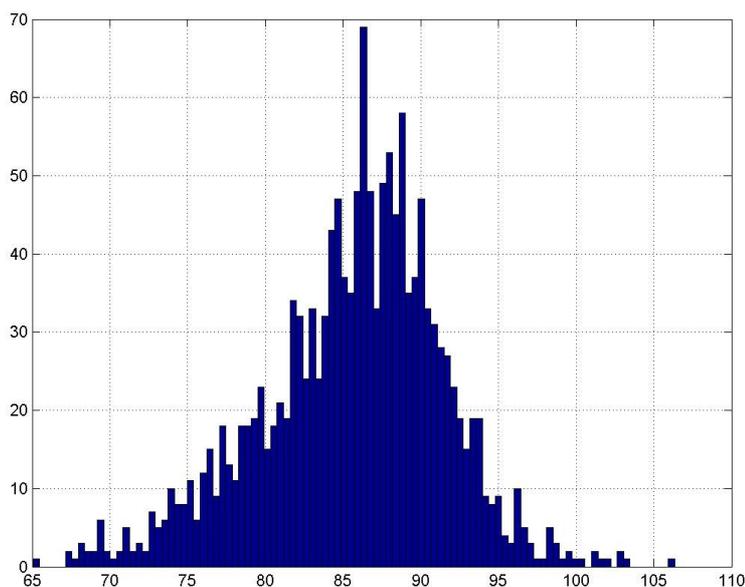


Figura 68 – Distribuição do valor do ângulo obtido usando o método das rectas obtidas por regressão linear

Tem-se como a valor médio entre os segmentos em questão 85.597°.

O que se pode concluir da análise visual do gráfico, é que existe uma maior probabilidade de se encontrarem valores inferiores a 90°. Verifica-se também que não é necessário que o limite superior do intervalo seja um valor tão elevado podendo se considerar como o valor de 106.35 que foi o valor máximo obtido da análise de 3440 scans.

2º Caso – ângulo entre as rectas obtidas por regressão linear de todos os pontos

Mais uma vez refere-se a necessidade de implementar um sistema que leve em consideração todos os pontos de forma a todos eles de uma forma global contribuam para uma diminuição do erro no resultado final.

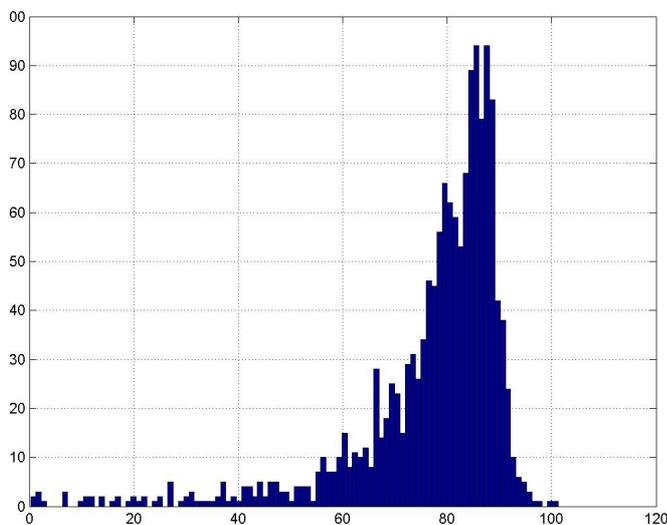


Figura 69 – Distribuição do valor do ângulo obtido usando o método das rectas obtidas por regressão linear

Tem-se como a valor médio entre os segmentos em questão 77.092° .

O que se verifica neste caso é uma maior dispersão da distribuição fazendo com que o valor médio obtido seja inferior ao anterior.

Neste caso também surgiu um problema de implementação do algoritmo para o cálculo da regressão linear. Os parâmetros das rectas, ou seja, as rectas que se obtêm em alguns casos não minimizam efectivamente a soma das distâncias quadráticas. Este fenómeno surge pelo facto de se tentar encontrar uma recta que melhor se ajuste a um conjunto de pontos que se encontram praticamente na vertical. Verificou-se que as rectas obtidas usando o método anterior tinham um coeficiente de correlação muito baixo o que confirma a teoria de não ser possível a implementação deste método em determinadas situações. Então a solução passou por rodar todos os pontos 90° de forma a determinar-se os parâmetros da recta que efectivamente melhor se ajusta aos pontos. Desta forma verificou-se que o valor para o coeficiente de correlação da recta obtida aproxima-se do esperado, ou seja, apresenta um valor próximo da unidade. Podemos verificar esta situação no exemplo seguinte (scan 162).

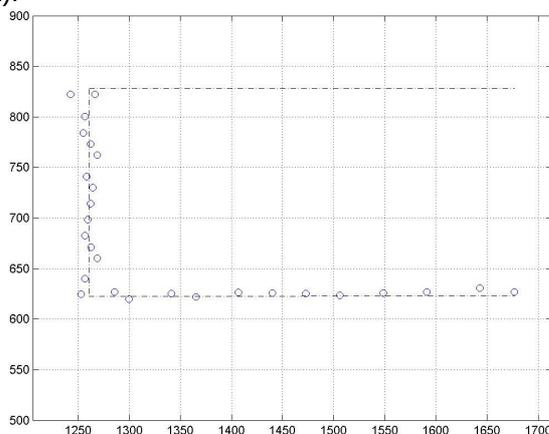


Figura 70 – Figura representativa do scan 162 onde se encontra com círculos azuis os valores obtidos através do laser e a tracejado uma simples representação do possível pilar para melhor compreensão da figura

Na figura anterior representou-se de uma forma empírica o pilar que deu origem aos pontos. Mas, para verificarmos se efectivamente os pontos obedecem a uma determinada distribuição sendo assim necessário segmentar a feature para posteriormente calcular regressão linear para cada um dos segmentos obtidos.

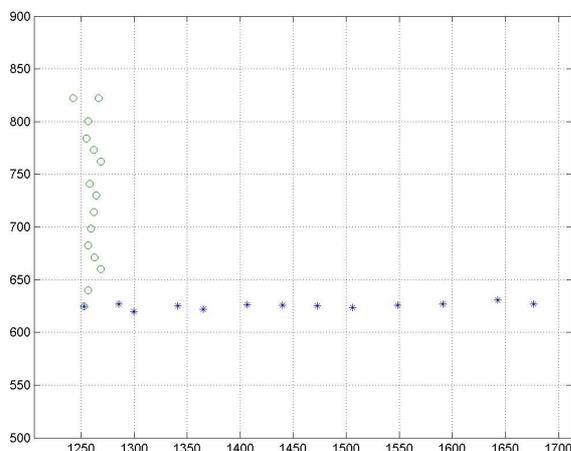


Figura 71 – Figura onde se representa o resultado do processo de segmentação obtendo-se dois grupos de pontos que posteriormente vão definir os dois segmentos de recta da feature.

Aplicando directamente o método dos mínimos quadrados para encontrar a melhor recta segundo este critério obteve-se o seguinte:

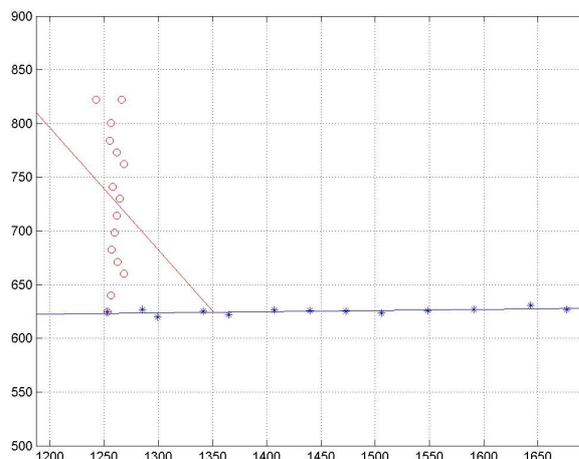


Figura 72 – Figura onde se representa as rectas obtidas pelo processo de regressão linear.

Como se pode verificar de uma simples análise visual, na figura anterior a recta que se obtém do conjunto de pontos a vermelho não parece ser aquela que efectivamente minimiza a soma das distâncias quadráticas. Se analisarmos os parâmetros da recta obtidos verificamos que o valor do coeficiente de correlação linear obtido é $r^2=0.01394$ ($r = -0.11807$). Como se pode concluir a qualidade da recta obtida em relação aos pontos originais não é a mais desejada isto porque um valor tão pequeno para o coeficiente de correlação linear implica que a existência de uma grande dispersão no pontos. Como exemplo apresenta-se na figura seguinte alguns casos onde se verifica que quanto mais próximo da unidade for o valor do coeficiente de correlação linear menor é a dispersão dos pontos em relação à recta obtida.

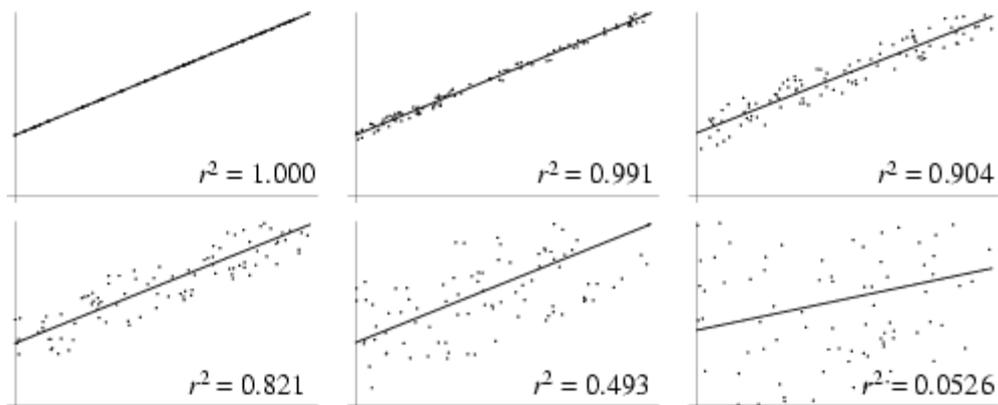


Figura 73 – Figura onde se representa exemplo de rectas obtidas utilizando o método de regressão linear e respectivo coeficiente de correlação.

Já não se pode afirmar o mesmo do conjunto de pontos azuis onde a recta correspondente já apresenta características de que efectivamente esta minimiza a distância quadrática a todos os pontos.

Mas, para tentar resolver o problema do primeiro caso onde não se obtêm a recta esperada (recta aproximadamente vertical) fez-se a seguinte abordagem:

1. Representação da recta obtida com os dados originais

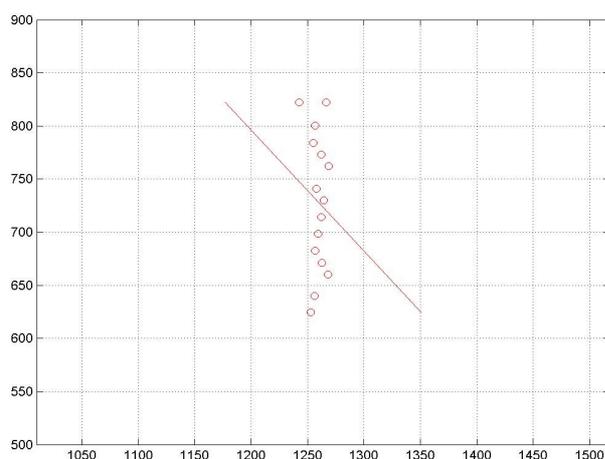


Figura 74 – Figura onde se representa a recta obtida pelo processo de regressão linear com os dados originais.

Equação da recta:

$$y = -1.13715x + 2160.67119$$

$$r^2 = 0.01394$$

2. Representação da recta obtida com uma rotação dos dados originais de 90° o mesmo será dizer $(x', y') = (-y, x)$

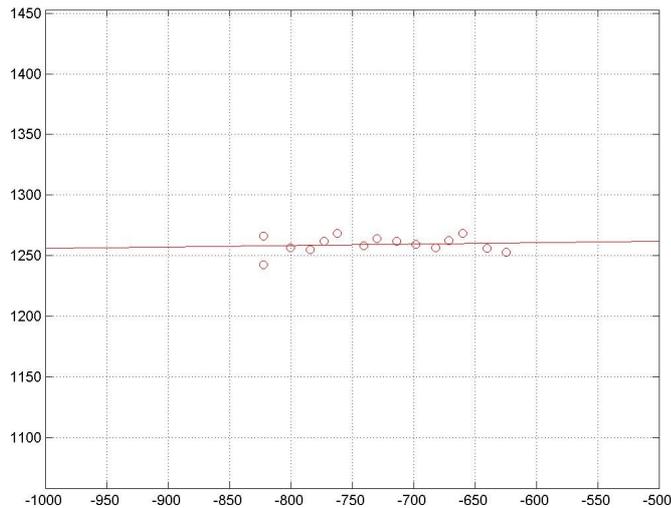


Figura 75 – Figura onde se representa a recta obtida pelo processo de regressão linear dos pontos com rotação de 90° em relação os dados originais.

Equação da recta:

$$y = 0.01226x + 1268.39718$$

$$r^2 = 0.01394$$

Como se pode verificar a recta obtida parece ser a recta que efectivamente minimiza a distância quadrática média aos pontos apesar do coeficiente de correlação apresentar um valor muito baixo, que significa uma aproximação dos pontos à recta de fraca qualidade.

3. Rotação de -90° da recta obtida no caso anterior (com uma rotação dos dados originais de 90°)

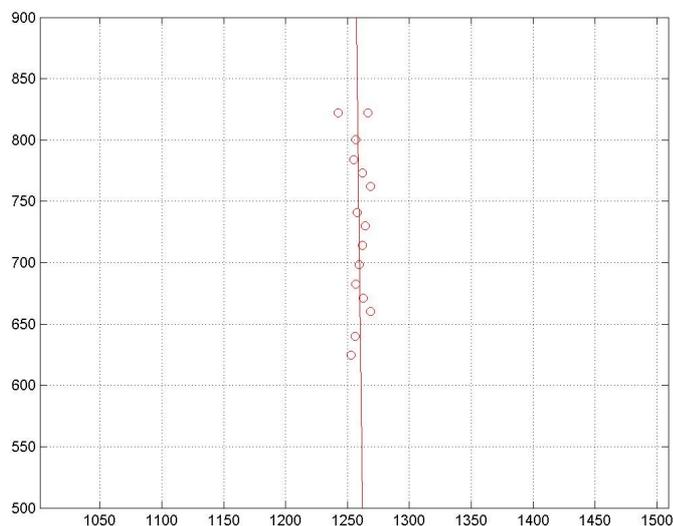


Figura 76 – Figura onde se representa a recta obtida pelo processo de regressão linear dos pontos com rotação de 90° em relação os dados originais.

Equação da recta:

$$y = -81.560580x + 103451,209840$$

Se analisarmos os pontos 1 e 2 verificamos que o coeficiente de correlação linear dos dois casos é igual. Mas após a representação do ponto 3 verificou-se que a recta resultante não correspondia à obtida em 1, apesar de terem o mesmo coeficiente de correlação linear. Põe-se

assim em questão a utilização do coeficiente de correlação como parâmetro de avaliação da qualidade do resultado obtido. Segundo análise visual parece que no 3º caso a recta obtida se encaixa melhor do que no 1º ponto, parecendo que a soma das distâncias quadráticas dos pontos à recta é inferior. Na realidade foi-se calcular este valor e o resultado vem de encontro ao esperado.

Soma da distancia quadrática dos pontos à recta:

Caso 1. 25377

Caso 3. 627

Após análise de alguns casos da mesma natureza verificou-se que se obtêm melhores resultados quando se aplica o método da rotação acima descrito conseguindo-se minimizar desta forma a soma da distância quadrática dos pontos à recta obtida. Deste modo será possível levar em consideração todos os pontos de forma à obter-se uma maior fiabilidade dos resultados, o que não seria possível obter levando somente em consideração os extremos de cada segmento de recta.

Ao longo da análise mais pormenorizada dos dados verificou-se que havia em alguns casos uma má definição do canto que constitui o elemento. O mesmo será dizer que probabilidade de se obter no scan o ponto que define a extremidade do elemento é muito diminuta, obtendo-se na maioria dos casos um ponto que pertence a uma das faces do elemento. Para além disto, relembra-se que a definição de ponto de canto baseia-se somente no método da distância máxima do ponto à recta definida pelas extremidades do elemento. Esse ponto vai assim ser considerado o canto do elemento apesar de ele na realidade pertencer a um dos segmentos do elemento introduzindo erros no cálculo de alguns parâmetros principalmente no cálculo do declive dos segmentos de recta. Na figura seguinte apresenta-se dois casos distintos onde se ilustra esses mesmos problemas de má definição do canto.

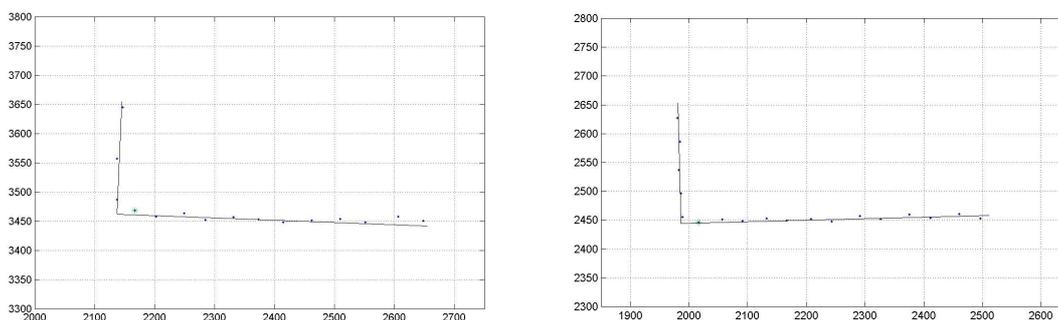


Figura 77 – Figura onde se representa a definição do canto do elemento.

Se fizermos uma simples análise dos dois casos verificamos que o problema da definição do canto tem tendência a ser minimizado, ou seja, a induzir um erro cada vez menor à medida que se aproxima do elemento, concluindo-se assim que quanto mais afastado tiver o elemento maior será o erro induzido aos parâmetros calculados (declive dos segmentos de recta, comprimento dos segmentos de recta e ângulo entre os segmentos de recta).

Nos exemplos propostos foram desenhadas umas rectas (sem recorrer a qualquer critério, somente usando análise visual e bom senso) de forma a ilustrar que o ponto que foi escolhido como canto não é efectivamente esse ponto. Como se verifica o critério de escolha do ponto de canto ou de descontinuidade dos segmentos de rectas pode ser insuficiente apresentando algumas particularidades como se pode ver na figura seguinte.

Figura 78 – Figura onde se tenta representar a diferença de probabilidade do ponto que define o canto se encontrar no segmento de maior dimensão.

Como se pode verificar o ponto que vai definir o canto tem uma maior probabilidade de se encontrar no segmento de maior dimensão.

Por outro lado quando se utiliza o critério que leva em conta a distancia dos pontos ao segmento de recta definidos por os extremos do elemento, definindo como canto aquele ponto que tem a maior distancia, pode acontecer o caso de este ponto estar mais afastado do canto real que outro elemento vizinho. Ver figura seguinte.

Figura 79 – Figura onde se representa um exemplo onde o elemento que tem a distância máxima ao segmento não é efectivamente o mais próximo do canto real.

Como se pode verificar neste caso o ponto verde encontra-se mais afastado que o ponto azul do canto. Mas apesar disso segundo o critério em causa é o ponto verde que é escolhido como o ponto de canto. O que verifica posteriormente é um maior erro no cálculo dos parâmetros do pilar circular. Todos estes exemplos são teóricos mas têm como objectivo mostrar a real probabilidade dos fenómenos em causa.

Deste modo para complementar o critério, decidiu-se analisar numa pequena vizinhança do ponto definido como canto as distancias destes à origem, ou seja ao robô, porque o ponto que estiver mais próximo do robô é que será aquele que efectivamente minimiza o erro dos cálculos pois o mais próximo do canto efectivo. Na Figura 80 prova-se que o ponto mais próximo do robô pode não ser o que se encontra mais perto do canto real, mas verifica-se ao longo da análise da dados reais que este método trás uma melhor definição do pilar rectangular.

Figura 80 – Figura onde se representa que o canto real é o ponto que apresenta a distância menor ao ponto de origem.

Na figura anterior verificamos que efectivamente o canto real entre dois segmentos em relação a um ponto caracteriza-se por ter a menor distancia a esse mesmo ponto. Mas é muito importante referir que se não for definido o ponto do canto (que é sempre o nosso caso pois não se pode afirmar que um ponto é efectivamente o canto), o ponto que apresentar a menor distancia à origem pode não ser aquele que mais próximo está do canto real. A única coisa que se pode afirmar é que os resultados em dados reais melhoram aquando da aplicação deste método, apesar de existir uma maior probabilidade de se estar a definir um ponto mais afastado do canto real. É importante ainda referir o facto do caso em cima ilustrado reflecte um caso ideal, porque na realidade o ponto de origem não se pode encontrar tão perto do pilar em causa devido às dimensões do robô e espaço necessário para se fazer navegação com segurança, sendo necessário garantir um maior espaço entre os dois para evitar colisões diminuindo deste modo a probabilidade de este fenómeno acontecer.

Figura 81 – Figura onde se representa a zona de maior probabilidade de navegação e zona a partir do qual será possível detectar um pilar rectangular.

A curva representada por pontos na figura anterior advém de um desenvolvimento que se apresenta em seguida, segundo o qual será possível definir o segmento menor do pilar rectangular com 3 pontos. Ou seja delimita a zona a partir da qual será tecnicamente possível detectar um pilar rectangular.

Figura 82 – Figura base para o desenvolvimento da equação seguinte.

$$d = D1 - D0$$

$$\tan \alpha = \frac{D0}{C} \quad \alpha = \tan^{-1} \left(\frac{D0}{C} \right)$$

$$\tan(\alpha + \theta) = \frac{D1}{C} \quad C \times \tan(\alpha + \theta) = D1$$

$$\text{Assim} \quad d = C \times \tan \left(\tan^{-1} \left(\frac{D0}{C} \right) + \theta \right) - D0$$

No caso limite tem-se:
d=200 mm

$$\theta=1^\circ$$

$$200 = C \times \tan \left(\tan^{-1} \left(\frac{D0}{C} \right) + 1 \right) - D0$$

Assim variando o valor de C entre 500 e 2500 mm acha-se o valor de D0

Apesar disto implementou-se o método onde inicialmente se define o elemento do conto como aquele que é calculado pelo método da maior distancia ao segmento definido pelos dois extremos sendo este posteriormente testado com os seus dois vizinhos um de cada lado, de forma a escolher aquele que apresente a menor distancia ao ponto de origem. O mesmo método foi implementado na definição de canto quando o pilar se encontra encostado a painéis mas em vez de se considerar o ponto que apresenta a menor distancia é aquele que apresenta a maior distancia. Como reflexo dos bons resultados obtidos apresentam em seguida um exemplo onde este método trouxe vantagens significativas.

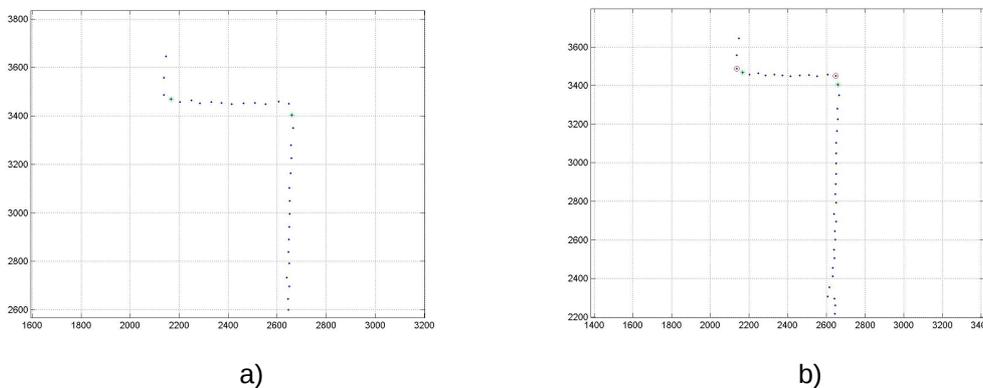


Figura 83 – Figura representativa dos dois diferentes métodos de classificação de um ponto como canto. No lado esquerdo o critério da maior distancia à recta definida pelos dois extremos do elemento e à direita suplementado com o critério da menor distancia ao ponto de origem numa dada vizinhança

Como se pode verificar na figura anterior a) a definição dos pontos de canto usando o critério da maior distancia à recta definida pelos extremos do segmento não parecem ser aqueles que mais se aproximam do canto real. Já na b) da mesma figura pode-se verificar em círculos vermelhos quais os pontos que seriam considerados como ponto de canto usando o método que avalia a distancia do ponto de origem aos pontos e seus vizinhos que foram obtidos no método anterior. Ou seja, este segundo método não é mais que um suplemento trazendo em algumas situações melhoria para que o erro dos parâmetros a calcular seja menor.

Por fim pode-se afirmar que como existe uma maior probabilidade de se definir o ponto do canto o ponto de segmento de maior dimensão existe consequentemente uma maior probabilidade de erro no cálculo da inclinação do segmento de recta menor (vertical) porque existe uma maior probabilidade de se encontrar um ponto que não pertence a este segmento. Para agravar ainda mais este calculo onde se utiliza o método dos mínimos quadrados, o segmento é definido por um pequeno número de pontos sendo o peso de cada um deles muito elevado obrigando a recta resultante a ter uma inclinação maior que efectivamente se previa. Logo a uma distância de 3,5 metros como se pode ver na figura onde se representa o scan 237 a inclinação do segmento resultante da aplicação do método da regressão linear é fortemente condicionado por a posição de um só ponto porque este é somente definido por 4.

Assim a forma mais simples de mostrar que efectivamente todos estes pormenores influenciam de uma forma tendenciosa para que o elemento do canto seja um elemento do segmento de maior dimensão é representar a distribuição da inclinação da recta do segmento de menor dimensão, ou seja vertical.

O método da vizinhança como já foi referido consiste em utilizar o ponto de canto definido pelo método da maior distancia entre cada ponto e a recta definida pelos dos extremos do elemento, e os dois vizinhos, um de cada lado e verificar de entre os três pontos qual é que se encontra mais perto no caso de definição de um canto convexo ou o mais longe no caso de definição de um canto concavo em relação do laser colocado no robô. Apesar da terminologia não ser a mais correcta considera-se neste contexto como canto convexo e canto concavo de acordo com a figura seguinte.

Figura 84 – Figura representativa da terminologia utilizada para diferenciar dois tipos de canto convexo e côncavo.

Mas, a aplicação deste novo método viria a trazer problemas adicionais, a um outro problema ignorado até então, que é a definição dos extremos de um elemento (border-points). Então explicar-se-á em seguida o problema dos border-points e em seguida que influência estes terão na aplicação do método da vizinhança nestes pontos no resultado final.

O problema da definição dos pontos extremos é um problema de ordem tecnológica inerente ao próprio laser. O problema reside no facto do feixe laser fazer um determinado cone de abertura que leva o contacto e reflexão não se realize num simples ponto mas numa superfície. Se esta superfície pertencer sempre ao mesmo plano em princípio a energia reflectida vai ser toda integrada e faz com que a medida obtida seja a medida efectiva. Mas, se a superfície de contacto tiver dois planos distintos os resultados obtidos não reflectem a medida de nenhum dos planos induzindo em erro.

Assim demonstra-se em seguida exemplos onde este efeito dos border-points é visível.

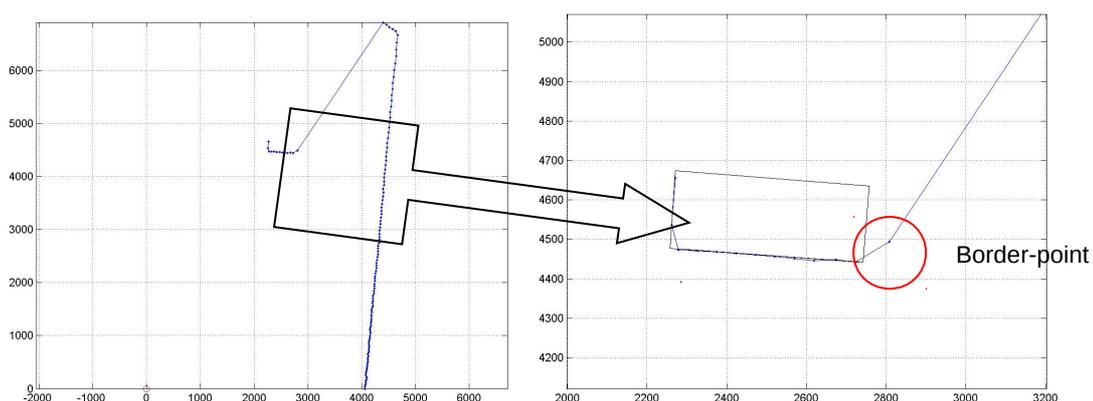


Figura 85 – Figura onde se representa o problema dos pontos extremos.

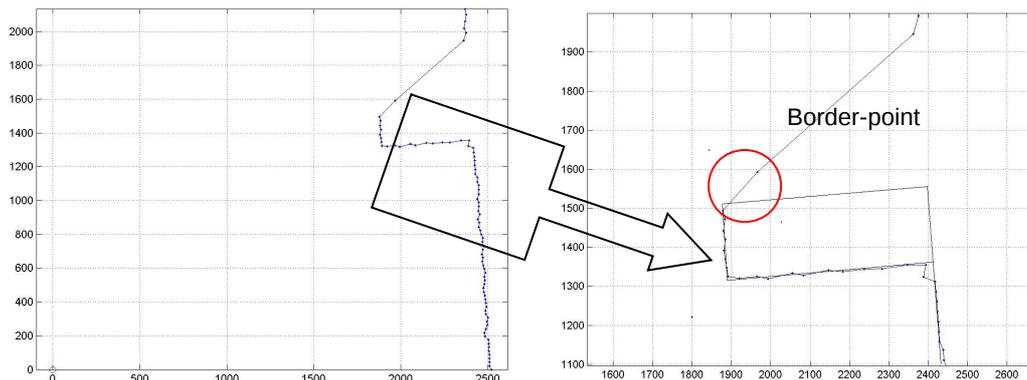


Figura 86 – Figura onde se representa o problema dos pontos extremos.

Verifica-se em ambos os casos os pontos que se encontram dentro da circunferência vermelha não representam nenhum contorno de um elemento já como se pode ver na figura os pontos vizinhos a estes definem elementos completamente distintos.

Apesar de este tipo de pontos representar algo que efectivamente não existe, não era de todo muito significativo porque no método de segmentação utilizado para dividir um elemento em vários segmentos de recta a maior parte deixam de ser considerados porque formam outros segmento mais pequenos. Ilustra-se em seguida uma destas situações.

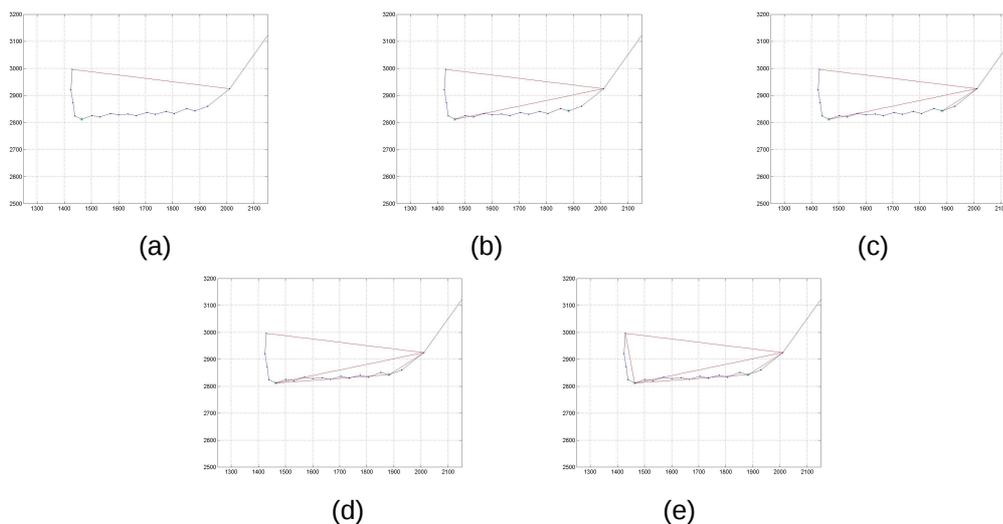


Figura 87 – Figura onde se representa os diferentes passos de segmentação do elemento usando o critério da máxima distancia entre a recta definida pelos dois pontos extremos e os pontos.

Como se pode ver neste exemplo a elemento foi dividido em três segmentos de recta (e) dos quais somente dois poderão ter condições para passar nos critérios de triagem dos pilares rectangulares. Efectivamente isso verificava-se pois a segmentação provocada pelo ponto que efectivamente não pertence ao elemento (1º ponto), eliminou outros que não eram decisivos para a passagem no critério que verifica o comprimento dos segmentos, mas à outros casos onde isto não se verifica.

Para além existir a probabilidade de se rejeitar alguns pilares rectangulares devido a uma sobre segmentação do elemento, esta é definitivamente afectada por o método suplementar que verifica se o ponto de canto escolhido é o mais próximo ou mais afastado entre os seus dois vizinhos, sendo escolhido aquele que verificar estas condições.

A razão reside no facto de o método suplementar em causa estar somente preparado para a detecção de cantos com se apresentam na Figura 84 sendo excluídos todos os outros tipos como se apresenta em seguida.

Figura 88 – Figura onde se representa quais os cantos que segundo o método da vizinhança traz vantagens (verde/visto) e desvantagens (vermelho/cruz) no calculo dos parâmetros para identificação dos pilares rectangulares.

Como se pode constatar no exemplo do scan 839 este problema do canto, faz com que mais pontos não sejam levados em consideração, implicando na maioria dos casos a rejeição do pilar em análise.

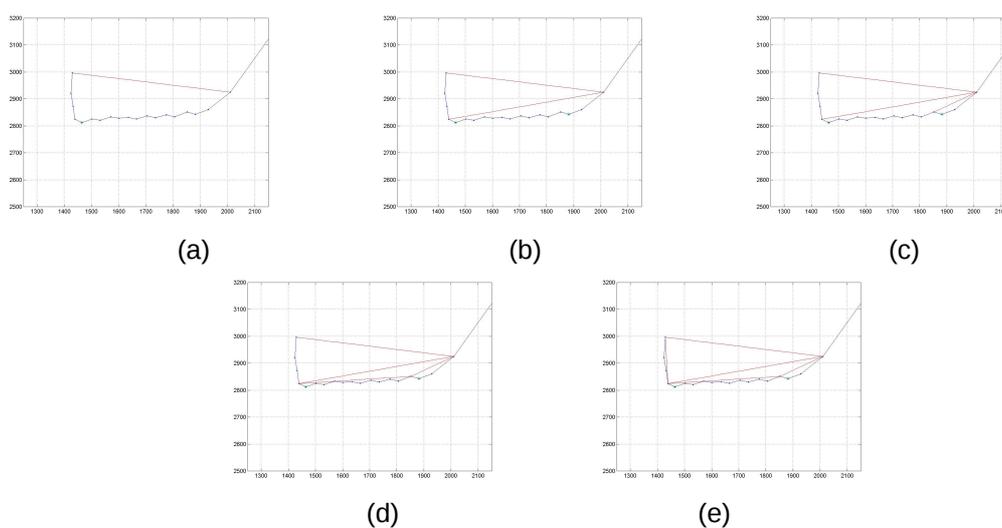


Figura 89 – Figura onde se representa os diferentes passos de segmentação do elemento usando o critério da máxima distancia entre a recta definida pelos dois pontos extremos e os pontos.

Fazendo uma breve descrição da figura anterior, verifica-se que inicialmente (a) foi escolhido um ponto de canto que foi corrigido (b) para um que se encontrava mais próximo da origem, trazendo uma melhor definição de canto. Também se pode verificar que na figura com índice (b) foi escolhido um novo elemento de canto que advém do problema do border-point que também foi corrigido (c). Mas, aqui surge o problema adicional apresentado na Figura 89 que faz com que o método suplementar em vez de melhorar a definição do canto piora fazendo com que o comprimento do segmento de recta de maior dimensão seja encurtado não passando no teste de comprimento.

Portanto umas das conclusões que se pode tirar é que não é o método suplementar de definição do canto que traz problemas na rejeição dos pilares, isto porque se sabe quais as suas limitações e que problemas podem advir da sua utilização. O problema reside no facto de haver os border-points que não representam nada físico. O objectivo seguinte foi assim tentar não levar em consideração este tipo de ponto nos cálculos.

A solução mais simples de implementar seria rejeitar todos os pontos iniciais e finais de cada elemento eliminando todos os possíveis erros que poderiam advir da existência destes nos cálculos. Mas, a rejeição leva a perda de informação fazendo com que seja necessário ser-se mais permissivo nos intervalos de triagem para além de se diminuir drasticamente a distância a partir do qual será tecnicamente possível de se detectar pilares circulares afectando todos os elementos em causa. O método a implementar para solucionar este problema terá de ser selectivo eliminando somente os pontos aos elementos que efectivamente os possuam.

O método implementado baseia-se na comparação de distâncias euclidianas de forma a eliminar somente os pontos extremos onde a sua distância ao seu ponto adjacente ultrapassar um determinado valor.

Assim através de uma análise visual de diferentes tipos de pilares e situações decidiu-se usar como parâmetro fronteira 1.7 do máximo das duas distâncias euclidianas adjacentes. O mesmo será dizer em cada uma das extremidades de cada elemento serão calculadas as três distâncias euclidianas correspondentes aos 4 pontos finais e iniciais. Desta forma para que ponto inicial não seja rejeitado será necessário que a distancia entre este e o seu ponto adjacente não seja superior a 1.7 do máximo das distâncias euclidianas já calculadas. Na figura seguinte apresenta-se em termos gráficos o método descrito.

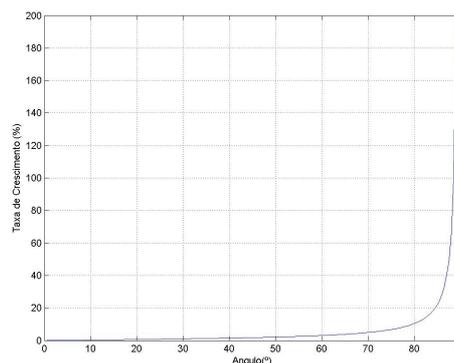
Figura 90 – Figura onde se representa a distância euclidiana entre os 4 pontos iniciais e finais.

O método então diz que para que o ponto extremo inicial ou final pertença ao elemento é necessário que:

$$d1 \leq 1.7 \times \max(d2, d3)$$

Esta abordagem pode ser considerada muito conservadora ou permissiva e algo duvidosa porque ela é obtida por uma simples análise visual e porque não se fundamenta em nenhum desenvolvimento que leve em conta a distribuição dos pontos nesse mesmo elemento. Claro que com uma análise da distribuição dos pontos de cada elemento individual pode-se estimar qual a máxima distancia que em termos teóricos seria aceitável entre os pontos extremos. Mas, este tipo de análise é computacionalmente muito exigente. Para além disso como não se sabe efectivamente qual o erro do laser seria necessário complementar o cálculo teórico com um factor de compensação que é algo complexo de achar.

Outras formas existem de tentar representar a evolução ou o crescimento desta distância euclidiana entre pontos adjacentes que pertencem ao mesmo segmento de recta, que é fazer a associação a uma função tangente. Por uma simples representação verifica-se que a distribuição de ponto usando um laser de varrimento angular sobre uma superfície plana é a distribuição da função tangente. No gráfico seguinte apresenta-se o crescimento em termos percentuais da distância euclidiana entre dois pontos em função do ângulo de incidência.



(a)

(b)

Figura 91 – Figura onde se representa (a) a associação da distribuição dos pontos numa superfície plana a uma tangente; (b) o gráfico da taxa de crescimento da distancia d em função do ângulo de incidência τ para um incremento angular de 0.5° .

Pode-se verificar que mesmo para ângulos de incidência muito elevado da ordem dos 87.5° a taxa de crescimento previsto para um acréscimo de 0.5° é de aproximadamente 50%. Mais uma vez de acordo com esta análise 1.6 vezes a máxima das distâncias adjacentes parece extremamente permissivo, mas convém lembrar que em primeiro lugar não existe informação sobre o erro do laser e em segundo lugar não se tem como objectivo fazer uma triagem rigorosa dos pontos que pertencem ao elemento. O objectivo será tentar diminuir o erro associado ao cálculo de alguns parâmetros como seja o comprimento de um segmento assim como a sua inclinação, mas sempre com objectivo de rejeitar o mínimo de informação possível.

Como até então o método de cálculo dos parâmetros estava somente desenvolvido para uma única configuração do scan, ou seja ele somente saberia andar para um dos lados foi necessário fazer alguns ajustes no código de forma a permitir que a detecção dos pilares fosse independente do sentido de navegação do robô tornando deste modo o algoritmo “universal”

Após a implementação destes métodos que permitem o cálculo dos parâmetros que servem para classificar um elemento como sendo ou não um pilar rectangular, fez-se uma análise exhaustiva de todos scan obtidos na segunda captura de dados. Tem-se assim como objectivo fazer uma pequena análise estatística de forma a ajustar os parâmetros de triagem e assim garantir um maior índice de fiabilidade na detecção dos pilares rectangulares assegurando um valor mínimo de rejeição de pilares verdadeiros.

Mas antes foi necessário determinar a posição do pilar rectangular a partir da informação do conjunto de pontos. Achou-se que seria conveniente considerar como o canto do pilar o ponto que resulta da intercepção das duas rectas obtidas quando se aplicou o método de regressão linear. Para se calcular a orientação do pilar decidiu-se calcular o ângulo médio entre estes dois segmentos de forma a obter-se assim a bissetriz do ângulo entre os dois segmentos. Assim com as coordenadas de um ponto e com a orientação da bissetriz entre dois segmentos será possível definir um rectângulo segundo o sistema de coordenadas do robô que represente o pilar rectangular.

Figura 92 – Figura onde se exemplifica o método de cálculo para determinação da posição e orientação do pilar rectangular.

Após a definição de todos os parâmetros foram analisados e classificados 3440 scans, aqueles que foram obtidos na segunda captura de dados. Com os dados obtidos será possível fazer a distribuição dos diferentes parâmetros calculados e assim otimizar estes para que o algoritmo de detecção seja o mais eficiente possível rejeitando o menor número de pilares rectangulares.

Matriz_dados tem os seguintes parâmetros:

- 1- Ângulo entre rectas definidas somente pelos pontos extremos;
- 2- Ângulo entre as rectas obtidas usando o método da regressão linear;
- 3- Comprimento do segmento 1
- 4- Comprimento de segmento 2
- 5- Numero do scan
- 6- Convexidade
- 7- Classificação
- 8- Coordenadas do ponto de canto (x_int)
- 9- Coordenadas do ponto de canto (y_int)
- 10- Direcção da bissectriz (ângulo em relação à horizontal)
- 11- Ângulo que faz o 1º Segmento encontrado em relação à horizontal

Dos parâmetros obtidos fazendo esta análise estatística não vão ser representados o primeiro campo que representa o ângulo entre as rectas definidas pelos pontos extremos dos segmentos. Isto deve-se essencialmente ao facto de se considerar que é insuficiente a análise do ângulo de duas rectas que levam somente em consideração os seus pontos extremos ignorando os restantes. Deste modo o primeiro parâmetro a ser representado é o ângulo entre as rectas obtidas usando o método da regressão linear.

Antes de mais gostaria de salientar que apesar do facto de estas distribuições seguintes advirem de um universo de 3440 scans o número de scans onde se detectam pilares rectangulares é muito inferior rondando os 45% ou seja, 1544. Assim o que se poderia concluir desde já é que este método de detecção não era muito eficiente, mas efectivamente não se pode fazer a análise desta forma porque em primeiro lugar esta captura de dados foi realizada de uma forma não linear onde o robô era empurrado manualmente. Para além de ser empurrado manualmente houve diversas paragens do robô o que implica um acumular de scans em locais onde possivelmente não seria tecnicamente possível fazer a detecção de pilares. Não deveremos esquecer que existe uma grande percentagem do campus onde o modelo em causa e o alcance e resolução do laser não permite a detecção de pilares rectangulares. Por fim convém perceber que esta análise continua a ser valida servindo de referência para configuração dos parâmetros de triagem porque se analisam um elevado número de scans em situações completamente distintas mas reais.

Em causa estão 1544 scans dos quais verifica-se que utilizando intervalos de triagem muito alargados obteve-se 1319 pilares verdadeiros e 125 pilares falsos, ou seja, com estes parâmetros tão permissivos somente 8% são falsos pilares.

Apresenta-se em seguida o primeiro parâmetro, o ângulo entre as rectas obtidas usando o método da regressão linear.

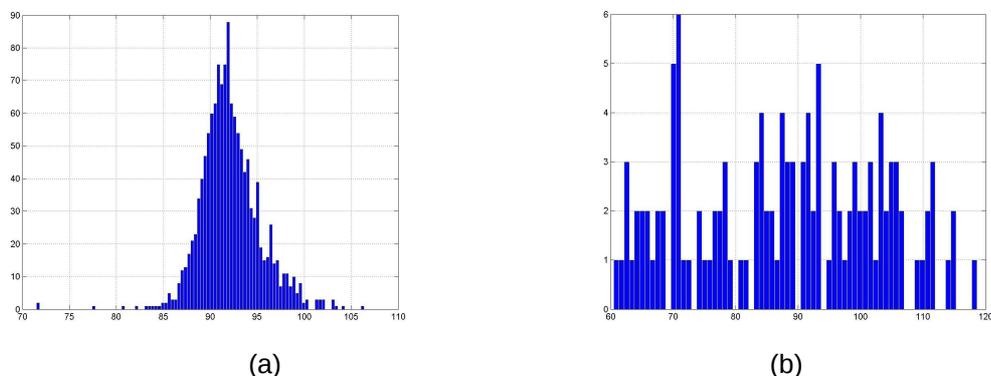


Figura 93 – Figura onde se representa a distribuição individual dos ângulos entre as rectas para o caso de pilares verdadeiros (a) e pilares falsos (b).

Em relação aos pilares verdadeiros podemos verificar a tendência de o ângulo entre as rectas ser superior a 90° devido ao anteriormente apresentado da má definição do elemento do canto. O valor médio é de 92.11° e o desvio padrão da distribuição de 3.18. Se considerar-se esta distribuição como representativa pode-se por exemplo também determinar um intervalo de tolerância baseado no desvio padrão. Se esse intervalo tiver entre os $+3$ vezes o desvio padrão tem-se um intervalo $[82.57 \ 101.65]$ onde se verificam 98.71% de todos os casos. O mesmo será dizer que implementando-se este intervalo como intervalo de triagem vão ser rejeitados 1,29% dos pilares verdadeiros.

Mas se implementarmos esse mesmo intervalo na distribuição verifica-se que se conseguem eliminar 72 dos 125, ou seja 57.6% de falsas detecções usando somente um intervalo para o ângulo entre as rectas mais restrito. Em relação aos outros falsos pilares não é possível que este critério os elimine porque estes apresentam valor muito próximos dos esperados. Pode-se verificar este facto na figura seguinte onde se fez uma sobreposição das duas distribuições e onde se pode verificar que existe um grande número de falsos pilares que têm um ângulo muito próximo dos 90° não podendo ser assim eliminados.

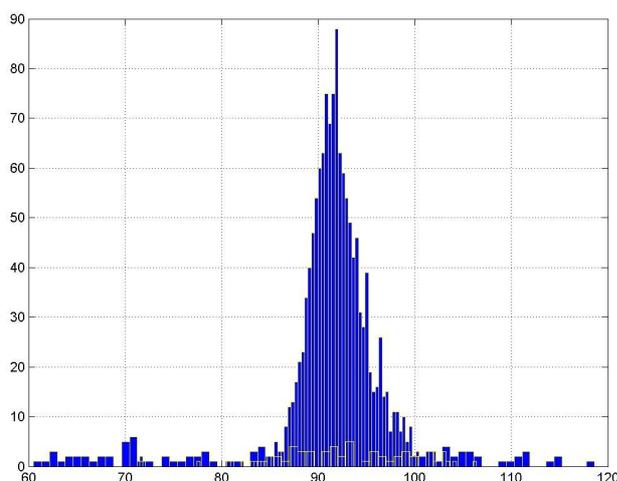


Figura 94 – Figura onde se representa as duas distribuições apresentadas na figura anterior individualmente.

Outro parâmetro que é levado em conta na triagem dos dados para verificar se este elemento é ou não um pilar rectangular é o comprimento de cada um dos segmentos do pilar. Por exemplo em seguida vai-se começar por o segmento de maior dimensão aquele que teoricamente tem 500 mm. Claro que em ambos os casos é mais que provável que a media deste segmento obtida através do laser seja um pouco inferior ao valor teórico devido à má definição dos extremos.

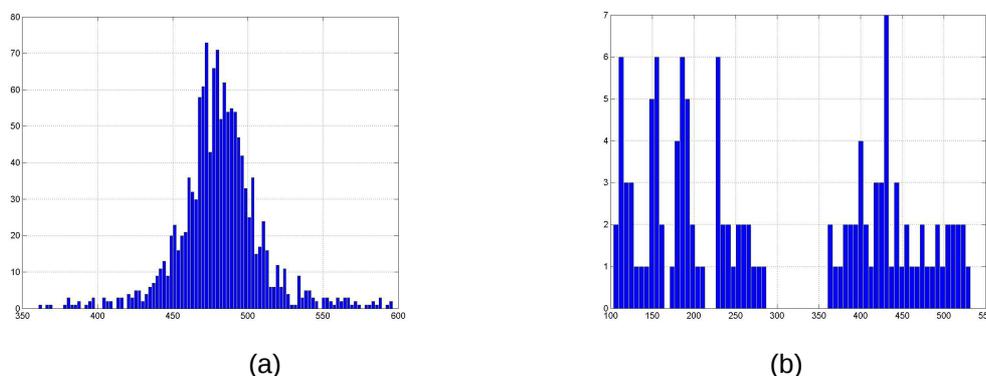


Figura 95 – Figura onde se representa a distribuição do comprimento de um dos lados o caso de pilares verdadeiros (a) e pilares falsos (b).

Da figura (a) pode-se obter a média que dá 481.07 mm com um desvio padrão de 28.64. Daqui pode-se tirar que se tivermos um intervalo entre $\pm 3 \times$ desvio padrão tem-se um intervalo de [395.14 567] o que implicaria 97.80% estivesse dentro deste intervalo. Com este tipo de resultado conseguia-se eliminar 79 falsos pilares ou seja 63.2%. Mas, do meu ponto de vista deve-se restringir mais o intervalo para minimizar as falsas detecções implementando se neste caso o intervalo de $\pm 2 \times$ desvio padrão. O mesmo será dizer que o intervalo é [423.79 538.36] onde se encontram 93.85% dos verdadeiros pilares, conseguindo-se deste modo uma eliminação de 91 dos 125 falsos pilares ou seja, 72.8%.

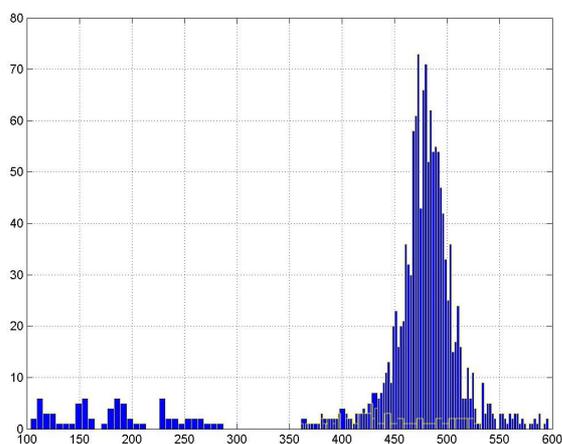


Figura 96 – Figura onde se representa as duas distribuições dos comprimentos do segmento de maior dimensão apresentadas na figura anterior individualmente

Em relação ao segmento de menor dimensão obteve-se as seguintes distribuições:

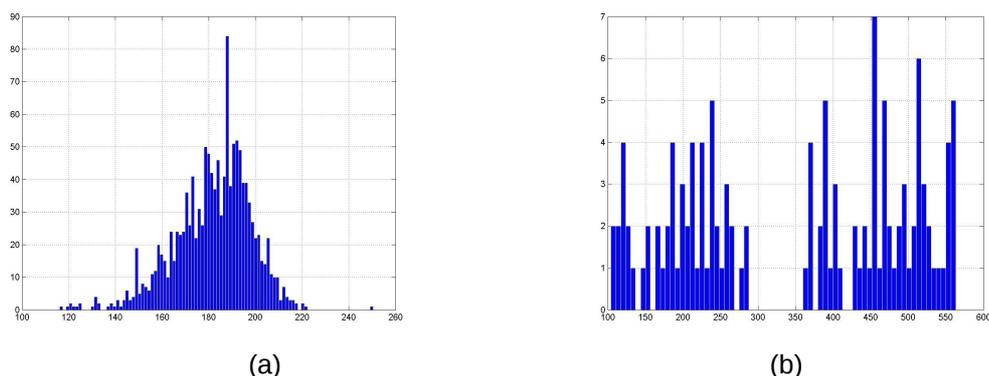


Figura 97 – Figura onde se representa a distribuição do comprimento de um dos lados o caso de pilares verdadeiros (a) e pilares falsos (b).

A média do segmento de menor dimensão tem um valor de 181.81 mm com um desvio padrão de 16.45. Apesar da a distribuição não apresentar uma forma muito simétrica continuou-se a aplicar para o cálculo do intervalo de triagem o $\pm 2 \cdot \text{desvio padrão}$, do qual se obtém [148.92 214.70]. com este intervalo garante-se que 95.75% são detectados como verdadeiros pilares rectangulares conseguindo-se eliminar com este intervalo 105 dos 125 falsos pilares, ou seja, 84%.

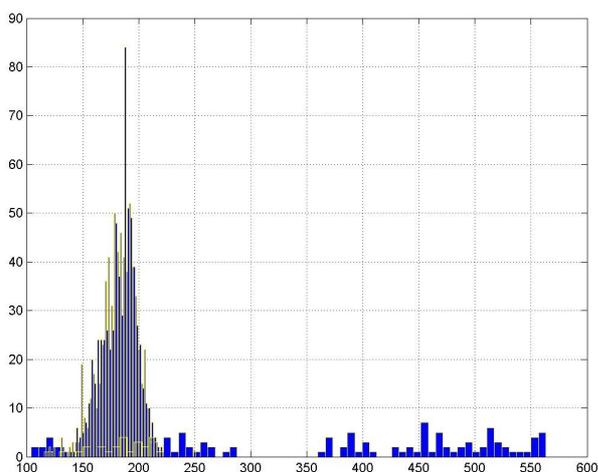


Figura 98 – Figura onde se representa as duas distribuições dos comprimentos do segmento de menor dimensão apresentadas na figura anterior individualmente

Assim em resumo apresentam-se os intervalos para triagem:

- Ângulo entre os segmentos de recta [82.57 101.65] (bastante permissivo)
- Comprimento do segmento de maior dimensão é [423.79 538.36]
- Comprimento do segmento de menor dimensão é [148.92 214.70].

Após esta análise realizada e definição dos parâmetros ou intervalos de triagem individuais, poderá se por a questão qual será o resultado a nível global e final. Este resultado não será apresentado porque implicava a uma nova análise individual de cada elemento e depois uma representação e análise final. O objectivo será somente no fim quando se fizer a junção dos dois métodos detecção analisar qual a probabilidade de se poder localizar ao longo do modelo em causa.

3.3.4.4- Topologia

Com a identificação dos elementos identificados e extraídos de um scan laser, como é o caso dos pilares com geometria circular e rectangular foi necessário torna-se possível a referenciarão do robô segundo o modelo parcial considerado. Neste capítulo tem-se como objectivo descrever as técnicas utilizadas para que o robô se possa localizar não de uma forma global em relação ao modelo global do campus mas sim localmente em relação ao modelo parcial considerado. (a completar...)

4- Resultados

A intervenção mecânica operada na Robuter resultou bem e é, portanto, uma solução viável para os pavimentos típicos da aplicação em causa. Em termos cinemáticos e dinâmicos, com esta solução perspectiva-se obter boas capacidades de navegação estando-se actualmente a efectuar testes com resultados bastante positivos.

Com os dados sensoriais recolhidos para análise e posterior simulação de uma solução de navegação foram implementados algoritmos que garantem um elevado grau de fiabilidade. Para além da fiabilidade dos dados também se pretendia que todo o processo de localização fosse eficiente. Em relação a este ponto somente se pode afirmar que numa primeira análise este não é um problema porque a plataforma de desenvolvimento utilizada ainda não corresponde à definitiva sendo esta ainda mais eficiente. Um dos últimos passos será a migração de todo o código desenvolvido para C onde será compilado para Linux. Este processo encontra-se actualmente em fase de conclusão. Mas apesar disso actualmente todo o processo de simulação é realizado em Matlab e verifica-se que se consegue em média (dependendo e claro da máquina em questão, neste caso um Athlon XP a 1400MHz) analisar e referenciar o robô com uma frequência entre 30 e 40 Hz que é efectivamente superior à frequência dos dados obtidos do laser que ronda os 17Hz.

Em resumo, pode concluir-se que a abordagem encetada tem vindo a mostrar-se válida em diversas frentes e é de crer que, com os trabalhos em curso e previstos a breve prazo, poderá contribuir claramente para uma solução de navegação em ambientes desta natureza ou similar. (a completar...)

5- Conclusões

Do trabalho realizado muitas conclusões podem ser tiradas a nível individual onde a apresentação de cada método e solução implementados levam a resultados e conclusões sobre a validade da implementação dos mesmos.

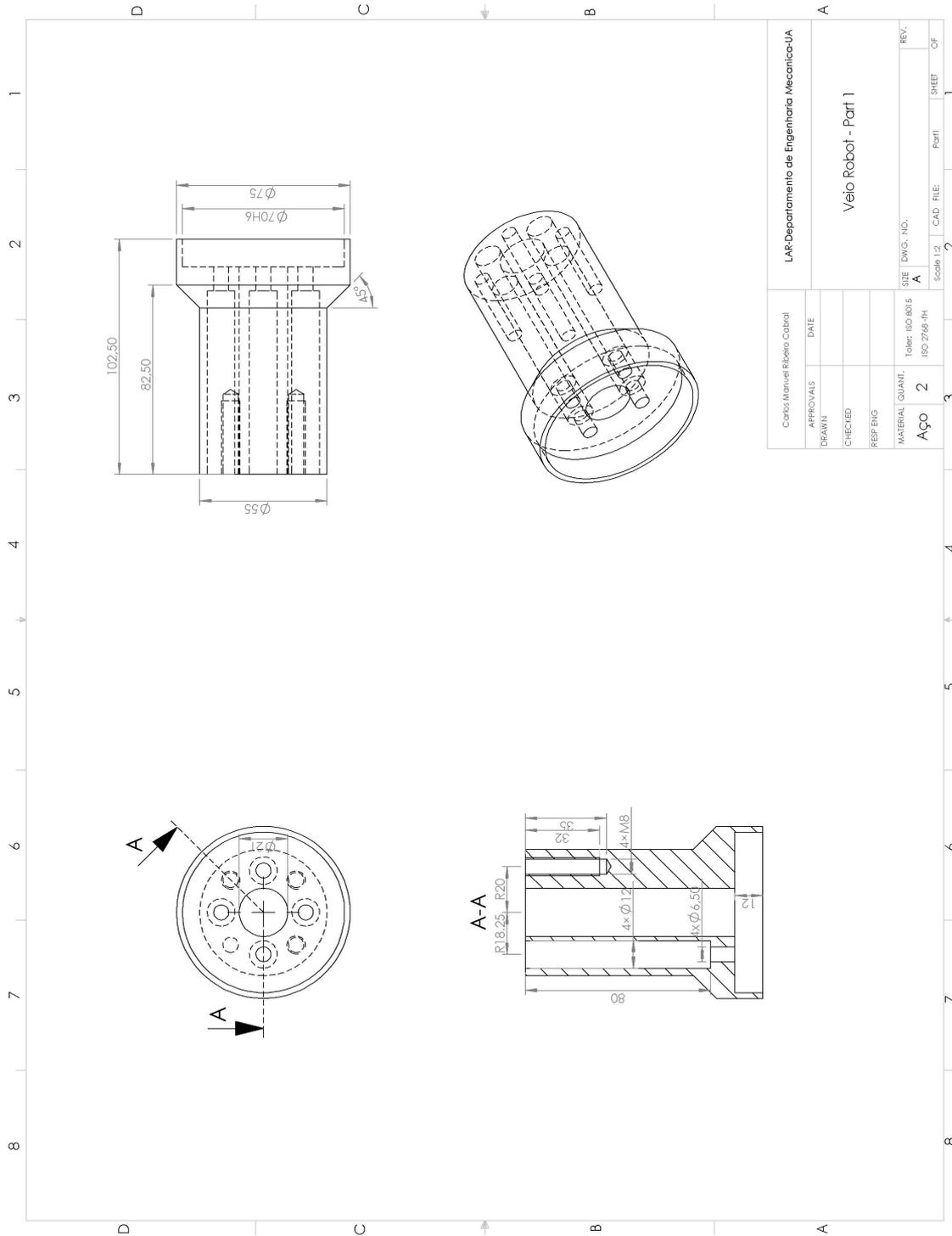
Mas, devido a estes métodos implementados serem somente resultado de simulação, apesar desta ser baseada somente em dados reais adquiridos, será prematuro antes da confirmação na terreno tirar conclusões genéricas sobre o trabalho.

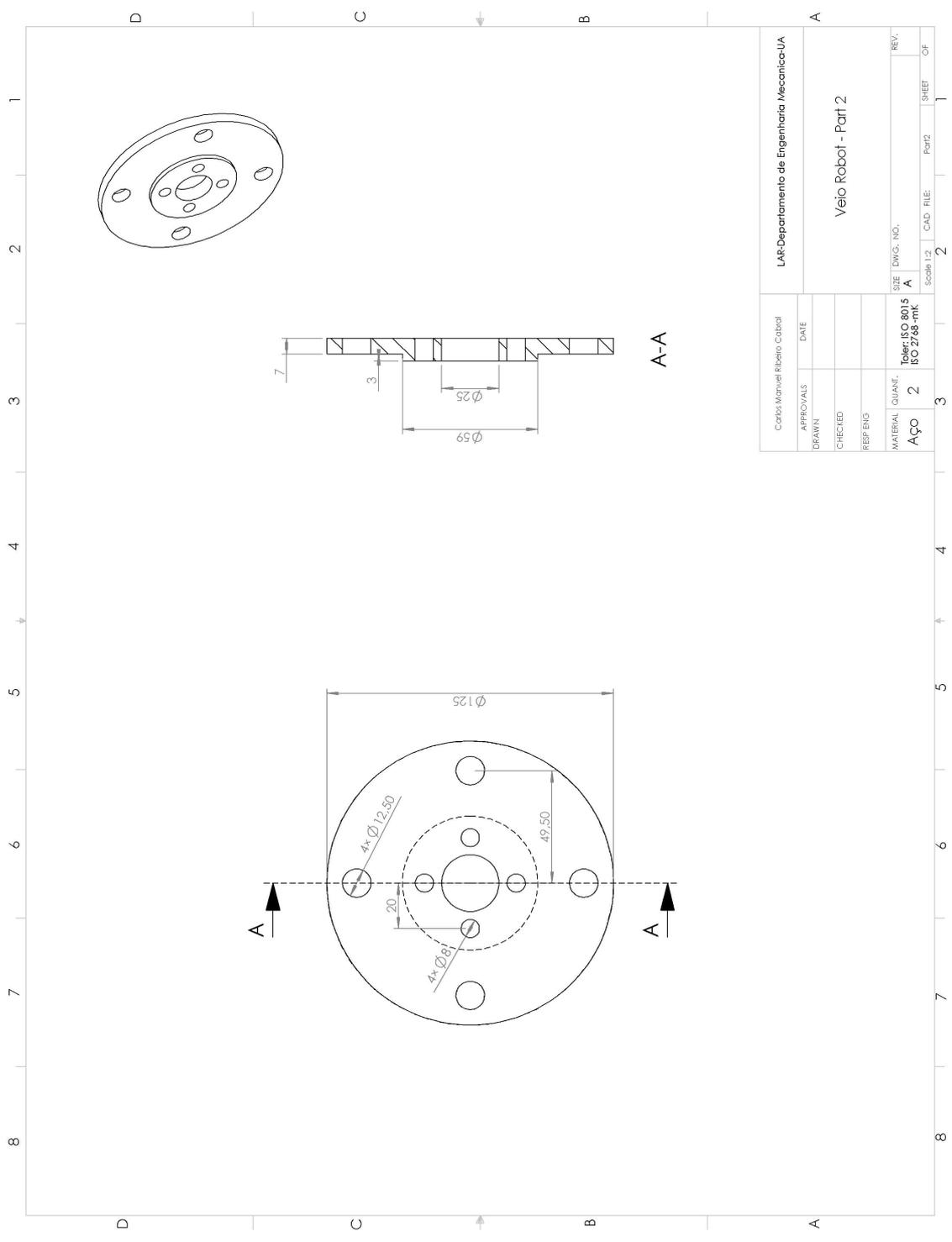
Prevê-se deste modo concluir a fase de transição da migração do código e implementação de todo o processo na plataforma robótica para se realizarem experiências reais onde se poderá comprovar a eficiência ou não de todo este trabalho. (a completar...)

6- Apêndices

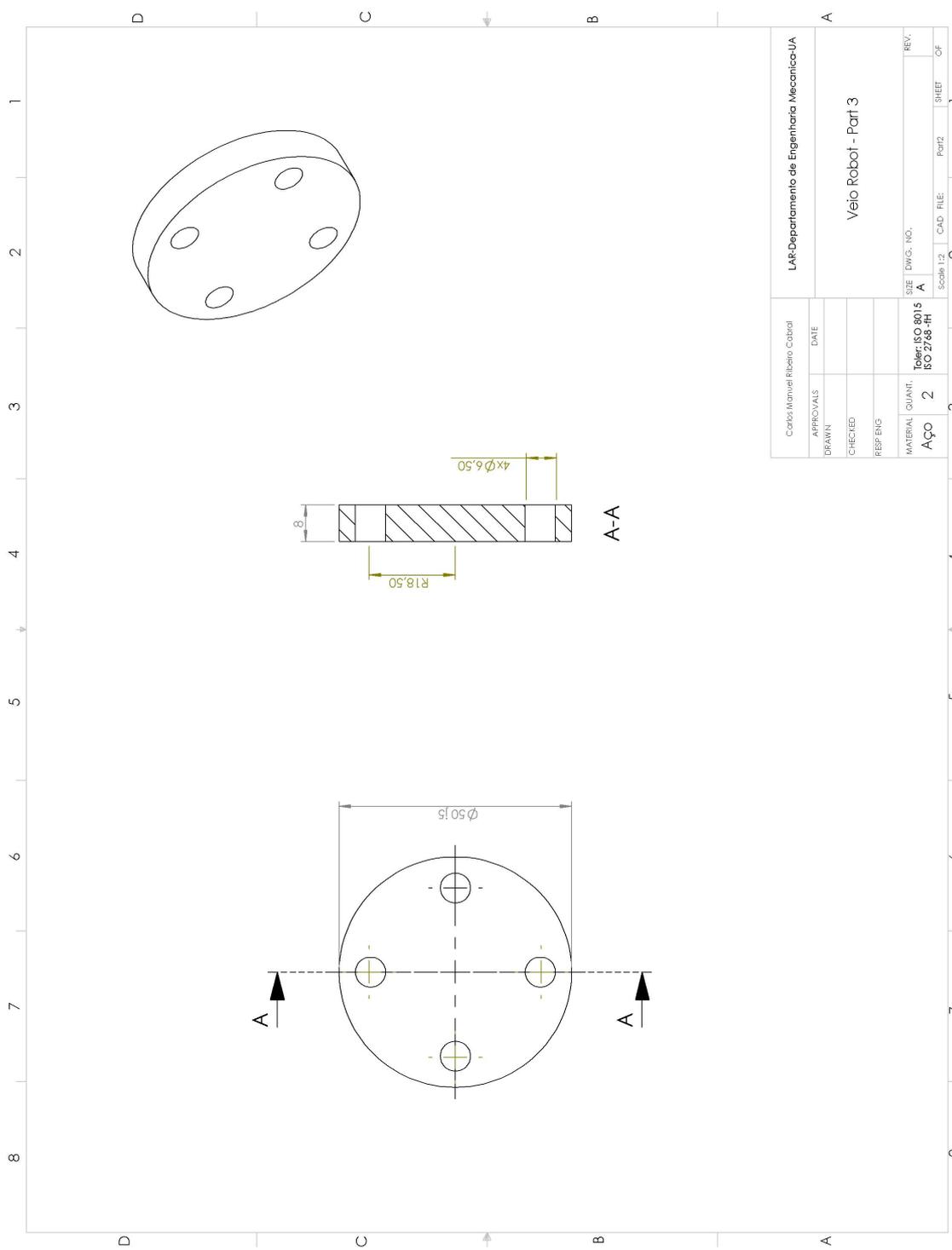
Desenhos técnicos da intervenção mecânica nas:

Rodas motrizes





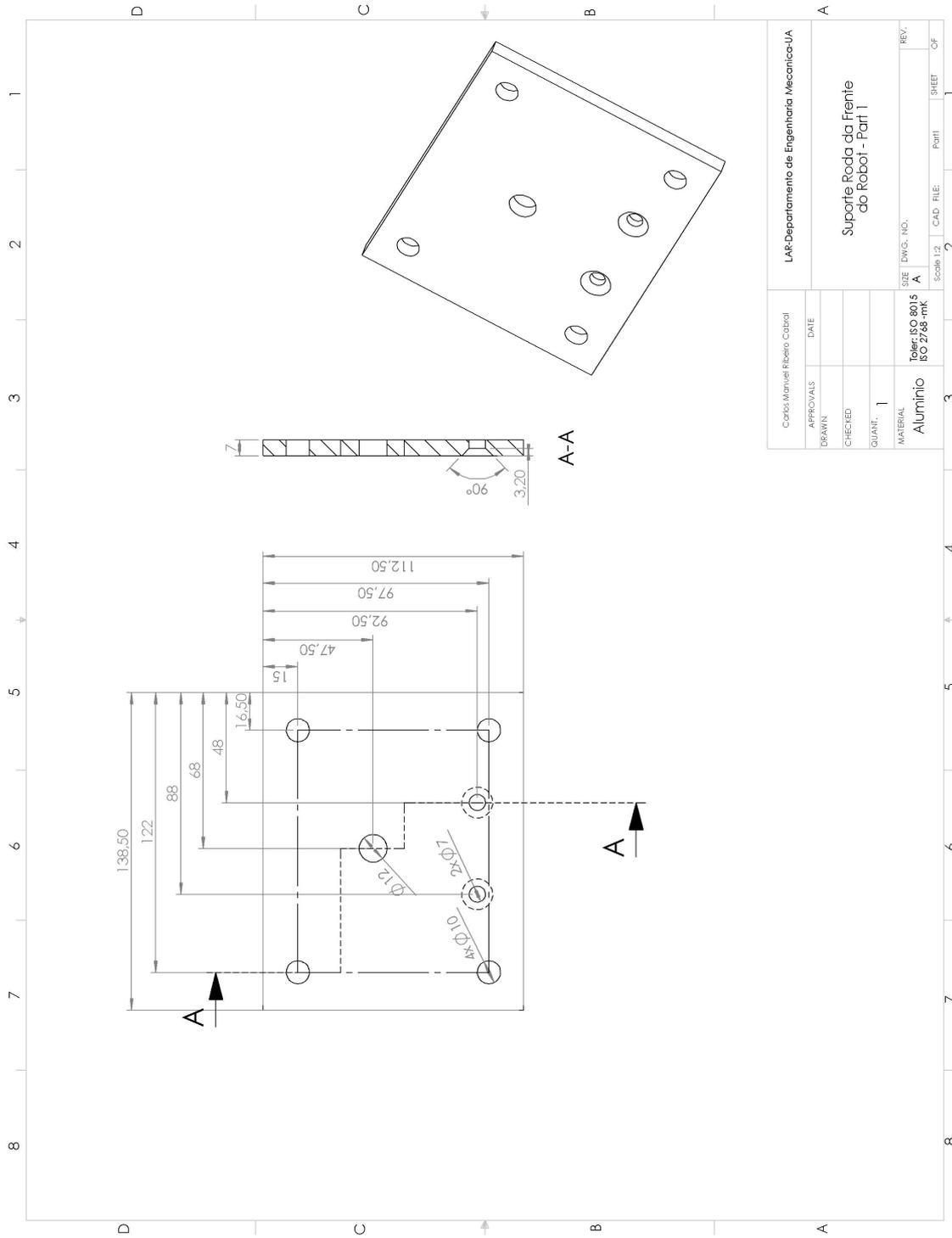
Carlos Manuel Ribeiro Cabral		LAF-Departamento de Engenharia Mecânica-UA	
APPROVALS	DATE	A	
DRAWN		Veio Robot - Part 2	
CHECKED			
RESP. ENG.			
MATERIAL	QUANT.	SIZE	DWG. NO.
AÇO	2	A	
Toler. ISO 801 S		Scale 1:2	
ISO 2768 -mk		CAD FILE:	Part2
		SHEET	2
		OF	



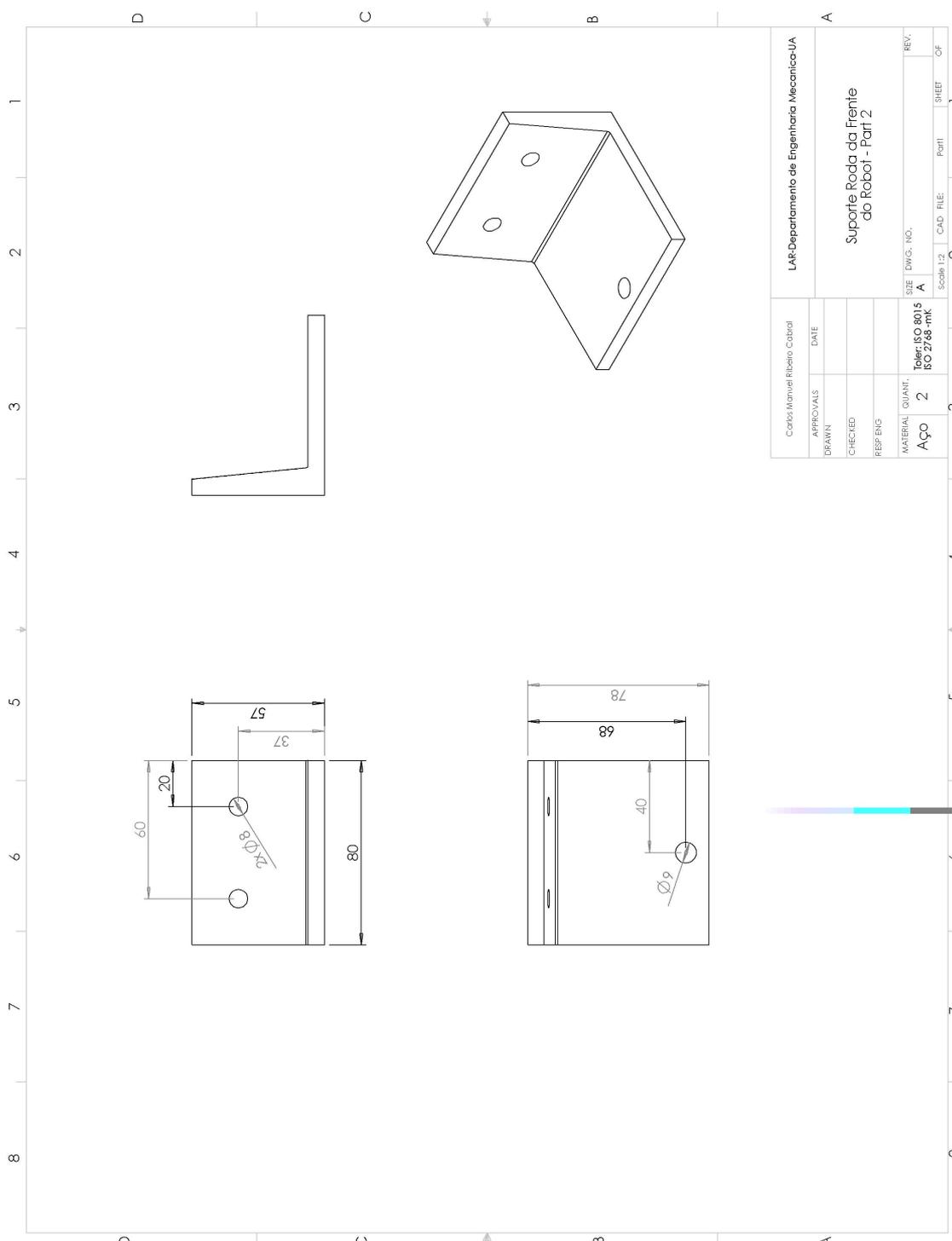
Carlos Manuel Ribeiro Cabral		LAF-Departamento de Engenharia Mecânica-UA	
APPROVALS	DATE		
DRAWN			
CHECKED			
RESP. ENG.			
MATERIAL	QUANT.	SIZE	DWG. NO.
AÇO	2	A	
Toler: ISO 8015		Scale: 1:2	
ISO 2768 -M		CAD FILE:	Part2
		SHEET	2
		OF	

Veio Robot - Part 3

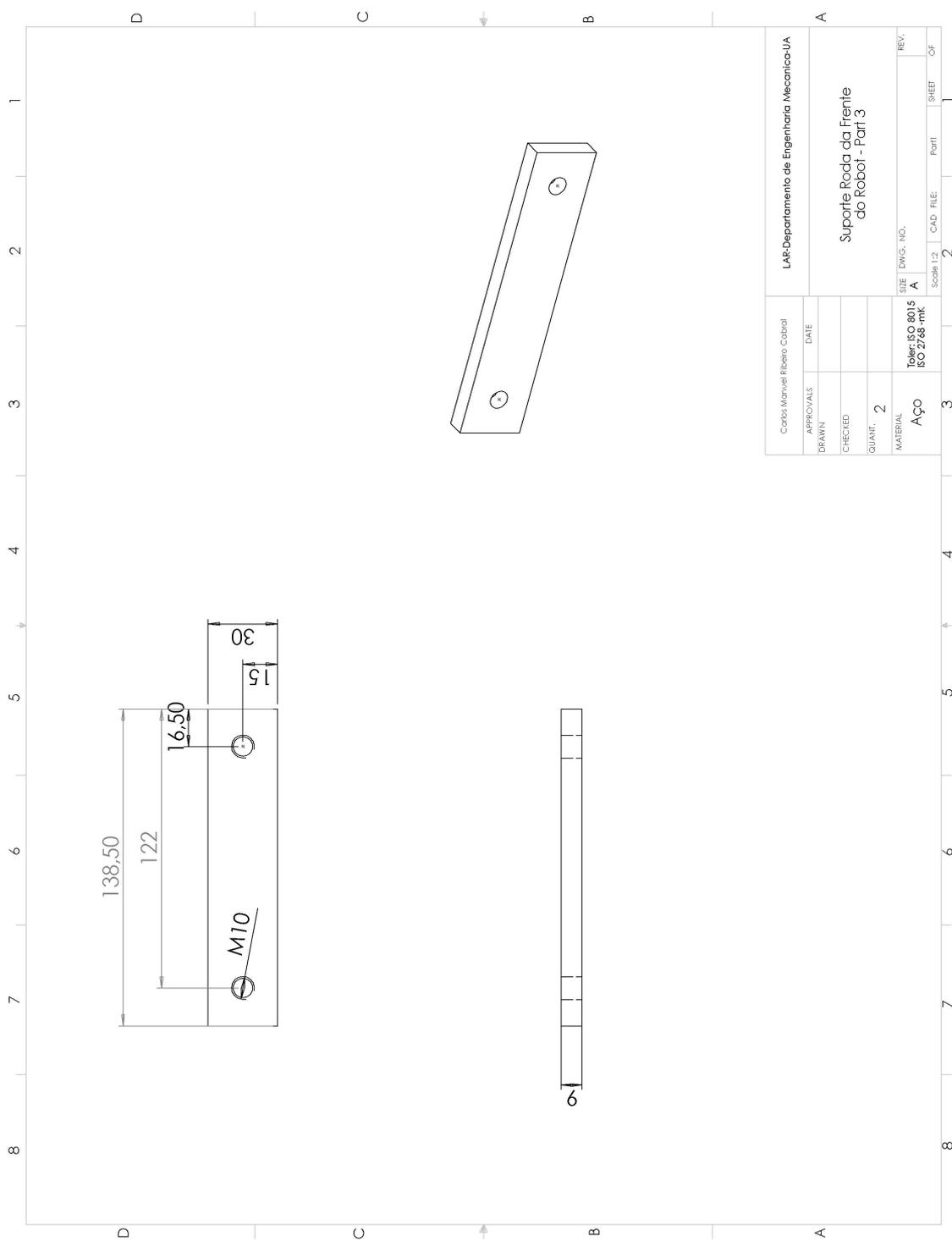
Rodas livres



Carlos Manuel Ribeiro Cabral		LAI-Departamento de Engenharia Mecânica-UA	
APPROVALS	DATE	Suporte Roda da Frente do Robot - Part 1	
DRAWN		SIZE	DWG. NO.
CHECKED		MATERIAL	REV.
QUANT.	1	Alumínio	A
Toler: ISO 8015		Scale 1:1	CAD FILE:
ISO 2768-mk		2	SHEET
		2	OF



Carlos Manuel Ribeiro Cabral		LAF-Departamento de Engenharia Mecânica-UA	
APPROVALS	DATE		
DRAWN			
CHECKED			
RESP. ENG.			
MATERIAL	QUANT.	SIZE	DWG. NO.
AÇO	2	A	
Toler. ISO 8015		Scale 1:2	
ISO 2768 - mt		CAD FILE:	2
		Part11	SHEET
			OF



Carlos Manuel Ribeiro Cabral		LAF-Departamento de Engenharia Mecânica-UA	
APPROVALS	DATE		
DRAWN			
CHECKED			
QUANT.	2		
MATERIAL	Aço	SIZE	DWG. NO.
			A
		Scale 1:2	CAD FILE: Part11
			SHEET
			OF

Supporte Roda da Frente do Robot - Part 3

7- Lista de referências

- [1] Hannu Mäkelä – Outdoor Navigation of Mobile Robots – PhD Thesis Helsinki University of Technology, 2001.
- [2] E. Oliveira, P. Dias, V. Santos, L. Almeida - Sistema de Atravessamento de Passagens Estreitas para um Robot Móvel, *Revista do Departamento de Electrónica e Telecomunicações da Universidade de Aveiro*, Vol. 2, n.º 4, Jan. 1999, pp. 547-551.
- [3] Z. Xiang , V. Santos, J. Liu - Robust Mobile Robot localization by Fusing Laser Rangefinder and Sonar, *Submitted to ICAR2003*
- [4] Santos, V., Oliveira, E. 2001 – Missões de Navegação para um robot Móvel baseadas em Tarefas e Relações Topológicas do Ambiente, *Robótica*, Num. 45, pp. 14-22.
- [5] C. Ferreira, V. Santos – Mobile Robot Localization using Laser Ranging and a Multi–component Landmark, *Submitted to ICAR2003*.
- [6] V.A. Sequeira, J.G.M Gonçalves – Position estimation of a Mobile Robot Using Laser Range Data, Techinal Note No.1.93.132, C.E.C. Joint Research Centre (Ispra site).
- [7] Ingemar J. Cox – Blanche – An Experiment in Guidance and Navigation of an Autonomous Robot Vehicle, *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, Vol. 7, No.2 April 1991.
- [8] A. Strandlie, J. Wroldsen - Track Fitting on the Riemann Sphere, Faculty of Technology, Gjovik College, Gjovik, Norway.
- [9] Parah H. Batavia, Stephan A. Roth, Sanjiv Singh – Autonomous Coverage Operations In semi-Structured Outdoor Environments, Intl. Conference Robots and Systems, EPFL, Lausanne, Switzerland, October 2002
- [10] Hagen Schempf, Todd Graham – Junior: A Robot for Outdoor Container Nurseries, Intl. Conference Robots and Systems, EPFL, Lausanne, Switzerland, October 2002
- [11] Paulo Debenest, Edwardo F. Fukushima, Shigeo Hirose – Development and Control of a Buggy Robot for Operation on Unstructured Terrain, , Intl. Conference Robots and Systems, EPFL, Lausanne, Switzerland, October 2002
- [12] Sergio Santos, José E. Faria, Fernando Soares, Rui Araújo, Urbano Nunes – Tracking of Multi-Obstacles With Laser Range Data for Autonomous Vehicles, 3º Festival Nacional de Robótica – Robótica 2003, Lisboa, 9 de Maio de 2003.
- [13] Boris Kluge, Christian Köhler, Erwin Prassler - Fast and Robust Tracking of Multiple Moving Objects with a Laser Range Finder, International Conference on Robotics & Automation, Seoul, Korea, May 21-26, 2001.
- [14] Jose Guivant, Eduardo Nebot, Stefan Baiker – High Accuracy Navigation Using Laser Range Sensors in Outdoor Applications, International Conference on Robotics & Automation, San Francisco, CA, April 2000