



Mestrado em Engenharia Eletrotécnica

Localização de AGVs Baseado na Detecção de Marcadores RFIDs, Magnéticos e GPS-indoor

Trabalho Projeto para a obtenção do grau de Mestre em Engenharia Eletrotécnica – Área de Especialização em Automação e Comunicações em Sistemas Industriais

Autor

Daniel de Almeida Pereira

Orientador

Mestre Fernando Domingues Moita

Professor do Departamento de Engenharia Eletrotécnica

Instituto Superior de Engenharia de Coimbra

Coorientador

Doutor Professor Urbano Nunes

Instituto de Sistemas e Robótica - Coimbra

Coimbra, Maio, 2019

AGRADECIMENTOS

Gostaria de começar por agradecer aos meus familiares, em destaque para os meus pais, irmão e avós, pela constante ajuda, presença e aconselhamento nos bons e nos maus momentos.

Agradecer ao Professor Doutor Urbano Nunes, Mestre Tiago Barros e Mestre Luis Garrote pela ajuda, paciência e partilha de conhecimentos não só durante todo o tempo do projeto de dissertação, mas também durante o meu percurso académico.

Agradecer também ao professor Mestre Fernando Moita por todo o apoio e conhecimento disponibilizado ao longo do decorrer deste trabalho de projeto.

Aos meus amigos por me apoiarem, proporcionar momentos de convívio e diversão e por estarem presentes quando é preciso.

Aos meus colegas de curso, pela partilha de experiências ao longo destes 2 anos e pelo espírito de camaradagem.

Aos meus colegas investigadores pelos conselhos dados, atividades desportivas realizadas e pelo ambiente de trabalho descontraído proporcionado.

Ao Instituto de Sistemas e Robótica e Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra, por todos os recursos disponibilizados para o bom decorrer desta dissertação.

Todos os que contribuíram direta ou indiretamente para o meu processo de formação académica e pessoal.

A todos
Muito Obrigado

RESUMO

A robótica está cada vez mais presente nas nossas vidas cotidianas, num mundo cada vez mais globalizado e exigente, onde é necessário tirarmos benefícios do que a tecnologia nos oferece.

Os **AGVs** são exemplo disso, aplicados cada vez mais na indústria para o transporte de materiais e apoio à produção. A sua flexibilidade e a sua rentabilidade são muito apreciadas na indústria que necessita de transportar matérias-primas ou até produtos acabados.

Esta tecnologia atualmente adotada por muitas indústrias tem obtido um grande êxito uma vez que contribui para o aumento da produtividade e reduz os custos de produção. No entanto para que robôs tenham uma maior projeção no mercado, é imprescindível ultrapassar as limitações que os sistemas atuais apresentam. Daí este trabalho de projeto se concentrar no estudo da problemática da localização, por forma a encontrar otimizações e novas soluções de localização de um **AGV**.

O sistema proposto baseia-se no uso de vetores de atributos compostos de medições momentâneas extraídas do ambiente através de sensores que se encontram exteriormente, bem como no próprio **AGV**.

As estimativas de posição são detetadas por um sensor de guia magnético que gera uma leitura da posição global por meio de linhas e *beacons* magnéticos.

Rede de sensores estáticos já instalados no local onde se pretende localizar com dispositivos moveis, de modo a se comunicarem e determinarem a sua posição.

E a sinalética e orientação do robô móvel através de um sensor **RFID** passivo, ambos estes sensores, utilizados em conjunto nestes vetores de atributos, de forma a caracterizar os resultados obtidos pelo **AGV**.

A nova solução de localização é então resolvida por estas três tecnologias agregadas, com uma topologia do ambiente já conhecida, e a correlação entre cada local neste ambiente e os seus atributos são armazenados através do uso de um servidor local. O sistema de localização foi avaliado de maneira experimental em campo, numa plataforma robótica modular desenvolvida exclusivamente para este propósito, bem como vários simuladores.

Foi feito um estudo detalhado para cada tecnologia e os resultados obtidos, que são promissores, são apresentados e permitem validar a solução proposta.

Palavras-chave: AGV, GPS-indoor, Hardware, Localização, Odometria, Protótipo, Posição, RFID, Régua Magnética, Régua RFID.

ABSTRACT

Robotics are progressively entering our everyday lives, in an increasingly globalized and demanding world, where we need to take advantage of the evolution of the technology that we offer.

AGVs are an example of this, applied more in the transportation industry materials and production support. Its flexibility and profitability are highly appreciated in factories that need to transport raw materials or even finished products.

This technology, currently adopted by many industries, has been a success as it contributes to increased productivity and reducing production costs. However, for AGVs to have greater projection in the market it is imperative to overcome the limitations of the current systems.

Hence, this dissertation focuses on the study of the localization problem, in order to find optimizations and new localization solutions of an AGV. The proposed system is based on the use of attributes vectors composed of momentary measurements extracted from the environment by sensors that are found externally, as well as in the AGV itself. Position estimates are detected by a magnetic guide sensor, the reading of the global position of beacons and the signage and orientation of the mobile robot through a passive RFID sensor are used together in these attribute vectors in order to characterize the results obtained by the AGV.

The new localization solution is solved by these three aggregate technologies, the topology of the environment is known, and the correlation between each location in this environment and its attributes are stored through the use of a local server. The localization system was evaluated experimentally in the field, in a modular robotic platform developed for this purpose, as well as several simulators and the promising results were obtained and are presented with the purpose of validating the solution.

Keywords: AGV, GPS-indoor, Hardware, Localization, Magnetic Rule, Odometry, Prototype, Position, RFID, RFID Rule.

ÍNDICE

AGRADECIMENTOS	iii
RESUMO	v
ABSTRACT	vii
ÍNDICE.....	ix
ÍNDICE DE FIGURAS	xi
ÍNDICE DE TABELAS	xv
ABREVIATURAS	xvii
1 INTRODUÇÃO	1
1.1 Objetivos e Contribuições.....	2
1.2 Estrutura do Trabalho de Projeto	3
2 ESTADO DA ARTE	5
2.1 Introdução	5
2.2 Sistema Filoguiado e Faixa magnética	5
2.3 Sistema Baseado em Marcadores.....	7
2.4 Sistema de localização baseado em odometria	9
2.5 <i>Sistema de localização baseado na tecnologia RF</i>	11
2.6 Sistemas de detecção de informação por RFID.....	12
3 DESENVOLVIMENTO	17
3.1 Plataforma Experimental	18
3.2 Sensores	23
3.3 Arquitetura de Firmware do Robot Móvel	28
4 ALGORITMOS APLICADOS A LOCALIZAÇÃO.....	33
4.1 Localização Relativa.....	33
4.2 Localização com Régua de leitores RFID	41
4.3 Localização com Régua de sensor magnético MGS1600.....	47
4.4 Posição Global com sistema de GPS Indoor	49
5 DESENVOLVIMENTO E RESULTADOS.....	53
5.1 Testes à Régua de Leitura RFID.....	53
5.2 Testes e resultados ao <i>GPS - Indoor</i>	57

5.3	Testes e resultados ao <i>GPS - Indoor</i>	63
6	CONCLUSÃO E TRABALHO FUTURO	67
7	BIBLIOGRAFIA.....	69

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 - Sistema de Navegação	6
Figura 2 - Colocação de faixa magnética sob a superfície	6
Figura 3 - Colocação de cabo magnético soterrado no solo (Filoguiado)	7
Figura 4 - Faixa magnética para um sistema de seguimento de faixa	7
Figura 5 - Sistema de localização com marcadores	8
Figura 6 - Modelo de Movimento da Odometria	9
Figura 7 - Sistema de localização por radio frequência.	12
Figura 8 - Sistema de localização UWB	12
Figura 9 - Modulo de Leitura/Escrita RFID RC522 e descrição dos pinos de comunicação... 13	
Figura 10 - Modulo completo de Leitura/ Escrita e respectivas <i>tags</i> de armazenamento de informação passiva.	13
Figura 11 - Etiqueta ou <i>tag</i> de RFID.	13
Figura 12 - Modelo de funcionamento/ alimentação e envio/receção de informação.	14
Figura 13 Modelo variante de diferentes frequências e distâncias de alcance.	15
Figura 14 - Arquitetura funcional dos principais sistemas do robô móvel	17
Figura 15 -	18
Figura 16 - Modelo de bateria aplicada ao robô móvel	19
Figura 17 - Motor aplicado ao robô móvel com <i>encoder</i> acoplado	19
Figura 18 - Controlador de motores: Roboteq SDC2130	21
Figura 19 - Raspberry Pi 2, SOC usado no robô móvel para controlar os movimentos da mesma.	21
Figura 20 - Conversor DC/DC usado no robô móvel	22
Figura 21 - Estrutura em perfil de alumínio do robô móvel	22
Figura 22 - Montagem das rodas e componentes eletrónicos anteriormente referidos.	23
Figura 23 - Primeiros ensaios do controlo de movimento do robô, feitos com <i>On-board PC Raspberry Pi2</i>	23
Figura 24 - Imagem do sensor magnético MGS1600 sobre uma fita magnética.	24
Figura 25 - Protótipo de uma Régua de Leitores de <i>tags</i> RFID usado na plataforma robótica.	25
Figura 26 - Protótipo de uma Régua de Leitores de <i>tags</i> RFID em fase de testes.	26
Figura 27 - Kit de beacons para o cálculo da posição global do robô móvel	27

Figura 28 - Ambiente Gráfico para o monitoramento da posição Global do robô móvel.....	27
Figura 29 - Exemplo arquitetura ROS tipo publicador subscritor.	28
Figura 30 - Software que representa a informação proveniente da localização de um robô móvel.	29
Figura 31 - Diagrama de camadas do software.	30
Figura 32 - Fluxograma da arquitetura de software aplicada em ambiente ROS no robô móvel.	31
Figura 33 - Demonstração do ambiente de teste em estudo, com a associação de todas as metodologias aplicadas.....	33
Figura 34 - Robô móvel diferencial no sistema de coordenadas global.....	34
Figura 35 - Disposição geométrica das <i>Tags</i> RFID.....	42
Figura 36 - Descrição do modelo geométrico que permite a obtenção da orientação e velocidade do robô móvel.....	43
Figura 37 - Modelo de aquisição de informação a partir da disposição geométrica de <i>tags</i> RFID	44
Figura 38 - Protótipo da régua de sensores RFID.	45
Figura 39 - Fluxograma do algoritmo aplicado a régua de leitura de <i>tags</i> RFID.....	46
Figura 40 - Representação de uma bifurcação e o modo de medição pelo sensor MGS 1600.	47
Figura 41 - Navegação utilizando o método de seguimento de fita magnética e calculo do erro lateral.	48
Figura 42 - Modelo representativo da locomoção por <i>GPS - indoor</i>	49
Figura 43 - Fluxograma do algoritmo implementado para o seguimento de retas.	50
Figura 44 - Simulador desenvolvido para testar a taxa de aquisição da informação recebida e da orientação.....	53
Figura 45 - Simulador de sensores RFID, a realizar testes ensaios reais de velocidade e orientação em ambiente controlado.....	54
Figura 46 - Simulador de Leitura RFID criado para o propósito deste trabalho de projeto.	55
Figura 47 - Gráfico que indica a taxa quantitativa de amostras numa velocidade controlada por simulador, como o microcontrolador Atmel 328P	55
Figura 48 - Gráfico que indica a taxa quantitativa de amostras numa velocidade controlada por simulador, como o microcontrolador ESP8866	56
Figura 49 - Desfasamento temporal entre a <i>tag2</i> e <i>tag1</i> em diferentes angulos em relação a uma reta perpendicular ao sensor de leitura (Velocidade 0.5 m/s).....	57
Figura 50 - Cenário de teste para a medição de precisão e exatidão.	57
Figura 51 - Posições dos <i>beacons</i> e dos registos efetuados no primeiro teste.....	57

Figura 52 - Zoom do ponto (2,2) da grelha disposta na figura 51.....	58
Figura 53 - Grelha de pontos que foram realizados para medir a precisão e o erro do sistema de localização da <i>Marvelmind</i>	59
Figura 54 - Erro e desvio padrão dos 11 registos, onde cada registo corresponde a cada ponto.	59
Figura 55 - Sala de teste onde foram efetuados os testes com a disposição dos <i>beacons</i> estáticos e móvel para realizar o registo do percurso.	60
Figura 56 - Percurso registado pelo GPS Indoor , encoders e pontos ideais virtuais.	61
Figura 57 - distâncias euclidianas do percurso Real realizado pelo robô móvel.....	62
Figura 58 - Distâncias euclidianas do percurso ideal (com pontos virtuais).	62
Figura 59 -Cenário montado com a disposição de <i>beacons</i> , fita magnética e conjuntos de <i>tags</i> dispostas no chão.	63
Figura 60 - Disposição geométrica do conjunto de <i>tags</i> em paralelo com a fita magnética e partes do trajeto sem fita.....	63
Figura 61- Marcação dos pontos em todo o trajeto definido.	64
Figura 62 - Dados da posição obtidos pela odometria.....	64
Figura 63 - Erro em metros em relação aos pontos virtuais/ ideias na trajetória.	65
Figura 64 - Dados da orientação nos pontos obtidos pela régua de leitura RFID à velocidade de 0.5 m/s	66
Figura 65 - Desenvolvimento dos circuitos internos de uma PCB híbrida que permite unir as tecnologias estudadas no trabalho de projeto.	67
Figura 66 - Ilustração tridimensional da PCB Híbrida que permite detetar <i>tags</i> RFID, detetar a fita magnética e comunicar com as <i>beacons</i> estáticas por radiofrequência.	68

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1 - Tabela de parâmetros elétricos do motor	20
Tabela 2 - Descrição das ligações elétricas dos <i>encoders</i>	20
Tabela 3 - Tabela de especificações do sensor MGS1600	24
Tabela 4 - Tabela de especificações do protótipo de criado para a leitura de <i>tags</i> RFID.	25
Tabela 5 - Valores dos parâmetros do modelo de odometria do robô móvel.....	37

ABREVIATURAS

AGV Automated Guided Vehicle

AGVPOSYS Automated-Guided-Vehicle with innovative indoor positioning system for the factory of the future

RFID Radio Frequency IDentification

RF Radio frequency

SLAM Simultaneous localization and mapping

UWB Ultra-wide band

WLAN Wireless Local Area Network

PVC Poly vinyl chloride

PET Polyethylene terephthalate

ROS Robot Operating System

1 INTRODUÇÃO

Nas últimas décadas, a investigação na área da robótica móvel tem crescido e envolve mais pessoas devido aos seus vastos potenciais de aplicação. Todos os anos, mais robôs móveis e dispositivos eletrônicos estão ao dispor do nosso quotidiano. As melhorias feitas na capacidade de processamento e na redução de tamanho em microcontroladores e sensores de aquisição, permitiram que o campo da robótica evoluísse bastante.

Os **AGVs** podem ter uma tremenda importância para aplicações industriais, pois permitem realizar tarefas tediosas e repetitivas, ter tempos de resposta mais rápidos e operar em áreas inóspitas ou inacessíveis para a vida humana. Quando se utiliza **AGVs**, uma das tarefas mais importantes é estimar a sua localização com exatidão e precisão, e ao mesmo tempo ter noção de tudo o que o rodeia. É por isso que a localização constitui uma área de grande interesse para a investigação robótica, uma vez que se trata de uma atividade essencial para a realização de diversas tarefas que estão contidas no robô móvel, como a localização, navegação ou a construção de mapas.

Esta importante área de investigação, consiste basicamente em por um robô móvel capaz de conhecer a sua própria posição, a cada instante, dentro do ambiente em que está contido e ser capaz de se mover de um dado local para um local alvo, mantendo uma trajetória determinada e desviar dos obstáculos se necessário. Para conseguir evitar obstáculos, o robô móvel precisa não só conhecer a sua posição, mas também de desempenhar complexas atividades de planeamento de trajetórias usando o conhecimento que tem do ambiente envolvente [1].

A identificação do meio envolvente acaba por ser tão importante como a localização do robô [2], criando desafios de grande interesse na representação do ambiente, através de mapas produzidos incrementalmente pelo próprio robô móvel enquanto se movimenta [3]. Este problema é referenciado na literatura como localização e mapeamento simultâneo **SLAM**.

Neste trabalho de projeto será abordado essencialmente o problema de localização, como parte da problemática da robótica móvel. A localização é extremamente relevante uma vez que serve de base para a realização de outras atividades que o compõem. É por isso mesmo que se aborda um estudo determinístico para o problema de localização.

Considerando ainda que a localização deve ser realizada em tempo real e que os algoritmos são baseados em processos estocásticos, são computacionalmente mais intensivos ao que motiva o desenvolvimento de algoritmos de localização a partir de processos determinísticos sempre que justificável.

A opção por métodos determinísticos implica numa representação e atualização da posição num mapa, este método é muito mais simples uma vez que não é necessária a determinação da incerteza associada e da estimativa da matriz de covariância [4].

No que se refere à percepção do robô móvel, são utilizados no projeto sensores propriocetivos, como é o caso da odometria, como também a utilização de sensores exteroceivos como sensor guia magnético, sensores **RFID** passivo e *beacons* que estimam a posição absoluta com o recurso a sensores de ultrassons e radiofrequência [5].

As informações provenientes da odometria não foram utilizadas para este trabalho de projeto, isto devido ao acúmulo de erros que vão sendo adquiridos que poderiam comprometer o desempenho das tarefas de localização e navegação e por este trabalho de projeto apenas focar alternativas de baixo custo a ser implementadas na indústria. No entanto as informações provenientes da odometria que foram recolhidas no decorrer do estudo foram utilizadas em conjunto com a leitura dos sensores de ultrassom a fim de construir um tramito comparativo que caracterize o ambiente visitado.

1.1 Objetivos e Contribuições

O trabalho de projeto encontra-se enquadrado no projeto AGVPOSYS [6]. (*Automated-Guided-Vehicle with innovative indoor positioning system for the factory of the future*), suportado pelo Instituto de Sistemas e Robótica da Universidade de Coimbra.

No âmbito deste projeto, o principal foco deste trabalho de projeto consiste em desenvolver soluções que elevem a uma eficácia na localização de um **AGV** em ambientes industriais recorrendo a tecnologias de baixo custo, com a compatibilidade de estudar e solucionar novos algoritmos de localização.

Com esse fim, foram feitos estudos recorrendo a 3 tecnologias distintas, como o uso de uma régua de guia magnético, um sistema de leitura de etiquetas **RFID** e um sistema de *beacons* estacionários.

Espera-se com este sistema obter uma forma de corrigir os erros inerentes de estimação feitas pela odometria possibilitando diminuição das incertezas associadas a estas medições, com isso objetivas e também a construção de uma interface gráfica para acompanhamento das trajetórias.

Para além das soluções tecnológicas, podemos ainda destacar as seguintes atividades desenvolvidas que foram de elevada importância para a conclusão dos trabalhos:

- Desenvolvimento e construção de uma plataforma Robótica para a implementação de testes experimentais e estudo das três tecnologias aplicadas à localização e navegação que se encontra descrito na secção 3.1 do capítulo 3;
- Desenvolvimento de duas bancadas de ensaios experimentais para testes de velocidade e orientação controlada para o estudo dos sensores de **RFID** e para a régua de sensores magnéticos, que está descrito e pode ser visualizado na secção 5.1 do capítulo 5;

- Construção de um protótipo de régua de leitura de *tags* **RFID**, para adquirir velocidade, orientação e informação armazenada nas *tags*;
- Melhoramento nos algoritmos de localização para os ensaios experimentais com o sensor de régua magnética e régua de Leitores de **RFID** a fim de otimizar a fusão de tecnologias no âmbito da navegação;
- Estudo de algoritmos aplicados a *beacons* de radiofrequência numa área *indoor* da marca *Marvelmind*;
- Desenvolvimento de uma placa de circuito impresso com a compilação das três tecnologias em estudo, que permita para a realização de trabalhos futuros;

1.2 Estrutura do Trabalho de Projeto

Esta dissertação encontra-se dividida em 6 capítulos. Após a introdução, o capítulo 2 aborda as soluções já existentes e mais utilizadas no que toca a sistemas de localização.

São também apresentados alguns algoritmos e conceitos base relativos a sistemas de localização. No capítulo 3 é apresentado os principais componentes integrantes do robô móvel. Nele é descrita toda a evolução de construção mecânica, *hardware* como de *firmware*, assim como o desenvolvimento do sensor **RFID** e o estudo do sensor de guia magnético e os *beacons* de radiofrequência. Além disso, descreve de igual modo a construção das bancadas de teste que foram usadas para variados experimentos.

O capítulo 4 é dedicado ao algoritmo de localização de nome Localização Relativa e Absoluta e nele são explicados todos os princípios envolventes ao processo, onde é feita uma descrição de todos os blocos envolventes ao algoritmo.

No capítulo 5 terá a mesma estrutura que o capítulo 4, no entanto, descreve o algoritmo de localização e os resultados obtidos para cada tecnologia em estudo.

Finalizando, o capítulo 6 apresenta as principais conclusões tiradas ao longo da dissertação e sugere linhas de trabalho futuro.

2 ESTADO DA ARTE

2.1 Introdução

A localização surgiu como uma necessidade infundada, devido a consequente diversidade de tecnologias existentes e do grande leque de aplicações dadas aos robôs móveis. No entanto existem diversos métodos de localização que permitem seguir um caminho fixo ou dinâmico. A determinação na escolha de caminhos fixos ou dinâmicos recai no custo de instalação, nos requisitos de flexibilidade e na necessidade ou não de futura expansão do sistema [8].

Atendendo a que este trabalho tem como fim a sua aplicação em ambiente industrial, neste capítulo será dada prioridade às soluções de localização com aplicabilidade em ambientes industriais, uma vez que é reconhecidamente impossível mencionar todos os métodos de localização de robôs móveis já estudados e propostos. Para além de um vasto trabalho de investigação, existem atualmente no mercado diferentes soluções de localização de robôs móveis para a indústria.

Algumas delas apresentam grandes níveis de fiabilidade, devido aos vários anos de maturação. Em guia de exemplo, o primeiro **AGV** da história foi criado em 1950, por *Barrett Electronics* Consistia num veículo de reboque que seguia um fio elétrico embutido no pavimento [8]. Esta mesma técnica ainda hoje é aplicada na indústria.

Os caminhos fixos, são a solução mais comum no mercado [9], implicam menores custos. No entanto apresentam-se como uma solução com menor flexibilidade inviabilizando assim reação rápida quando existe a necessidade de mudanças no plano predefinido. Os caminhos dinâmicos, permitem maior flexibilidade, contudo são sistemas mais pesados e com custos de implementação mais elevados. Existem diferentes soluções às metodologias aplicadas a localização, nomeadamente se são determinísticas, topologias ou híbridas. Na presente secção serão abordados alguns dos sistemas mais usados no mercado de aplicações industriais.

2.2 Sistema Filoguiado e Faixa magnética

O sistema de filoguiado, baseia-se, como representado na (Figura 1)[24], no seguimento por parte do robô móvel de um cabo enterrado no pavimento da área de trabalho.

Este fio é um condutor percorrido por uma corrente elétrica alternada criando assim um campo elétrico em torno do mesmo, como representado na (Figura 2)[8].



Figura 1 - Sistema de Navegação



Figura 2 - Colocação de faixa magnética sob a superfície

O sensor, é colocado num ponto estratégico do robô móvel, quando está sobre a linha, apresenta na sua saída o valor zero, (ver Figura 3). Este valor vai variando mediante o deslocamento e a orientação, sendo o objetivo do sistema corrigir constantemente a posição de forma a manter-se com valor de referência zero [8].

Assim, pode-se concluir que é um sistema robusto, simples e barato para soluções onde se pretenda um caminho fixo, visto que, desde que esteja sobre o fio estará sempre orientado. Contudo necessita de velocidades baixas de forma a nunca se perder do fio. A grande desvantagem de tal sistema passa pelos elevados custos para enterrar os condutores no solo e consequentemente custos na mudança do *layout*.

O seguimento de faixas é também uma solução com trajetórias fixas, e em parte bastante idêntico ao filoguiado. O princípio de funcionamento desta técnica assenta, tal como ilustrado na Figura 4 [25], no seguimento, por parte do robô móvel, de uma fita magnética. Com o sensor apropriado este método funciona de forma muito idêntica ao anterior.



Figura 3 - Colocação de cabo magnético soterrado no solo (Filoguiado)



Figura 4 - Faixa magnética para um sistema de seguimento de faixa

2.3 Sistema Baseado em Marcadores

O princípio deste método de localização assenta no seguimento, por parte do robô móvel, de uma trajetória em que a informação não se encontra sempre disponível.

Ou seja, ao longo de um percurso quando o robô móvel encontra um marcador retira informação do mesmo, sendo esta informação relativa à sua posição atual (corrigindo assim a sua localização) e por vezes traça nova trajetória para o próximo marcador, deslocando-se de seguida ao longo de uma distância sem mais nenhuma informação, até que novo marcador seja encontrado.



Figura 5 - Sistema de localização com marcadores

Os marcadores podem ser etiquetas magnéticas, refletores, **RF** passivas, formas geométricas ou até mesmo códigos de barras. Nesta técnica os caminhos são definidos com pequenos marcadores posicionados ao longo do percurso do robô móvel ligando entre si uma trajetória imaginária.

Devido ao facto de os marcadores se encontrarem distanciados entre si, existem momentos onde o robô móvel se encontra a deslocar sem nenhuma informação do ambiente ao seu redor. Assim surge a necessidade de a esta técnica de localização absoluta juntar outras técnicas, conhecidas como técnicas de localização relativa, de forma a adquirir um pouco mais de informação ajudando o robô móvel a encontrar o próximo marcador. A fusão da localização absoluta e relativa é possível através de métodos probabilísticos como é exemplo do *Filtro de Kalman* e do *Filtro de Partículas* [10][11].

É então perceptível que esta solução é versátil, flexível, simples, rápida e consequentemente de menor custo que as anteriormente referidas. Contudo está dependente da informação proveniente dos marcadores, os quais não estão sempre disponíveis ao longo do tempo.

Tornando assim a localização intermitente. Tal facto torna esta solução pouco robusta sendo passível o robô móvel perder-se devido a erros de leituras nos marcadores ou ainda a erros no processamento da informação.

2.4 Sistema de localização baseado em odometria

Esta é uma técnica de localização relativa acompanhada por um erro não limitado e é usual usar esta técnica em conjunto com outras referidas anteriormente, de forma a minimizar as incertezas. A odometria é uma maneira de obter a posição de um robô móvel no momento $t+1$ a partir da sua posição anterior t através da integração de comandos de velocidade num espaço definido de tempo ou a partir da informação proveniente dos *encoders* das rodas.

Estes dois modelos diferem principalmente entre a grandeza do seu erro. Embora a obtenção da odometria através de comandos de velocidade permite-nos saber facilmente a próxima posição, é acompanhada por erros associados ao modelo de velocidade e a erros de deslizamento.

A odometria baseada em *encoder* tem provado ser a mais fiável e acompanhada de menor erro. Atendendo ao facto dos *encoders* utilizados atualmente serem de alta precisão este modelo fica unicamente afetado por erros de deslizamento.

Hoje em dia a maior parte das arquiteturas fornecidas pelo mercado disponibiliza o deslocamento em x , y e δ periodicamente (em intervalos de 10ms) [8].

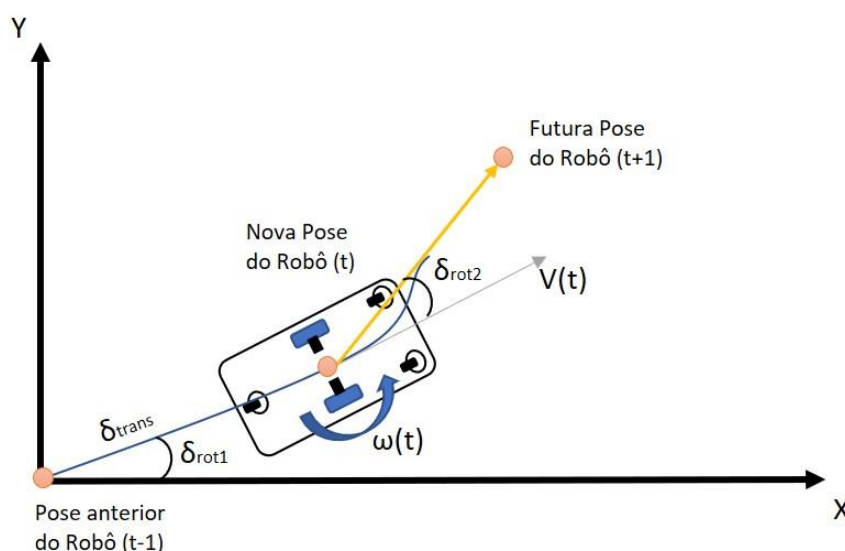


Figura 6 - Modelo de Movimento da Odometria

Na odometria baseada em encoders a posição só se encontra disponível depois do movimento.

Para tal foi desenvolvido um modelo para o processamento da próxima posição, tendo este o nome de *Odometry Motion Model* [12]. Este modelo consiste em dividir o movimento em duas rotações e uma translação como exemplificado na Figura 6. É feita uma rotação inicial entre a pose anterior ($t-1$) e a linha de menor caminho entre as coordenadas anteriores e as coordenadas atuais (δ_{rot1}). De seguida faz-se a translação entre os pontos referidos anteriormente e, por fim uma rotação para o ângulo final.

As próximas equações demonstram como é feito o cálculo das duas rotações e a translação das leituras da odometria entre $\hat{x}_{t-1} = (\hat{x} \ \hat{y} \ \hat{\theta})$ e $\hat{x}_t = (\hat{x}' \ \hat{y}' \ \hat{\theta}')$:

$$\delta_{rot1} = atan2(\hat{y}' - \hat{y}, \hat{x}' - \hat{x}) - \hat{\theta} \quad (2.1)$$

$$\delta_{trans} = \sqrt{(\hat{x} - \hat{x}')^2 + (\hat{y} - \hat{y}')^2} \quad (2.2)$$

$$\delta_{rot2} = \hat{\theta} - \hat{\theta} - \delta_{rot1} \quad (2.3)$$

Assim sendo podemos calcular o deslocamento em x , y e θ através do seguinte modelo:

$$f_v = \begin{bmatrix} \delta_{trans} \cos(\theta + \delta_{rot1}) \\ \delta_{trans} \sin(\theta + \delta_{rot1}) \\ \delta_{rot1} + \delta_{rot2} \end{bmatrix} \quad (2.4)$$

Tem-se que a posição atual, xt , é obtida através de $xt - 1$, ou seja, obtém-se a posição atual somando o deslocamento obtido pelo modelo do sistema à posição anterior:

$$\begin{bmatrix} x' \\ y' \\ \theta' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x \\ y \\ \theta \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \delta_{trans} \cos(\theta + \delta_{rot1}) \\ \delta_{trans} \sin(\theta + \delta_{rot1}) \\ \delta_{rot1} + \delta_{rot2} \end{bmatrix} \quad (2.5)$$

Cada vez que o veículo se desloca, este deslocamento é acompanhado de erros provenientes de diversos fatores como é exemplo o erro dos *encoders* ou erros na estimativa do tamanho da roda, cujo diâmetro depende da carga do robô ou da pressão, que por sua vez depende da temperatura, entre outros fatores. É então necessário ao modelo previamente apresentado adicionar um erro gaussiano de média zero, tendo então:

$$\begin{bmatrix} x' \\ y' \\ \theta' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x \\ y \\ \theta \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \delta_{trans} \cos(\theta + \delta_{rot1}) \\ \delta_{trans} \sin(\theta + \delta_{rot1}) \\ \delta_{rot1} + \delta_{rot2} \end{bmatrix} + q_v \quad (2.6)$$

onde q_v se decompõe da seguinte forma:

$$q_v = \begin{bmatrix} \varepsilon_{xv} \\ \varepsilon_{yv} \\ \varepsilon_\theta \end{bmatrix} \quad (2.7)$$

2.5 Sistema de localização baseado na tecnologia RF

A utilização de tecnologias de Radio Frequência na localização de veículos móveis tem sido alvo de estudos recentes [13]. Alguns trabalhos sugerem a utilização de tecnologias como **UWB** [26], **WLAN** [19], ZigBee [19] e **RFID**. Porém, de um modo geral, a precisão destes sistemas é ainda baixa quando comparada com as soluções tradicionais.

Na maioria destas soluções, o cálculo da localização do robô móvel é realizado com base na informação da distância entre este e os dispositivos com que interage. Um método muito utilizado na medição desta distância passa por se saber a força do sinal recebido. Porém, em ambientes interiores, a relação entre a distância percorrida e a atenuação do sinal não é linear nem constante.

Além disso, esta medida apresenta ruído não gaussiana resultante de efeitos como reflexões, tráfego de rede, presença de pessoas ou condições atmosféricas. Estes fatores tornam difícil quantificar de forma precisa a distância da fonte emissora [12]. Com o objetivo de melhorar a precisão da localização, outras soluções baseiam-se em técnicas alternativas, como por exemplo o tempo de voo do sinal, mas apresentam igualmente algumas limitações. De referir ainda que em robôs que já fazem uso de comunicações por rádio frequência, a utilização desses sinais para localização apresenta-se bastante mais atrativa. Além de reduzir os custos com equipamentos, possibilita ainda que equipas de robôs colaborem no cálculo da localização ao mesmo tempo que trocam dados. A nível comercial existem já soluções que fazem uso de tecnologia **RF**.

Neste âmbito, as empresas como *Marvelmind* [19] (ver Figura 7), *Localino* [26] (ver Figura 8), entre outras, apresentam um sistema de localização em tempo real baseado em tecnologia **RF**. Este sistema permite a localização de dispositivos a três dimensões com uma precisão de dois centímetros com um nível de confiança de 95%. No dispositivo a monitorizar é colocada uma *tag* móvel ativa que emite impulsos de sinais **RF**, de frequência compreendida entre 433MHz, ou então o uso de UWB, que comunica com um servidor central, este por sua vez conecta-se com uma rede de sensores já instalada no local onde se pretende localizar os dispositivos, de modo a receberem o sinal sonoro emitido pelas *tags* e assim conseguir medir distancias. Habitualmente, esta rede é composta por quatro sensores ou mais, sendo que um deles assume o papel de mestre e os restantes de escravos. A posição absoluta do dispositivo é calculada, no sensor mestre, através da combinação de posições já conhecidas pela *tags* recetoras e pela

trilateração calculada através das medições feitas pelos ultrassons. As medidas podem ser atualizadas no máximo a cada 109 milissegundos.



Figura 7 - Sistema de localização por radio frequência.



Figura 8 - Sistema de localização UWB.

2.6 Sistemas de detecção de informação por RFID

A identificação por radiofrequência ou RFID (do inglês Radio Frequency *ID*entification) é um sistema de identificação que permite a leitura e escrita de dados através de sinais de rádio.

Este sistema é composto por leitores e etiquetas RFID (ver Figura 9) ou *tags* como são mais vulgarmente conhecidas, as quais estão normalmente ligadas fisicamente a um objeto, de forma a permitir a sua identificação e rastreamento. Os leitores transmitem sinais de rádio codificados de modo a interrogá-las, aos quais estas respondem com informação sobre a sua identificação, bem como outras informações que possam conter.



Figura 9 - Modulo de Leitura/Escrita RFID RC522 e descrição dos pinos de comunicação.



Figura 10 - Modulo completo de Leitura/ Escrita e respectivas tags de armazenamento de informação passiva.

Portanto, a etiqueta ou *tag*, é geralmente um componente passivo, que contem apenas uma antena e um microchip integrado, e quando se aproxima do campo eletromagnético do transceptor, devido à indução, é gerada uma tensão na bobina da antena, que isso servirá como alimentação para o microchip. Estas fazem o armazenamento da informação de forma remota para, posteriormente poder ser lida pelos leitores eletrônicos [14].

Podem ser colocados em pessoas, equipamentos, embalagens ou até mesmo em animais pois, apesar de poderem assumir várias formas, geralmente são de tamanho reduzido.

As etiquetas são compostas por três componentes: um circuito integrado, uma antena e um encapsulamento como mostra Figura 11.

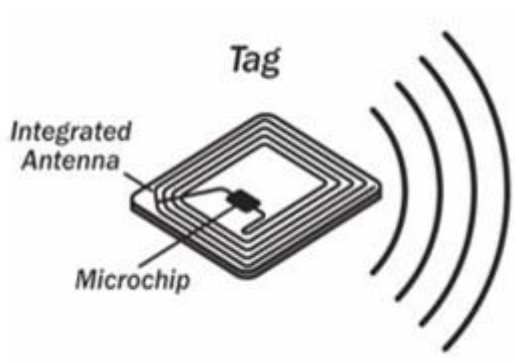


Figura 11 - Etiqueta ou *tag* de RFID.

O circuito integrado é um chip de silício, ou seja, um circuito eletrônico integrado, que faz o armazenamento e processamento (em certos casos) da informação. Por sua vez, este encontra-se ligado a uma antena que, por vezes, pode ser composta por elétrodos de tinta de carbono que são impressos na parte de trás da etiqueta de papel. O seu revestimento é feito por encapsulamento, normalmente constituído por materiais como o Policloreto de Vinilo (**PVC**), Epóxi, Poli tereftalato de Etileno (**PET**), entre outros, devido às suas propriedades, as quais permitem manter a integridade do dispositivo. O RFID apresenta várias vantagens relativamente a outros tipos de sistemas similares. Utiliza comunicação sem fios, não necessitando assim de contacto nem de campo visual direto. Além disso, permite a leitura e escrita de dados a grandes velocidades e um grande armazenamento de informação, sendo superior a tecnologias similares nestes pontos. Outro ponto positivo é o facto de as *tags*, além de serem baratas (ficando ainda mais quando compradas em grandes quantidades), poderem ser reutilizadas e exigirem uma manutenção mínima ou inexistente. O sistema pode ser utilizado em ambientes severos, com condições adversas, tais como, locais húmidos, molhados, poeirentos, corrosivos, sujeitos a altas ou baixas temperaturas, sujeitos a vibrações ou choques, entre outros [15].

O leitor RFID tem presente em si, um módulo de radiofrequência, uma unidade de controlo de dados e uma bobina de antena que gera um campo eletromagnético de alta frequência como mostra na Figura 12.

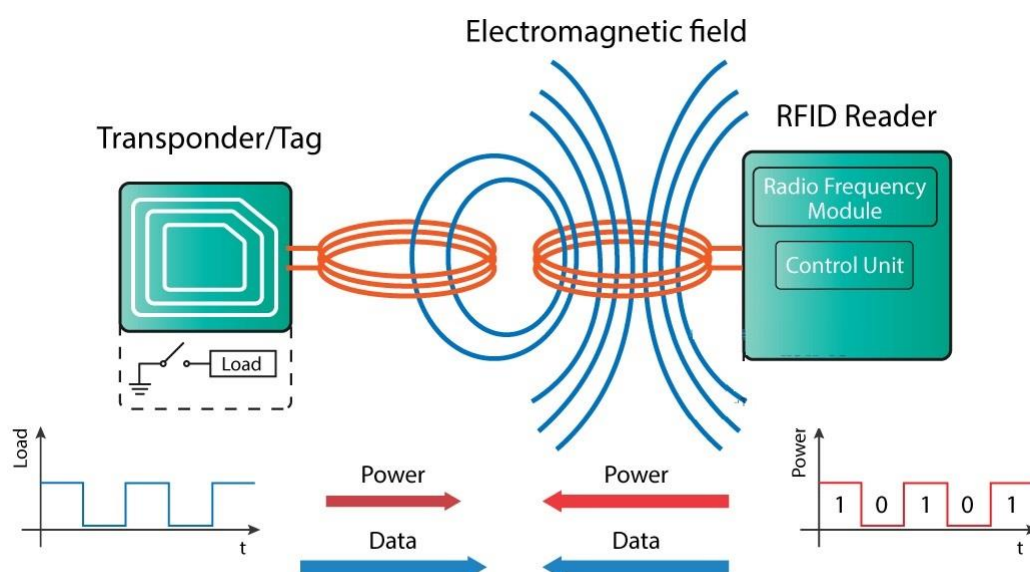


Figura 12 - Modelo de funcionamento/ alimentação e envio/receção de informação.

À medida que a etiqueta é alimentada por radiofrequência, pode extrair a mensagem transmitida do leitor e, para enviar a mensagem ao leitor, usa uma técnica chamada manipulação de carga. Ligar ou desligar uma carga na antena da etiqueta afetará o consumo de energia da antena do leitor que pode ser medido como queda de tensão. Essa mudança de tensão, será capturada como um e zero e é assim que os dados são transferidos da *tag* para o leitor.

Há também outra maneira de transferência de dados entre o leitor e a *tag*, que se chama método de acoplamento retrodifusão. Neste caso, a etiqueta usa parte da energia recebida para gerar outro campo eletromagnético que será apanhado pela antena do leitor.

Isto faz com que sejam de grande utilização em várias indústrias, permitindo uma melhor gestão de armazém e recurso, poupando tempo e dinheiro. No entanto, o sistema RFID evidencia uma grande variedade de frequências e alcances para mais diversas utilizações. A Figura seguinte (Figura 13) mostra uma comparação das principais características destes sistemas [15].

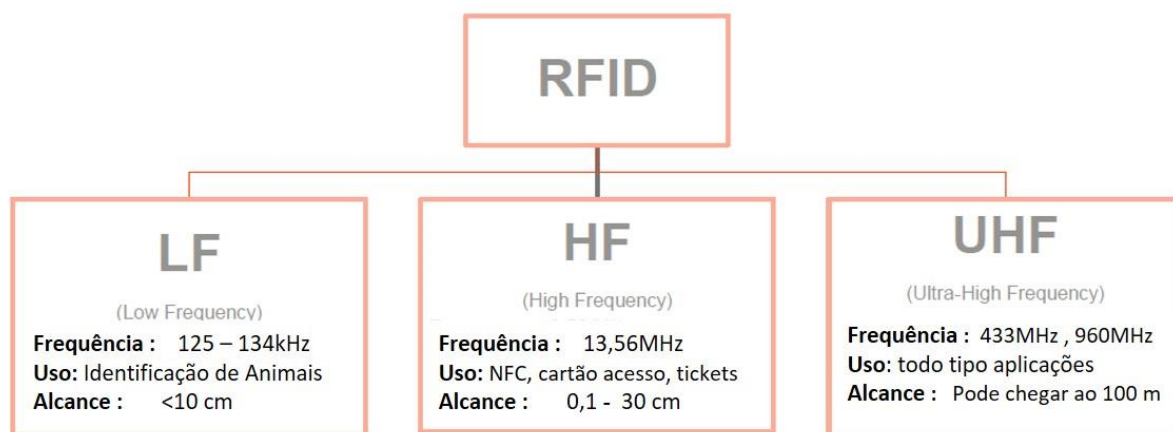


Figura 13 Modelo variante de diferentes frequências e distâncias de alcance.

3 DESENVOLVIMENTO

Neste capítulo vão ser apresentadas todas as características concebidas, tanto da parte do hardware como de firmware. Inicialmente serão apresentadas as características de todos os elementos constituintes da plataforma construída para a realização de testes e de seguida é feita uma breve descrição da arquitetura desenvolvida na parte de firmware e das diferentes camadas criadas e utilizadas. Por fim, são feitas algumas considerações relativamente ao modo de comunicação entre a camada de firmware e a de hardware utilizando **ROS**.

Para que o robô móvel seja dotado de autonomia e cumpra as tarefas que lhe forem confiadas, foi necessário instalar, desenvolver e interligar vários equipamentos eletrônicos e algoritmos de firmware capazes de criar uma arquitetura funcional dos principais sistemas que o constituem.

Esta arquitetura encontra-se representada na Figura 14, onde mostra de forma clara o modelo funcional e a ligação de todos sensores usados com forme a sua prioridade.

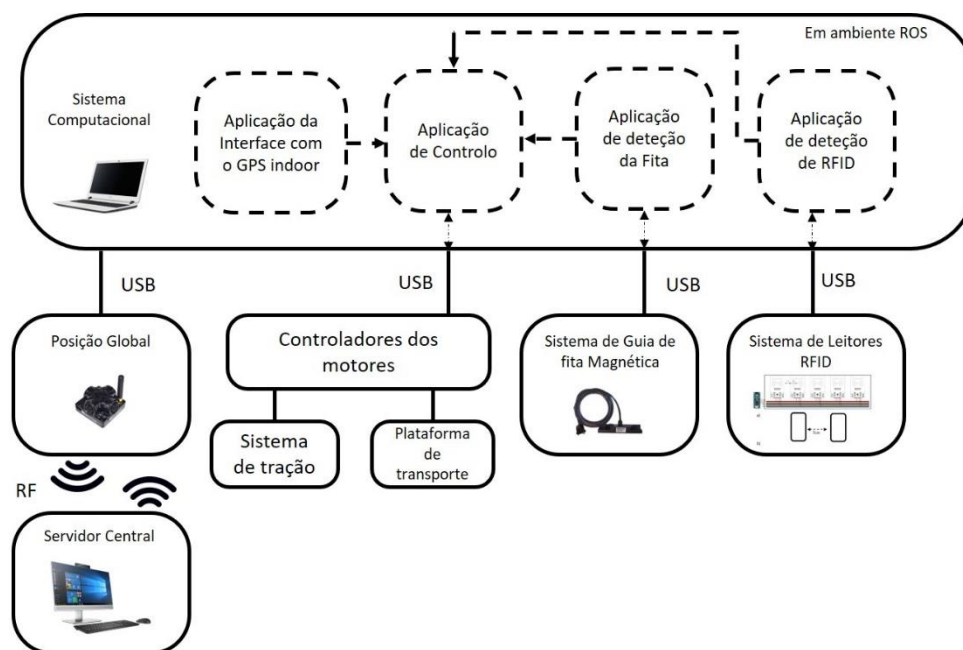


Figura 14 - Arquitetura funcional dos principais sistemas do robô móvel.

3.1 Plataforma Experimental

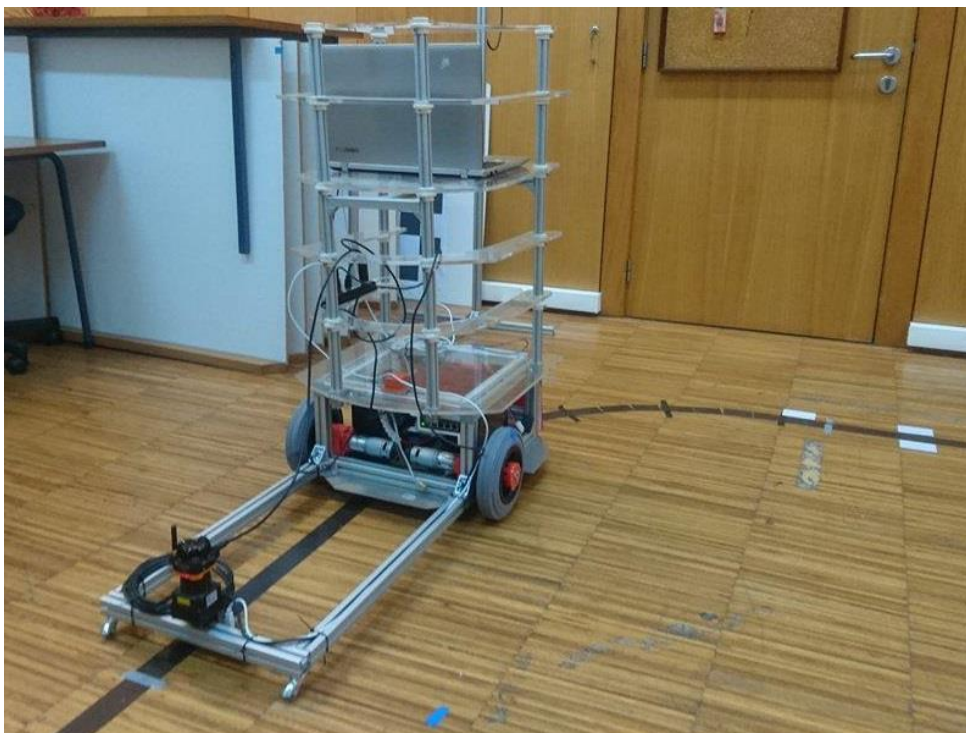


Figura 15 - Robô móvel construído no âmbito deste trabalho de projeto.

Este robô móvel foi totalmente projetado e concebido para o propósito deste trabalho de projeto, no qual um dos objetivos consiste, no transporte de objetos percorrendo um layout pré-definido do ponto A ao ponto B com a maior precisão possível. O robô movimenta-se com base num sistema de tração diferencial dianteira e possui na retaguarda uma roda livre do tipo castor que permite a sustentação do veículo (ver Figura 16). Esta configuração torna o veículo bastante estável e, como possui apenas duas rodas motrizes, é de fácil controlo. Ao mesmo tempo, apresenta um bom nível de manobrabilidade, possibilitando inclusivamente que o robô rode sobre si.

O controlo do sistema de condução é realizado por três controladores que, para além da leitura de sensores e atuação nos respetivos motores, executam algumas tarefas de processamento.

A plataforma móvel intitulada “*InterBot*” é uma plataforma compacta e robusta, com a capacidade de transportar grandes cargas, nomeadamente equipamento para fins robóticos (Lasers, KINECT, PC etc).

Os módulos principais que integram esta base são:

- 2 Baterias;
- 1 Controlador de motores DC com escovas;
- 1 conversor DC/DC;
- 1 *On-Board* PC, Raspberry Pi 2;
- 2 Motores DC com escovas e *encoders*;

3.1.1 Baterias

As baterias *Shimastu* NP18-12, são baterias de chumbo e conseguem fornecer 18Ah a 12V. Estas baterias têm um peso de 5,7Kg por unidade (ver Figura 16).



Figura 16 - Modelo de bateria aplicada ao robô móvel.

3.1.2 Motores



Figura 17 - Motor aplicado ao robô móvel com *encoder* acoplado

O EMG49 (ver Figura 17) é um motor DC com escovas de 24V, com *encoder* e uma caixa de redução 49:1, capaz de ter um binário superior a 16Kg/cm de reboque. Na tabela seguinte é apresentado uma tabela com as características elétricas.

Tabela 1 - Tabela de parâmetros elétricos do motor

Designação	Valor
Tensão nominal	24 V
Binário nominal	16Kg/cm
Velocidade nominal	122 rpm
Corrente nominal	2100 mA
Velocidade sem carga	143
Corrente máxima	13 A
Potência de saída máxima	34,7 W
Pulsos do <i>encoder</i> por volta do eixo	980

A cada *encoder* é constituído por dois sensores de *hall*, representado cada um por uma fase (A e B) e são tolerantes a tensões de alimentação entre 3.5V e 20V. As saídas, destes, estão configuradas em coletor aberto e necessitam de resistências *pull-ups*.

Os sinais extraídos dos *encoders* são enviados diretamente para o controlador de motores e tem a seguinte configuração como mostra na tabela 2.

Tabela 2 - Descrição das ligações elétricas dos *encoders*

Cor dos fios	Ligação
Roxo	Sensor de <i>Hall B</i> V_{out}
Azul	Sensor de <i>Hall A</i> V_{out}
Verde	GND
Castanho	Vcc (3.5V - 20V)

3.1.3 Motores

O controlador de motores *RoboteQ SDC2130* (ver Figura 18), foi escolhido para esta aplicação, pois tem a capacidade de receber comandos via RC rádio, um *Joystick* analógico, modem *wireless*, PC (através RS232 ou USB) ou microcontrolador e controlar os dois motores a partir do método de sintonização de *Ziegler-Nochols* de Malha Fechada, determinado o K crítico para o calculo do controlador P.

A tensão máxima é 30 V e 10 A por canal [17].



Figura 18 - Controlador de motores: Roboteq SDC2130[18]

3.1.4 On-Board PC

Um *System-On-Chip (SoC)* Raspberry Pi 2 é usado para implementar a cinemática inversa da plataforma e, assim, converter velocidades linear e angulares em velocidades lineares para cada roda.

O Raspberry 2 foi o candidato escolhido devido as sua dimensão e por ter um processador quad-core ARM Cortex-A7 com 900 MHz e 1GB de RAM. Este dispositivo tem 4 portas USB, 40 pinos GPIO, uma porta HDMI, uma porta Ethernet, etc.



Figura 19 - Raspberry Pi 2, SOC usado no robô móvel para controlar os movimentos da mesma.

3.1.5 Conversor DC/DC

No robô móvel é usado um conversor DC/DC SD-150B-12 da *MEAN WELL*. Este conversor DC/DC converter 24 V para 12 V com uma corrente nominal de 12.5 A 150W de potência de saída. Garantindo assim tensão para que outros equipamentos se possam ligar sem problema.



Figura 20 - Conversor DC/DC usado no robô móvel

3.1.6 Estrutura da Plataforma móvel

O robô móvel intitulado de Interbot, apresenta dimensões bastante compactas, menores que a largura de uma porta (480 mm x 480mm x 300mm), para que fosse possível a passagem de forma autónoma de uma divisão para outra, o mesmo tem uma capacidade de carga que poderá chegar aos 60Kg. Na figura 21, 22 e 23, é possível verificar alguns passos do processo de montagem.

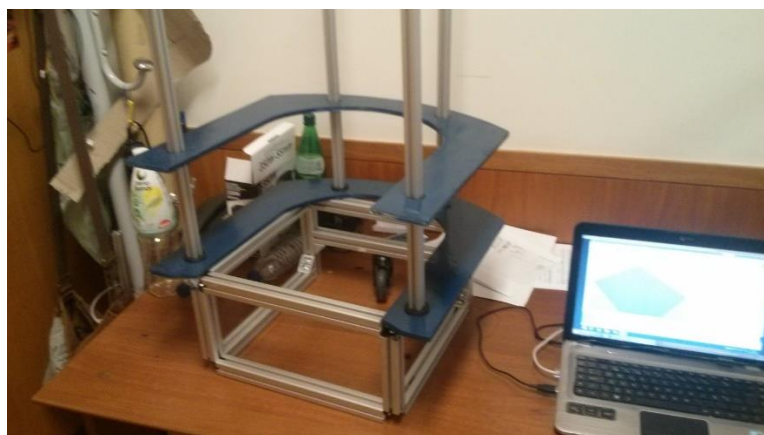


Figura 21 - Estrutura em perfil de alumínio do robô móvel.

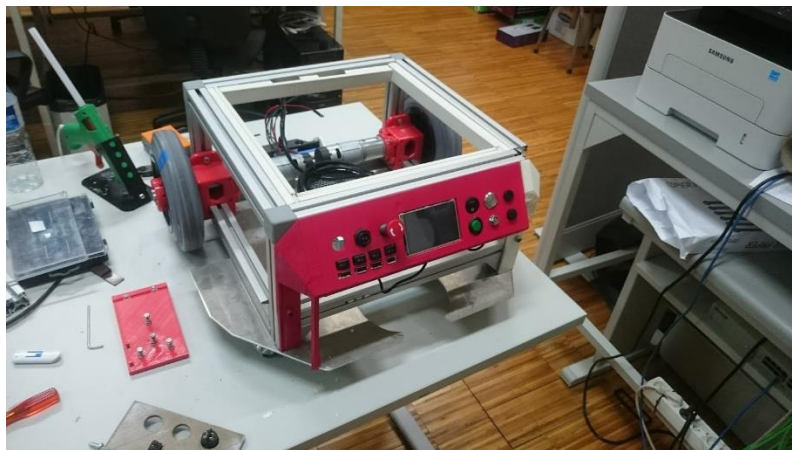


Figura 22 - Montagem das rodas e componentes eletrônicos anteriormente referidos.

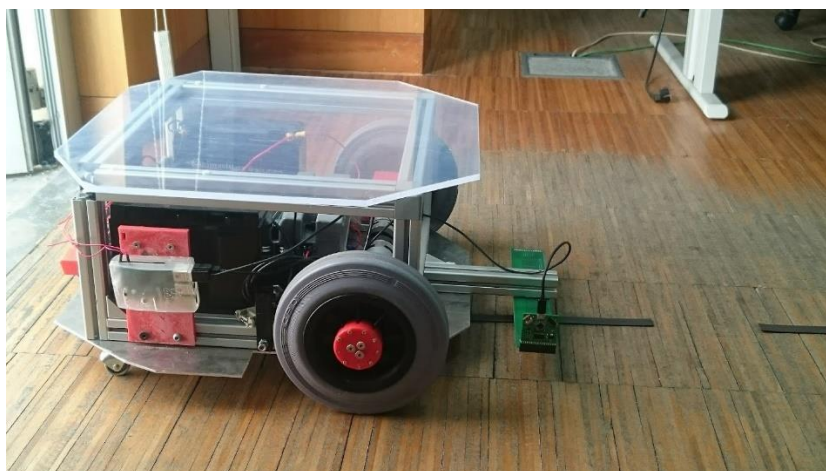


Figura 23 - Primeiros ensaios do controle de movimento do robô, feitos com *On-board PC Raspberry Pi2*.

3.2 Sensores

De forma a existir uma localização do robô móvel, visto o erro da odometria ser ilimitado, torna-se necessário adquirir mais informação do exterior de forma a poder corrigir a posição prevista pela odometria. Para tal, foram adicionados ao robô móvel um sensor de guia magnético da marca *Roboteq MGS1600*, um protótipo de régua de sensores de leitura de *tags RFID* e *Beacons* da marca *Marvelmind* para se obter a posição Global.

3.2.1 Sensor Magnético MGS1600 Roboteq

O Sensor de Guia Magnético da *Roboteq* é um sensor capaz de detetar e referir a posição de um campo magnético ao longo do seu eixo horizontal. O sensor destina-se a aplicações em Veículos Guiados Automáticos, usando fita magnética adesiva de baixo custo para criar um guia de referência no chão. Em comparação com outras técnicas de guia, os guias magnéticos são totalmente passivos e, portanto, fáceis de estabelecer e modificar. A fita cria um campo invisível que é imune a poeiras industriais e não é afetado pelas condições de iluminação. A faixa magnética pode ser totalmente escondida sob qualquer material de revestimento não ferroso. O sensor pode ser conectado diretamente a qualquer um dos controladores de motores da *Roboteq* para criar uma solução AGV eficaz com apenas dois componentes. O sensor também pode ser conectado a qualquer computador de PLC, PC ou outro PCB, capaz de comunicar via analógica, PWM, RS232, Interfaces USB ou CANbus [18].



Figura 24 - Imagem do sensor magnético MGS1600 sobre uma fita magnética.

Tabela 3 - Tabela de especificações do sensor MGS1600

Designação	Valor
Largura do sensor (mm)	160 mm
Alcance	10-60 mm
Tensão de alimentação	4,5 V a 30 V
USB, RS232, Analógico, PWM	Sim
Scripts Microbasic	Sim
Dimensões	165 mm x 30 mm x 25 mm
Corrente máxima	13 A
Peso	160 g

O campo magnético gerado pela fita magnética, permite dessa forma seguir o trajeto pré destinado, sem que outros erros de sensores externos, possam influenciar a trajetória.

3.2.2 Régua Sensorial de leitura de Tags RFID



Figura 25 - Protótipo de uma Régua de Leitores de tags RFID usado na plataforma robótica.

O protótipo criado (ver Figura 25) é um sensor capaz de detetar e relatar a velocidade instantânea a que o robô móvel se desloca ao longo do seu eixo horizontal e devido a disposição geométrica das tags, os sensores integrados neste protótipo são capazes de reconhecer a orientação ao qual o robô móvel se encontra, mas a metodologia aplicada será descrita na secção 4.2. Para já esta régua sensorial contém as seguintes características (ver tabela 4):

Tabela 4 - Tabela de especificações do protótipo de criado para a leitura de tags RFID.

Designação	Valor
Dimensões	380 mm x 125 mm x 25mm
Número de Leitores RFID	5 mm
Espaçamento entre Leitores	14 mm
USB; SPI	Sim
Alcance	10 – 60 mm
Tensão de alimentação	3.3 V – 5 V
Microcontrolador	ESP8266 (160MHz)
Taxa de Atualização	100 Hz

Este protótipo apresenta como mostra na figura 26, barramentos em cobre que e permitiu dessa forma uma comunicação por SPI, capaz de ler em simultâneo a leitura de todos os sensores. Sempre que um leitor de RFID recolhia informação, emitia um sinal para o processador central, onde este, criava uma interrupção prioritária para receber a informação e depois pré processá-la.

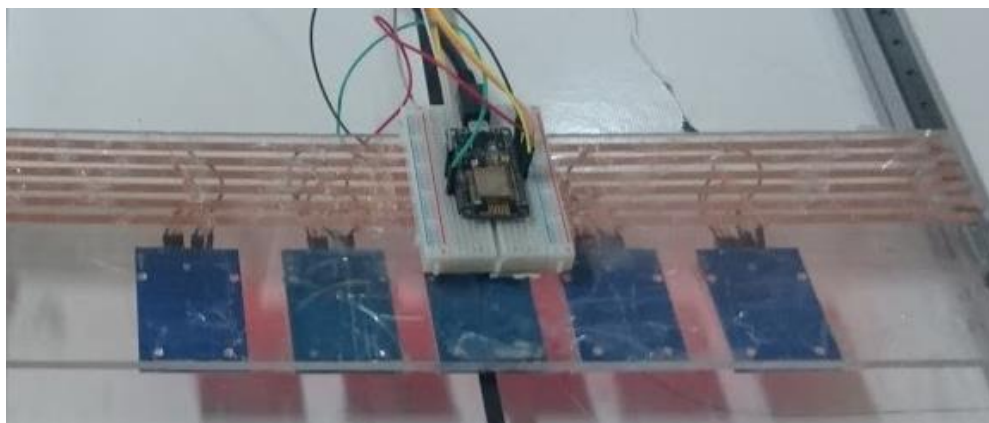


Figura 26 - Protótipo de uma Régua de Leitores de *tags* RFID em fase de testes.

3.2.3 GPS Indoor *Marvelmind*

O “*GPS Indoor*” comercializado pela *Marvelmind* é um sistema de localização “*indoor*”, pese embora, também, funcione em meios exteriores, especialmente projetado para fornecer a localização em tempo real dos robôs e veículos autônomos, mas também pode ser usado para localizar outros objetos, onde a *beacon* móvel possa ser instalada. O sistema é composto por uma *beacon* ultrassónica móvel instalada no objeto que pretende localizar, e por pelo menos 3 *beacons* estacionárias (ver Figura 27), recebem comandos de aquisição e envio de informação pelo modem através de radiofrequência, numa banda livre de 433MHz.

Sem esta obstrução é possível obter distâncias até aos 50 metros entre *beacons* e o modem garante uma cobertura por radiofrequência até 1000 metros, com uma precisão diferencial de cerca de 2 a 5 centímetros.

A taxa de atualização da localização do sistema, ronda entre os 0,5 e os 16Hz e que pode ser modificada pelo utilizador e o modelo de criação do mapa é automático, ou seja, não necessita de adicionar as coordenadas, que o próprio software (ver Figura 28) consegue através das medições feitas pelas próprias *beacons* construir um mapa de localização.



Figura 27 - Kit de beacons para o cálculo da posição global do robô móvel.

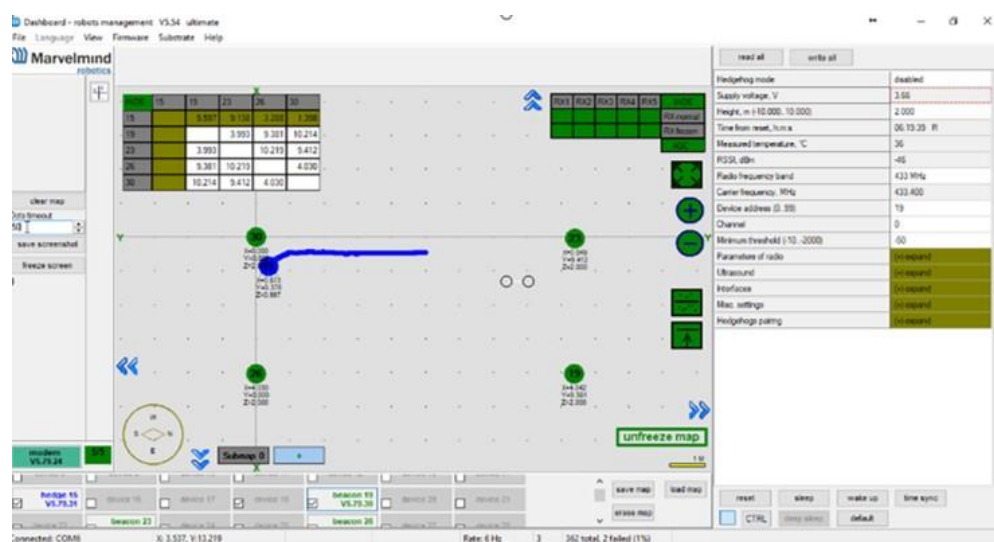


Figura 28 - Ambiente Gráfico para o monitoramento da posição Global do robô móvel.

3.3 Arquitetura de Firmware do Robot Móvel

3.3.1 Camada ROS

O **ROS** (*Robot Operating System*) disponibiliza bibliotecas e ferramentas que ajudam os programadores a criarem novas aplicações robóticas. Na verdade, o **ROS** não é exatamente um sistema operativo no verdadeiro sentido da palavra, é um *framework* que é executado sobre um sistema operativo. E tem como principais vantagens o fornecimento de *drivers*, software de visualização, *messagepassing*, gestão de pacotes é uma das suas maiores vantagens recai na abstração do hardware, proporcionando assim grande flexibilidade ao código criado.

Os principais conceitos do ROS passam pelos seus serviços, nodos, mensagens e tópicos [6]. Os nodos executam os programas e é onde todo o processamento computacional é executado. Um sistema é usualmente composto por múltiplos nodos ou nós, sendo cada um deles responsável por uma tarefa diferente. A comunicação entre nodos é feita pela passagem de mensagens. Uma mensagem é um tipo de dado, por exemplo *int*, *double*, etc... Os nodos enviam as mensagens publicando-as num tópico que é posteriormente subscrito. Por outras palavras os nodos seguem um serviço de publicador/subscritor.

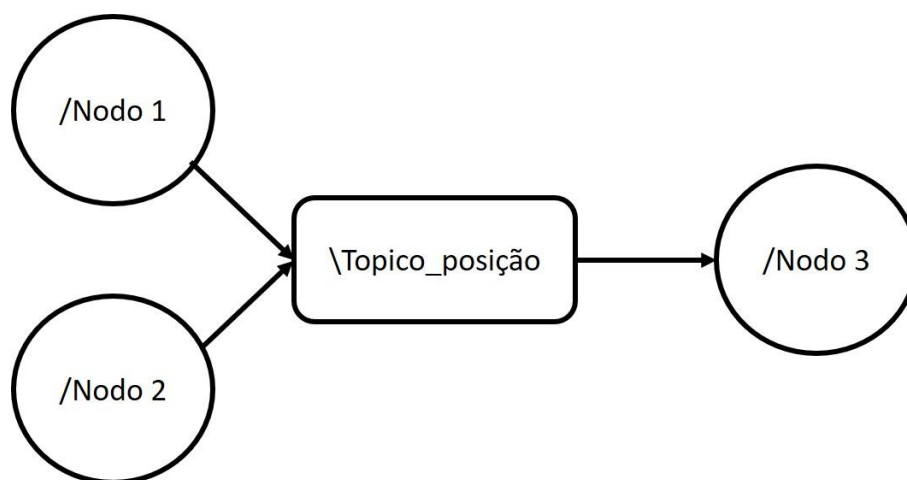


Figura 29 - Exemplo arquitetura **ROS** tipo publicador subscritor.

Um tópico é simplesmente o nome dado para identificar o tipo da mensagem. Todos os nodos interessados numa determinada mensagem subscvem o tópico referente à mesma. Podem existir diversos publicadores e subscritores para o mesmo tópico, todos ignorando a existência uns dos outros. Este paradigma é utilizado para separar os conceitos de produtor e consumidor (um problema comum em sistemas de tempo real ou em execução paralela).

Um serviço é outra forma de os nodos comunicarem entre si. Os serviços permitem aos nodos enviarem um pedido e receberem uma resposta. Ou seja, seguem um serviço de pedido/resposta.

Como se pode ver na Figura 29, o nodo 1 e o nodo 2 são dois nodos que produzem mensagem do mesmo tipo. O tipo de mensagem transmitido pelo nodo 1 e 2 é denominado como *"tópico_posição"* e este tópico é subscrito pelo nodo 3.

Para lá dos conceitos referidos anteriormente o ROS é dotado de vários programas, que ajudam na interpretação tanto dos resultados adquiridos pelos sensores como dos possíveis erros desconexão entre outros. São exemplo de tais programas o *rxgraph*, o *rxconsole* e o *rviz*. O *rxgraph* permite-nos ver os nodos existentes, na execução do programa, e a interação entre os mesmos (é exemplo da Figura 30).

O *rviz* é um visualizador 3D de ambiente e permite saber o que o robô está a fazer sentir e ver. É ideal para utilizar durante o *debug* do código de forma a interpretar os comandos provenientes do algoritmo.

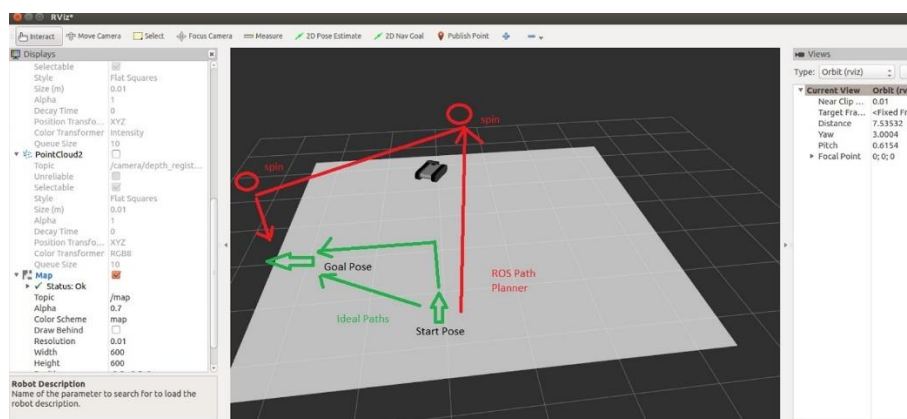


Figura 30 - Software que representa a informação proveniente da localização de um robô móvel.

Atendendo à capacidade de abstração do hardware que o ROS permite, é possível tornar o código muito mais flexível e reutilizável. Ou seja, em vez da configuração do hardware ser feita no início do algoritmo e o pré-processamento da informação proveniente do mesmo ser feito no decorrer

do algoritmo, é tudo processado no bloco de hardware. No final, a informação proveniente do bloco do hardware é enviada por mensagens de diferentes tipos, mediante o tipo de informação para o bloco de interface. Tal característica permite separar completamente os códigos dos

diferentes blocos sendo assim possível usar um diferente hardware sem ser necessário mudar o algoritmo e também usar um diferente algoritmo sem ser necessário reconfigurar a maneira como a informação é passada pelo bloco de hardware.

Assim como representado na Figura 31, o programa desenvolvido é constituído por 4 blocos diferentes: 1) Algoritmo; 2) Ambiente Gráfico; 3) Interface; 4) Hardware;

No bloco Algoritmo é onde é feito todo o processamento do algoritmo, e onde são guardadas todas as variáveis. O ciclo principal é dividido em 3 fases:

- *getInputData ();*
- *processMainCycle();*
- *setOutputData();*

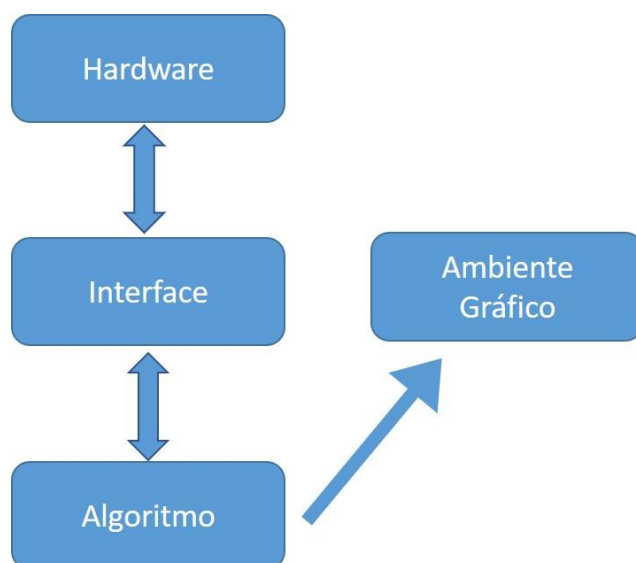


Figura 31 - Diagrama de camadas do software.

Na fase de *getInputData* são atualizadas todas as variáveis com os novos dados provenientes do bloco de Hardware. No *processMainCycle* são processados todos os dados mediante o objetivo do algoritmo. E por fim novos dados já atualizados pelo algoritmo são passados na fase de *setOutputData* para fora do bloco.

É no bloco de hardware que é feito o pré-processamento da informação proveniente do hardware envolvente. Neste bloco são inicializadas as configurações de cada hardware e são feitos todos os cálculos necessários de forma a ter os dados de saída prontos a serem usados pelo algoritmo.

O Bloco de Interface é onde são feitas todas as ligações entre o bloco de Hardware e de Software. Ou seja, é onde se organiza os dados provenientes dos sensores de forma a ficarem acessíveis ao algoritmo.

Nesta situação, a arquitetura de software utilizada em ROS para conseguir navegar com robô móvel foi a seguinte:

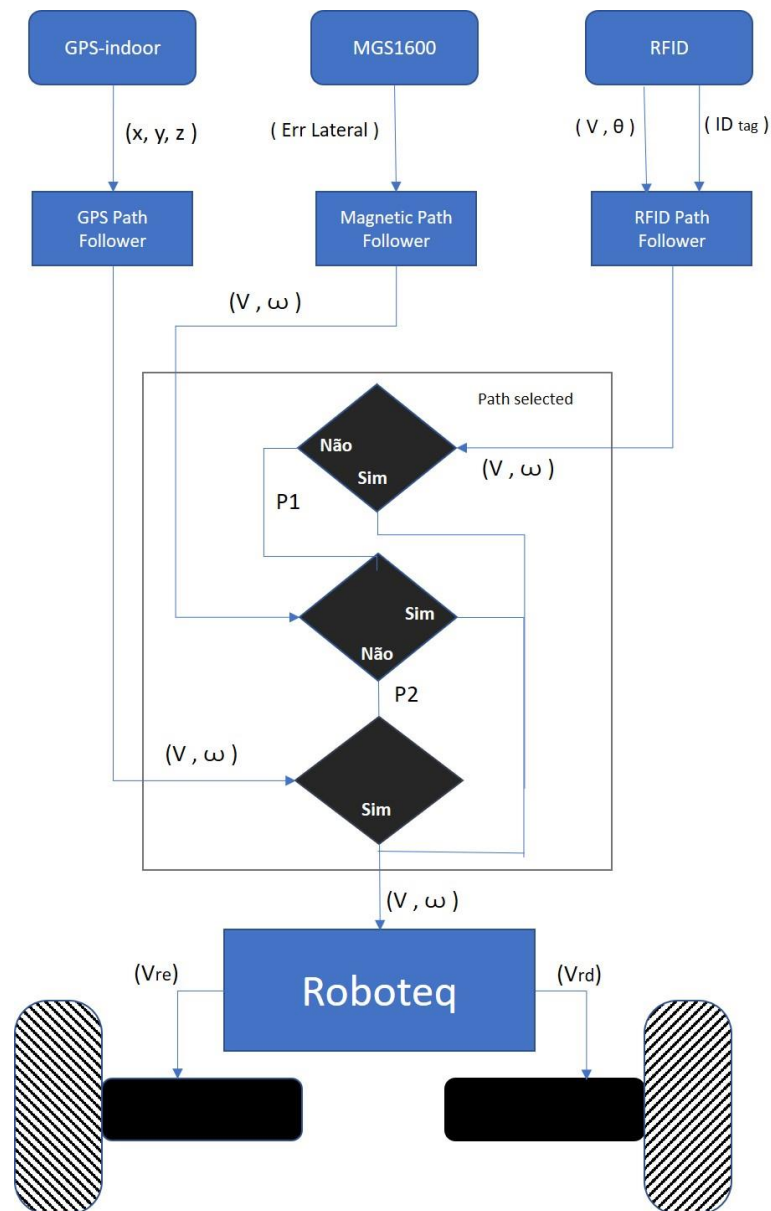


Figura 32 - Fluxograma da arquitetura de software aplicada em ambiente ROS no robô móvel.

4 ALGORITMOS APLICADOS A LOCALIZAÇÃO

A capacidade de se auto localizar é um dos requisitos fundamentais para a autonomia de um robô móvel. O objetivo da localização é determinar a posição nas coordenadas x , y e a orientação θ do veículo em relação a um referencial externo.

Os métodos de localização de robôs móveis habitualmente utilizados podem ser resumidos a essencialmente dois tipos de abordagens: localização relativa e localização absoluta do ambiente.

Neste projeto de trabalho, a posição do robô é periodicamente estimada a partir da informação fornecida pela odometria na secção 4.1, que servirá de comparação para os outros métodos utilizados, que será corrigida sempre que um método de localização baseado em medidas absolutas esteja disponível. Os dois métodos de localização absoluta desenvolvidos, fazem uso de *tags* passivas de RFID e o uso de fita magnética, que são apresentados nas secções seguintes.



Figura 33 - Demonstração do ambiente de teste em estudo, com a associação de todas as metodologias aplicadas.

4.1 Localização Relativa

A odometria é um dos métodos mais simples e mais amplamente utilizados para estimação momentânea da posição de um robô móvel. Sendo um método de localização relativa, a sua utilização em aplicações práticas tem, quase sempre, por objetivo o fornecimento de informação atualizada em tempo real da posição e orientação do veículo durante os intervalos de tempo em que outro método de localização absoluta é periodicamente executado. O deslocamento do robô móvel a partir de uma posição inicial conhecida é obtida pela integração dos movimentos lineares de cada uma das rodas.

As principais vantagens da odometria estão associadas à elevada taxa de amostragem permitida e à boa precisão alcançada a curto prazo. A principal restrição prende-se com a acumulação ilimitada de erros ao longo da navegação, fruto da integração dos erros com que as medidas do movimento das rodas são afetadas. Este facto faz com que a estimativa da posição do robô móvel fornecida por este método se afaste dos seus valores reais, impossibilitando que a sua utilização seja bem-sucedida durante um período alargado de tempo, sem recorrer a um método de localização absoluta. Apesar desta tecnologia, não ser proposta pelo projeto ao qual este trabalho de projeto está inserida, como os motores motrizes do robô já continham os *encoders*, foi aproveitado essa informação nos testes que foram realizados para realização do estudo que serão descritos a seguir [12].

Na secção seguinte, 4.1.1, é apresentado o modelo da odometria. Os seus erros sistemáticos e calibração são abordados na secção 4.1.2. Na secção 4.1.3 são mencionados os erros não sistemáticos e apresenta-se um método de quantificar a incerteza da estimativa da posição do robô, através de um modelo de erro da odometria.

4.1.1 Metodologia Aplicada a Odometria

Na Figura 34, encontra-se representado o modelo do robô diferencial no sistema de coordenadas global X^0, Y^0, Z^0 (a omissão do eixo Z^0 deve-se à consideração de que o robô se desloca no plano definido por X^0, Y^0). A pose do robô é definida pela sua posição ($x_r^0; y_r^0$) e orientação, θ_r^0 , em relação ao sistema de coordenadas global [20].

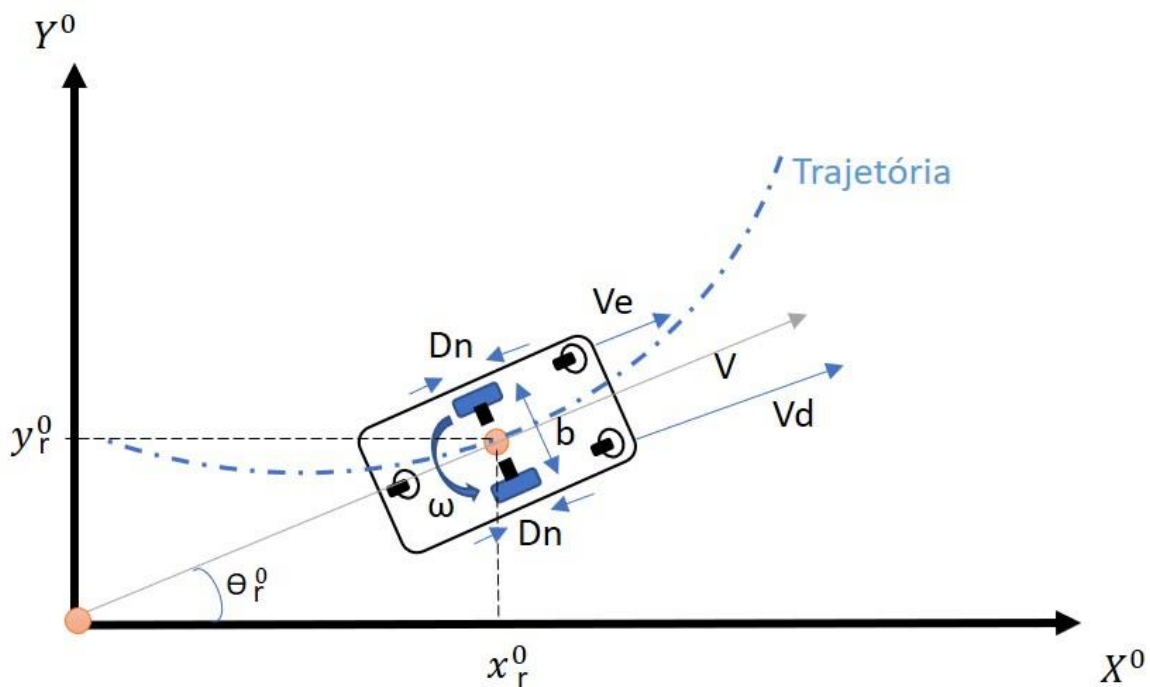


Figura 34 - Robô móvel diferencial no sistema de coordenadas global.

O modelo cinemático do robô diferencial [20] pode ser representado pelo seguinte sistema de equações:

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} x_r(t) \\ y_r(t) \\ \theta_r(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v_r(t) * \cos(\theta_r(t)) \\ v_r(t) * \sin(\theta_r(t)) \\ \omega_r(t) \end{bmatrix} \quad (4.1)$$

As variáveis de entrada deste sistema são as velocidades linear, $v_r(t)$, e angular, $\omega_r(t)$, do robô móvel que podem ser obtidas a partir das velocidades lineares de cada roda motriz:

$$v_r(t) = \frac{v_d(t) + v_e(t)}{2} \quad (4.2)$$

$$\omega_r(t) = \frac{v_d(t) - v_e(t)}{b} \quad (4.3)$$

b representa a distância entre as rodas dianteiras do robô no ponto de contacto com o solo.

A discretização por diferenças centradas do modelo cinemático, permite encontrar a expressão de atualização da posição do robô a cada instante de amostragem:

$$\begin{bmatrix} x_r(i+1) \\ y_r(i+1) \\ \theta_r(i+1) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_r(i) + \Delta d(i) * \cos(\theta_r(i)) + \frac{\Delta \theta(i)}{2} \\ y_r(i) + \Delta d(i) * \sin(\theta_r(i)) + \frac{\Delta \theta(i)}{2} \\ \theta_r(i) + \Delta \theta(i) \end{bmatrix} \quad (4.4)$$

A aproximação da orientação do veículo durante o período de amostragem pelo ângulo intermédio, $\theta_r(i) + \frac{\Delta \theta(i)}{2}$, procura minimizar o erro introduzido pela discretização.

Os deslocamentos, linear e angular do robô móvel, $\Delta d(i)$ e $\Delta \theta(i)$, são calculados, de modo análogo às equações 4.2 e 4.3, através de:

$$\Delta d(i) = \frac{\Delta d_d(i) + \Delta d_e(i)}{2} \quad (4.5)$$

$$\Delta \theta(i) = \frac{\Delta d_d(i) - \Delta d_e(i)}{b} \quad (4.6)$$

O deslocamento linear de cada roda durante um período de amostragem, $\Delta d_d(i)$ e $\Delta d_e(i)$, é estimado a partir do número de pulsos, $Nd_{d/e}(i)$, gerados pelo *encoder* correspondente, isto é:

$$Nd_{d/e}(i) = cm * N_{d/e}(i) \quad (4.7)$$

e

$$cm = \frac{\pi D_n}{n R_e} \quad (4.8)$$

O termo cm representa o factor de conversão que relaciona o número de pulsos do *encoder* com o deslocamento horizontal; D_n corresponde ao diâmetro nominal das rodas; R_e é a resolução dos *encoders* e n a relação da caixa redutora.

4.1.2 Erros Sistemáticos

Para que o modelo da odometria fique completamente definido, é necessário determinar os parâmetros que lhe estão associados. A resolução dos *encoders* e a relação da caixa redutora são conhecidos, pelo que resta apenas estimar D_n e b .

Começou-se por estimar o diâmetro nominal das rodas, que se assume igual em ambas. Para isso, fez-se o robô percorrer em linha reta numa distância de 5 metros e registou-se o número total de pulsos gerados pelos *encoders*. Com base nestes dados e nas equações 4.5, 4.7 e 4.8, D_n pode ser facilmente obtido.

Finalmente, para estimar a distância entre rodas no ponto de contacto com o solo, b , aplicou-se o mesmo módulo de velocidade a ambas as rodas, mas de sentidos opostos, ficando o robô móvel a rodar sobre o seu próprio eixo. Ao fim de 20 voltas completas, registou-se novamente o número total de pulsos gerados pelos *encoders* durante este procedimento. A informação disponível até o momento permite, através da equação 4.6, obter a estimativa da distância entre rodas, b .

Os valores dos parâmetros D_n e b obtidos nestas duas experiências encontram-se na tabela 5.

Tabela 5 - Valores dos parâmetros do modelo de odometria do robô móvel.

Diâmetro das rodas (D_n)	201 mm
Distância entre rodas (b)	479 mm

Este método de calibração, apesar de ser bastante simples, permite obter uma estimativa do diâmetro médio das rodas e da distância entre elas mais precisa do que a que seria obtida por medição. Para além destes dois fatores, existem outras fontes de erros sistemáticos, como, por exemplo, o desalinhamento das rodas e a diferença de diâmetro das mesmas, cujo efeito no cálculo da odometria foi considerado suficientemente baixo para requerer uma calibração mais complexa.

De salientar ainda que a rigidez das rodas do robô em estudo é elevada e que não proporciona, por isso, a sua deformação com o aumento da carga, diminuindo assim a influência negativa que este efeito poderia ter na estimativa da posição do veículo dada pela odometria.

A compensação mais precisa dos erros sistemáticos obrigaria à utilização de métodos de calibração mais completos. Um deles, conhecido como *UMBMark*, é apresentado por *Borenstein et. al.* [20] e permite estimar e compensar separadamente os erros devidos à diferença no diâmetro das rodas e à incerteza da distância entre os pontos de contacto destas com o solo. Informações mais detalhadas sobre este método de calibração podem ser consultadas na referência [20].

4.1.3 Erros não sistemáticos aplicados a Odometria

Para além dos erros sistemáticos, existem outros erros imprevisíveis que resultam principalmente da interação do robô móvel com o ambiente à sua volta. Estes erros, habitualmente designados de aleatórios ou não sistemáticos, são causados, por exemplo, pelo resvalamento das rodas (associado a pisos escorregadios ou aceleração excessiva), irregularidades no pavimento ou presença de objetos inesperados no percurso.

A própria resolução finita dos *encoders*, bem como a discretização e aproximações introduzidas na formulação do modelo da odometria, podem ser consideradas fontes de erros não sistemáticos [20]. No entanto, os seus efeitos podem ser bastante atenuados ao se utilizar uma frequência de leitura dos dados dos *encoders* suficientemente elevada para a velocidade a que o robô se desloca. No caso particular do robô móvel em estudo, o comportamento dinâmico das rodas livres, do tipo “*castor*”, gera forças internas difíceis de prever, condicionando a correta interpretação do real deslocamento do robô.

Apesar de não se poder compensar previamente este tipo de erros, é possível estimar a incerteza associada à posição do robô calculada pela odometria. Com esse objetivo foi implementado um modelo estocástico do erro da odometria, conforme apresentado por *Crowley*, que se passa a descrever de seguida.

Ao sistema de equações 4.4 é adicionado, a cada instante de amostragem, uma parcela relativa aos erros da odometria, obtendo-se:

$$\begin{bmatrix} x_r(i+1) \\ y_r(i+1) \\ \theta_r(i+1) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_r(i) + \Delta d(i) * \cos(\theta_r(i)) + \frac{\Delta \theta(i)}{2} \\ y_r(i) + \Delta d(i) * \sin(\theta_r(i)) + \frac{\Delta \theta(i)}{2} \\ \theta_r(i) + \Delta \theta(i) \end{bmatrix} + W(i) \quad (4.9)$$

Considera-se que o ruído $W(i)$ possui distribuição gaussiana de média nula e matriz de covariância $Q(i)$:

$$E[W(i)] = 0 \quad (4.10)$$

e

$$E[W(i) * W(i)^T] = Q(i) \quad (4.11)$$

$E[]$ representa o valor esperado. Pressupondo que os ruídos que afetam as estimativas de x_r , y_r e θ_r são independentes entre si, a matriz $Q(i)$ é uma matriz diagonal:

$$Q(i) = \begin{bmatrix} Q_{11} & 0 & 0 \\ 0 & Q_{22} & 0 \\ 0 & 0 & Q_{33} \end{bmatrix} \quad (4.12)$$

Os elementos da diagonal principal são definidos da seguinte forma:

$$Q_{11} = K_{uu} |\Delta d(i) * \cos(\Delta \theta(i))| \quad (4.13)$$

$$Q_{22} = K_{uu} |\Delta d(i) * \sin(\Delta \theta(i))| \quad (4.14)$$

$$Q_{33} = K_{u\theta} |\Delta d(i)| + K_{\theta\theta} |\Delta \theta(i)| \quad (4.15)$$

K_{uu} é o coeficiente que relaciona o erro da odometria segundo $d(i)$ (translação do robô móvel) em relação a $\Delta d(i)$, $K_{u\theta}$ é o coeficiente que relaciona o erro da odometria segundo $\theta(i)$ (rotação do robô) em relação a $\Delta d(i)$, e $K_{\theta\theta}$ o coeficiente que relaciona o erro da odometria segundo $\theta(i)$ em relação a $\Delta \theta(i)$.

A matriz de covariância do erro da estimativa da posição do robô móvel, $C(t)$, é definida por:

$$C(i) = \begin{bmatrix} Var(x_r(i)) & Covar(x_r(i), y_r(i)) & Covar(x_r(i), \theta_r(i)) \\ Covar(x_r(i), y_r(i)) & Var(y_r(i)) & Covar(y_r(i), \theta_r(i)) \\ Covar(x_r(i), \theta_r(i)) & Covar(y_r(i), \theta_r(i)) & Var(\theta_r(i)) \end{bmatrix} \quad (4.16)$$

$Var()$ e $Covar()$ representam, respetivamente, a variância e covariância.

A matriz de covariância da estimativa da posição fornecida pela odometria é atualizada através de:

$$C(i+1) = \Phi^* * C(i) * \Phi^{*T}(i) + Q(i) \quad (4.17)$$

$\Phi^{*T}(i)$ corresponde à matriz de transição de estado e é dada, em cada instante de amostragem, por:

$$\Phi^*(i) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & -\Delta d(i) * \sin(\theta(i)) + \frac{\Delta \theta(i)}{2} \\ 0 & 1 & \Delta d(i) * \cos(\theta(i)) + \frac{\Delta \theta(i)}{2} \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4.18)$$

De modo a estimar os parâmetros K_{uu} , $K_{u\theta}$ e $K_{\theta\theta}$ do modelo de erro apresentado, foram realizados dois ensaios experimentais [20].

Em primeiro lugar fez-se o robô percorrer, em linha reta, uma distância de 4 metros segundo o eixo coordenado x_0 e, no final do percurso, calculou-se o erro da odometria através do sistema de localização baseado em marcadores visuais. A partir dos dados de 20 ensaios, calculou-se K_{uu} e $K_{u\theta}$, definidos como [20]:

$$K_{uu} = \frac{Var(x)}{med(x_{total})} \quad (4.19)$$

e

$$K_{u\theta} = \frac{Var(\theta)}{med(x_{total})} \quad (4.20)$$

$Var(x)$ e $Var(\theta)$ representam, respetivamente, a variância do erro da medida de x e de θ ao passo que $med(x_{total})$ corresponde à média das distâncias totais percorridas. Na segunda experiência registou-se o erro do sistema de odometria após uma rotação do robô sobre si próprio. Foram realizados novamente 20 ensaios, permitindo estimar $K_{\theta\theta}$:

$$K_{\theta\theta} = \frac{Var(\theta)}{med(\theta_{total})} \quad (4.21)$$

O termo $med(\theta_{total})$ representa a média do deslocamento angular realizado.

De salientar ainda que o valor destes parâmetros depende não só do robô móvel, mas também do ambiente em que este se desloca. Assim, caso as experiências realizadas fossem efetuadas em pisos mais irregulares ou rugosos, seria de esperar estimativas de K_{uu} , $K_{u\theta}$ e $K_{\theta\theta}$ de valor superior.

Estes parâmetros definem o modelo de erro apresentado e representam a confiança que temos no sistema da odometria.

4.2 Localização com Régua de leitores RFID

Com esta tecnologia de localização **RFID**, pretende-se criar um sistema de localização absoluta, eficiente para um robô móvel incorporando um sistema de leitura e identificação por radiofrequência (**RFID**). O robô móvel carrega consigo um ou mais leitores de **RFID** na parte superior do chassi, que lê as etiquetas no chão para localizar o robô móvel.

Cada etiqueta **RFID** armazena a sua própria posição, em relação ao mapa global, que depois usada para calcular a posição segundo um eixo bidimensional, o sentido em que o robô se desloca e a veracidade do trajeto em que o robô móvel se encontra. Podendo deste modo ser ajustar consoante a trajetória predefinida. No entanto, um sistema de localização baseado na tecnologia **RFID** inevitavelmente sofre de um erro de estimação no cálculo da posição.

Nesta tarefa, foi proposto um novo padrão de geometria na organização das etiquetas **RFID** no chão para reduzir o erro de estimação da posição, como na adição de mais leitores de **RFID** como demonstra na secção 3.2.2, para reduzir o erro lateral na localização do robô móvel [9] [21].

De acordo com uma abordagem anteriormente regida, foram necessários 5 leitores, distanciados em 14mm, para identificar se robô móvel se depara dentro da trajetória predefinida e saber a sua própria orientação. Para além disso foi necessária a aplicação de duas etiquetas de **RFID** paralelas e distanciadas em 114 mm no chão e uma *tag* perpendicular com uma distância de 300 mm. Esta nova abordagem, baseada na propriedade de continuidade de movimento do robô móvel de condução diferencial, proporciona uma estimativa barata e rápida da orientação, verifica se existe erro lateral da plataforma a ser corrigido e envia informações codificadas para ações futuras. Os sistemas construídos visam a aumentar a precisão da localização do robô que são verificados através de experiências de desenvolvimento [22].

Como primeiro objetivo, foi construir uma régua com um espaçamento angular, que coincidissem com a alocação de cada leitor que esteja na régua, ou seja a cada 5 graus desfasados. Para tal que isso acontecesse foi necessário distanciar uma *tag* da outra, cerca de 30 cm até conseguir adicionar um novo leitor a cada 5 graus desfasados, como mostra na figura 35.

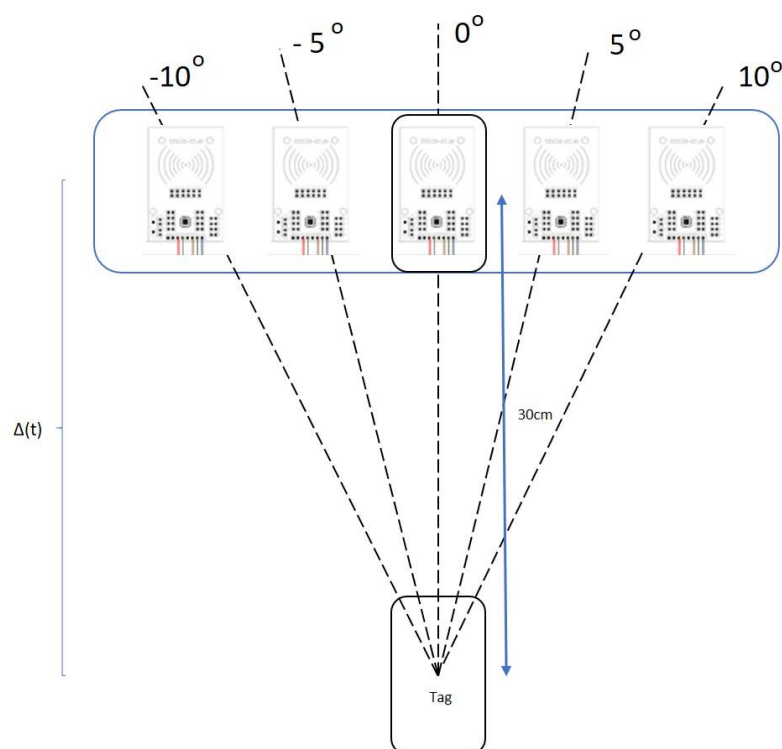


Figura 35 - Disposição geométrica das Tags RFID.

Foi então traçada uma reta a cada 5 graus e concluiu-se que só seria possível posicionar os leitores nas devidas retas se realmente uma *tag* estivesse distanciada a 30cm da outra (ver figura 36) , depois disso, foi necessário implementar um algoritmo capaz de reconhecer qual o leitor que leu a primeira *tag* e qual o leitor leu o segunda *tag* e fazer os cálculos do erro lateral e para além disso saber qual a velocidade instantânea do robô móvel, uma vez sem odometria ligada não se sabe a que velocidade o robô se desloca. A equação para o cálculo da velocidade:

$$v[k] = \frac{x[k+1] - x[k]}{t[k+1] - t[k]} \quad (4.22)$$

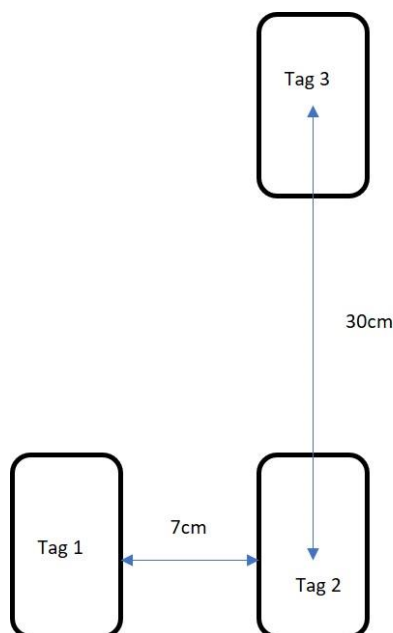


Figura 36 - Descrição do modelo geométrico que permite a obtenção da orientação e velocidade do robô móvel.

Após isto, concluiu-se que seria necessário obter uma orientação mais precisa, pois tanto os leitores como as *tags* tem uma largura de 5cm e isso poderia causar um erro angular significativo para se obter uma localização absoluta, por isso mesmo, foi necessário a adicionar uma terceira *tag* **RFID** paralela ao diferencial do robô móvel, distanciada em 7 cm. Com este modelo triangular será possível calcular a orientação do robô móvel devido ao deslocamento temporal entre as *tag1* e a *tag2* como mostra a Figura 37.

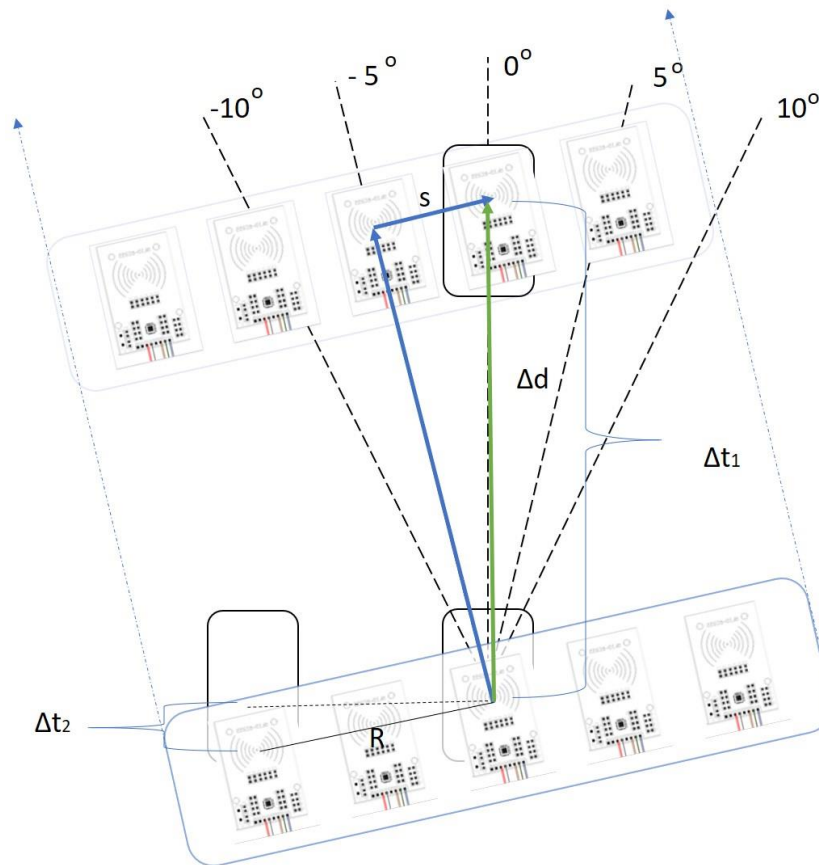


Figura 37 - Modelo de aquisição de informação a partir da disposição geométrica de *tags* **RFID**.

Onde o deslocamento é dado Δd e o tempo (t) entre aquisição *tag2* e a *tag3* é dado por Δt_1 .

Para além disso ainda foi adquirido o desfasamento temporal dado por Δt_2 entre aquisição da *Tag1* e *Tag2* e a distância entre os dois leitores R .

Depois disto apenas foi necessário aplicar algumas equações matemáticas sobre o movimento circular:

$$v[k] = \frac{\sqrt{0.3^2 + S^2}}{t_{[k+1]} - t_{[k]}} \quad (4.23)$$

$$\omega_m = \frac{v[k]}{R} \quad (4.24)$$

e

$$\Delta\theta = \omega_m * \Delta t_2 \quad (4.25)$$

E posteriormente usar a seguinte equação para o cálculo do ângulo:

$$angulo = \Delta\theta * \frac{180}{\pi} \quad (4.26)$$

onde $v[k]$ é velocidade linear, ω_m a velocidade angular e $\Delta t_1 = t_{[k+1]} - t_{[k]}$ a diferença temporal adquirida entre as *tags3* e *tags2* e R a distancia entre *tags* e Δt_2 o desfasamento temporal entre a *tag2* e a *tag1*. Após isso faz se uma média dos dois ângulos obtidos.



Figura 38 - Protótipo da régua de sensores RFID.

A estas equações anteriormente referidas, foi necessário criar um algoritmo capaz de conseguir adquirir toda a informação e aplicar o processamento matemático para o cálculo da posição, velocidade e orientação como mostra a Figura 39.

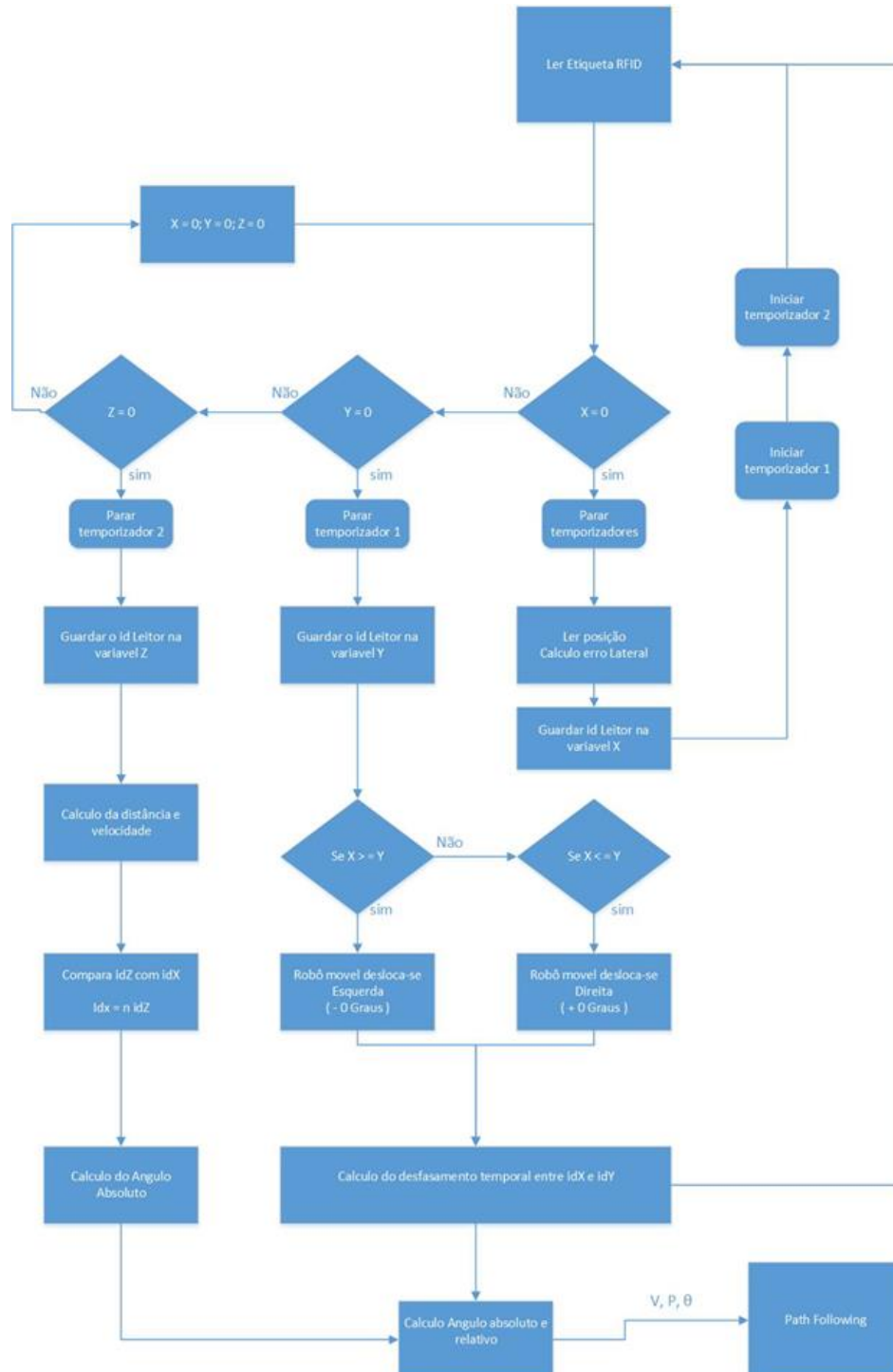


Figura 39 - Fluxograma do algoritmo aplicado a régua de leitura de tags RFID.

Após todo este cálculo, foi necessário testar a veracidade do protótipo criado e para isso, foram criados dois simuladores para testar diferentes velocidades de aquisição, e diferentes orientações que serão retratados no capítulo 5.

4.3 Localização com Régua de sensor magnético MGS1600

O sensor de fita magnética gera uma matriz de informação proveniente da distância da fita alojada ao solo até ao centro sensor, nos quais as variáveis envolvidas, tem como valores, números inteiros positivos e negativos consoante a polaridade da fita magnética [18].

A fita usada contém duas polaridades, uma em cada face da fita, onde é possível distinguir ambas devido a uma das faces ser rugosa e outra plenamente lisa. O sensor de fita magnética deteta essa diferença de polaridades. A face lisa é utilizada como fita de orientação, ou seja, fita da rota principal. A face rugosa é utilizada como fita de marcador, ou seja, fita que permite dar instruções ao robô móvel. Este sensor permite detetar a existência de bifurcações ou convergências de caminhos devido à possibilidade de detetar duas fitas de orientação. O controlador assume sempre que os dois caminhos estão presentes: o caminho da esquerda (*Track Left*) e o caminho da direita (*Track Right*) e ciclicamente, é calculada a diferença entre a *Track Left* e a *Track Right* em relação ao centro do sensor de forma a gerar um erro lateral correspondente a deslocação do robô móvel.

No caso de seguir uma única fita, o sensor considera que estão duas fitas sobrepostas. Ao entrar na bifurcação, é como se a fita expandisse, e assim neste caso faz a distância de igual modo descrito anteriormente, conforme mostra na Figura 40 [24], abaixo:



Figura 40 – Representação de uma bifurcação e o modo de medição pelo sensor MGS 1600.

Esta informação é transmitida ao controlador que usa para corrigir a direção. Um controlador P é implementado de forma a melhorar a precisão e tempo de resposta. O robô móvel pára, quando deixa de detetar a fita magnética.

Para determinar qual a faixa deve seguir, no caso de uma bifurcação ou quando deve parar, o robô móvel deve obter essa informação antecipadamente através do recurso das *tags* **RFID**, pois as fitas magnéticas não dão informação alguma sobre a posição do robô móvel ou orientação. Para isso as etiquetas devem conter informação relativas à ação a tomar em cada local, e indicar a direção a tomar e cada ponto de aquisição.

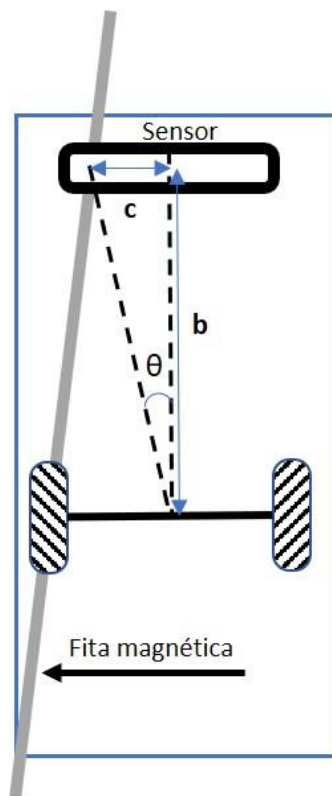


Figura 41 - Navegação utilizando o método de seguimento de fita magnética e calculo do erro lateral.

Quanto à correção do erro lateral, o controlador proporcional necessita da seguinte equação:

$$\theta = \arctan\left(\frac{c}{b}\right) \quad (4.27)$$

Onde c é um erro calculado pelo sensor e devolvido em distância, b é o desfasamento entre o sensor e o eixo central do robô móvel e θ o ângulo gerado derivado do desvio do robô e que servirá para corrigir a trajetória do robô.

Determinado o erro angular este será inserido com o ganho proporcional k , obtém-se a velocidade angular necessária para ação de controlo, como mostra a equação seguinte:

$$\omega = k * \theta \quad (4.28)$$

Assim desta forma é possível compensar o erro lateral e o erro angular causado pela distância a que o sensor se encontra do eixo diferencial, depois os valores devolvidos, serão convertidos em velocidade angular e velocidade linear e enviados para o controlador da *Roboteq*.

4.4 Posição Global com sistema de GPS Indoor

O Sistema de "GPS indoor" da marca *Marvelmind* é um sistema que utiliza uma metodologia de triangulação a partir das medições feitas pelas *beacons* estacionarias como referido na secção 3.2.3, que nos garante uma posição em tempo real de onde se encontra o robô móvel. Embora este sistema não devolva nenhuma orientação do robô móvel, foi possível contornar esse problema aplicando cálculos vetoriais a partir de um referencial global um pouco à semelhança do modelo de odometria e ao modelo do sensor de leitura de RFID, mas seguidamente será explicado como maior detalhe.

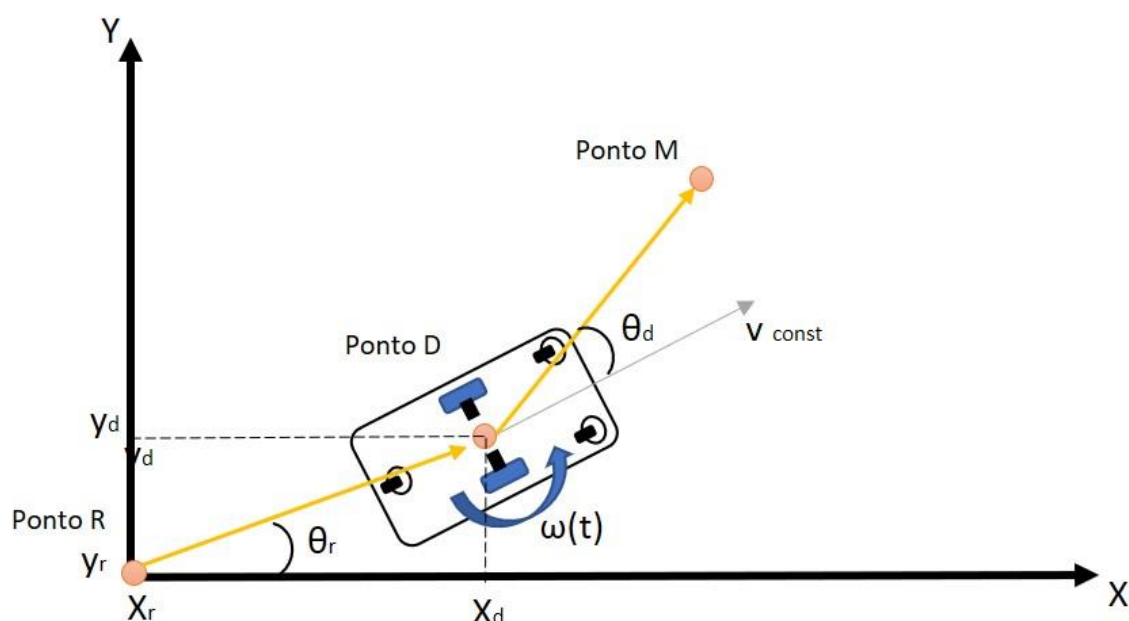


Figura 42 - Modelo representativo da locomoção por GPS - indoor

Como mostra a figura 42, a metodologia aplicada consiste no controlo por seguimento de pontos (coordenadas virtuais), onde o objetivo, passa pelos deslocamentos de um robô móvel da sua posição $D(X_d, Y_d)$ até um determinado ponto objetivo $M(X_m, Y_m)$. Para isso, é traçado uma trajetória que une os pontos (coordenadas) D e M composta por um segmento de reta de orientação definidos no sistema global de coordenadas.

Esta perspectiva pode ser entendida como uma simplificação do controlo por seguimento de retas, uma vez que o robô móvel sempre se mantém sobre a trajetória definida pela reta, que é recalculada a cada ciclo com os dados de posição atualizados. A seguir na imagem 43 contém uma representação esquemática deste controlador.

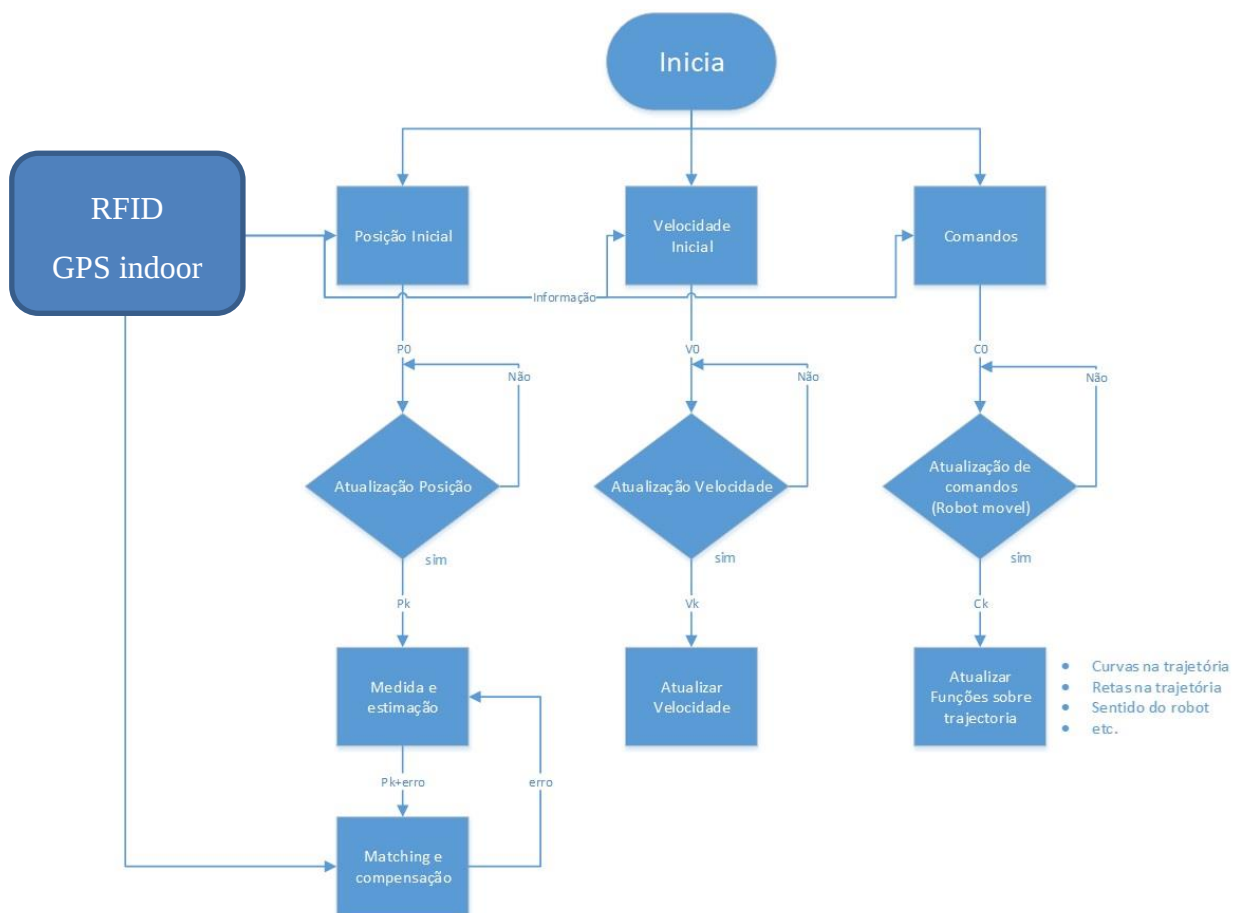


Figura 43 - Fluxograma do algoritmo implementado para o seguimento de retas.

O ângulo θ_d (representado na Figura 42) é denominado de erro de orientação do robô móvel, e consiste na diferença entre o ângulo do segmento e o ângulo do robô no sistema global de coordenadas globais transpostas no ponto D .

$$\theta = \arctan\left(\frac{y_d}{x_d}\right) \quad (4.29)$$

Neste modelo de seguimento de pontos, o erro é nulo, uma vez que o ponto D faz parte da trajetória definida. Por isso, a velocidade angular ω do robô móvel fica definida ao utilizar apenas o erro de orientação:

$$\omega = -\frac{\theta_d}{t} = -k\theta_r \quad (4.30)$$

Onde k representa o ajuste de ganho proporcional. Neste caso, será necessário considerar o erro e_p de distância entre o ponto D e o ponto M :

$$e_p = \sqrt{(x_d - x_m)^2 + (y_d - y_m)^2} \quad (4.31)$$

O cálculo da velocidade linear é expresso na equação abaixo:

$$v = v_n + k_2 e_x \quad (4.32)$$

Onde v_n representa uma velocidade nominal constante, e k_2 um ganho de ajuste.

A partir daqui pode então corrigir a direção e ajustar uma nova velocidade angular em cada roda do robô móvel. Para que esta trajetória continuasse a acontecer, foi necessário medir vários pontos do trajeto definido e obter as respectivas coordenadas de cada ponto e sempre que robô móvel percorrer esse ponto a sua trajetória vetorial é atualizada.

5 DESENVOLVIMENTO E RESULTADOS

Neste capítulo serão apresentados os algoritmos aplicados e resultados experimentais obtidos com a realização dos testes aos variados sistemas.

5.1 Testes à Régua de Leitura RFID

A fim de testar a eficiência das *tags* de RFID, para garantir um bom funcionamento dos algoritmos de velocidade e orientação desenvolvidos, foi necessário avaliar a sua resposta quanto a taxa de atualização na aquisição de informação, desfasamento temporal entre *tags* e validar a velocidade instantânea $v_{[k]}$ adquirida, já referida na secção 4.2.2.

Para tudo isso, foi necessário construir uma bancada de teste de velocidade controlada com um controlador proporcional (PD), como mostra na Figura 44, a fim de verificar qual a velocidade mínima e máxima que seria capaz de adquirir a informação necessária e para além disso, colocar a régua de leitores magnéticos em diferentes ângulos distintos para averiguar o calculo de forma correta o desfasamento temporal entre os sensores.

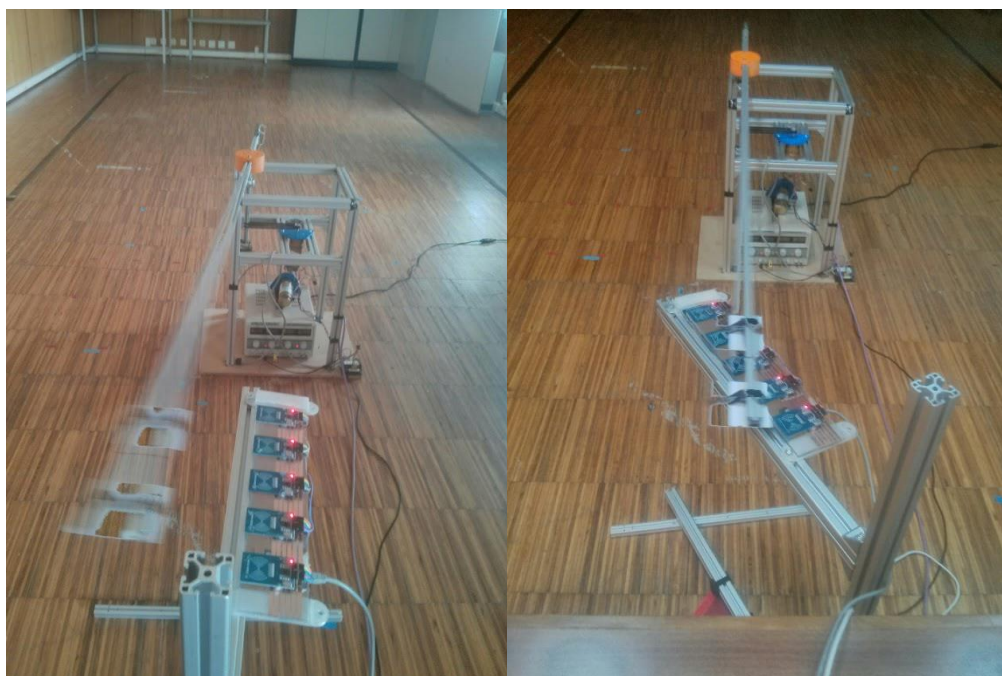


Figura 44 - Simulador desenvolvido para testar a taxa de aquisição da informação recebida e da orientação.

Com este sistema foi possível receber a informação proveniente das *tags* **RFID** sobre o seu id, e verificar qual a sua posição absoluta armazenada em memória numa matriz do microcontrolador.

O robô móvel com esses dados consegue estimar o erro lateral para que seja aplicado um algoritmo de compensação de trajetória semelhante ao utilizado pelo sensor de fita magnética. No entanto não nos dá a informação sobre a velocidade, por faltar uma terceira *tag*. Foi então construído um segundo simulador experimental à semelhança do anterior mas com finalidade de poder ser testado com 3 *tags* , em vez de apenas duas , como mostra a figura 45, com a finalidade de se realizar testes com parâmetros pré estabelecidos como a velocidade constante, e assim , conseguir calcular taxas de aquisição de informação , cálculos dos ângulos pretendidos e verificar o desfasamentos temporais entre leituras de sensores .

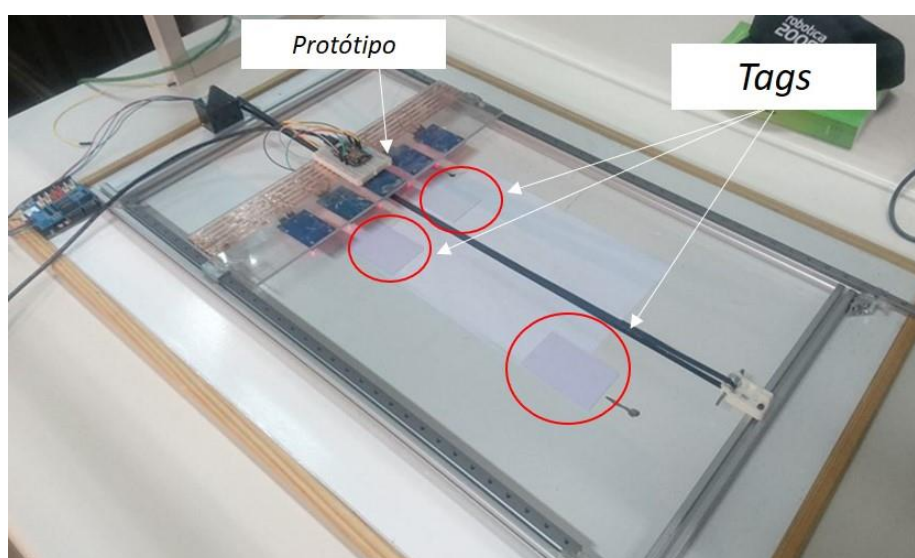


Figura 45 - Simulador de sensores RFID, a realizar testes ensaios reais de velocidade e orientação em ambiente controlado.

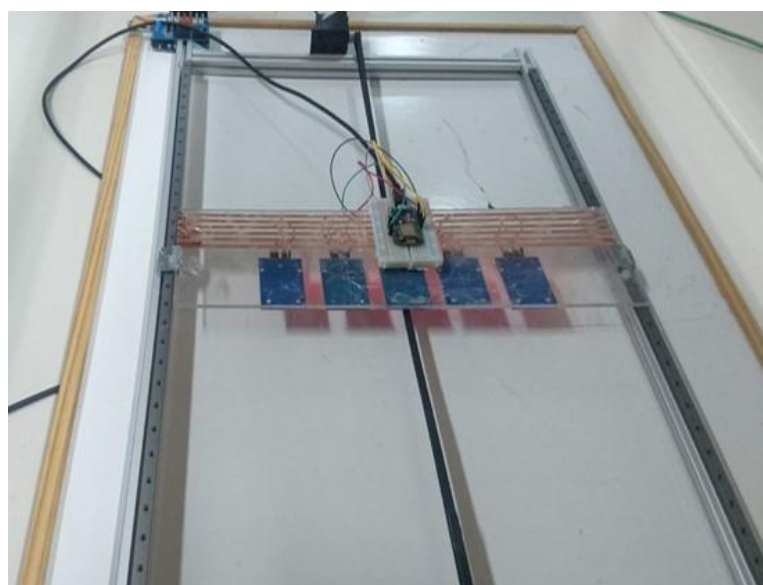


Figura 46 - Simulador de Leitura RFID criado para o propósito deste trabalho de projeto.

N_t

de aquisição em diferentes velocidades, para testar se a régua de leitura de **RFID** seria capaz de receber a informação, processar a mesma e apresentar um resultado de posição, velocidade e orientação satisfatório. O microcontrolador usado foi **Atmel328P** e o seu tempo de aquisição ronda os 15ms, no entanto, posteriormente foi usado um microcontrolador do tipo **ESP88266** com um processamento 10 vezes superior e o tempo de aquisição baixou para 2ms, permitindo deste modo uma maior taxa de atualização e resultados mais satisfatórios. O quanto maior for o poder de processamento do microcontrolador de aquisição, maior a velocidade que poderá ser adicionada ao robô móvel durante um ensaio final.

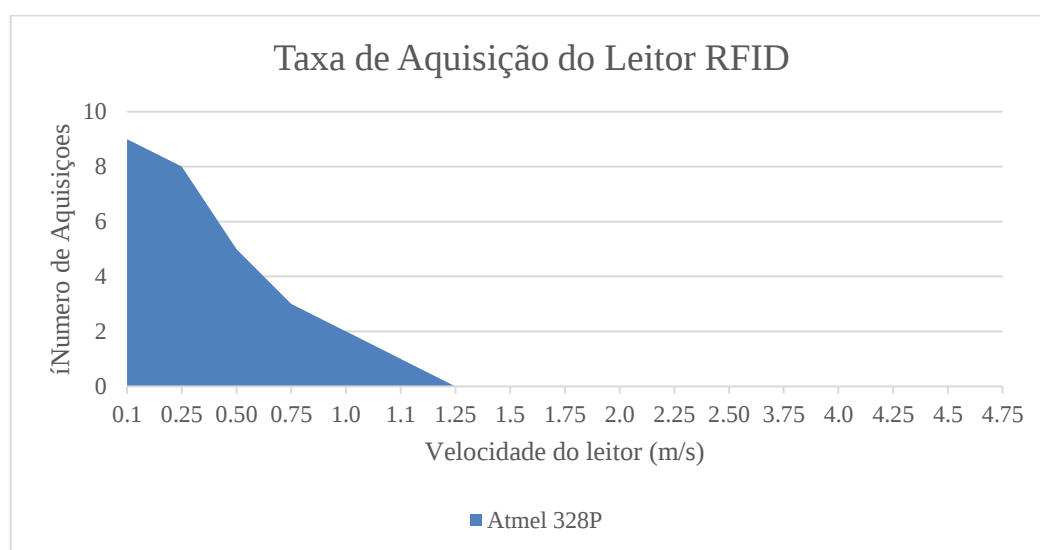


Figura 47 - Gráfico que indica a taxa quantitativa de amostras numa velocidade controlada por simulador, como o microcontrolador **Atmel 328P**.

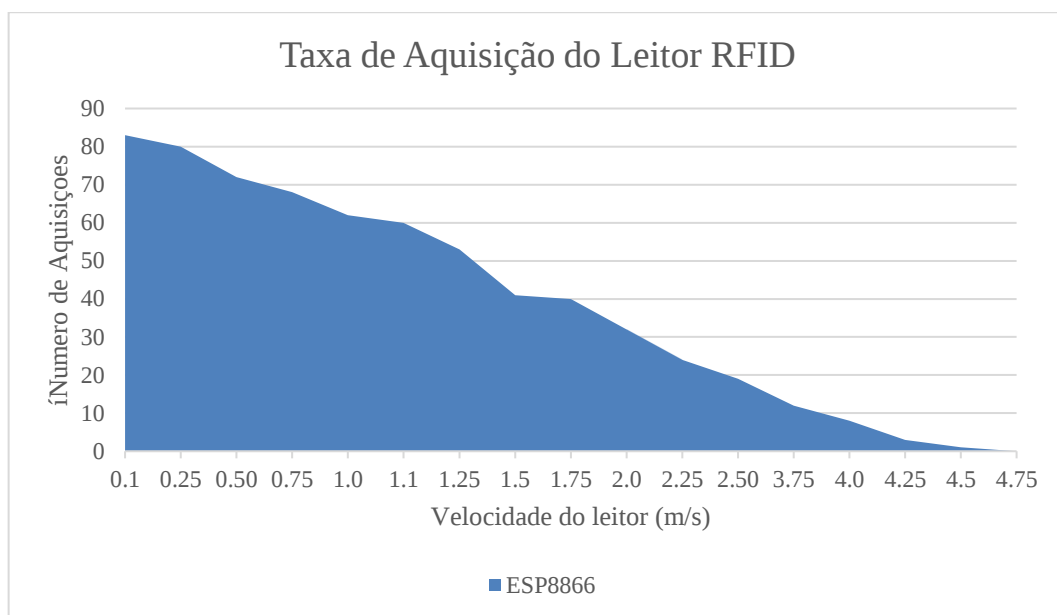


Figura 48 - Gráfico que indica a taxa quantitativa de amostras numa velocidade controlada por simulador, como o microcontrolador **ESP8866**.

Na segunda parte de ensaios foi usado o segundo simulador para calcular o desfasamento temporal de leitura entre *tags*, garantindo sempre que a velocidade em teste é uma velocidade constante. Só assim é possível determinar o desfasamento de tempo face a resposta ao ângulo em que a régua de leitura de RFID se encontra.

Para uma mesma velocidade, fez-se os testes várias vezes, mas com ângulos diferentes, dando o seguinte resultado na Figura 49.

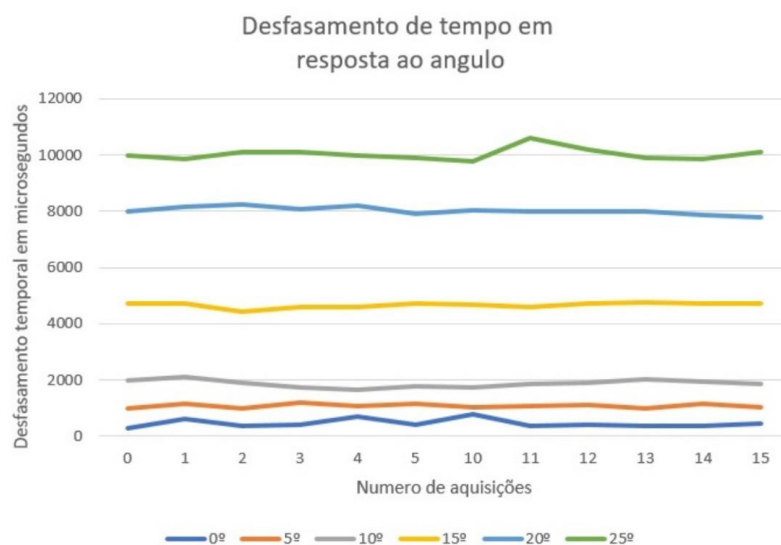


Figura 49 - Desfasamento temporal entre a *tag2* e *tag1* em diferentes ângulos em relação a uma reta perpendicular ao sensor de leitura (Velocidade 0.5 m/s).

Após estes resultados, bastante satisfatórios, houve a necessidade de aplicar alguns conceitos de cálculo de variância, média e interpolação, e aplicá-los ao algoritmo final para unificar o resultado obtido na orientação relativa e na orientação absoluta e dessa forma reduzir o erro angular do robô móvel.

5.2 Testes e resultados ao GPS - Indoor

Visto este equipamento é muito recente no mercado, foi necessário realizar alguns testes de precisão e desempenho. Para realizar o seu primeiro teste, foi criado um cenário com formato de quadrado com 3m de lado.

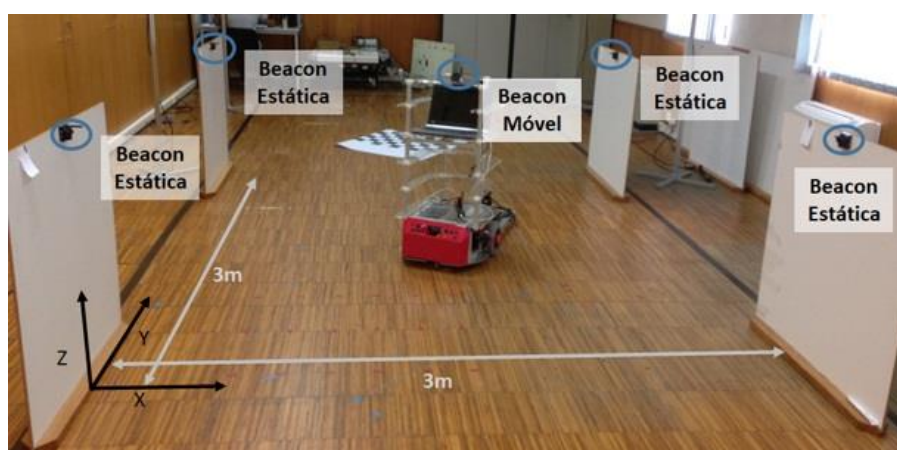


Figura 50 - Cenário de teste para a medição de precisão e exatidão.

Os *beacons* foram posicionados nos vértices do quadrado (ver Figura 50). O *beacon* móvel foi posicionado em 11 pontos diferentes e em cada ponto foi feito um registo de 2 minutos a uma taxa de aquisição de 7.14Hz, resultando em mais de 857 amostras em cada registo. Na tabela da Figura 51 é apresentada a correspondência entre registos e as respectivas posições.

	x	y		x	y		x	y
Beacon 1	0	0	Registo 2	2	1	Registo 7	1	2
Beacon 2	0	3	Registo 3	3	0	Registo 8	2	2
Beacon 3	3	3	Registo 4	3	1	Registo 9	3	3
Beacon 4	3	0	Registo 5	0	1	Registo 10	2	3
Registo 1	1	1	Registo 6	0	2	Registo 11	1	3

Figura 51 - Posições dos *beacons* e dos registos efetuados no primeiro teste.

Os pontos foram medidos, recorrendo a uma fita métrica, relativamente à origem do cenário que correspondia à *beacon* 1 como consta na Figura 50. O erro destas medições foi arredondado aos centímetros.

No posicionamento dos *beacons*, tanto estáticos como do *beacon* móvel, assumindo que desconhecia a origem de medição nas *beacons*, pois não se encontrou nenhuma referência deste dado nos manuais disponibilizados pela *Marvelmind*. Foi por essa razão, que se assumiu que a área da base das *beacons* (55x55 mm) representaria a área de incerteza, revelada por um quadrado na Figura 52.

A mesma Figura representa a ampliação do ponto (2,2), pois a incerteza e a distribuição das amostras não são distinguíveis na Figura 53. As marcações pretas representam *3sigma* (desvio padrão) de cada registo.

Na Figura 54 estão representados os desvios quadráticos médios de cada registo. O valor médio dos 11 registos é 0.06m.

Na Fig. 55, constatou-se que a variação do erro é devido ao posicionamento, pouco preciso, dos *beacons*. O desvio padrão dos dados registados apresenta um valor médio de 7.8mm. Este valor está abaixo dos 25 mm que a *Marvelmind* apresenta no manual do sistema.

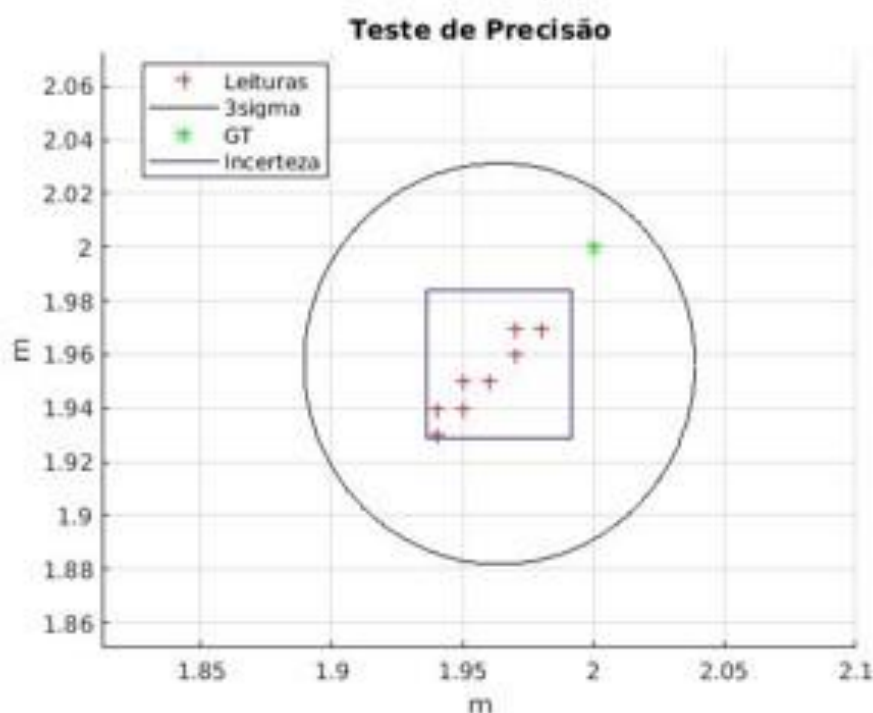


Figura 52 - Zoom do ponto (2,2) da grelha disposta na figura 51.

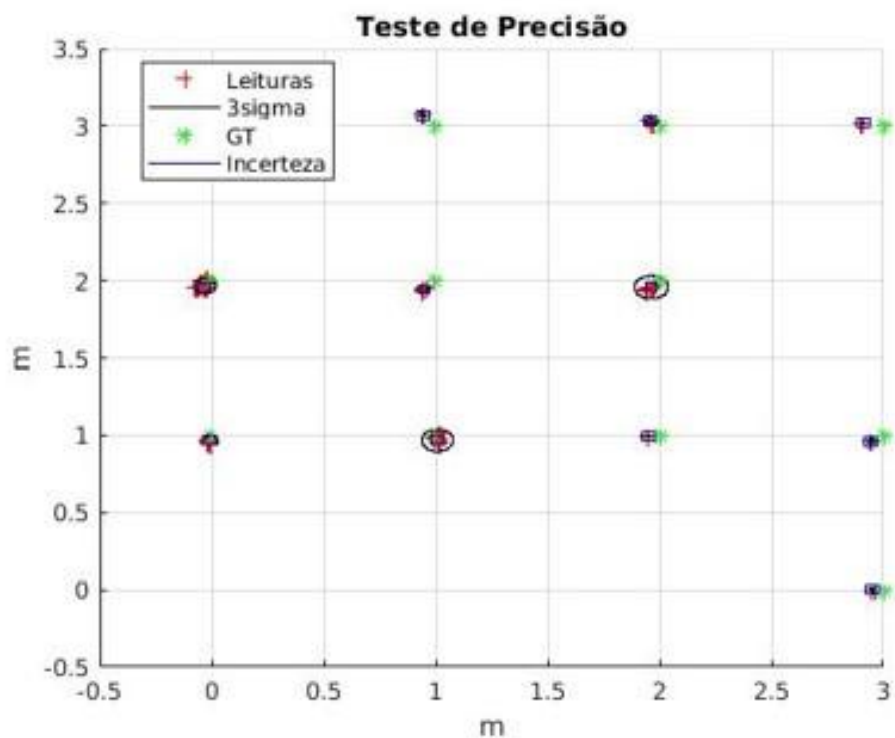


Figura 53 - Grelha de pontos que foram realizados para medir a precisão e o erro do sistema de localização da *Marvelmind*.

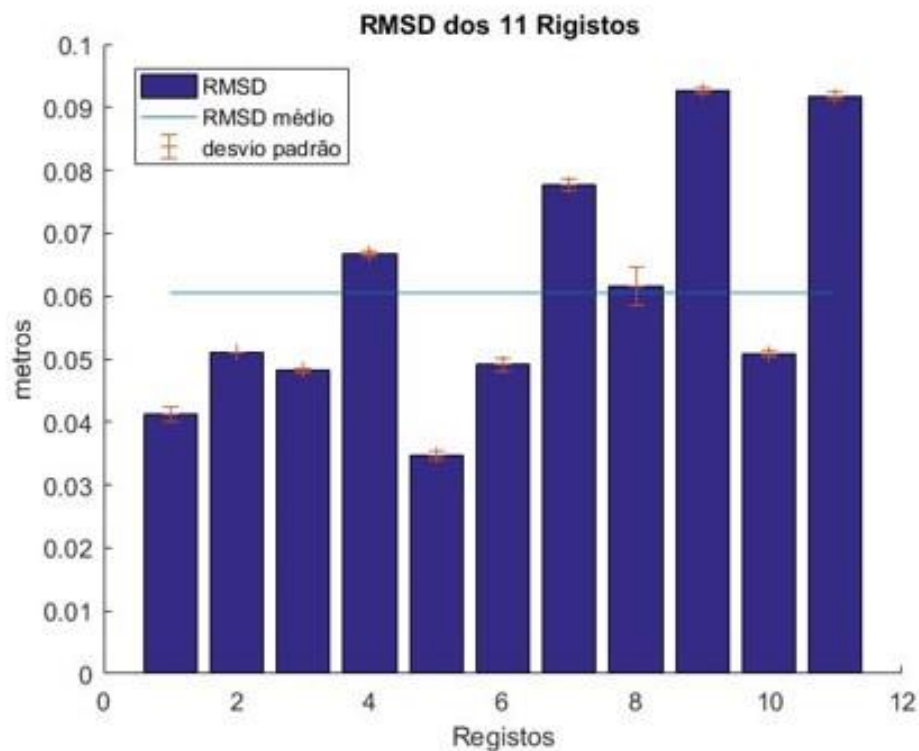


Figura 54 - Erro e desvio padrão dos 11 registos, onde cada registo corresponde a cada ponto.

Um segundo teste, teve como objetivo avaliar o comportamento do sistema de localização “*GPS Indoor*” ao longo de um percurso com características semelhantes às encontradas em meio fabril. O percurso foi traçado com fita magnética 50mm de largura, e em pontos estratégicos foram adicionadas *tags* RFID. O teste foi efetuado com um robô tele operado tentado, o máximo possível, manter o ponto de controlo virtual (local no robô onde se encontra a régua magnética) no centro da fita magnética. Os *beacons* foram colocados em pórticos a 2m de altura com o objetivo de garantir que o sistema funcione ao longo de todo o percurso.

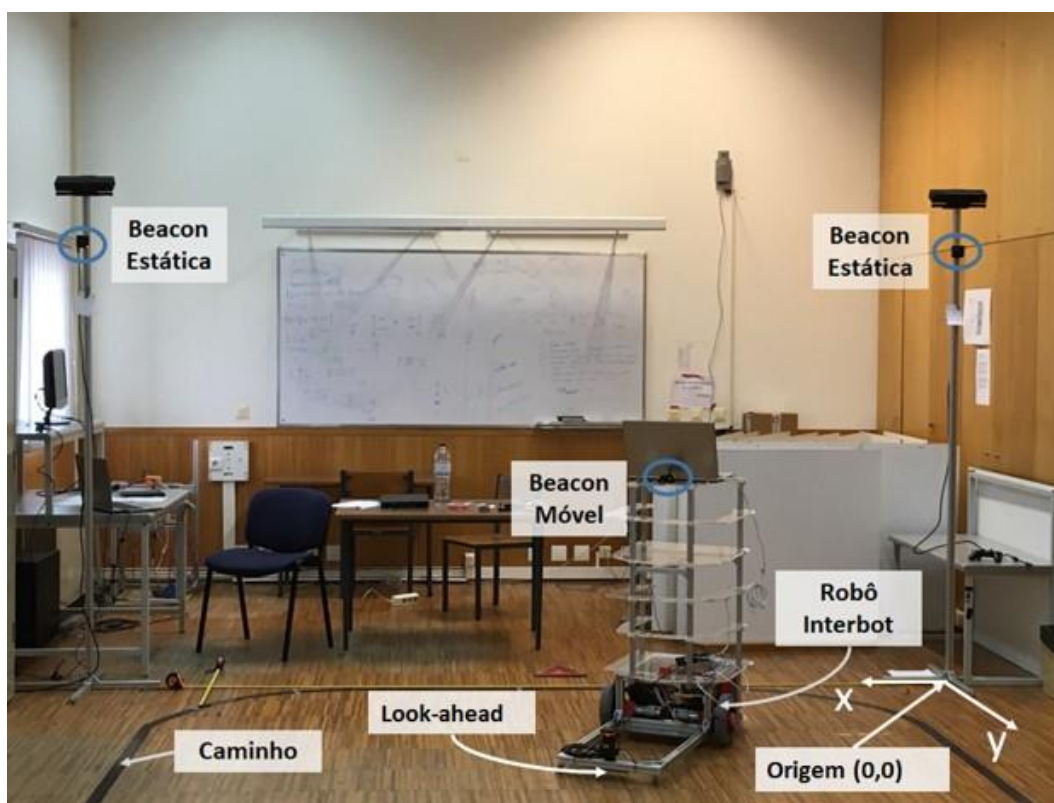


Figura 55 - Sala de teste onde foram efetuados os testes com a disposição dos *beacons* estáticos e móvel para realizar o registo do percurso.

Na Figura 55 é apresentado o cenário com a disposição dos *beacons*, o robô móvel usado e parte do percurso. Na Figura 56 são apresentados os dados do “*GPS Indoor*” e *encoders*, que o robô registou ao longo do percurso e que servirá de comparação. Para além destes, também, é apresentado o percurso real, sendo este, medido recorrendo a uma fita métrica relativamente à origem do referencial de navegação identificado na figura 55. Todos os dados registados, foram à posteriori transformados para a origem do referencial.

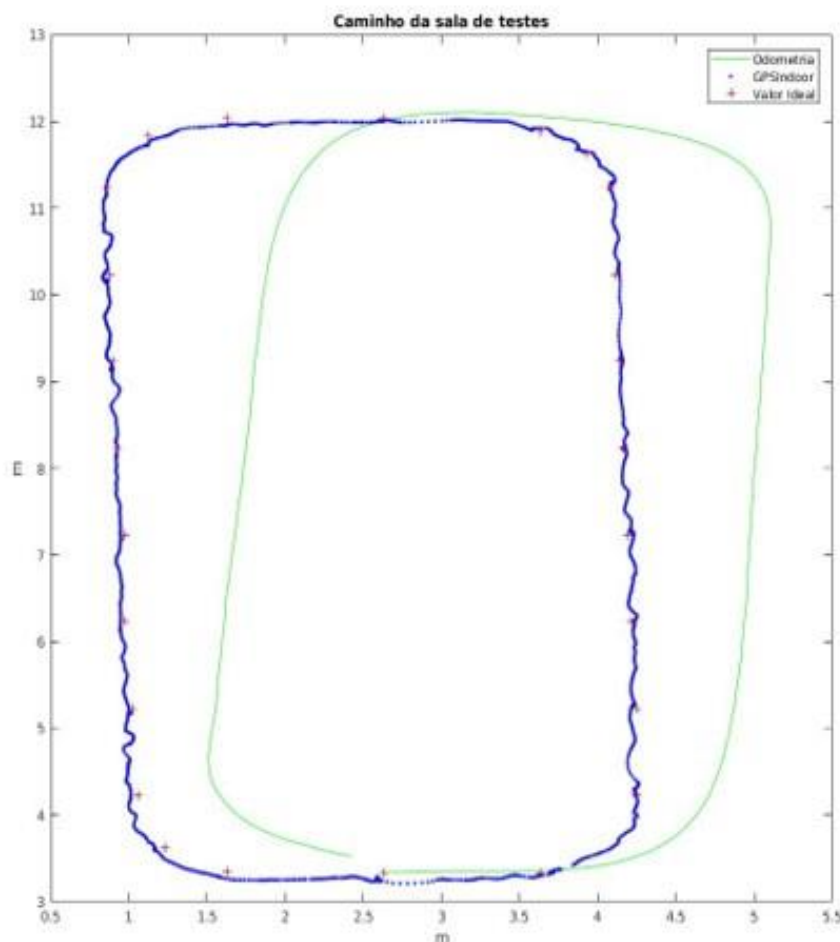


Figura 56 - Percurso registrado pelo **GPS Indoor**, encoders e pontos ideais virtuais.

Na Figura 56, é visível que o sistema de localização **“GPS Indoor”** tem um bom desempenho ao longo de todo o percurso, tendo em conta que o *beacon* móvel estava localizado em cima do centro de massa do robô móvel e não no ponto *look-ahead* que seguia o percurso. Sendo esta uma explicação plausível para o erro nas curvas ser maior do que nos segmentos retilíneos do percurso.

A Figura 57 e 58 contém as funções das distâncias euclidianas do percurso do **“GPS Indoor”** e do percurso ideal, relativamente à origem do referencial. A função apresenta segmentos retos devido ao robô móvel ter sido parado nos pontos virtuais durante um tempo variável, ao longo da realização do teste. Significando isto que, cada segmento reto representa a localização de um valor ideal. Visualmente, esta relação é fácil de estabelecer, porém computacionalmente é necessário recorrer a algoritmos de reescalonamento temporal para conseguir estabelecer um termo de comparação entre as duas funções para calcular o erro entre elas, visto que têm taxas de amostragem muito muito dispares. Sendo, devido a este facto, necessário realizar novos

testes para obter dados mais conclusivos e representativos do percurso, para calcular o erro e a precisão deste sistema em movimento.

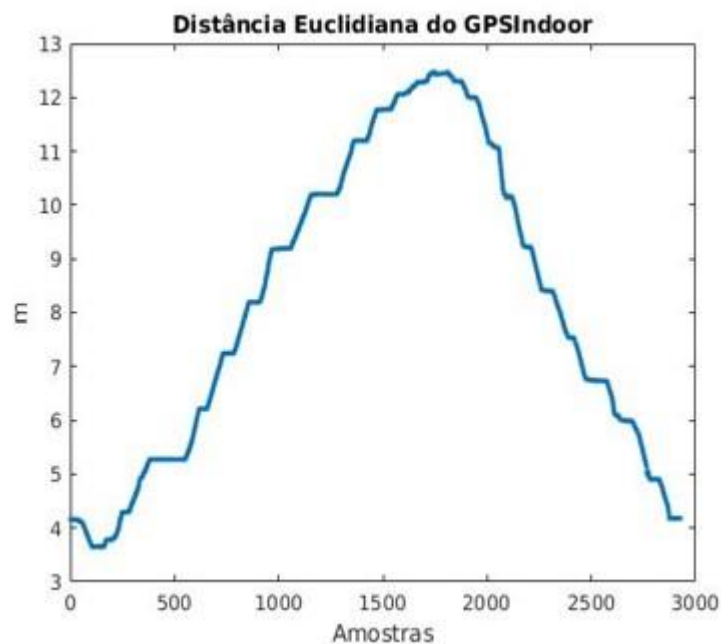


Figura 57 - distâncias euclidianas do percurso Real realizado pelo robô móvel.

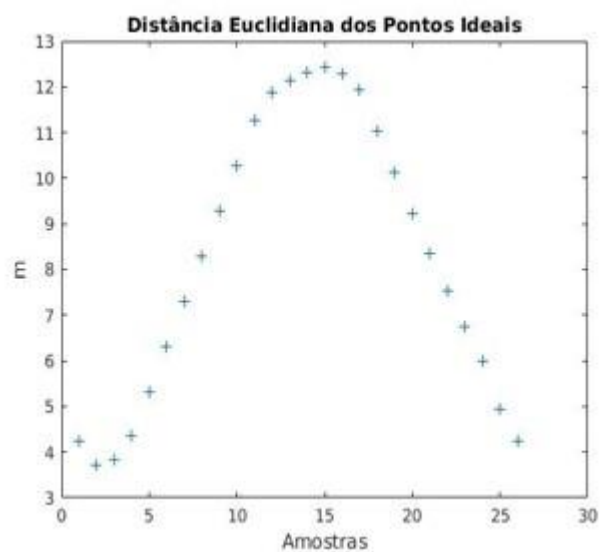


Figura 58 - Distâncias euclidianas do percurso ideal (com pontos virtuais).

5.3 Testes e resultados ao GPS - Indoor

A fim de validar as potencialidades do sistema de detecção de marcadores em relevo e comprovar a sua capacidade de fornecer uma estimativa precisa da pose do robô foram realizados testes em condições semelhantes às de funcionamento. Foi então criado um cenário apropriado para o teste das tecnologias descritas como mostra a Figura 59.

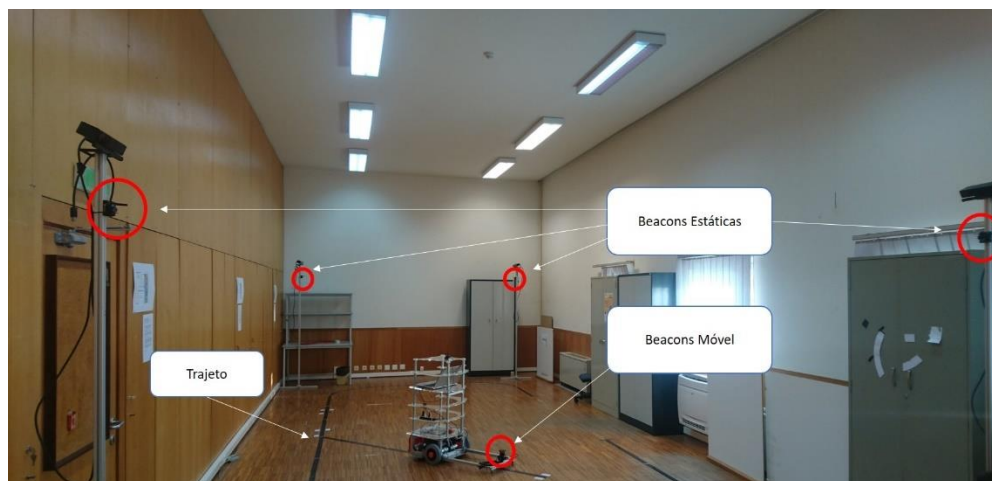


Figura 59 -Cenário montado com a disposição de *beacons*, fita magnética e conjuntos de *tags* dispostas no chão.

Existem partes do trajeto onde não foi adicionado fita magnética, para que nos testes, fosse possível provar, o algoritmo que dá prevalência ao uso da fita magnética e na sua ausência passaria somente a usar a tecnologia de **RFID** e “*GPS Indoor*”.



Figura 60 - Disposição geométrica do conjunto de *tags* em paralelo com a fita magnética e partes do trajeto sem fita.

Após isto, foram marcados os pontos virtuais e as respectivas **tags RFID** da trajetória para implementar o algoritmo de navegação com o “**GPS-Indoor**” como mostra a Figura 61.

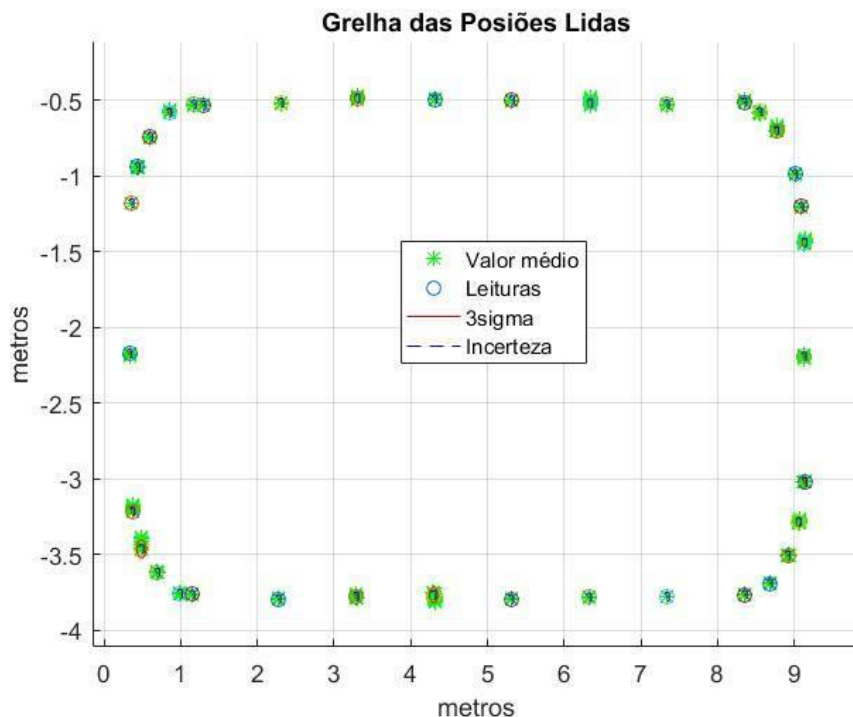


Figura 61- Marcação dos pontos em todo o trajeto definido.

Durante a execução desta trajetória registou-se a estimativa da posição do robô móvel dada pela odometria e pelo “**GPS-indoor**”. Como seria de esperar na odometria, a não correção desta estimativa com os dados fornecidos pela “**GPS-indoor**”, leva a que a odometria avalie incorretamente a localização do veículo. como mostra a Figura 62 e na Figura 63.

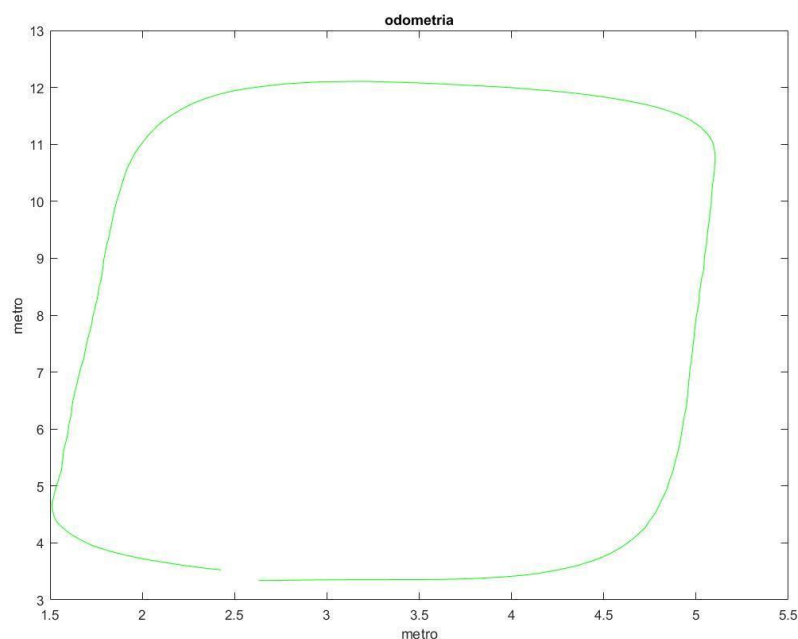


Figura 62 - Dados da posição obtidos pela odometria.

E por fim a precisão obtida por parte do “GPS-indoor”.

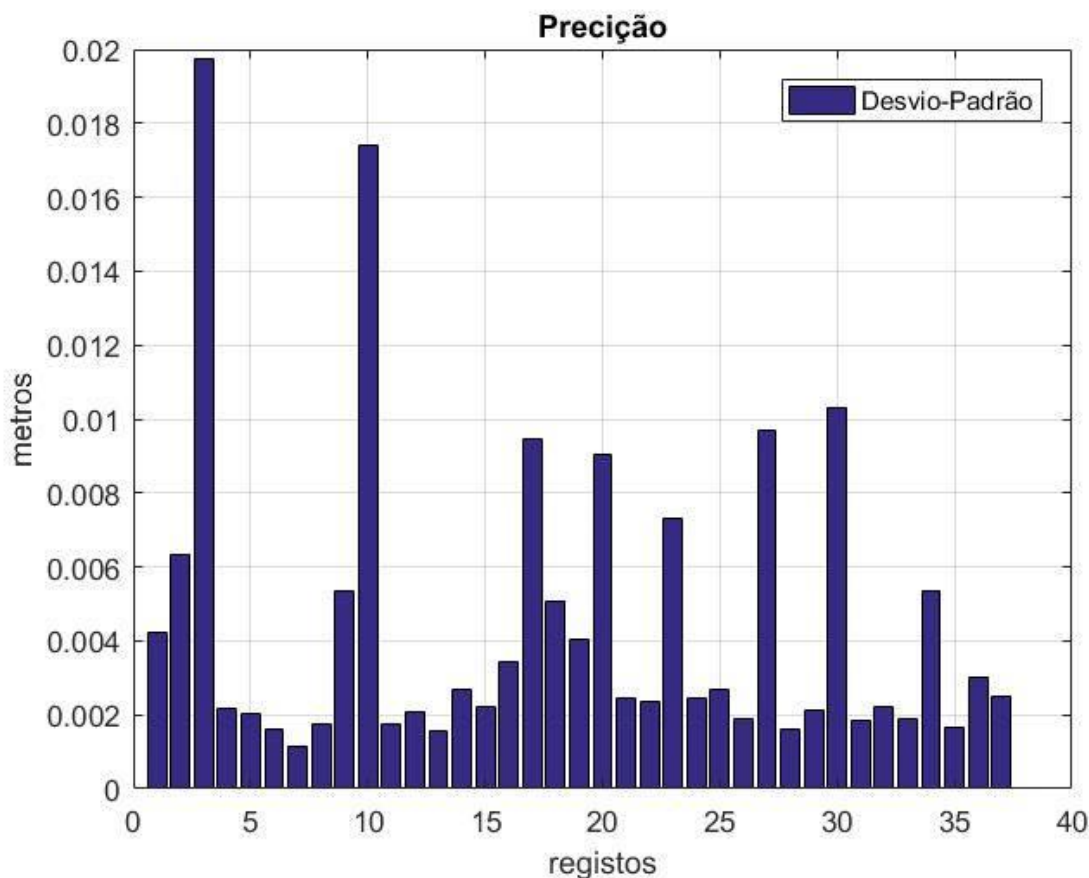


Figura 63 - Erro em metros em relação aos pontos virtuais/ ideias na trajetória.

Quanto a navegação realizada pelo seguimento de fita magnética com o sensor MGS1600, foi como esperado, sem erros e o seguimento era feito sem nenhum constrangimento, desde que a velocidade do robô móvel não ultrapasse 0.5 m/s. Acima disso, numa trajetória que contenha uma curva, o sensor MGS1600 não conseguia recolher a informação suficiente para estimar o erro lateral e calcular a velocidade angular de corrigir a mudança de trajetória.

Quanto ao sensor de leitores RFID obteve-se resultados nos quais esperados, como mostra a figura 64, houve apenas um ponto que não conseguiu calcular a orientação e isso deve-se a proximidade entre pontos que não permitia ser conclusivo para o leitor. O teste foi feito à velocidade de 0.5m/s, mas a velocidades superiores a 3 m/s os resultados não foram tão satisfatórios devido a falha de leitura de *tags*, que se encontravam nas curvas do percurso e não conseguia estimar a orientação no ponto definido.

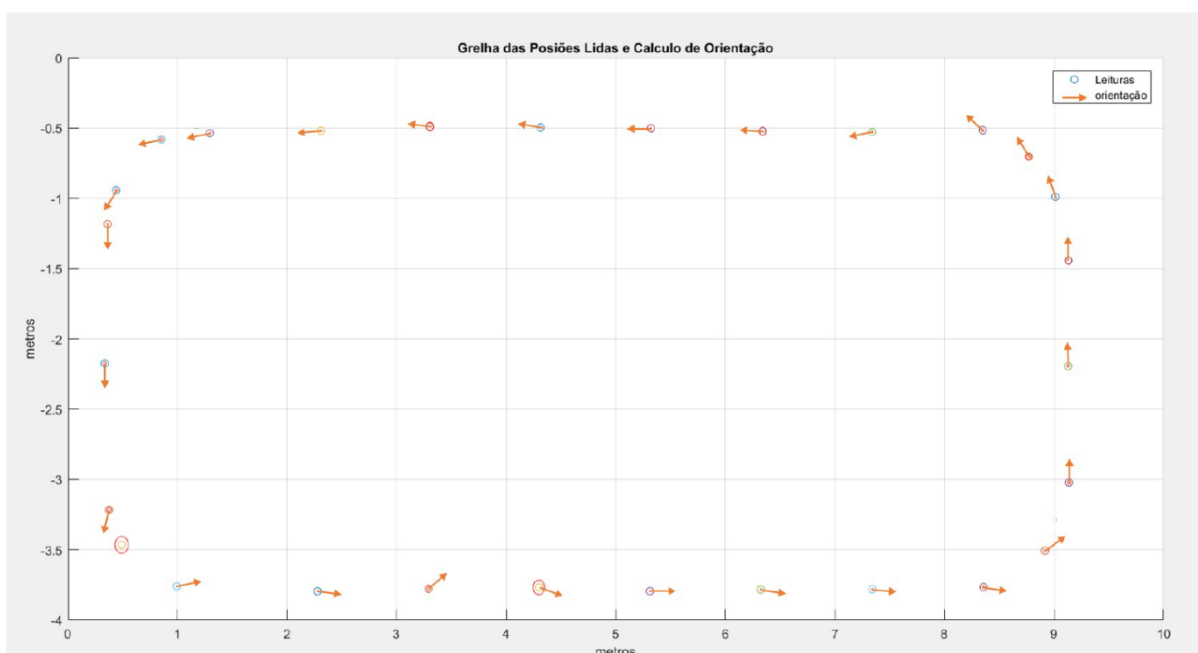


Figura 64 - Dados da orientação nos pontos obtidos pela régua de leitura RFID à velocidade de 0.5 m/s

6 CONCLUSÃO E TRABALHO FUTURO

Neste trabalho de projeto foi desenvolvido um robô móvel de baixo custo com tecnologias que diferem um pouco do que se usa no mercado industrial. Este protótipo foi testado em diferentes rotas existentes no laboratório do Instituto de Sistemas e Robótica e está de acordo com os objetivos propostos.

Concluiu-se ser possível realizar uma alternativa aos **AGVs** existentes capaz de ser facilmente reconfigurável e adaptável às necessidades. Verificou que é possível usar apenas 2 sensores (sensor de fita magnética e Sensor **RFID**) para se obter uma localização de um robot móvel de mais baixo custo, no entanto é um pouco limitativo devido a desvios de percurso ou no caso de sair fora da fita magnética. Já com o sistema de “**Gps-indoor**” poderá descartar o uso da régua de Leitores de **RFID**, uma vez que é possível saber a posição do robô e determinar algumas regras de sinalética quando o robô móvel passar pelos pontos pré-definidos.

Com a implementação do “**Gps-indoor**”, a solução torna-se mais fácil no que toca a alternativa de desvios de obstáculos, ou até mesmo continuar o seu percurso mesmo que a fita magnética esteja danificada.

Tratando-se este trabalho, de um projeto de desenvolvimento de um protótipo de localização de um AGV, existem alguns trabalhos futuros possíveis de desenvolver e melhorar a solução.

O primeiro passa para o desenvolvimento de uma PCB de raiz para o protótipo da Régua de leitura de RFID com a possibilidade de aumentar o ganho de potência da antena para aumentar a distância de alcance, e reduzir as capacitâncias e perdas de potencia como aconteceu durante os testes.

O segundo será finalizar o desenvolvimento e posteriormente montagem de uma nova PCB híbrida que permitiria unir todas as tecnologias aqui estudadas e após isso implementar todos os algoritmos aqui estudados uma vez esta PCB ser compatível com todo o trabalho desenvolvido. Neste momento é mostrada na Figura 65 e 66, o processo de desenvolvimento da PCB híbrida.

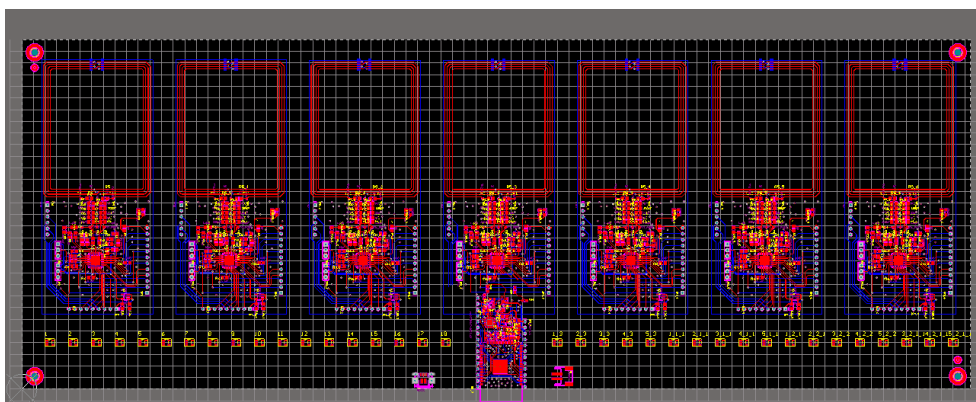


Figura 65 - Desenvolvimento dos circuitos internos de uma PCB híbrida que permite unir as tecnologias estudadas no trabalho de projeto.

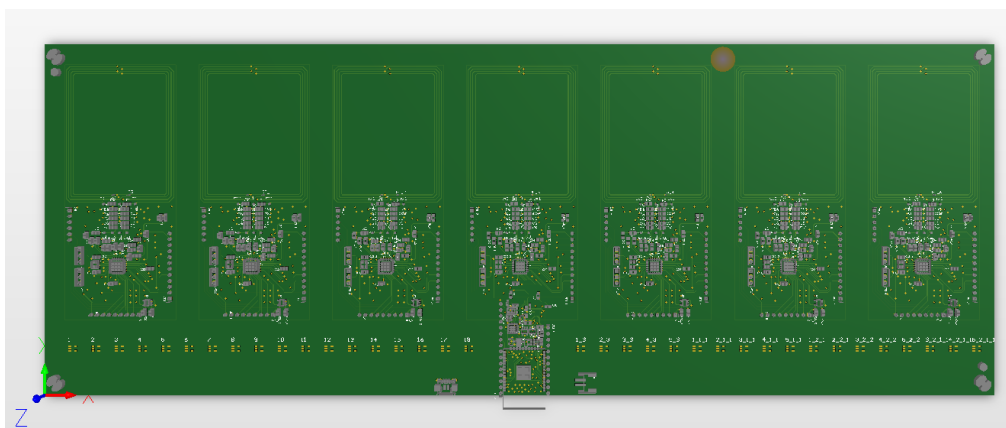


Figura 66 - Ilustração tridimensional da PCB Híbrida que permite detectar *tags* RFID, detectar a fita magnética e comunicar com as *beacons* estáticas por radiofrequência.

Quanto aos algoritmos, ainda existe muito trabalho a ser feito, possibilidade de aplicar alguns filtros para o tratamento dos dados é uma viabilidade plausível.

Propõe-se igualmente como trabalho futuro, a calibração da odometria recorrendo a um método mais completo e a adoção das funções de erro para um melhor uso das matrizes de covariância.

7 BIBLIOGRAFIA

- [1] R. P. P. da Rocha, “Desenvolvimento de um sistema de gestão de agvs”, Master’s thesis, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 1998.
- [2] E. A. da Silva Santos, “Logística baseada em agvs”, Master’s thesis, FACULDADE DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE DO PORTO, 2013.
- [3] H. C. Marco A. Moreno-Armendáriz, “Visual slam and obstacle avoidance in real time for mobile robots navigation,” 2014 International Conference on Mechatronics, Electronics and Automotive Engineering, 18-21 Nov. 2014.
- [4] K. M. Fumitaka Hashikawa, “Mobile robot navigation based on interactive slam with an intelligent space,” 2011 8th International Conference on Ubiquitous Robots and Ambient Intelligence (URAI), 23-26 Nov. 2011.
- [5] J. A. S. Martins, “Mrslam- localização e mapeamento simultaneos com múltiplos robôs,” Master’s thesis, Faculdade de Ciências e Tecnologia Universidade de Coimbra, 2012.
- [6] Agvposys: Automated-guided-vehicle with innovative indoor positioning system for the factory of the future. [Online]. Available:
https://www.uc.pt/administracao/dpa/investigacao/proj_cof/agvposys
- [7] Agvposys: Automated-guided-vehicle with innovative indoor positioning system for the factory of the future. [Online]. Available: <https://www.isr.uc.pt/index.php/automation-and-robotics-for-human-life/people?task=showprojectisr.show&idProject=175>
- [8] R. P. Rocha, “Estado da arte da robótica móvel em portugal,” Master’s thesis, Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra, 2001.
- [9] J. P. B. Neiva, “Localização e orientação “indoor” com recurso à tecnologia rfid,” Master’s thesis, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 2012.
- [10] Y. Z. H.-W. H. Wang, “Indoor navigation system design based on particle filter,” 2016 International Conference on Intelligent Transportation, Big Data & Smart City (ICITBS), 2016.
- [11] M. A. M. M. S. A. H. J. A. A. K. Yelamarthi, “Kalman filter based indoor mobile robot navigation,” 2016 International Conference on Electrical, Electronics, and Optimization Techniques (ICEEOT), 2016.

- [12] A. C. B. P. Lopes, “Mobile robot assisted navigation based on collaborative control,” Ph.D. dissertation, Faculdade de Ciencias e Tecnologia da Universidade de Coimbra, 2013.
- [13] R. J. M. da Silva, “Localização de agvs industriais baseada em marcadores,” Master’s thesis, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 2011.
- [14] (2016) Standard performance mifare and ntag frontend. [Online]. Available: <https://www.nxp.com/docs/en/data-sheet/MFRC522.pdf>
- [15] J.-W. L. Byoung-Suk Choi* and J.-J. Lee, “Localization and map-building of mobile robot based on rfid sensor fusion system,” IEEE Division of Electrical Engineering.
- [16] [Online]. Available: https://en.wikipedia.org/wiki/Ziegler%E2%80%93Nichols_method
- [17] [Online]. Available: <https://www.roboteq.com/index.php/roboteq-products-and-services/brushed-dc-motor-controllers/279/sdc2130-detail>
- [18] (2018) Precision magnetic track following sensor with gyroscope. [Online]. Available: <https://www.roboteq.com/index.php/docman/magsensor-documents-and-files/mgsdocuments-1/mgs-datasheets-1/mgs1600-datasheet/37-mgs1600-datasheet/file>
- [19] [Online]. Available: [https://marvelmind.com/pics/marvelmind presentation.pdf](https://marvelmind.com/pics/marvelmind%20presentation.pdf)
- [20] J. Borenstein(1) and L. Feng(2), “Umbmark – a method for measuring, comparing, and correcting odometry errors in mobile robots,” 1994.
- [21] H. M. C. Gomes, “Construção de um sistema de rfid com fins de localização especiais,” Master’s thesis, Universidade de Aveiro, 2007.
- [22] J. Mi and Y. Takahashi, “Low cost design of hf-band rfid system for mobile robot self-localization based on multiple readers and tags,” IEEE Conference on Robotics and Biomimetics, 2015.
- [23] [Online]. Available: <https://www.transbotics.com/learning-center/guidance-navigation>
- [24] [Online]. Available: <https://www.roboteq.com/index.php/applications/100-how-to/278-building-a-magnetic-track-guided-agv>
- [25] [Online]. Available: http://www.simotecthailand.co.th/en/r_agv.html
- [26] [Online]. Available: <https://www.localino.net/localino-v3-0/>

