

# **Movimentação Autónoma de Robôs Móveis de Baixo Custo, com Base no Sistema NXT da LEGO®**

*Pedro Miguel de Sá Pereira da Silva*

**Dissertação de Mestrado Integrado em Engenharia Mecânica**

Orientador: Prof. Doutor Manuel Romano Barbosa

Co-Orientador: Prof. Doutor António Mendes Lopes

**U. PORTO**

**FEUP** FACULDADE DE ENGENHARIA  
UNIVERSIDADE DO PORTO

**Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto**

**Mestrado Integrado em Engenharia Mecânica**

Julho de 2010

*Aos meus pais*



## Resumo

O aparecimento de robôs móveis em ambientes industriais pode aliar-se à necessidade de agilizar a movimentação de materiais de um local de carga para um local de descarga. Inicialmente, esta movimentação era feita através de tapetes transportadores, mas esta solução apresenta diversos inconvenientes, como sejam: pouca flexibilidade nas trajectórias de movimentação ou na capacidade de adaptação ao aumento do volume de carga. Para colmatar estas dificuldades desenvolveram-se veículos com capacidade de serem programáveis e progressivamente dotados de alguma autonomia. Actualmente, existem no mercado diversas empresas que disponibilizam soluções mais ou menos capazes de satisfazer as necessidades do utilizador.

No âmbito desta área da robótica, surgiu a presente dissertação que se debruça sobre a locomoção de veículos móveis. Em particular foram consideradas várias soluções para a implementação das trajectórias de um veículo de accionamento diferencial e realizados os respectivos ensaios, com posterior análise dos mesmos. As soluções foram implementadas e testadas com recurso a um veículo móvel de baixo custo da Lego® Mindstorms® NXT.



## **Autonomous movement of low cost mobile robots based on Lego® Mindstorms® NXT system**

### **Abstract**

The emergence of mobile robots in industrial environments arised from the need to streamline the movement of materials from a point of loading to a point of unloading. Initially, an alternative was to use conveyor type systems. However, this solution has several drawbacks, such as: low flexibility of the movement paths or in the ability to adapt to changes in capacity. To overcome these difficulties vehicles capable of being programmed and with some degrees of autonomy were developed. Currently, there are several commercial solutions capable of satisfying some of the user's needs.

This dissertation appeared due to our interest for this area of robotics. The work presented is related to the movement of differential type vehicles, and various solutions for the definition and implementation of trajectories are presented. These strategies were implemented in a low cost mobile vehicle from Lego® Mindstorms® NXT, and the results obtained from running several tests are presented.



## **Agradecimentos**

... À Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, por ser um dos estabelecimentos de ensino superior mais reconhecidos em Portugal. Pela política organizacional que leva a cabo. Pelo alargar de novos horizontes em termos académicos e profissionais...

... Ao Prof. Doutor Manuel Romano Barbosa e Prof. Doutor António Mendes Lopes, pela incrível disponibilidade, paciência e tentativa de transmissão de conhecimento. Pelo apoio incondicional e pela partilha de outros pontos de vista...

... Ao Prof. Doutor Francisco Freitas que sempre se prestou a ouvir, aconselhar e ajudar. Obrigado por todas as palestras, conversas e ensinamentos ...

... A todos os professores do departamento de Engenharia Mecânica...

... À Sónia, a todos os meus amigos e colegas que ajudaram a ultrapassar esta fase da vida com sucesso. Nem sempre foi fácil mas nada como uma mão amiga para ajudar nos momentos mais complicados...



## Índice de conteúdos

1	Introdução geral e estado da arte.....	1
1.1	Utilização de veículos automatizados do tipo AGV em sistemas fabris.....	1
1.2	Robôs móveis (RM) .....	6
1.2.1	Locomoção .....	7
1.2.2	Configurações dos robôs móveis .....	11
1.2.3	Localização .....	14
1.2.4	Navegação .....	14
1.3	Conclusões.....	15
2	Modelização cinemática de um veículo diferencial .....	17
2.1	Características de um veículo diferencial.....	17
2.2	Modelo de um veículo diferencial: derivação geométrica.....	19
2.3	Modelo do veículo diferencial: derivação analítica .....	21
2.3.1	Roda <i>standard</i> .....	21
2.3.2	Roda castor livre.....	22
2.3.3	Restrições ao movimento do veículo .....	23
2.4	Conclusão .....	25
3	Implementação de trajectórias com base no modelo do veículo diferencial.....	27
3.1	Implementação de uma trajectória tendo por base dois movimentos distintos .....	28
3.2	Implementação de uma trajectória com base em comandos de velocidade de rotação para as rodas .....	31
3.3	Localização e navegação do veículo.....	36
3.4	Conclusões.....	37
4	Implementação e avaliação experimental .....	39
4.1	Apresentação do sistema experimental.....	41
4.2	Experiências e testes .....	45
4.2.1	Implementação de trajectórias .....	49
4.3	Conclusões.....	82
5	Conclusões e trabalhos futuros.....	83
6	Referências.....	85



## Índice de figuras

Figura 1- Sistema de veículos automaticamente guiados do porto de Roterdão (Holanda).....	1
Figura 2 - Primeiro AGV desenvolvido por A. M. Barrett [2].....	2
Figura 3 - Arquitectura do sistema de software utilizado pela empresa <i>Danaher</i> [5].....	4
Figura 4 - Veículo AGV da empresa <i>Swisslog</i> [6]. ....	5
Figura 5 - Sistema de <i>hardware</i> utilizado num AGV pela empresa <i>Danaher</i> [5].....	6
Figura 6 - Configuração possível para um robô móvel segundo Roland Siegwart & Illah Nourbakhsh [1]. ....	7
Figura 7 - Comparação dos vários mecanismos de locomoção tendo em conta a velocidade possível vs energia [1]. ....	9
Figura 8 - Os quatro tipos básicos de rodas utilizados em robôs móveis [1]. ....	10
Figura 9 - Roda omnidireccional com configuração Swedish-45 [12].....	10
Figura 10 - Roda omnidireccional convencional.....	11
Figura 11 - Configuração do tipo <i>Synchro drive</i> . ....	12
Figura 12 - Referencial implementado para o veículo diferencial em estudo [1]. ....	18
Figura 13 - Dimensões do veículo móvel utilizado [18]. ....	19
Figura 14 – Restrições presentes numa roda standard.....	20
Figura 15 - Localização genérica da roda standard no veículo ( $X_R Y_R$ ). ....	21
Figura 16 - Roda castor livre. ....	22
Figura 17 - Localização genérica de uma roda do tipo castor livre no veículo ( $X_R Y_R$ ).....	22
Figura 18 - Planeamento de uma trajectória em parábola seguindo o primeiro método. ....	28
Figura 19 - Trajectória realizada pelo veículo móvel.....	29
Figura 20 - Fluxograma do movimento do veículo para uma trajectória em parábola. ....	30
Figura 21 - Discretização do movimento da parábola.....	31
Figura 22 - Perfil de velocidade trapezoidal implementado.....	33
Figura 23 - Fluxograma de implementação da trajectória com comando em velocidade. ....	34
Figura 24 - Discretização do movimento da parábola, perfil de velocidade trapezoidal. ....	35
Figura 25 - Trajectórias e perfis de velocidade implementados.....	40
Figura 26 - Veículos e sensores utilizados na implementação das trajectórias. ....	41
Figura 27 - Ambiente de programação do veículo Lego®. Bloco do motor.....	42
Figura 28 - Programa desenvolvido para programação do Lego® NXT, programa da parábola com perfil trapezoidal.....	43
Figura 29 - Fluxograma do programa a implementar no veículo móvel da Lego® Mindstorms® NXT.....	44
Figura 30 - Característica do motor C, sem carga. ....	45
Figura 31 - Característica do motor B, sem carga. ....	46
Figura 32 - Característica do motor C, em carga e sentido de rotação igual nos dois motores. ....	46
Figura 33 - Característica do motor B, em carga e sentido de rotação igual nos dois motores. ....	47
Figura 34 - Característica do motor C, em carga e rotação de apenas um motor.....	47
Figura 35 - Característica do motor B, em carga e rotação de apenas um motor.....	48
Figura 36 - Característica do motor C, em carga e rotação dos motores em sentidos opostos.....	48
Figura 37 - Característica do motor B, em carga e rotação dos motores em sentidos opostos.....	49

Figura 38 – Perfil de velocidade sinusoidal para o perfil de deslocamento em parábola. ....	54
Figura 39 – Evolução da trajectória do veículo em posição, no eixo x do referencial global (caso 1). ....	55
Figura 40 - Evolução da trajectória do veículo em posição, no eixo y do referencial global (caso 1). ....	55
Figura 41 – Valores de velocidade de rotação das rodas calculados pelo NXT e <i>Matlab</i> ® . ....	56
Figura 42 - Valores de <i>power</i> para cada roda, calculados pelo NXT e <i>Matlab</i> ® . ....	56
Figura 43 - Localização do veículo com auxílio de odometria. ....	57
Figura 44 – Perfil de velocidade trapezoidal para o deslocamento em parábola. ....	59
Figura 45 – Evolução da trajectória do veículo em posição, no eixo x do referencial global. ....	59
Figura 46 – Evolução da trajectória do veículo em posição, no eixo y do referencial global. ....	60
Figura 47 – Valores de velocidade de rotação das rodas calculados pelo NXT e <i>Matlab</i> ® . ....	60
Figura 48 - Valores de <i>power</i> para cada roda, calculados pelo NXT e <i>Matlab</i> ® . ....	61
Figura 49 – Evolução da trajectória do veículo em posição, no eixo x do referencial global. ....	61
Figura 50 - Evolução da trajectória do veículo em posição, no eixo y do referencial global. ....	62
Figura 51 - Valores de velocidade de rotação das rodas calculados pelo NXT e <i>Matlab</i> ® . ....	62
Figura 52 - Valores de <i>power</i> para cada roda, calculados pelo NXT e <i>Matlab</i> ® . ....	63
Figura 53 – Evolução da trajectória do veículo em posição, no eixo x do referencial global. ....	65
Figura 54 - Evolução da trajectória do veículo em posição, no eixo y do referencial global. ....	65
Figura 55 – Valores de velocidade de rotação das rodas calculados pelo NXT e <i>Matlab</i> ® . ....	66
Figura 56 - Valores de <i>power</i> para cada roda, calculados pelo NXT e <i>Matlab</i> ® . ....	66
Figura 57 - Localização do veículo com auxílio de odometria. ....	67
Figura 58 – Evolução da trajectória do veículo em posição, no eixo x do referencial global. ....	68
Figura 59 – Evolução da trajectória do veículo em posição, no eixo y do referencial global. ....	69
Figura 60 – Valores de velocidade de rotação das rodas calculados pelo NXT e <i>Matlab</i> ® . ....	69
Figura 61 - Valores de <i>power</i> para cada roda, calculados pelo NXT e <i>Matlab</i> ® . ....	70
Figura 62 – Evolução da trajectória do veículo em posição, no eixo x do referencial global. ....	72
Figura 63 - Evolução da trajectória do veículo em posição, no eixo y do referencial global. ....	72
Figura 64 - Valores de velocidade de rotação das rodas calculados pelo NXT e <i>Matlab</i> ® . ....	73
Figura 65 - Valores de <i>power</i> para cada roda, calculados pelo NXT e <i>Matlab</i> ® . ....	73
Figura 66 - Localização do veículo com auxílio base em odometria. ....	74
Figura 67 – Evolução da trajectória do veículo em posição, no eixo x do referencial global. ....	75
Figura 68 – Evolução da trajectória do veículo em posição, no eixo y do referencial global. ....	76
Figura 69 – Valores de velocidade de rotação das rodas calculados pelo NXT e <i>Matlab</i> ® . ....	76
Figura 70 - Valores de <i>power</i> para cada roda, calculados pelo NXT e <i>Matlab</i> ® . ....	77
Figura 71 - Evolução da trajectória do veículo em posição, no eixo x do referencial global. ....	78
Figura 72 - Evolução da trajectória do veículo em posição, no eixo y do referencial global. ....	78
Figura 73 - Valores de velocidade de rotação das rodas calculados pelo NXT e <i>Matlab</i> ® . ....	79
Figura 74 - Valores de <i>power</i> para cada roda, calculados pelo NXT e <i>Matlab</i> ® . ....	79
Figura 75 - Estratégia de implementação de movimentos de rotação e deslocamento linear com correcção utilizando sensores externos. ....	81

## Índice de tabelas

Tabela 1 - Configuração das rodas para robôs móveis [1]. .....	13
Tabela 2 – Valores utilizados na implementação das estratégias A1, A2 e A3. ....	50
Tabela 3 - Resultados da implementação da trajectória com deslocamento em parábola.....	51
Tabela 4 - Resultados da implementação da trajectória com deslocamento em semicírculo...51	
Tabela 5 - Resultados da implementação da trajectória com deslocamento em linha recta.....	52
Tabela 6 - Variáveis de entrada para as trajectórias. ....	53
Tabela 7 - Valores medidos da implementação da trajectória pelo NXT, perfil de velocidade sinusoidal.....	53
Tabela 8 - Valores medidos da implementação da trajectória pelo NXT, perfil de velocidade trapezoidal. ....	58
Tabela 9 - Variáveis de entrada para as trajectórias. ....	64
Tabela 10 - Valores medidos da implementação da trajectória pelo NXT, perfil da velocidade sinusoidal.....	64
Tabela 11 - Valores medidos da implementação da trajectória pelo NXT, perfil de velocidade trapezoidal. ....	68
Tabela 12 – Ponto inicial e final do movimento em linha recta para os perfis B3.1, B3.2 e B3.3.. ....	71
Tabela 13 – Valores medidos da implementação da trajectória pelo NXT. ....	71
Tabela 14 – Valores medidos da implementação no NXT para a trajectória B3.2. ....	75
Tabela 15 – Valores medidos da implementação da trajectória pelo NXT, estratégia B3.3....	77
Tabela 16 - Valores da posição inicial e final pretendida. ....	80
Tabela 17 – Valores medidos da implementação da trajectória pelo NXT, trajectória C. ....	80
Tabela 18 - Movimentos de rotação em torno de um ponto fixo. ....	82



## 1 Introdução geral e estado da arte

A robótica móvel pode ser considerada como um ramo particular do grande universo que é a robótica. A sua importância pode ser avaliada pelos inúmeros exemplos de aplicações com interesses particulares, tais como, operações de busca e salvamento [9], de acesso a ambientes remotos e hostis [14], controlo do fluxo de materiais em sistemas industriais e serviços [15] ou mesmo em casos de carácter lúdico [8]. Apesar de a locomoção estar subjacente aos objectivos últimos de um robô, coloca problemas tecnológicos particulares, quer relativos às soluções de locomoção propriamente ditas, quer no que diz respeito ao funcionamento independentemente da existência de um condutor. Conhecer a localização relativamente a um referencial fixo aparece como um problema central.

A evolução da robótica móvel pode ser vista segundo duas linhas em função das aplicações: em sistemas industriais como veículos automatizados para transporte; e em outras aplicações mais genéricas, com objectivos distintos, muitas vezes abrangendo movimentação em ambientes não estruturados. Actualmente, a evolução tecnológica permite uma aproximação destas duas linhas através da implementação de soluções aplicáveis aos problemas comuns.

### 1.1 Utilização de veículos automatizados do tipo AGV em sistemas fabris

A utilização de veículos sem condutor (*AGV – Automated Guided Vehicles*) em sistemas industriais tem vindo a aumentar. A evolução que tem existido na tecnologia permite que a aplicação deste tipo de veículos se tenha expandido a áreas em que anteriormente não era possível a sua utilização (Figura 1).

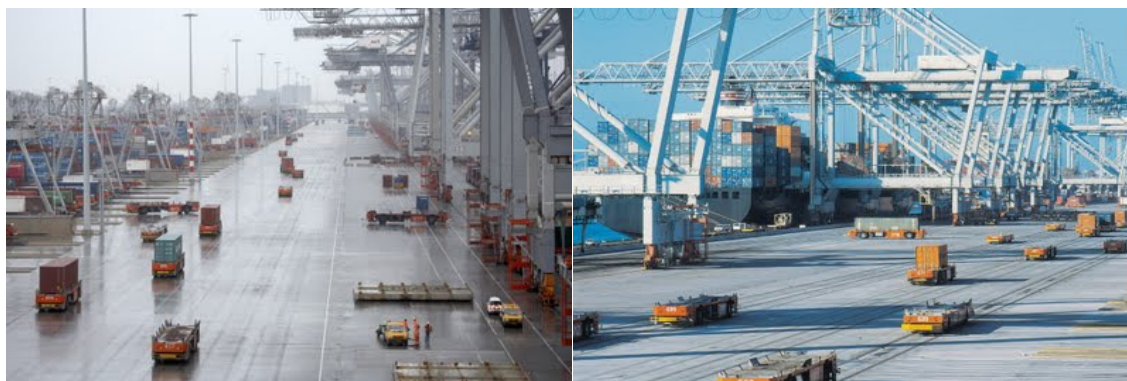


Figura 1- Sistema de veículos automaticamente guiados do porto de Roterdão (Holanda).

Actualmente, os mercados impõem que as empresas sejam cada vez mais eficientes reduzindo ou eliminado desperdícios que aparecem sob várias formas. O dinamismo e concorrência a que as empresas estão sujeitas, obriga-as a ter como um objectivo, eliminar todas as despesas supérfluas e maximizar a sua capacidade de reacção a “alterações” do mercado.

Os sistemas de transporte baseados em AGVs são uma alternativa mais flexível a outros tipos automatizados de sistemas de transporte, possibilitando uma maior capacidade de adaptação a alterações.

A flexibilidade dos AGVs pode ser considerada em relação aos trajectos, a alterações de locais de carga/descarga, bem como à capacidade de trabalho, mantendo a repetibilidade e controlo de fluxo de materiais associados aos sistemas automatizados e uma diminuição dos custos de mão-de-obra directa.

O primeiro veículo do tipo AGV (Figura 2) foi desenvolvido em 1954 por A. M. Barrett [2]. O método utilizado para guiar o veículo recorria a um fio condutor colocado segundo a trajectória pretendida, que o veículo seguia. Actualmente, o fio condutor é normalmente colocado a uma profundidade entre os 13-26 mm e alimentado com uma corrente eléctrica AC (de baixa amplitude e uma frequência de entre 1-15 kHz) [7]. O veículo tenta seguir o fio condutor, usando a influência do campo electromagnético no sistema de guiamento. A localização do veículo no percurso definido pelo fio condutor é feita recorrendo a odometria e calibração através de marcas exteriores ao veículo. A grande limitação deste tipo de veículos consiste na necessidade de existirem percursos fisicamente pré-definidos e de reconfiguração pouco prática.



Figura 2 - Primeiro AGV desenvolvido por A. M. Barrett [2].

O interesse em ultrapassar esta limitação levou ao desenvolvimento dos veículos, aumentando a sua mobilidade dentro do espaço de trabalho (*free-ranging*). Os veículos passam a poder movimentar-se através de percursos definidos por software, ou seja virtuais. Esta capacidade tornou-se efectiva pela primeira vez usando um sistema de medição da distância do veículo a posições conhecidas no ambiente de trabalho, através de um sensor laser [10]. Com base nestas medidas e num mapa do local é possível através de triangulação conhecer em cada instante a localização do veículo.

Actualmente, a tendência é para combinar várias técnicas, incluindo o recurso a sistemas inerciais e reconhecimento do ambiente através de scanners com laser e sistemas de visão [11].

Os AGVs são tipicamente associados a veículos guiados automaticamente. A evolução dos sistemas de localização, bem como dos sistemas de locomoção (veículos omnidireccionais) leva a que a ênfase se possa centrar em veículos mais autónomos e desta forma mais próximos de robôs móveis.

Um sistema de transporte baseado em AGVs pressupõe para além dos veículos, um elemento externo de controlo e gestão da frota, que assume a responsabilidade do sistema de AGVs responder a solicitações de transporte (Figura 3).

Neste contexto as características principais dos veículos são [16]:

- sistema de guiamento;
- programação de tarefas/percursos;
- comunicação com o sistema externo e/ou outros veículos;
- estabilidade;
- manobrabilidade;
- controlabilidade;
- características da superfície onde se realiza a locomoção;
- velocidade de deslocação;
- carga máxima de utilização;
- acesso para carga/descarga;

- ambiente e tarefas a que se destina;

O sistema de controlo e gestão de frota tem como funções:

- administrar e supervisionar a frota de veículos;
- alocar tarefas a cada veículo;
- definir percursos e gerir o tráfego;
- gerir a interface entre o sistema de produção/ de armazenagem e sistema de gestão.

Os fabricantes de veículos automáticos normalmente disponibilizam software apropriado para os controlar, como por exemplo: a *Danaher* [5], a *Siemens* [4], a *Swisslog* [6] e a *Pioneer* [3].

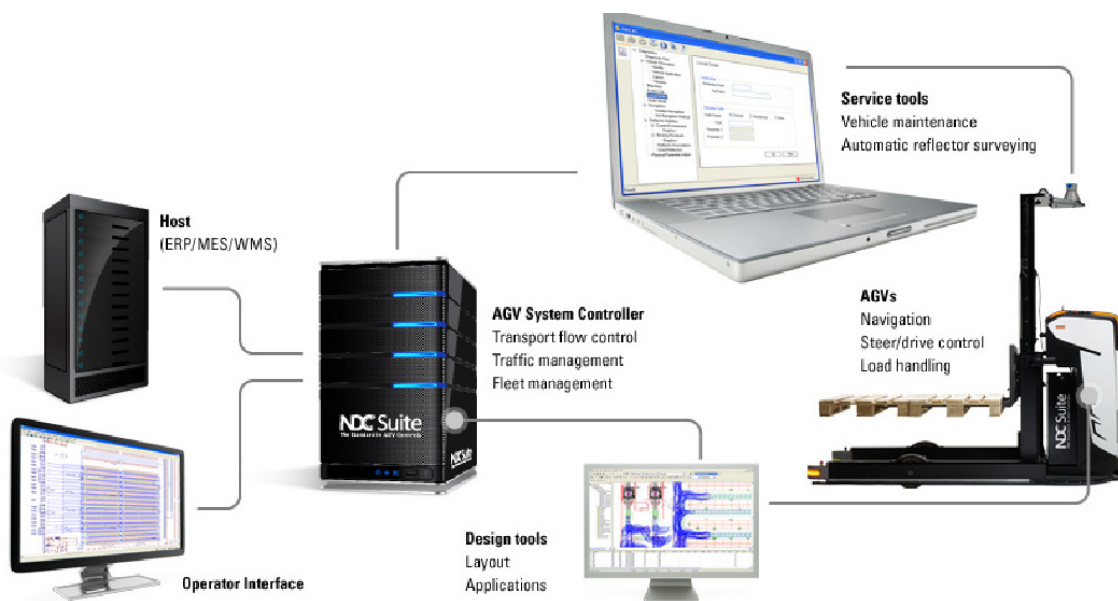


Figura 3 - Arquitectura do sistema de software utilizado pela empresa *Danaher* [5].

Nas Figuras 3 a 5, são visíveis os componentes principais de um sistema de AGVs comercial disponibilizado pelas empresas (*Danaher* e *Swisslog*) que incluem um sistema de transmissão de dados (para comunicação com o computador central onde corre o software de controlo), um sistema de locomoção (dependente do tipo de estrutura do veículo), um sistema de detecção de obstáculos (sensores laser) e um sistema de guiamento do AGV (dependente

do objectivo a que é destinado). Por questões de segurança existe normalmente um botão de emergência e em alguns casos um LCD para visualização de dados por parte do utilizador (Figura 4).

O fabricante *Swisslog*, disponibiliza dois sistemas possíveis para comunicação entre o computador central e o AGV. Esta comunicação pode ser efectuada através de um cabo USB, ligando-se directamente o AGV ao computador, ou enviando a informação através rádio frequência (RF) [6].



Figura 4 - Veículo AGV da empresa *Swisslog* [6].

A solução apresentada pela empresa *Danaher* não é muito diferente da solução da *Swisslog*. Cada AGV leva a bordo um controlador com a capacidade para controlar os *drivers*, *encoders*, *display*, PLC, sensores de segurança e navegação, e uma entrada para utilizar o AGV com controlo manual (Figura 5). O veículo utiliza um sistema RF para comunicar com o computador central que se encontra numa sala de controlo.

O computador central gere todos os veículos e sincroniza-os com a linha de produção de forma a constituir-se um fluxo ininterrupto de material [5].



Figura 5 - Sistema de *hardware* utilizado num AGV pela empresa *Danaher* [5].

Nas instalações fabris têm-se utilizado, frequentemente, AGVs com a configuração de três e quatro apoios [5]. Estas duas configurações são as que apresentam melhor balanceamento entre estabilidade, capacidade de carga e complexidade do veículo.

## 1.2 Robôs móveis (RM)

Apesar das características particulares da utilização de AGVs em sistemas industriais, a sua evolução actual justifica uma abordagem mais geral no âmbito da robótica móvel.

Roland Siegwart & Illah R. Nourbakhsh [1] apresentam uma estrutura de um robô móvel em que é possível destacar os seus módulos principais (Figura 6).

- percepção do meio que o rodeia;
- localização;
- capacidade de navegação;
- locomoção.

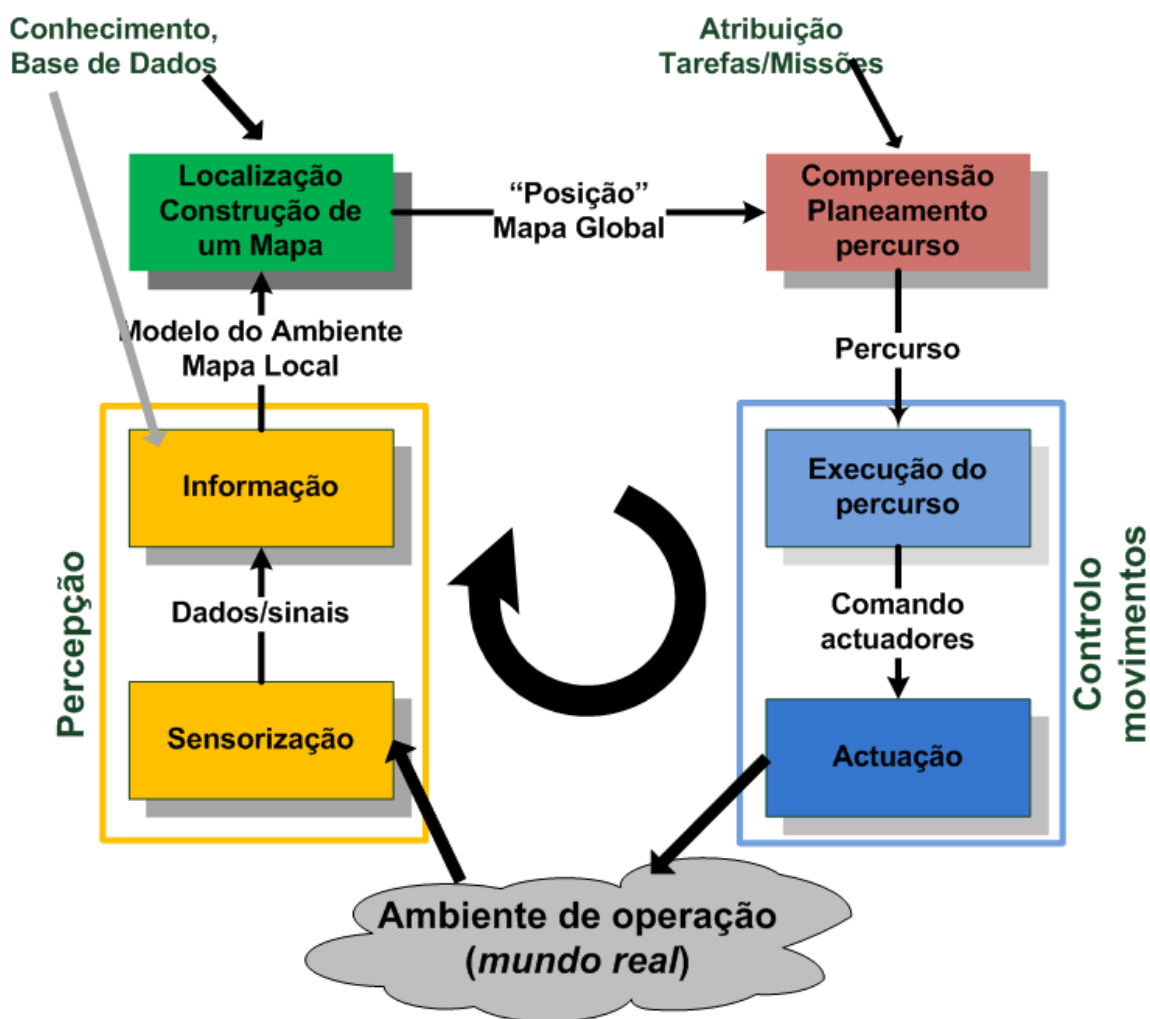


Figura 6 - Configuração possível para um robô móvel segundo Roland Siegwart & Illah Nourbakhsh [1].

### 1.2.1 Locomoção

Os robôs móveis necessitam de mecanismos de locomoção que se adaptem ao meio físico para o qual são projectados. A maioria dos sistemas de locomoção são inspirados na natureza e de seguida replicados em laboratório. Existem robôs com capacidade de andar, saltar, correr, arrastar, deslizar, nadar, voar e rolar. Para se conseguirem estas aptidões desenvolveram-se vários tipos de locomoção que ao nível de veículos assumem particular relevância: rodas, pernas, lagartas e mistos ou híbridos.

O tipo de locomoção utilizado é determinante no comportamento do robô móvel, definindo a sua interacção directa com o ambiente em que se desloca. O número e configuração dos pontos de contacto, as características de atrito, centro de gravidade e inclinação do terreno, são determinantes para a sua estabilidade estática e dinâmica. As

características (água, ar, solo) e as condições (estruturado, interior ou exterior do meio físico) são também determinantes na escolha de uma solução de locomoção [1].

A locomoção por pernas é caracterizada por uma série de pontos de contacto entre o robô e a superfície de deslocamento. As principais vantagens são a elevada adaptabilidade e manobrabilidade em superfícies irregulares. Um robô com locomoção por pernas tem ainda a capacidade de superar depressões ou elevações na superfície tão extensas quanto as suas limitações físicas permitirem. Uma última vantagem deste tipo de configuração é a possível capacidade de manipulação [1]. Como desvantagens podem referir-se a maior complexidade de implementação do sistema mecânico e do seu controlo.

A grande vantagem da locomoção por lagartas é a sua elevada capacidade de tracção e estabilidade, devidas à grande superfície de contacto entre o robô e o solo. Estas características podem ser bastante interessantes em ambientes acidentados. Por vezes esta característica torna-se indesejada. Por exemplo, na altura de alterar a orientação do robô é necessário um binário elevado para vencer as forças de atrito entre a superfície e as lagartas. Uma outra desvantagem é a dificuldade de determinar o centro de rotação do robô e a consequente dificuldade em se calcular a correcta orientação e posição (depende da fricção entre as superfícies) [1].

A locomoção mista ou híbrida conjuga o melhor dos dois sistemas (por rodas e por pernas). Este sistema combina a adaptabilidade de uma perna com a eficiência de uma roda. A desvantagem desta solução é a sua ineficiência e a complexidade do sistema para o controlar [1].

As rodas têm sido a escolha mais frequente para a solução de locomoção nos robôs móveis. Isto deve-se sobretudo à sua eficiência (Figura 7) e à simplicidade dos sistemas mecânicos associados à sua implementação [1]. A principal desvantagem é a dificuldade de locomoção em ambientes pouco estruturados.

O tipo, o número e a configuração geométrica das rodas é determinante para o comportamento cinemático de um robô móvel. Tipicamente, uma roda pode impor restrições ou permitir o movimento em determinadas direcções.

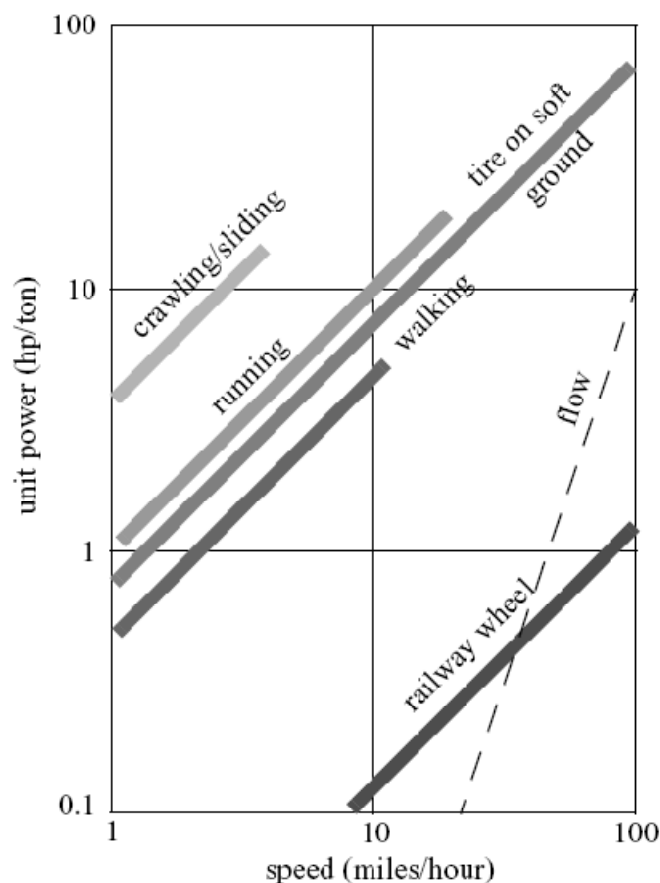


Figura 7 - Comparação dos vários mecanismos de locomoção tendo em conta a velocidade possível vs energia [1].

Na Figura 8 estão representados os quatro tipos de rodas mais usados. A roda (a) designada *standard*, apresenta dois graus de liberdade: a rotação em torno do eixo da roda (tracção) e a rotação em torno de um eixo que passa pelo ponto de contacto com a superfície (orientação). A roda (b) designa-se por castor móvel ou roda livre, tem também dois graus de liberdade, sendo que o eixo de rotação associado à direcção está desalinhado do ponto de contacto com a superfície. A roda (c) apresenta uma configuração particular, com roletes na periferia, designando-se normalmente por roda omnidireccional (ex. *Swedish*), apresentando três graus de liberdade: rotação em torno do eixo da roda (tracção), em torno dos roletes em contacto com a superfície (passivo) e em torno do eixo que passa pelo ponto de contacto com a superfície (direcção). A roda (d), esférica, pode deslocar-se em qualquer direcção no plano.

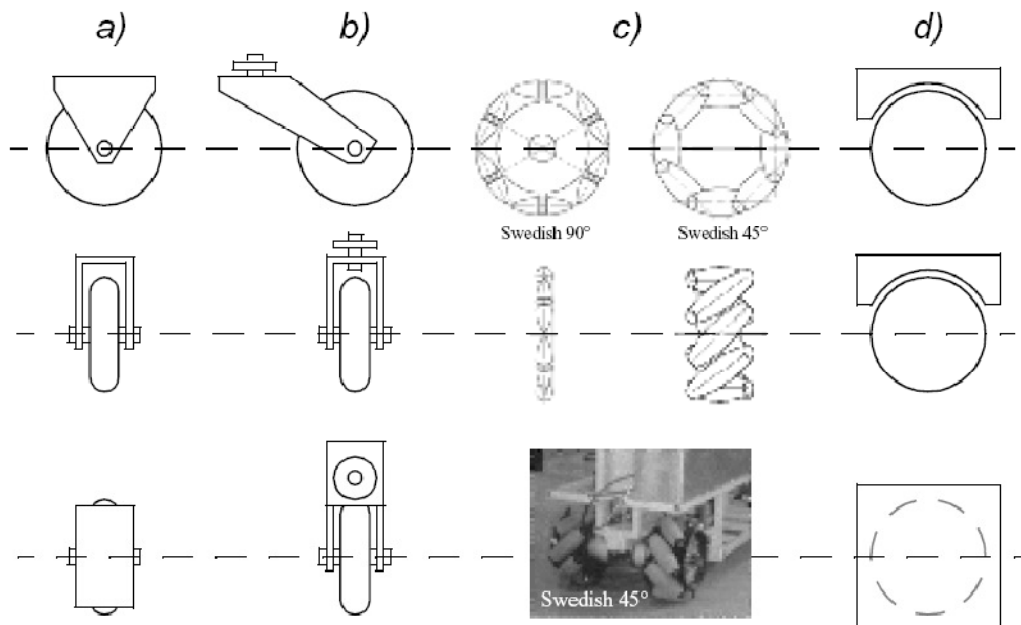


Figura 8 - Os quatro tipos básicos de rodas utilizados em robôs móveis [1].

A roda *standard*, comparativamente com a roda castor, absorve forças laterais, transmitindo-as directamente ao *chassis* do veículo.

As rodas *Swedish* e esférica são as que apresentam menores restrições ao nível das direcções que o veículo pode seguir. A roda *Swedish* é semelhante à roda *standard* mas com a característica de conter baixo atrito nas direcções dos rolos, tipicamente colocados a 45° (Figura 9) ou 90°. O conceito de omnidireccionalidade encontra o seu expoente máximo nas rodas esféricas. A configuração das rodas esféricas é parecida com a usada nos ratos de computador em que são colocados rolos motorizados para movimentar a esfera.



Figura 9 - Roda omnidireccional com configuração Swedish-45 [12].

Existem outros tipos de rodas omnidireccionais (ex. Figura 10). Estas apresentam boas características a nível da capacidade de carga, tolerância a irregularidades da superfície de deslocamento e são mecanicamente simples [13].



Figura 10 - Roda omnidireccional convencional.

### 1.2.2 Configurações dos robôs móveis

A manobrabilidade do veículo (equivalente ao número de graus de liberdade controlados) está associada à sua capacidade de se orientar e deslocar, o que é determinado não só pelas condições de movimentação de cada roda, mas também pelo seu número e disposição no veículo. A quantificação da manobrabilidade pode ser feita considerando um grau de mobilidade e um grau de direccionalidade. O grau de mobilidade tem em conta uma análise das restrições ao movimento do veículo a partir da análise das restrições cinemáticas inerentes (não deslizamento/escorregamento) ao movimento de cada roda e a respectiva conjugação quando consideradas todas as rodas. O grau de direccionalidade tem em conta a liberdade adicional obtida pela utilização de rodas direccionais.

Apesar de a configuração com três rodas, à partida, garantir estabilidade estática não quer dizer que não se alcançasse estabilidade com outras formas. Essas outras opções podem

levar à necessidade de um controlo do mecanismo do veículo mais robusto, ou de um sistema mecânico mais elaborado. Na configuração de quatro ou mais rodas é necessária a utilização de um sistema de suspensão para garantir o contacto entre a superfície e as rodas. Numa configuração de duas rodas é necessário garantir que o centro de gravidade se encontra abaixo do eixo das rodas, alinhado com este, e que as rodas sejam de grandes dimensões [1].

Um robô é considerado omnidireccional se tiver a capacidade de se movimentar em qualquer direcção no plano  $xy$  sem que seja necessária qualquer rotação prévia. Os robôs omnidireccionais têm a vantagem de conseguir movimentar-se em espaços congestionados.

Esta manobrabilidade é conseguida normalmente recorrendo a rodas que se consigam deslocar em mais do que uma direcção, logo a implementação de rodas esféricas ou *Swedish* é quase obrigatória. No entanto, um caso particular de um veículo com esta capacidade de se deslocar em todas as direcções é a configuração *Synchro drive* (Figura 11). Esta configuração apenas usa três rodas *standard* direccionais todas actuadas por um motor para tracção e outro para orientação da plataforma.

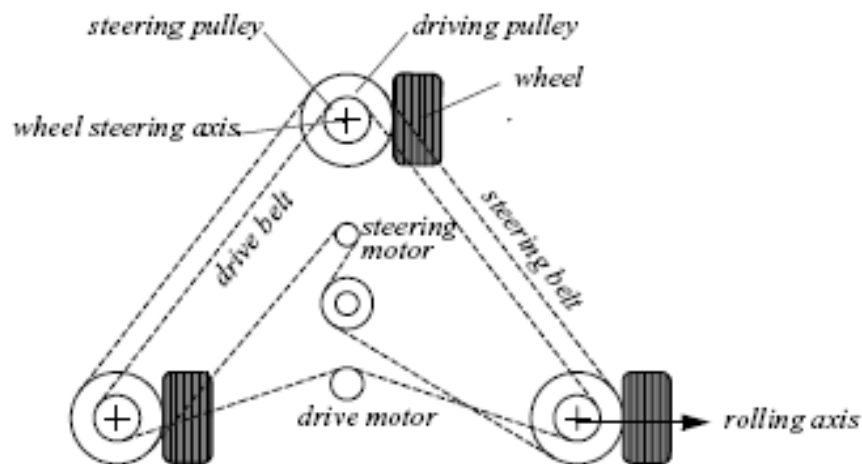
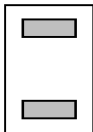

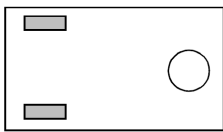
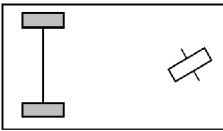
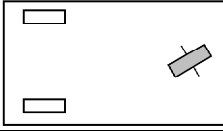
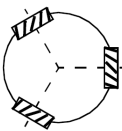
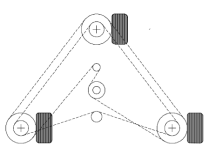
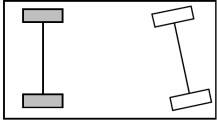
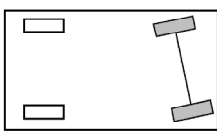
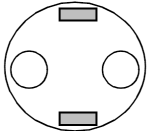
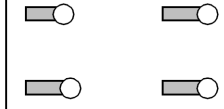


Figura 11 - Configuração do tipo *Synchro drive*.

Na Tabela 1, estão expostos alguns tipos de configurações para robôs com duas, três e quatro rodas e uma descrição da sua configuração.

Tabela 1 - Configuração das rodas para robôs móveis [1].

Número de rodas	Configuração física	Descrição
2		Duas rodas diferenciais com o centro de massa entre os seus eixos
		Uma roda de tracção (traseira) e uma roda de direcção (dianteira).
3		Duas rodas motorizadas, independentes. Um apoio omnidireccional
		Duas rodas motorizadas, ligadas entre si. Uma roda direccional.
		Duas rodas anteriores sem tracção. Roda posterior motorizada e direccional.
		Três rodas motorizadas do tipo <i>Swedish</i> , colocadas com arranjo triangular.
		Três rodas motorizadas e sincronizadas entre si mas que não permitem o controlo da orientação da plataforma.
4		Duas rodas motorizadas e duas rodas com tracção. As posteriores direccionam o veículo e as detrás impulsionam.
		Duas rodas na posição anterior e duas rodas posteriores motorizadas e direccionalidade.
		Duas rodas diferenciais e dois pontos adicionais de contacto.
		Quatro rodas motorizadas com castor livre.

### 1.2.3 Localização

O problema da localização é um dos problemas centrais em robôs móveis, tendo sido exaustivamente estudado nas últimas décadas e existindo actualmente várias soluções disponíveis. Estas soluções incluem a utilização de sensores associados ao sistema de locomoção bem como sensores para identificação de marcadores externos.

Uma solução interessante é a utilização de um sistema de GPS (*Global Positioning system*). Este sistema permite resolver o problema da localização do robô com diferentes resoluções (m/ cm) mas apresenta desvantagens importantes como: limitações à sua utilização no interior de espaços ou em locais muito congestionados e o tempo de actualização da informação (em particular com baixas resoluções).

Outro sistema de localização é através de um sensor laser. Este sistema utiliza a medição da posição do robô relativamente a pontos pré-definidos. Utilizando um sistema de triangulação e conhecendo o espaço de trabalho é possível calcular a posição do robô móvel e a sua orientação [1].

Um processo muito utilizado consiste em usar a informação da rotação das rodas (odometria) para estimar a posição do robô conhecendo o ponto de onde partiu. Os marcadores externos (magnetes) e sensores inerciais (giroscópios, acelerómetros) permitem actualmente bons resultados para estas soluções.

### 1.2.4 Navegação

A navegação é um dos maiores desafios colocados a um robô móvel. O sucesso desta operação necessita do sucesso dos quatro blocos que o constituem: percepção (o robô móvel tem de receber e interpretar os dados recebidos a partir dos seus sensores), localização (necessita saber a sua localização no ambiente que o rodeia), conhecimento (tem de decidir como agir para alcançar os objectivos) e controlo (capacidade de movimentação na trajectória pretendida a partir do controlo dos seus motores).

A navegação pode considerar-se como a capacidade que um robô móvel tem para, partindo do conhecimento do ponto de partida e de chegada, calcular uma trajectória que lhe permita deslocar-se entre esses pontos, evitando os obstáculos que possa encontrar.

Existem portanto duas competências principais que têm de ser atribuídas ao robô móvel para resolver o problema da navegação: planeamento de trajectórias e detecção de obstáculos [1].

A primeira competência envolve a identificação dos percursos, conhecimento do ponto de partida e chegada e uma estratégia para resolução de problemas de modo a alcançar os resultados desejados.

A segunda competência, detecção de obstáculos, envolve a monitorização dos sensores em tempo real e uma actualização e modelização de trajectórias durante a execução das tarefas [1].

No caso de robôs móveis industriais do tipo AGV, a atribuição de tarefas ao respectivo robô móvel é da responsabilidade do sistema de gestão. Este sistema de gestão de frotas encontra-se colocado num qualquer ponto da empresa podendo controlar vários robôs móveis ao mesmo tempo (existe ainda a possibilidade de controlar através da internet). Normalmente, estes sistemas de gestão de frota estão integrados com os sistemas de produção e gestão, de forma a maximizar o desempenho de todo o sistema.

### **1.3 Conclusões**

Este trabalho debruça-se sobre uma questão muito actual no mundo da robótica móvel, isto é, qual a melhor solução para se conhecer a localização e controlar a navegação de um robô móvel?

Para responder a esta questão foram analisadas as soluções que estão a ser implementadas pelas empresas ligadas à robótica móvel em geral e em particular aos AGVs.

O crescente interesse por este tipo de problemas e a existência de soluções com custo reduzido levou à tentativa de materializar algumas das soluções para os problemas associados aos robôs móveis usando o sistema Lego® Mindstorms® NXT. Neste sentido, no capítulo seguinte (capítulo 2) é apresentado o modelo cinemático de um veículo diferencial. O capítulo

3 aborda algumas estratégias para a implementação de trajectórias e de localização usando odometria. O capítulo 4 descreve o sistema da Lego® Mindstorms® NXT utilizado, as experiências e testes efectuados. Finalmente, no capítulo 5 são apresentadas as conclusões e sugestões para trabalhos futuros.

## 2 Modelização cinemática de um veículo diferencial

O estudo do modelo cinemático de um robô móvel é bastante relevante. Esse modelo permite conhecer as capacidades e limitações que o veículo apresenta ao nível da sua mobilidade e controlabilidade.

As questões cinemáticas que são colocadas na robótica móvel são bastante semelhantes às colocadas na robótica de manipulação. Para este ramo da robótica, o estudo cinemático tem vindo a ser realizado nos últimos trinta anos, pelo que está bastante mais desenvolvido.

A grande diferença entre o estudo de um braço manipulador e de um robô móvel é a necessidade de se conhecer, em qualquer instante de tempo, a posição em que o robô se encontra. Este problema não se coloca nos braços manipuladores, uma vez que apresentam sempre um ponto fixo em relação ao referencial absoluto.

A localização dos robôs móveis tem sido um obstáculo ao seu desenvolvimento e implantação na indústria. Para o estudo do comportamento de um robô móvel é necessário compreender o contributo que cada roda dá para a deslocação da plataforma. A própria configuração e posição da roda no veículo impõem restrições ao movimento do veículo (por exemplo: no movimento lateral).

### 2.1 Características de um veículo diferencial

Existem vantagens na utilização de veículos diferenciais de três rodas em detrimento de outras soluções. Este tipo de configuração dá garantias de estabilidade da plataforma do veículo e não exige a implementação de um sistema de suspensão em cada roda para manter o contacto permanente entre a roda e o solo.

O veículo móvel que é analisado no decorrer deste trabalho apresenta uma configuração com três apoios (duas rodas de tracção independentes e um castor livre). Considerou-se um veículo de corpo rígido, permitindo assim eliminar variáveis internas. Assim, serão considerados três graus de liberdade para o veículo, dois no plano  $xy$  (orientação no plano) e um outro,  $\theta$  (orientação), que é o ângulo de rotação segundo o eixo ortogonal ao plano.

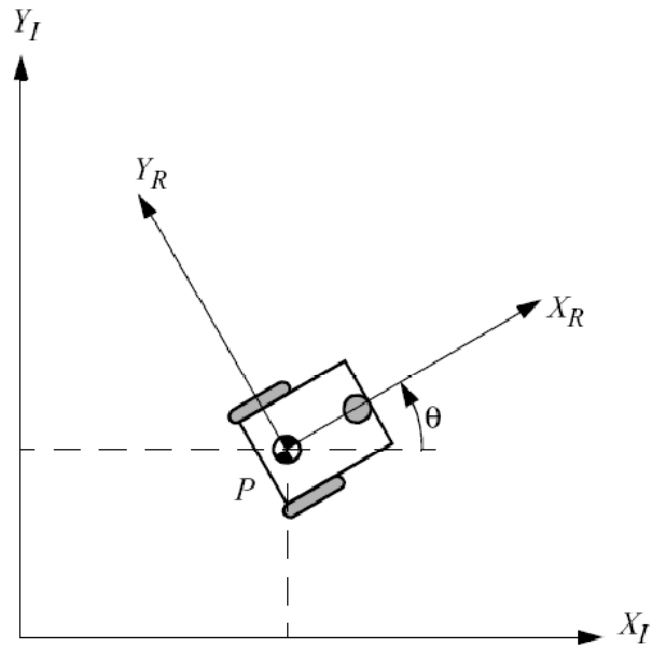


Figura 12 - Referencial implementado para o veículo diferencial em estudo [1].

O modelo cinemático de um veículo permite conhecer a posição/ velocidade linear e a orientação/ velocidade angular em que este se encontra, em qualquer instante de tempo, em função da posição/ velocidade das rodas. Inicialmente, define-se um referencial global  $X_I Y_I$ . De seguida, define-se um referencial local  $X_R Y_R$ , fixo em relação ao veículo. Neste caso, foi escolhido um referencial com origem no ponto  $P$ , orientação do eixo  $X_R$  segundo a direcção da deslocação linear e orientação do eixo  $Y_R$  perpendicular a este (Figura 12).

Estes veículos são bastante usados devido à sua simplicidade, que permite com apenas dois motores colocar o veículo em qualquer configuração ou “pose”  $[x, y, \theta]^T$  no seu espaço de trabalho.

Os movimentos simples de deslocamento (linear segundo  $X_R$  ou angular da plataforma,  $\theta_R$ ) são obtidos impondo respectivamente velocidades iguais, e iguais mas simétricas, para as duas rodas.

No entanto a movimentação do veículo no espaço de trabalho requer trajectórias mais complexas, que tenham em conta as restrições cinemáticas associadas a estes veículos.

## 2.2 Modelo de um veículo diferencial: derivação geométrica

A velocidade do veículo expressa no referencial local pode ser calculada através da matriz  $\mathbf{R}(\theta)$ :

$$\mathbf{R}(\theta) = \begin{bmatrix} \cos \theta & \sin \theta & 0 \\ -\sin \theta & \cos \theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.1)$$

$$\dot{\xi}_R = \mathbf{R}(\theta) \times \dot{\xi}_I \quad (2.2)$$

em que  $\dot{\xi}_R = [\dot{x}_R \ \dot{y}_R \ \dot{\theta}_R]^T$  é a velocidade expressa no referencial local e  $\dot{\xi}_I = [\dot{x}_I \ \dot{y}_I \ \dot{\theta}_I]^T$  é a velocidade expressa no referencial absoluto.

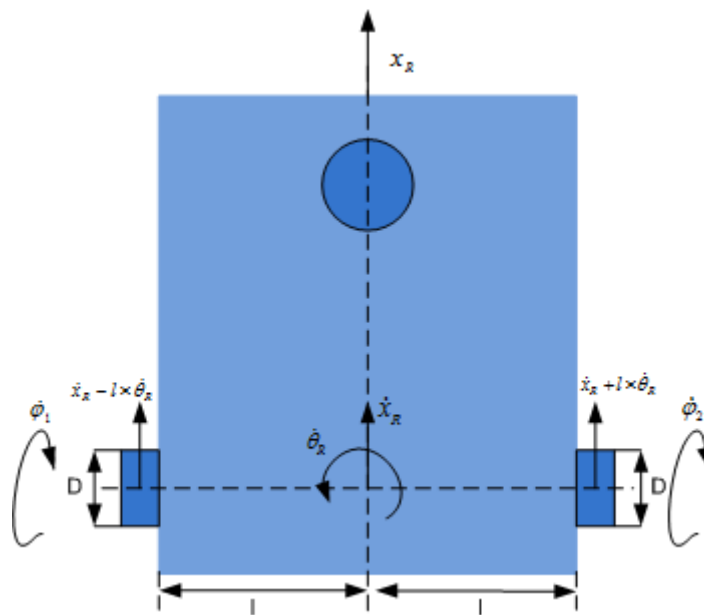


Figura 13 - Dimensões do veículo móvel utilizado [18].

Tendo em conta os parâmetros: diâmetro das rodas ( $D = 2r$ ) e a distância entre eixos ( $2l$ ) a velocidade de rotação de cada uma das rodas ( $\dot{\phi}_1$  e  $\dot{\phi}_2$ ) é dada por:

$$\dot{\phi}_1 = \frac{\dot{x}_R}{r} - \frac{l \cdot \dot{\theta}_R}{r} \quad \dot{\phi}_2 = \frac{\dot{x}_R}{r} + \frac{l \cdot \dot{\theta}_R}{r} \quad (2.3)$$

O modelo utilizado resulta de uma análise geométrica das velocidades em causa e, para além de ser apenas um modelo cinemático, assume as seguintes simplificações:

- o contacto entre a superfície de trabalho e as rodas é reduzido a um ponto;
- não existe escorregamento entre as rodas e superfície de trabalho;
- o plano das rodas, em qualquer instante, é sempre vertical ao plano de movimento;
- considera-se que o veículo é um corpo rígido.

Estas simplificações, para as rodas *standard* utilizadas, traduzem-se em (Figura 14):

- existir apenas rolamento durante o movimento;
- não existir movimento lateral das rodas;

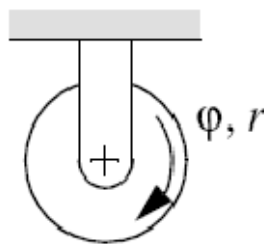


Figura 14 – Restrições presentes numa roda standard.

O mesmo modelo poderia ser derivado de uma forma analítica considerando em geral as restrições cinemáticas impostas por cada uma das rodas envolvidas, tal como é mostrado na secção seguinte.

## 2.3 Modelo do veículo diferencial: derivação analítica

### 2.3.1 Roda *standard*

As duas rodas acopladas aos motores do veículo são do tipo roda *standard*. Este tipo de rodas tem apenas a possibilidade de rodar em torno do seu eixo horizontal, sendo a sua orientação ( $\beta$ ) na plataforma ( $X_R Y_R$ ), conhecida e fixa.

Considerando uma posição ( $A$ ) e orientação ( $\beta$ ) genéricas de uma roda *standard* na plataforma do veículo ( $X_R Y_R$ ) de acordo com a Figura 15, é possível exprimir as restrições ao rolamento no plano da roda ( $v = r \dot{\varphi}$ ) e ao deslizamento na direcção perpendicular ao plano da roda (velocidade nula) através das seguintes equações; em função dos parâmetros ( $l, \alpha, \beta$ ) e das velocidades do veículo,  $[\dot{x}_R \quad \dot{y}_R \quad \dot{\theta}_R]^T = \mathbf{R}(\theta) \dot{\xi}_l$ .

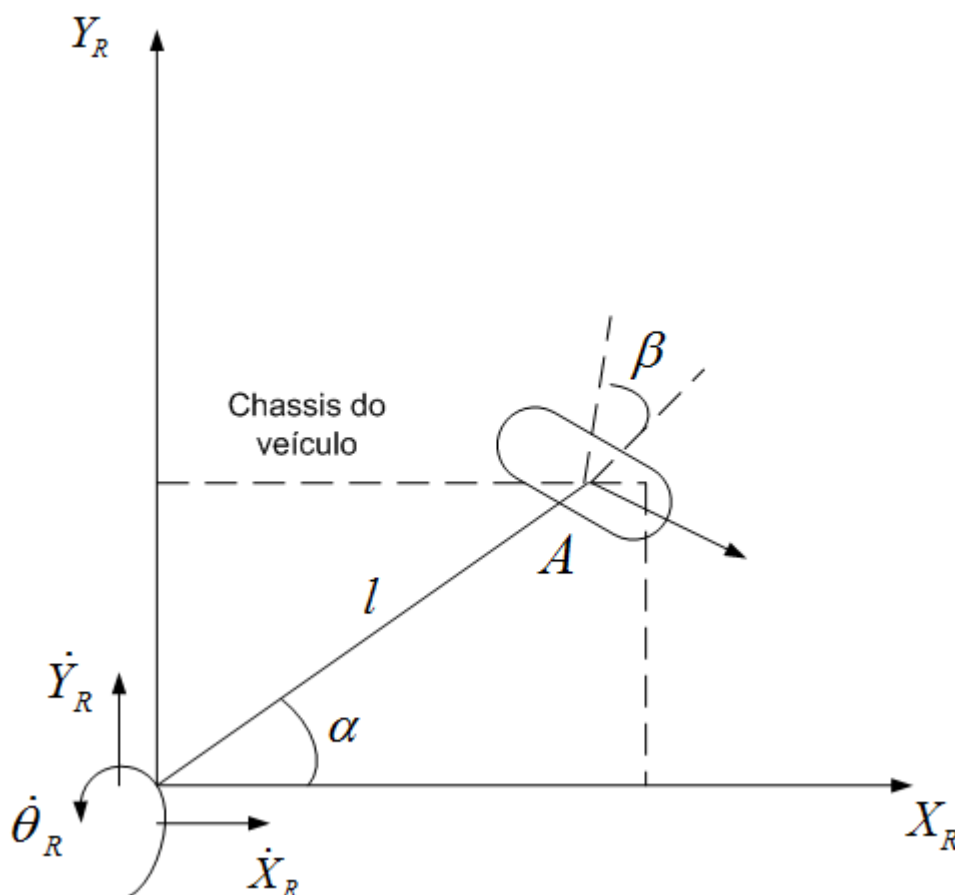


Figura 15 - Localização genérica da roda *standard* no veículo ( $X_R Y_R$ ).

$$[\sin(\alpha + \beta) \quad -\cos(\alpha + \beta) \quad (-l) \cos \beta]. \mathbf{R}(\theta) \dot{\xi}_I - r \dot{\varphi} = 0 \quad (2.4)$$

$$[\cos(\alpha + \beta) \quad \sin(\alpha + \beta) \quad l \sin \beta]. \mathbf{R}(\theta) \dot{\xi}_I = 0 \quad (2.5)$$

### 2.3.2 Roda castor livre

A roda do tipo castor livre tem apenas a capacidade de rotação em torno de um eixo vertical (Figura 16). A grande diferença deste tipo de rodas para as rodas *standard* direccionais é que o eixo vertical de rotação não contém o ponto de contacto entre a roda e a superfície de deslocação.

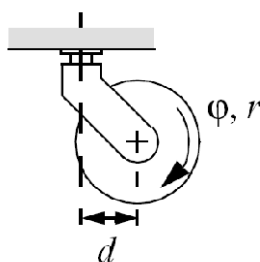


Figura 16 - Roda castor livre.

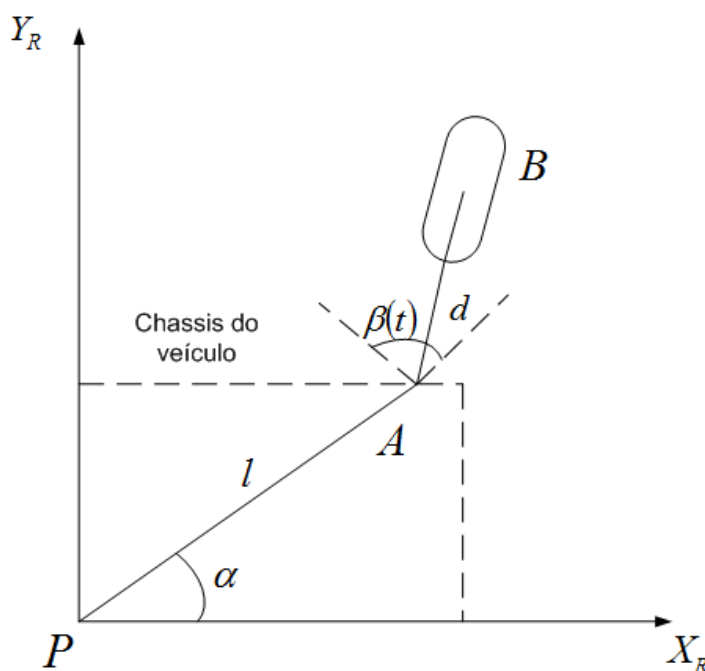


Figura 17 - Localização genérica de uma roda do tipo castor livre no veículo  $(X_R Y_R)$

O ponto de contacto entre a roda e a superfície de deslocação é o ponto  $B$ , que se encontra a uma distância fixa  $d$ , no referencial local, do ponto  $A$  (Figura 17).

Esta relação tem em conta que os pontos  $A$  e  $B$  se encontram no plano da roda em qualquer instante de tempo.

Estas rodas apresentam dois parâmetros que se alteram em função do tempo,  $\varphi(t)$  e  $\beta(t)$ . O primeiro caracteriza a rotação da roda em torno do seu eixo horizontal de rotação e o segundo representa o ângulo de rotação do vector  $AB$  em relação ao veículo.

De uma forma análoga à derivação das equações que resultam das restrições ao movimento imposto pelas rodas standard, resultam as equações:

$$[\sin(\alpha + \beta) \quad -\cos(\alpha + \beta) \quad (-l) \cos \beta]. \mathbf{R}(\theta) \dot{\xi}_I - r \dot{\varphi} = 0 \quad (2.6)$$

$$[\cos(\alpha + \beta) \quad \sin(\alpha + \beta) d \quad + l \sin \beta]. \mathbf{R}(\theta) \dot{\xi}_I + d \dot{\beta} = 0 \quad (2.7)$$

### 2.3.3 Restrições ao movimento do veículo

Para obter o modelo cinemático de um veículo consideram-se as restrições impostas pelas rodas que resultam num sistema de equações.

Estas condições podem ser expressas em duas equações matriciais:

- restrições ao rolamento

$$\mathbf{J}_1(\beta_s) \mathbf{R}(\theta) \dot{\xi}_I - \mathbf{J}_2 \dot{\varphi} = 0 \quad (2.8)$$

e restrições ao deslizamento

$$\mathbf{C}_1(\beta_s) \mathbf{R}(\theta) \dot{\xi}_I = 0 \quad (2.9)$$

em que:

$\mathbf{J}_1(\beta_s)$  – projecção das componentes de velocidade do veículo segundo as direcções de rolamento de cada roda (rodas fixas e rodas direccionais);

$\mathbf{C}_1(\beta_s)$  – projecção das componentes de velocidade do veículo segundo as direcções perpendiculares aos planos das rodas (rodas fixas e rodas direccionais);

$\mathbf{J}_2$  – matriz diagonal que contém o raio das rodas standard;

$\beta_s$  – ângulo de orientação da roda relativamente ao veículo.

Como se trata de um veículo diferencial, o castor livre não impõe restrições ao movimento, logo pode ser desprezado. Devido às rodas standard serem apenas motrizes e não terem a capacidade de orientação, pode simplificar-se  $\mathbf{J}_1(\beta_s)$  e  $\mathbf{C}_1(\beta_s)$ .

Utilizando a representação esquemática das Figuras 12 e 15 o eixo das rodas está alinhado com o eixo  $Y_R$ , definindo para roda direita (roda 2)  $\alpha_2 = -\pi/2$  e  $\beta_2 = \pi$ . Para a roda esquerda (roda 1)  $\alpha_1 = \pi/2$  e  $\beta_1 = 0$ , resultando as equações que permitem obter o modelo cinemático.

$$\mathbf{J}_1(\beta_s)\mathbf{R}(\theta)\dot{\xi}_I - \mathbf{J}_2\dot{\phi} = 0 \quad (2.10)$$

$$\begin{bmatrix} \sin(\alpha_1 + \beta_1) & -\cos(\alpha_1 + \beta_1) & -l_1 \cos(\beta_1) \\ \sin(\alpha_2 + \beta_2) & \cos(\alpha_2 + \beta_2) & -l_2 \cos(\beta_2) \end{bmatrix} \mathbf{R}(\theta)\dot{\xi}_I - \begin{bmatrix} r_1 & 0 \\ 0 & r_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{\phi}_1 \\ \dot{\phi}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (2.11)$$

$$\begin{bmatrix} 1 & 0 & -l \\ 1 & 0 & l \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{x}_R \\ \dot{y}_R \\ \dot{\theta}_R \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} r & 0 \\ 0 & r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{\phi}_1 \\ \dot{\phi}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (2.12)$$

$$\begin{cases} \dot{\phi}_1 = \frac{\dot{x}_R}{r} - \frac{l\dot{\theta}_R}{r} \\ \dot{\phi}_2 = \frac{\dot{x}_R}{r} + \frac{l\dot{\theta}_R}{r} \end{cases} \quad (2.13)$$

## 2.4 Conclusão

Neste capítulo obteve-se o modelo cinemático do veículo a partir de duas abordagens. A primeira usa uma abordagem geométrica para relacionar as velocidades linear e angular da plataforma com as velocidades das rodas. Na segunda caracteriza-se o comportamento das rodas relativamente às restrições que impõem ao movimento do veículo, de forma a poderem ser usadas para derivar o modelo cinemático.

Com base no modelo cinemático, no capítulo seguinte, apresentam-se as estratégias para implementação de várias trajectórias.



### **3 Implementação de trajectórias com base no modelo do veículo diferencial**

A capacidade de um veículo se movimentar no espaço de trabalho contornando obstáculos, fixos ou móveis, pode tirar partido da possibilidade de implementar diferentes trajectórias, isto é, definir caminhos e velocidades que lhe permitam deslocar-se entre diferentes pontos.

Para implementar diferentes trajectórias foram utilizadas duas estratégias baseadas em odometria. Inicialmente, optou-se por uma abordagem em dois movimentos distintos independentes: rotação e translação, para cada secção da trajectória. O comando dos movimentos é feito através do fornecimento dos valores dos ângulos de rotação que os motores têm de rodar.

No caso da rotação da plataforma são fornecidos aos motores valores de igual grandeza mas com sinais diferentes, o que provoca a rotação dos motores em sentidos opostos e, por consequência, a rotação da plataforma.

No caso do deslocamento linear do veículo, o valor fornecido é igual e com o mesmo sinal. O veículo desloca-se em linha recta.

As trajectórias obtidas apresentam vários inconvenientes, entre os quais:

- descontinuidade do movimento;
- tempos de execução das trajectórias longos.

Com o intuito de se melhorar a trajectória e eliminar a paragem do movimento no decorrer da reorientação da plataforma implementou-se uma segunda estratégia baseada em comandos de velocidade para as rodas.

A trajectória é gerada especificando a posição e velocidade desejadas, expressas no referencial absoluto, sendo usado o modelo cinemático do veículo para gerar as referências de velocidade para as rodas. Os movimentos de rotação e translação do veículo iniciam-se e terminam ao mesmo tempo e a trajectória é contínua.

No decorrer do trabalho, foram implementadas diversas trajectórias (parábola, linha recta e interpolação circular) com diversos perfis de velocidade (sinusoidal, triangular e trapezoidal) de forma a verificar qual a melhor estratégia de implementação.

De forma a diminuir o erro presente em ambas as estratégias, implementou-se um algoritmo de controlo para se aferir a posição em que o veículo se encontra e posteriormente corrigir possíveis erros.

### 3.1 Implementação de uma trajectória tendo por base dois movimentos distintos

A abordagem inicialmente utilizada no planeamento de trajectórias tem por base a divisão do movimento em duas fases. A primeira fase é a rotação da plataforma, no sentido de se orientar em relação ao ponto seguinte. A segunda fase consiste no deslocamento linear até ao referido ponto. A trajectória a percorrer é dividida em  $n$  pontos equidistantes segundo o eixo X no referencial global (Figura 18).



Figura 18 - Planeamento de uma trajectória em parábola seguindo o primeiro método.

Este tipo de aproximação à trajectória verificou-se não ser muito eficiente. Sendo notório que o tempo que o veículo demorava a percorrer a trajectória podia ser melhorado. Por outro lado, neste tipo de estratégia, o erro entre a trajectória aproximada e a trajectória pretendida pode ser melhorado, impondo um número de intervalos suficientemente elevado,

para que o ângulo e o deslocamento linear sejam incrementos pequenos. Na Figura 19 está representada a trajetória pretendida (a negro) e a trajetória aproximada (a vermelho). Como se pode verificar, no caso do número de intervalos ser reduzido, o erro entre as duas trajetórias é acentuado mas o ponto de destino final é igualmente alcançado.

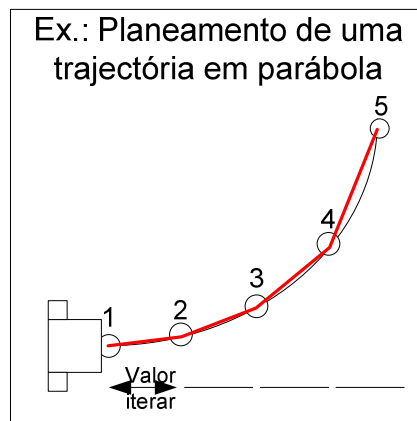


Figura 19 - Trajetória realizada pelo veículo móvel.

A implementação do movimento foi realizada de acordo com o fluxograma da Figura 20. Para o cálculo da trajetória é necessário fornecer os dados abaixo descritos:

- Diâmetro das rodas ( $D_1$ ,  $D_2$ );
- Distância entre eixos ( $2l$ );
- Número de pontos em que o movimento se divide ( $n$ );
- Configuração inicial do veículo ( $x_{\text{inicial}}$ ,  $y_{\text{inicial}}$ ,  $\theta_{\text{inicial}}$ );
- Configuração final do veículo ( $x_{\text{final}}$ ,  $y_{\text{final}}$ ,  $\theta_{\text{final}}$ ).

Para as outras trajetórias implementadas apenas se altera a função que define o percurso.

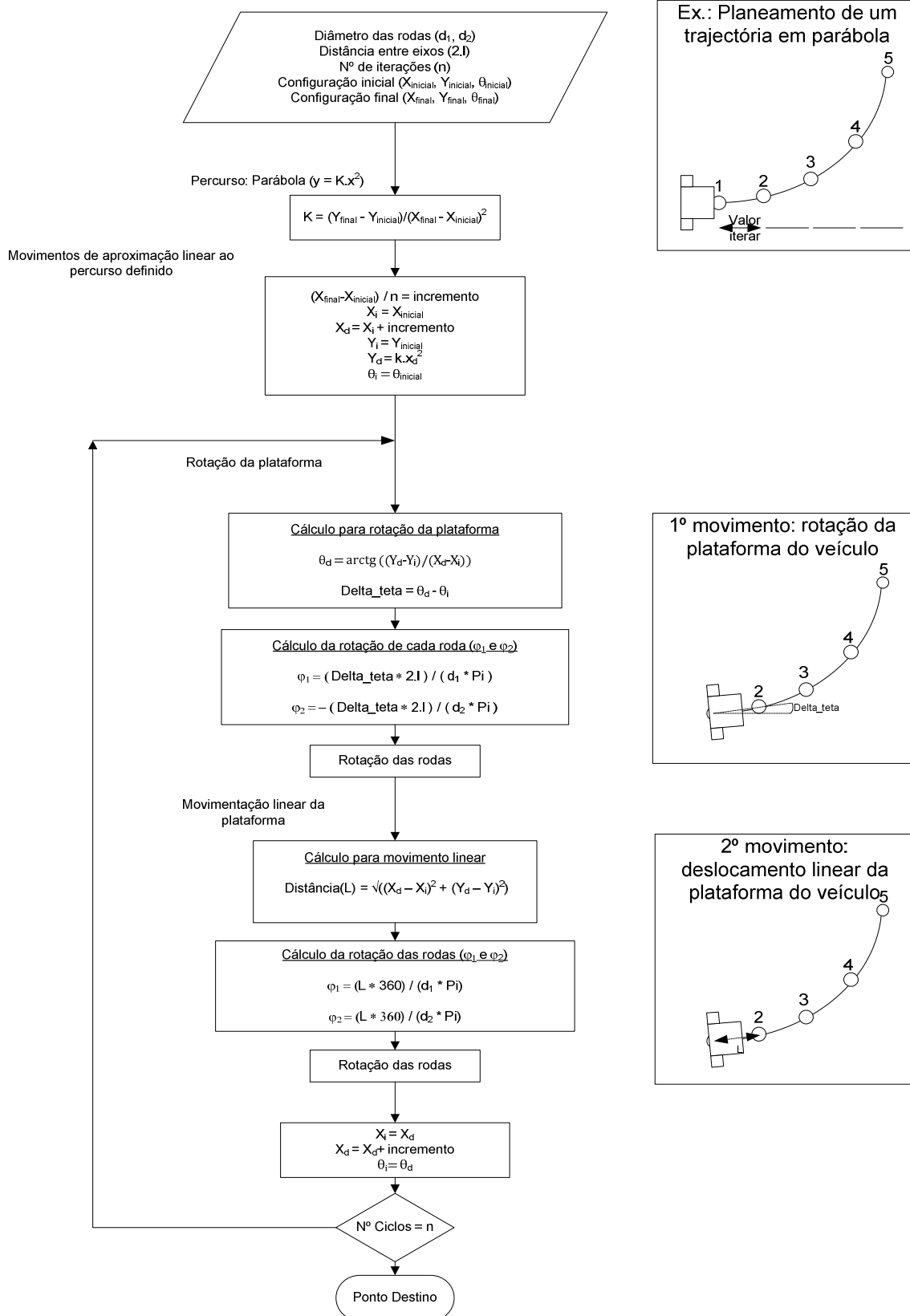


Figura 20 - Fluxograma do movimento do veículo para uma trajectória em parábola.

Inicialmente, é calculado o parâmetro  $k$  da parábola a realizar. A obtenção deste tem em conta a configuração inicial e final do veículo diferencial e é utilizado durante a totalidade da implementação do movimento.

Dividindo a trajectória nas várias secções pretendidas, é tido em conta que o ponto inicial dessa secção apresenta a configuração  $(x_i, y_i, \theta_i)$  e o ponto de destino da secção apresenta a configuração  $(x_d, y_d, \theta_d)$ , (Figura 21).

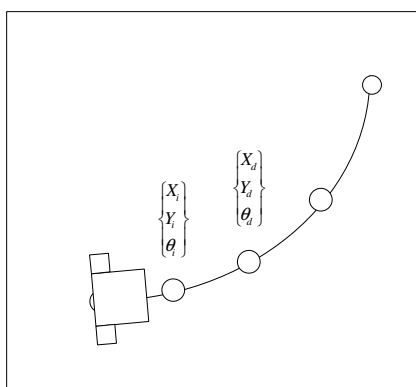


Figura 21 - Discretização do movimento da parábola.

O cálculo dos valores dos ângulos de rotação que cada roda recebe tem por base o modelo cinemático anteriormente descrito para um veículo diferencial.

A configuração final do veículo tem em conta o valor de  $\theta_{final}$  que é fornecido ao veículo para calcular a trajectória. Esta consideração tem implicações uma vez que o último movimento é uma da rotação da plataforma.

### 3.2 Implementação de uma trajectória com base em comandos de velocidade de rotação para as rodas

A implementação de uma trajectória com base numa especificação da velocidade das rodas permite definir movimentos para além dos movimentos de rotação em torno do ponto central do eixo das rodas e dos movimentos lineares simples.

A mudança de comando do veículo móvel, de comando em posição para comando em velocidade, tinha como principais objectivos a diminuição do tempo que o veículo demorava a cumprir o movimento e eliminar as descontinuidades durante o mesmo.

Este tipo de comando permite quaisquer trajectórias e, teoricamente, menores erros. As principais diferenças relativamente à estratégia anterior estão em não se basear numa aproximação por segmentos de recta ao percurso pretendido. Nesta segunda estratégia, impondo um perfil de velocidade e um tempo de execução ( $T$ ) é possível definir a trajectória pretendida, por uma aproximação apenas limitada pela capacidade (rapidez) de processamento do sistema ou seja do incremento de tempo/ ciclo ( $T_s$ ). Estes dois factores ( $T$  e  $T_s$ ) são utilizados para calcular a velocidade de rotação que cada roda deve cumprir, durante um determinado intervalo de tempo ( $T_s$ ), para deslocar o veículo do ponto inicial para o ponto seguinte, sucessivamente até ao ponto final.

Para a implementação deste tipo de comando é necessário fornecer ao veículo os seguintes dados:

- Diâmetro das rodas ( $D_1, D_2$ );
- Distância entre eixos ( $2l$ );
- Tempo do movimento ( $T$ );
- Tempo/incremento de ciclo ( $T_s$ );
- Configuração inicial do veículo ( $x_{inicial}, y_{inicial}, \theta_{inicial}$ );
- Configuração final do veículo ( $x_{final}, y_{final}, \theta_{final}$ );

Para se conseguir comparar os resultados obtidos pelas duas estratégias uma das trajectórias escolhidas foi uma parábola com um perfil de velocidade do tipo trapezoidal simétrico, Figura 22. Foi escolhido este perfil de velocidade devido a conter uma aceleração e desaceleração suaves, diminuindo a possibilidade de escorregamento das rodas.

O perfil de velocidade é dado pela equação:

$$\begin{cases} \frac{k_1 t^2}{T c_1}, & t \leq T c_1 \\ k_1, & T c_1 < t \leq T - T c_2 \\ \frac{k_1}{c_2 T (T-t)}, & t > T c_2 \end{cases} \quad (3.1)$$

sendo usados, entre outros, os seguintes parâmetros,

$$\begin{cases} c_1 = 1/3 \\ c_2 = 1/3 \\ k_1 = \frac{2}{T(2-c_1-c_2)} \end{cases} \quad (3.2)$$

em que,  $c_1 T$  é o tempo de aceleração e  $c_2 T$  é o tempo de desaceleração.

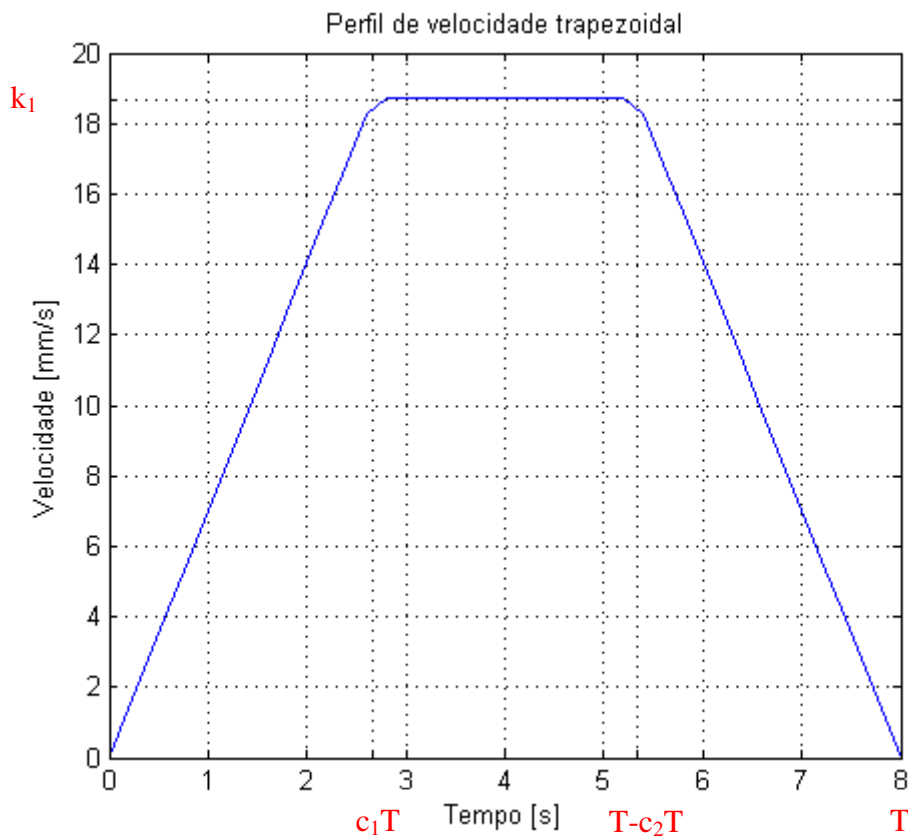


Figura 22 - Perfil de velocidade trapezoidal implementado.

Os fluxogramas das Figuras 23 e 24 descrevem a implementação da trajectória.

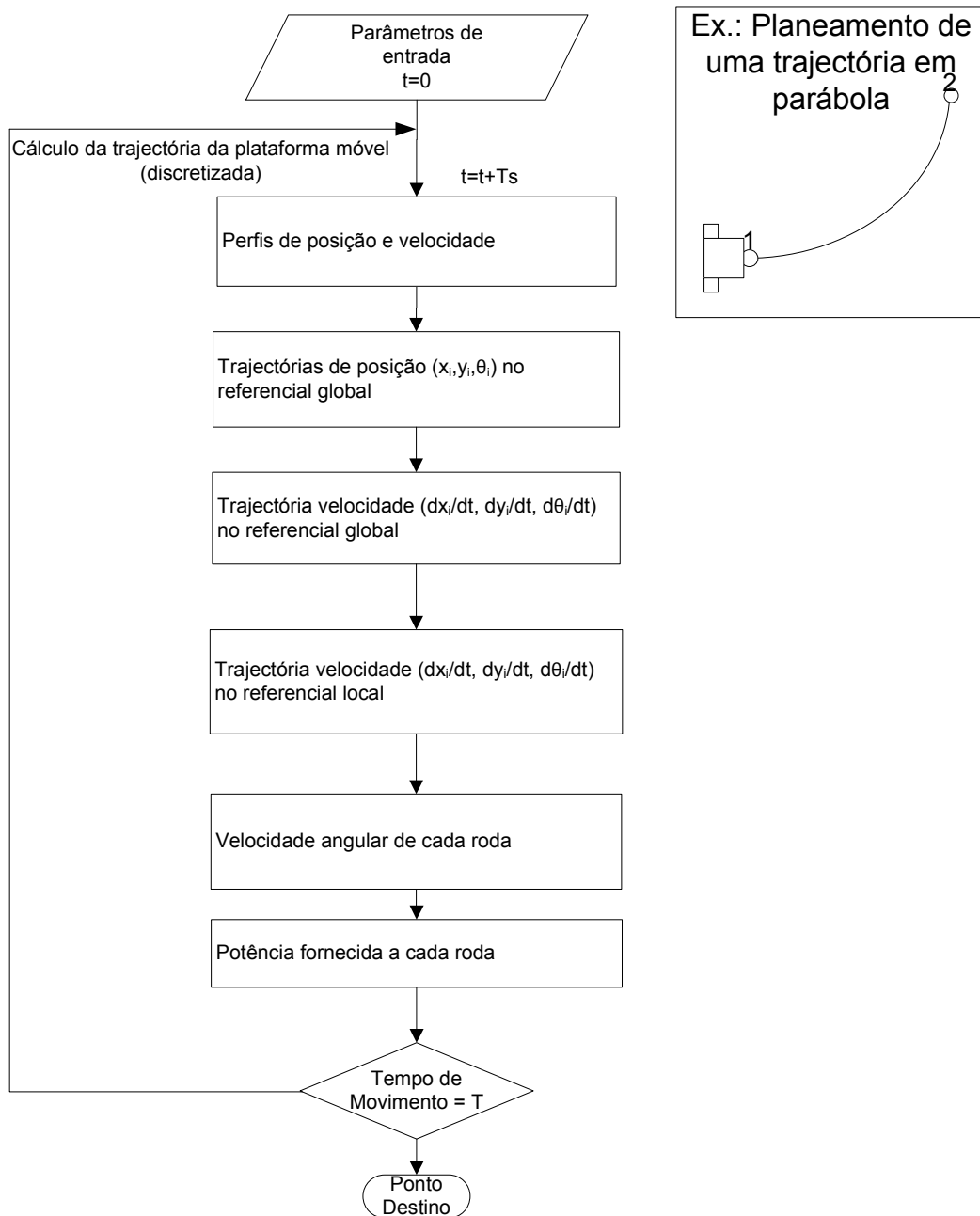


Figura 23 - Fluxograma de implementação da trajectória com comando em velocidade.

O bloco referente ao cálculo da potência para cada roda é necessário pois é o único parâmetro disponível para comandar a velocidade das rodas. Sendo necessário portanto converter o valor de velocidade para potência (descrita na secção 4.1).

Para além da trajectória parabólica com perfil de velocidade trapezoidal foram implementados outros perfis (sinusoidal e triangular) e trajectórias circulares e em linha recta. A implementação seguiu uma estratégia idêntica à das Figuras 23 e 24.

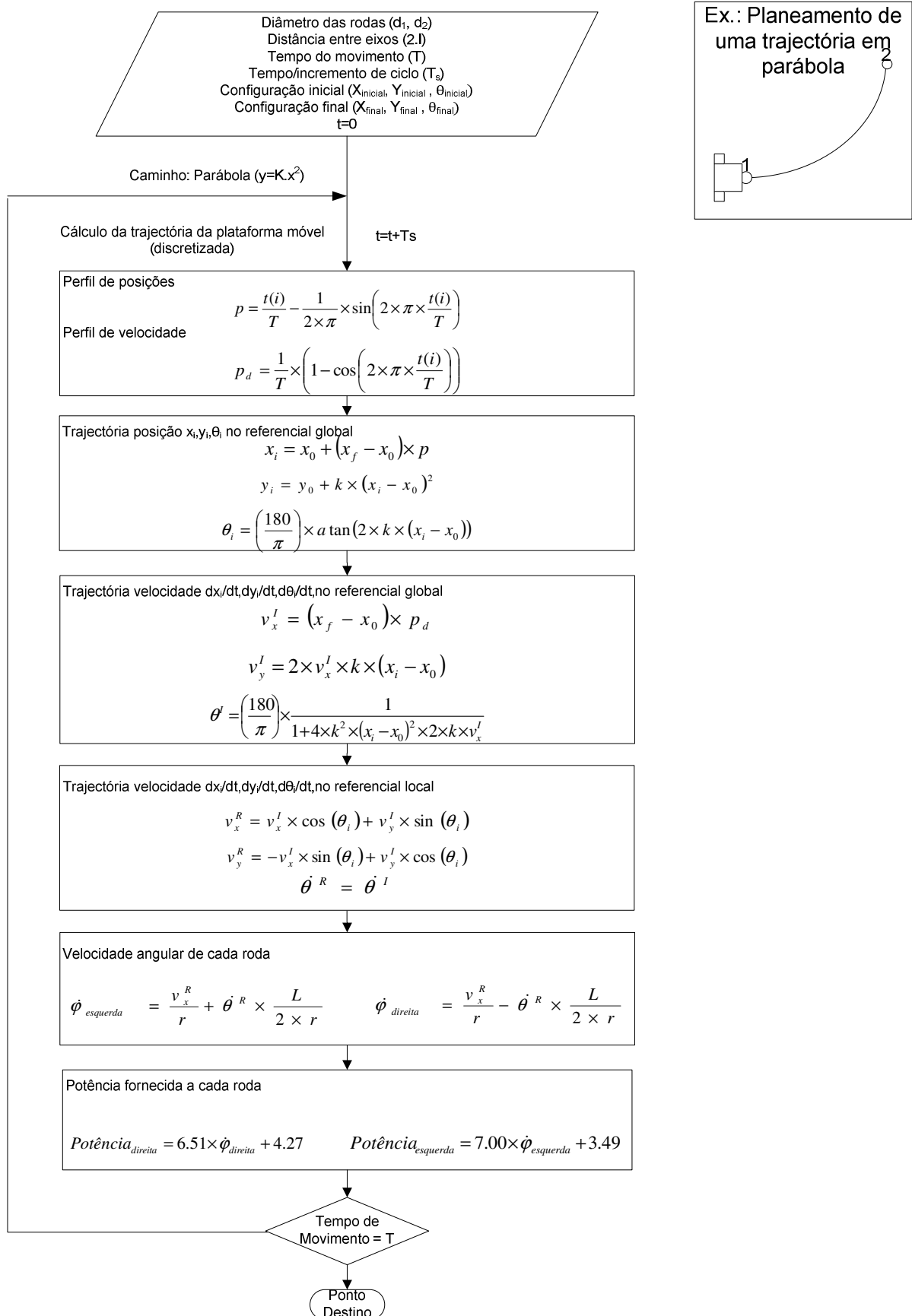


Figura 24 - Discretização do movimento da parábola, perfil de velocidade trapezoidal.

### 3.3 Localização e navegação do veículo

A implementação das trajectórias pressupõe a necessidade de conhecer em cada instante a localização do veículo. Numa primeira abordagem considerou-se um controlo em “malha aberta”, ou seja aceita-se que os movimentos são executados como pretendido, e portanto, a localização corresponde à obtida por leitura dos *encoders* das rodas (odometria). Posteriormente inclui-se a correcção da posição  $(x, y, \theta)$  através de sensores de distância (infravermelhos) e orientação (bússola digital).

O modelo usado para através de odometria calcular a posição e orientação do veículo, é representado pelas seguintes equações [1]:

$$\Delta x = \Delta s \cdot \cos\left(\theta + \frac{\Delta\theta}{2}\right) \quad (3.3)$$

$$\Delta y = \Delta s \cdot \sin\left(\theta + \frac{\Delta\theta}{2}\right) \quad (3.4)$$

$$\Delta\theta = \frac{\Delta s_r - \Delta s_l}{2l} \quad (3.5)$$

$$\Delta s = \frac{\Delta s_r + \Delta s_l}{2} \quad (3.6)$$

$(\Delta x; \Delta y; \Delta\theta)$  - variação da posição em relação ao intervalo de tempo anterior;

$\Delta s_r, \Delta s_l$  – distâncias percorridas pelas rodas direita e esquerda;

$2l$  - entre-eixo no caso de um veículo diferencial.

A posição e orientação ( $\mathbf{p}'$ ) podem ser calculadas através da seguinte equação, em que  $\mathbf{p}$  representa a posição anterior.

$$\mathbf{p}' = \begin{bmatrix} x' \\ y' \\ \theta' \end{bmatrix} = \mathbf{p} + \begin{bmatrix} \Delta s \cdot \cos\left(\theta + \frac{\Delta\theta}{2}\right) \\ \Delta s \cdot \sin\left(\theta + \frac{\Delta\theta}{2}\right) \\ \Delta\theta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x \\ y \\ \theta \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \Delta s \cdot \cos\left(\theta + \frac{\Delta\theta}{2}\right) \\ \Delta s \cdot \sin\left(\theta + \frac{\Delta\theta}{2}\right) \\ \Delta\theta \end{bmatrix} \quad (3.7)$$

Alguns resultados da utilização deste modelo são apresentados na secção 4.2.

### 3.4 Conclusões

As estratégias aqui descritas tiveram por base o modelo cinemático de um veículo diferencial. O objectivo da implementação de duas abordagens totalmente distintas permite aferir em qual delas se obtêm melhores resultados.

Apresentou-se também um modelo para estimar a posição do veículo através de odometria.

No capítulo seguinte (capítulo 4) é apresentado o sistema da Lego® Mindstorms® NXT que serviu de base à implementação destas estratégias e os testes efectuados.



## **4 Implementação e avaliação experimental**

Neste capítulo apresenta-se a materialização das estratégias de definição de trajectórias apresentadas no capítulo 3, tendo por base o sistema NXT – Mindstorms® da Lego®. Em primeiro lugar é feita uma descrição do sistema, na secção 4.1. De seguida, são apresentados os testes efectuados para cada uma das estratégias, apresentadas na Figura 25.

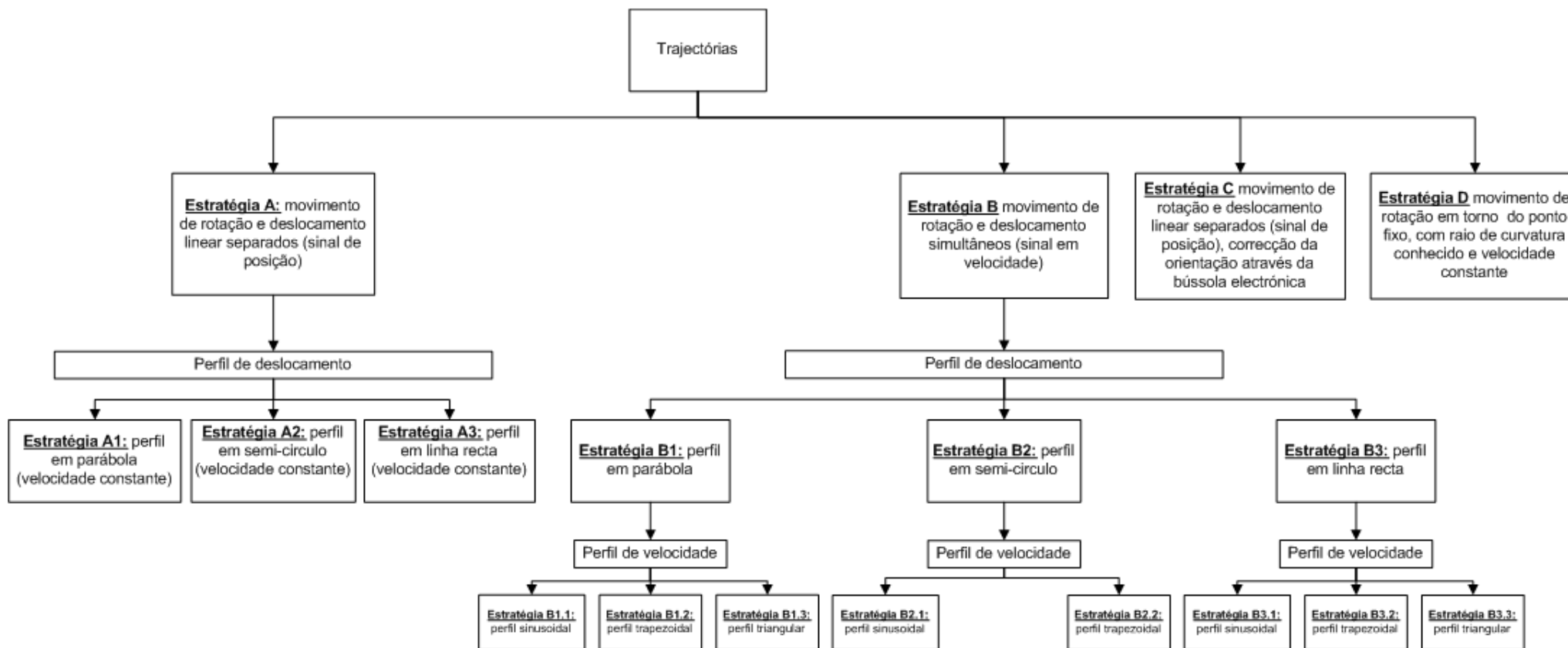


Figura 25 - Trajectórias e perfis de velocidade implementados.

## 4.1 Apresentação do sistema experimental

O veículo móvel utilizado foi o sistema da LEGO® Mindstorms® NXT numa montagem diferencial (Figura 26). A análise do mesmo pode ser efectuada dividindo-o em duas partes, no *software* e no *hardware*. A nível de *hardware*, o sistema é constituído por um controlador baseado num processador de 32 bits AMR7. A sua capacidade de memória é de 256 kb e a comunicação pode ser realizada de duas maneiras: através de uma porta USB 2.0 ou por um sistema de comunicação sem fios (“*Bluetooth*”).

Este controlador possui quatro portas de entrada que podem ser usadas para ligar os diversos sensores (ex. sensores de luz, distância (ultrasons, infravermelho), posição, som, aceleração ou orientação) e três portas de saída para ligar os motores. Os motores utilizados são servomotores DC com um *encoder* óptico incorporado. A resolução do *encoder* é de um grau.



Figura 26 - Veículos e sensores utilizados na implementação das trajectórias.

A nível de *software*, o controlador pode ser programado através da linguagem gráfica, fornecida pelo fabricante do sistema.

O ambiente de programação pode ser visualizado nas Figuras 27 e 28. A linguagem gráfica NXT foi desenvolvida com base em Labview o que permite desenvolver novos “blocos” directamente nesta linguagem.

As estratégias descritas no capítulo 3 foram simuladas e testadas em *Matlab*® e posteriormente implementadas no veículo móvel NXT. A implementação das estratégias em *Matlab*® permite validar os programas desenvolvidos para o NXT.

As restrições impostas pela linguagem de programação NXT obrigaram a adaptar os algoritmos desenvolvidos para implementar as trajectórias (Figuras 20 e 24), de forma a contornar entre outras, as seguintes limitações:

- resolução do cálculo igual a 0.01;
- implementação particular das funções sinusoidais;
- baixa capacidade de processamento, impondo  $T_{\text{ciclo}} \geq 200\text{ms}$  nos programas implementados.

O fluxograma da Figura 29 representa a versão de implementação em NXT do algoritmo representado no fluxograma da Figura 24.

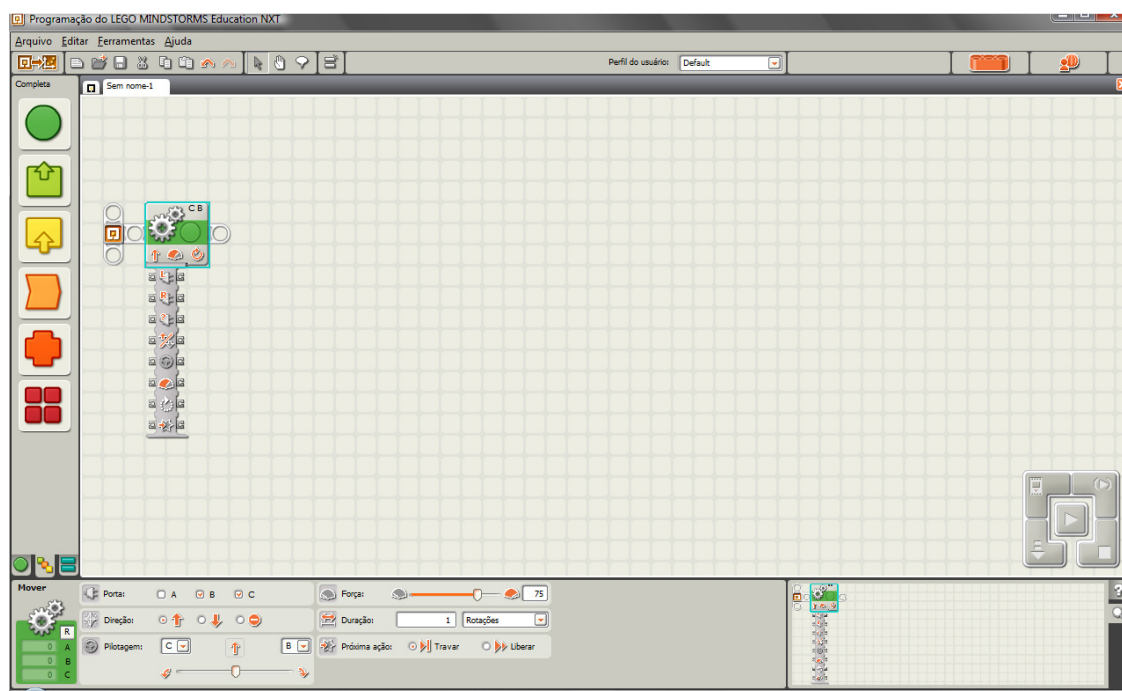


Figura 27 - Ambiente de programação do veículo Lego®. Bloco do motor.

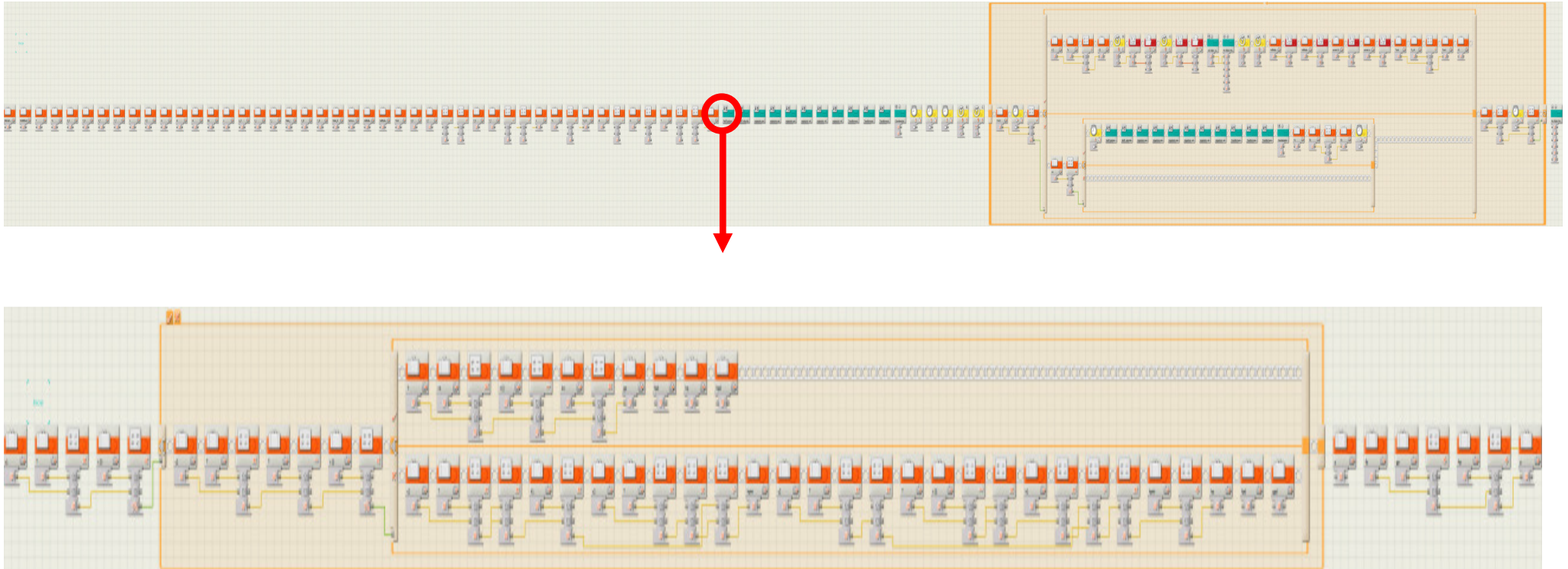


Figura 28 - Programa desenvolvido para programação do Lego® NXT, programa da parábola com perfil trapezoidal.

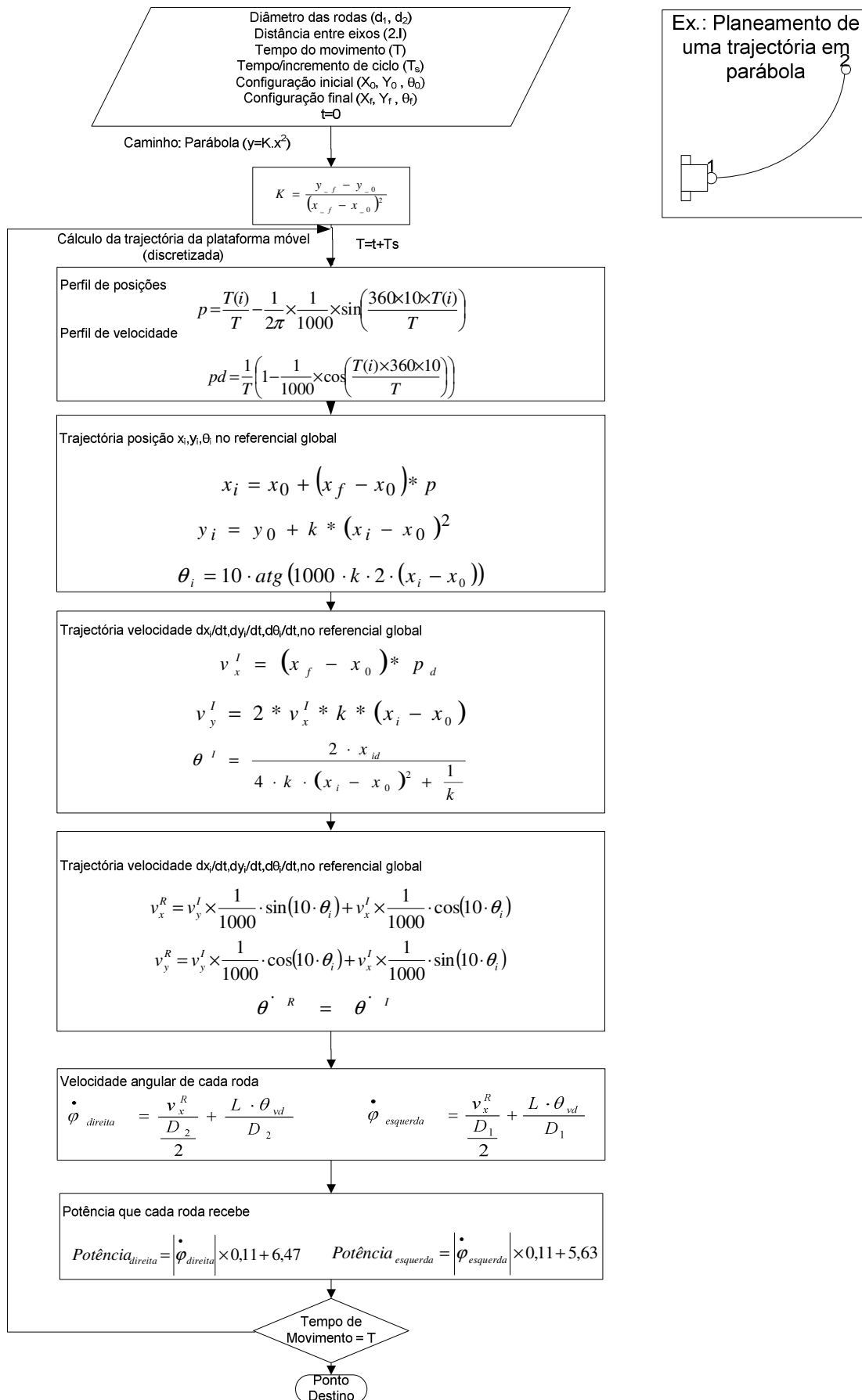


Figura 29 - Fluxograma do programa a implementar no veículo móvel da Lego® Mindstorms® NXT.

## 4.2 Experiências e testes

Tendo em conta as necessidades de comando dos motores em velocidade para algumas das estratégias e a impossibilidade de atribuir directamente referências de velocidade aos motores foi necessária a obtenção das características (potência vs velocidade).

Estas características foram obtidas executando uma série de testes, em diferentes condições: motores sem carga, motores com carga e o mesmo sentido de rotação, motores com carga mas com sentido de rotação oposto e rotação de um motor de cada vez.

O primeiro teste foi realizado com os motores sem carga, numa gama dos 10% até aos 100% e uma tensão da bateria de 8,3V. Foram realizados testes abaixo de 10% de *power* mas nem sempre é certo que o motor possa rodar nestas condições.

Nas Figuras 30 e 31 apresentam-se os resultados para o motor esquerdo (C) e motor direito (B), respectivamente.

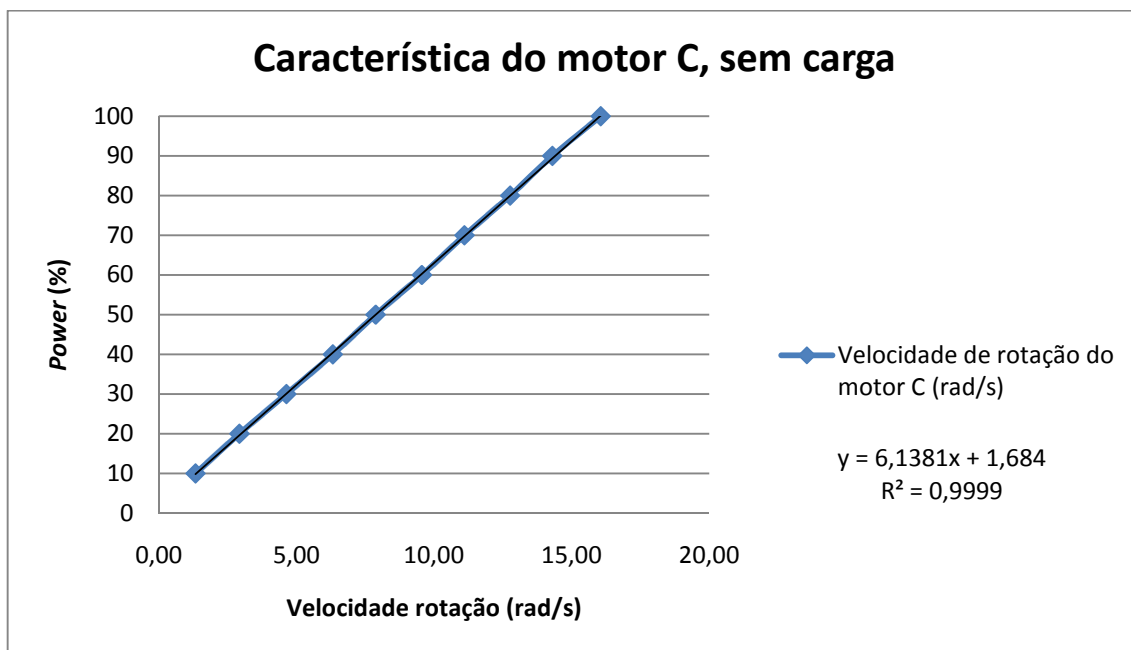


Figura 30 - Característica do motor C, sem carga.

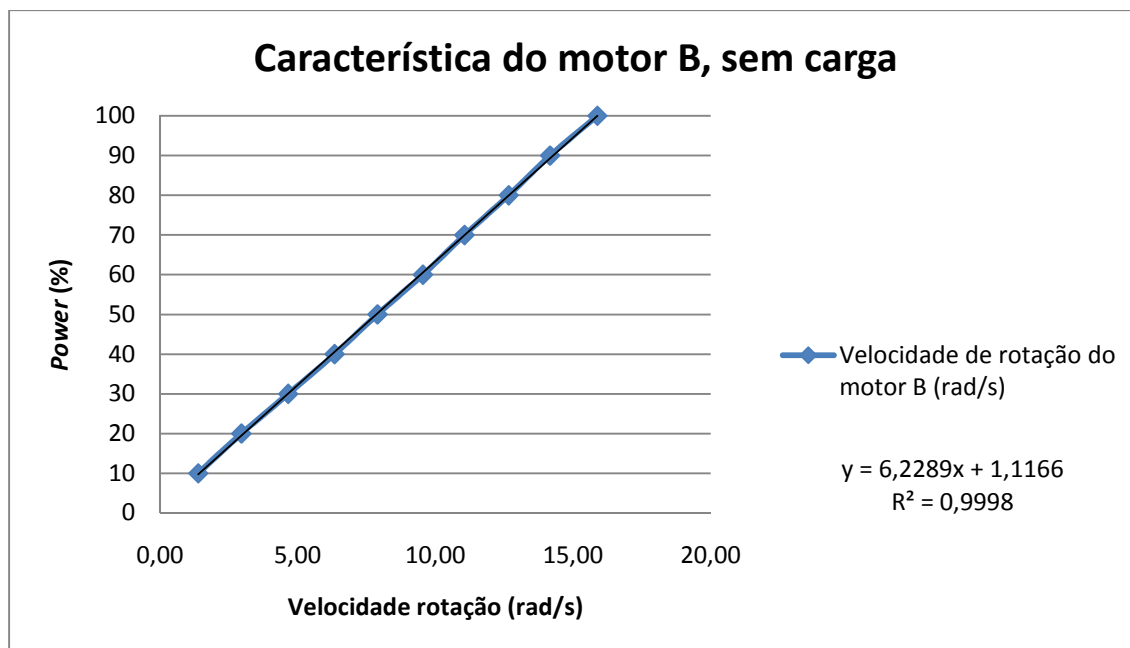


Figura 31 - Característica do motor B, sem carga.

O segundo teste que foi realizado teve em conta o veículo em carga, sobre a superfície onde posteriormente se iriam realizar as trajectórias e a bateria com uma tensão de 8,2 Volt. O sentido de rotação dos dois motores foi o mesmo e numa gama de *power* dos 10% até aos 100% (Figuras 34 e 35).

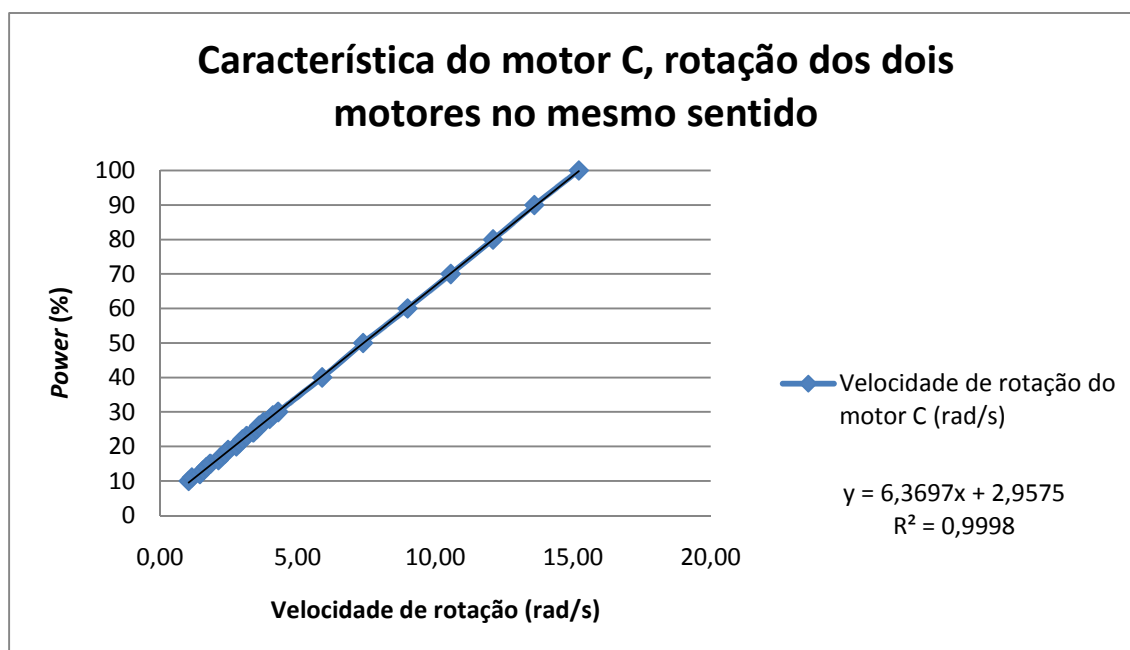


Figura 32 - Característica do motor C, em carga e sentido de rotação igual nos dois motores.

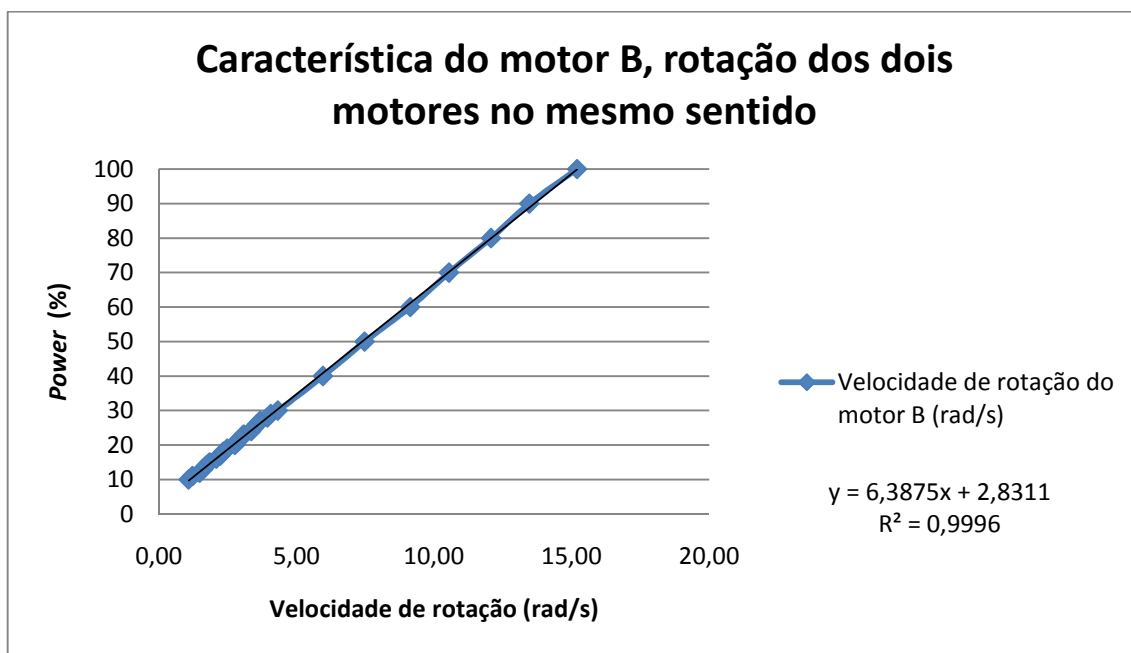


Figura 33 - Característica do motor B, em carga e sentido de rotação igual nos dois motores.

O teste seguinte tinha em conta a rotação apenas de uma roda, a outra permanecia parada, obrigando o veículo a rodar em torno do ponto de contacto desta com a superfície de trabalho. A bateria estava com 8V e a gama de *power* inicia em 10% até aos 100% (Figuras 34 e 35).

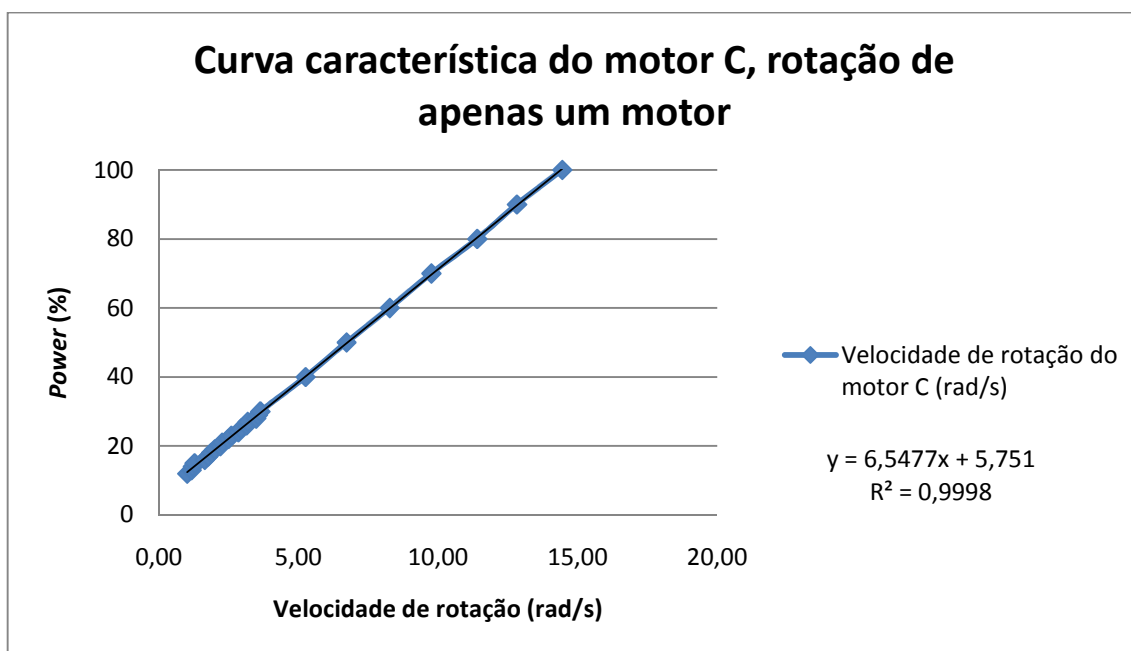


Figura 34 - Característica do motor C, em carga e rotação de apenas um motor.

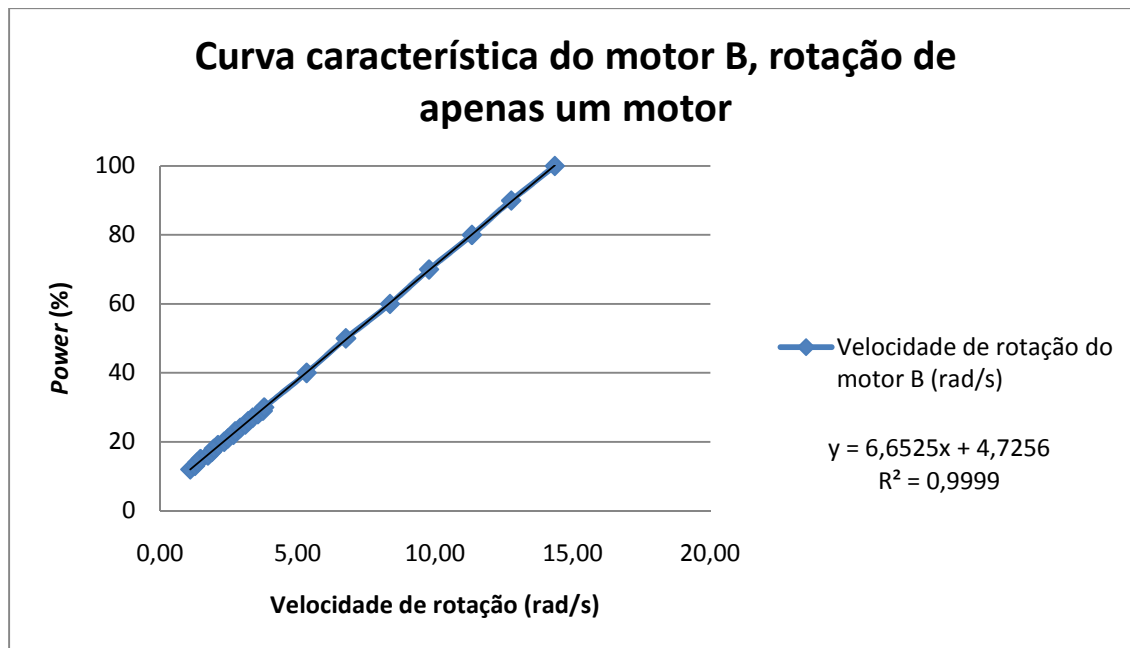


Figura 35 - Característica do motor B, em carga e rotação de apenas um motor.

Por último, foram colocados os motores com igual velocidade de rotação mas sentidos opostos. A tensão da bateria era de 8V. Gama de *power* vai igualmente dos 10% aos 100%.

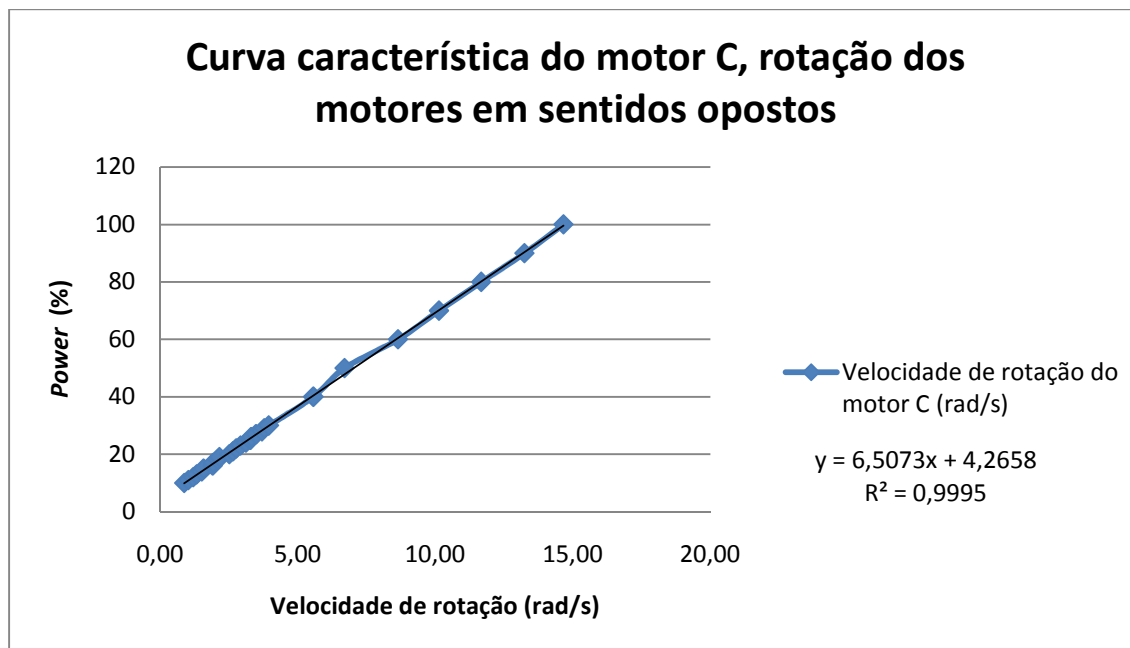


Figura 36 - Característica do motor C, em carga e rotação dos motores em sentidos opostos.

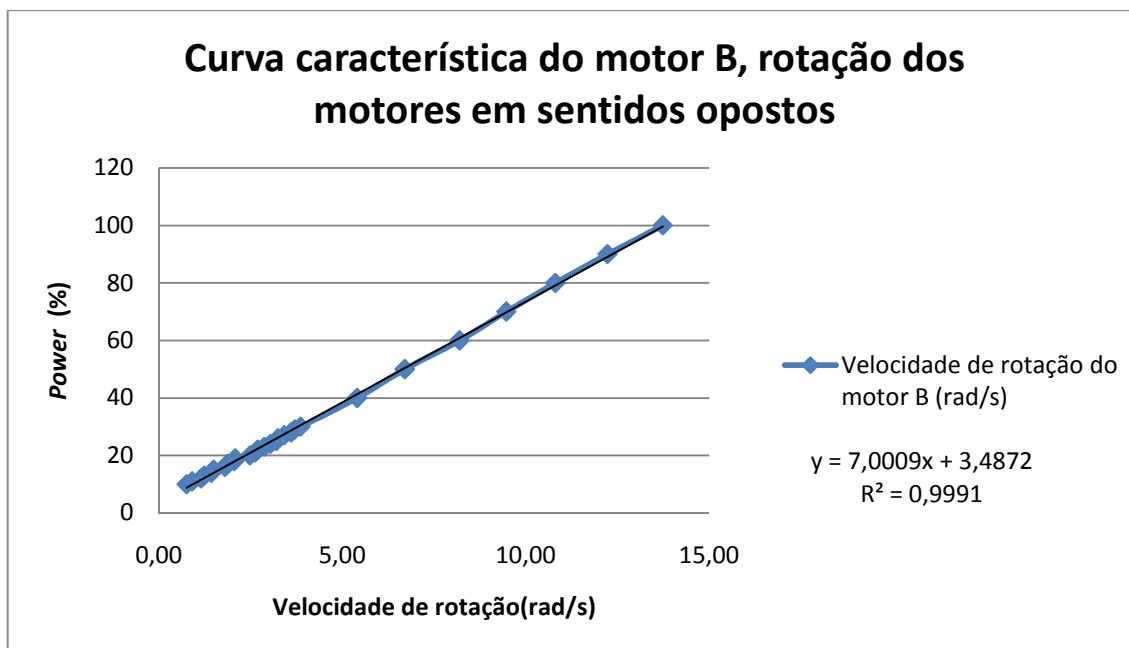


Figura 37 - Característica do motor B, em carga e rotacão dos motores em sentidos opostos.

Todos os testes foram realizados com o mesmo veículo, com a mesma bateria e na mesma superfície. Desta forma, tentou minimizar-se a influência das variáveis externas que poderiam influenciar os resultados.

Para a implementação das trajectórias foram tidas em conta as piores condições que o veículo poderia encontrar. Para tal utilizaram-se as curvas características dos motores para a rotacão de apenas uma roda durante o movimento.

#### 4.2.1 Implementação de trajectórias

Os testes realizados correspondem à esquematização, apresentada na Figura 25, das várias estratégias e perfis (posição e velocidade) implementados.

Tendo em conta as limitações dos meios utilizados para medir a posição e orientação do veículo, admite-se um erro de  $\pm 5\text{mm}$  (posição) e  $\pm 2$  graus (orientação) nos valores medidos, apresentados para as várias estratégias.

### **Estratégia A – Movimento de rotação e deslocamento linear independentes, sinal em posição**

As primeiras trajectórias a serem implementadas foram baseadas na estratégia A. Esta estratégia consiste na divisão da trajectória em duas fases distintas: rotação da plataforma na direcção correcta, seguida de deslocamento linear da mesma. Para tal, o percurso pretendido foi dividido num número de intervalos (número de iterações), e obtidos os diversos pontos ao longo da trajectória a executar.

O objectivo deste tipo de deslocamento era ir do ponto inicial até aos pontos de destino (casos 1 e 2) com uma determinada orientação da plataforma do veículo, para tal, foram usados os seguintes dados (Tabela 2).

**Tabela 2 – Valores utilizados na implementação das estratégias A1, A2 e A3.**

Nº de iterações [n]	5	
Diâmetro das rodas ( $d_1$ , $d_2$ ) [mm]	56	
Distância entre-eixos ( $2l$ ) [mm]	114	
	Caso 1	Caso 2
Posição inicial ( $X_0$ ) [mm]	0	0
Posição inicial ( $Y_0$ ) [mm]	0	0
Orientação inicial ( $\theta_0$ ) [graus]	0	0
Posição final ( $X_f$ ) [mm]	200	100
Posição final ( $Y_f$ ) [mm]	800	400
Orientação final ( $\theta_f$ ) [graus]	---	---

### **Estratégia A1 – Perfil de deslocamento em parábola**

O primeiro perfil de posições implementado foi o correspondente à estratégia A1, deslocamento em parábola com velocidade constante. Na Tabela 3 estão descritos dois testes para cada ponto escolhido. A orientação final do veículo coincide com a do movimento linear.

Foram ainda implementados mais dois perfis de deslocamento, um em semicírculo (estratégia A2 – Tabela 4) e um perfil em linha recta (estratégia A3 – Tabela 5), todos eles com velocidade constante.

**Tabela 3 - Resultados da implementação da trajectória com deslocamento em parábola.**

	Caso 1		Caso 2	
	Teste 1	Teste 2	Teste 1	Teste 2
Posição inicial (X <sub>0</sub> ) [mm]	0	0	0	0
Posição inicial (Y <sub>0</sub> ) [mm]	0	0	0	0
Orientação inicial ( $\theta_0$ ) [graus]	0°	0°	0°	0°
Posição final (X <sub>f</sub> ) [mm]	250	170	120	100
Posição final (Y <sub>f</sub> ) [mm]	780	790	380	390
Orientação final ( $\theta_f$ ) [graus]	80°	85°	82°	82°

### **Estratégia A2 – Perfil de deslocamento em semicírculo**

Alterando o perfil de deslocamento para um semicírculo mas mantendo os pontos finais da trajectória (0; 800) e (0; 400), os resultados são apresentados na Tabela 4.

**Tabela 4 - Resultados da implementação da trajectória com deslocamento em semicírculo.**

	Caso 1		Caso 2	
	Teste 1	Teste 2	Teste 1	Teste 2
Posição inicial (X <sub>0</sub> ) [mm]	0	0	0	0
Posição inicial (Y <sub>0</sub> ) [mm]	0	0	0	0
Orientação inicial ( $\theta_0$ ) [graus]	0°	0°	0°	0°
Posição final (X <sub>f</sub> ) [mm]	50	60	30	25
Posição final (Y <sub>f</sub> ) [mm]	920	910	450	460
Orientação final ( $\theta_f$ ) [graus]	60°	60°	50°	55°

### **Estratégia A3 – Perfil de deslocamento em linha recta**

Com um perfil de deslocamento em linha recta, era de esperar que os resultados obtidos fossem melhores, uma vez que não há acumulação de erros nos cálculos e nos movimentos. Os resultados obtidos são apresentados na Tabela 5.

**Tabela 5 - Resultados da implementação da trajectória com deslocamento em linha recta.**

	Caso 1		Caso 2	
Posição inicial (X <sub>0</sub> ) [mm]	0	0	0	0
Posição inicial (Y <sub>0</sub> ) [mm]	0	0	0	0
Orientação inicial ( $\theta_0$ ) [graus]	0°	0°	0°	0°
Posição final (X <sub>f</sub> ) [mm]	150	140	90	95
Posição final (Y <sub>f</sub> ) [mm]	800	800	400	400
Orientação final ( $\theta_f$ ) [graus]	15°	15°	12°	12°

Como era esperado, os resultados foram melhorados em relação às duas estratégias anteriores (A1 e A2).

### **Estratégia B – Movimento de rotação e deslocamento da plataforma simultaneamente, sinal em velocidade**

A estratégia B foi implementada com três perfis de deslocamento. O objectivo era saber se a mudança do tipo de perfis de deslocamento poderia, ou não, afectar o erro de posicionamento e em que grandeza. Cada perfil de deslocamento era implementado, novamente, com três perfis de velocidade distintos. O objectivo da implementação de um perfil de velocidade é conseguir impor a aceleração e desaceleração da plataforma do veículo, uma vez que, um dos grandes factores de erro na movimentação e posicionamento está nestas duas fases do movimento.

#### **Estratégia B1 – Perfil de deslocamento em parábola**

Para as estratégias B1.1, B1.2 e B1.3 foram implementados perfis de velocidade sinusoidal, trapezoidal e triangular.

Na Tabela 6 estão definidos os valores dos parâmetros para as três trajectórias definidas anteriormente.

**Tabela 6 - Variáveis de entrada para as trajectórias.**

Tempo de ciclo [s]	8	
Tempo iteração [s]	0,2	
	Caso 1	Caso 2
Posição inicial (X <sub>0</sub> ) [mm]	0	0
Posição inicial (Y <sub>0</sub> ) [mm]	0	0
Orientação inicial ( $\theta_0$ ) [graus]	0°	0°
Posição final (X <sub>f</sub> ) [mm]	100	300
Posição final (Y <sub>f</sub> ) [mm]	1000	800
Orientação final ( $\theta_f$ ) [graus]	---	---

### **Estratégia B1.1 – Perfil de velocidade sinusoidal**

A estratégia B1.1 utiliza um perfil de velocidade sinusoidal, apresentado na Figura 38. Este tipo de perfil tem a vantagem de acelerar e desacelerar de uma forma suave mas tem como principal inconveniente não serem as duas independentes. A Tabela 7 apresenta os resultados da implementação dessa trajectória.

**Tabela 7 - Valores medidos da implementação da trajectória pelo NXT, perfil de velocidade sinusoidal.**

	Caso 1	Caso 2
Posição inicial (X <sub>0</sub> ) [mm]	0	0
Posição inicial (Y <sub>0</sub> ) [mm]	0	0
Orientação inicial ( $\theta_0$ ) [graus]	0°	0°
Posição final (X <sub>f</sub> ) [mm]	48	350
Posição final (Y <sub>f</sub> ) [mm]	960	840
Orientação final ( $\theta_f$ ) [graus]	60°	75°

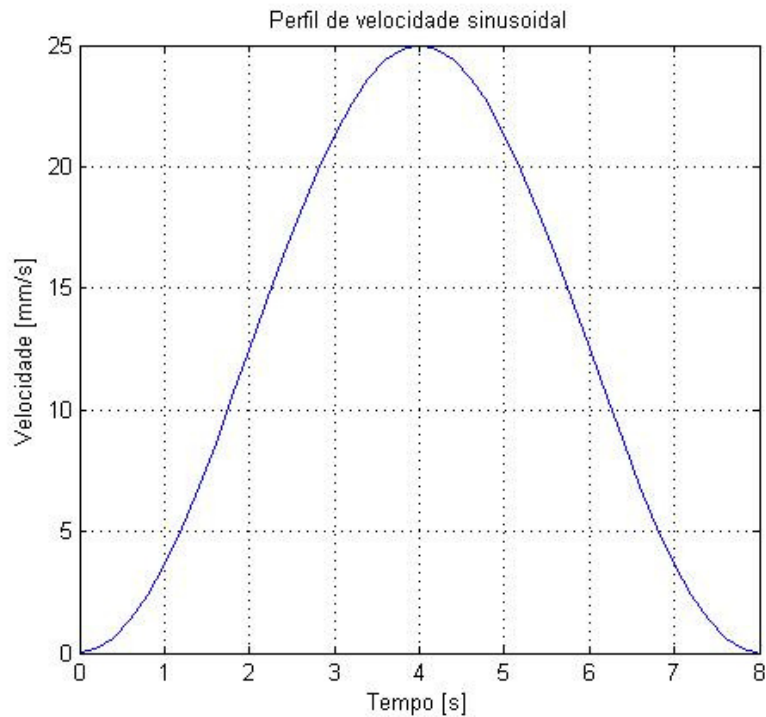


Figura 38 – Perfil de velocidade sinusoidal para o perfil de deslocamento em parábola.

A evolução das trajetórias resultantes dos cálculos efectuados em *Matlab*® e no programa implementado no controlador do robô (NXT) do referencial global estão representadas nas Figuras 39 a 42 respectivamente, validando a implementação efectuada. As diferenças observadas resultam das limitações de cálculo do controlador NXT (ex. resolução = 0.01).

### Caso 1

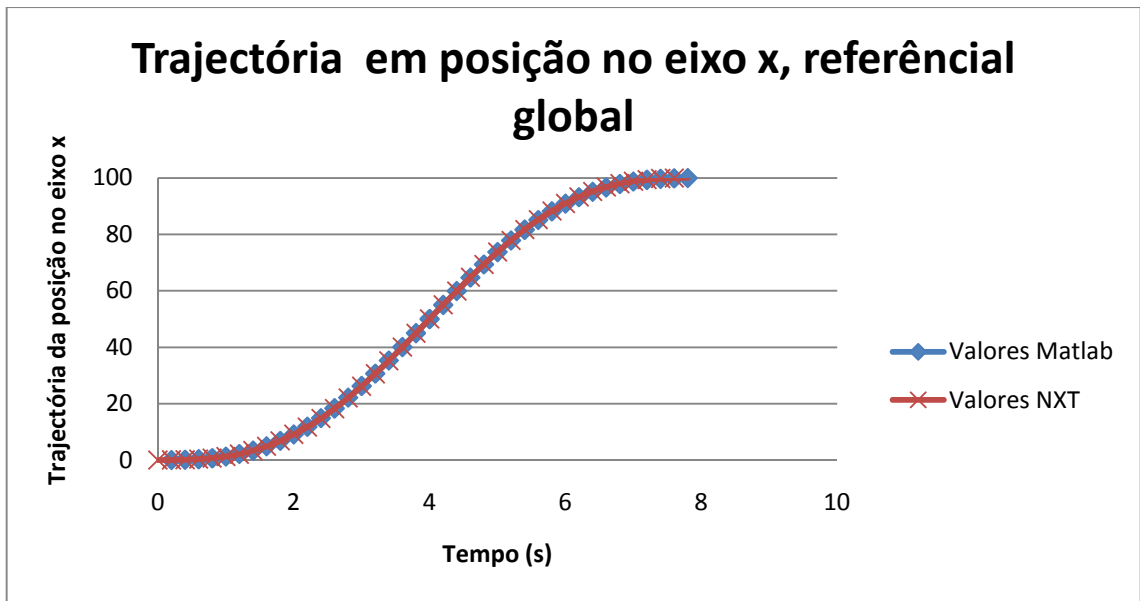


Figura 39 – Evolução da trajectória do veículo em posição, no eixo x do referencial global (caso 1).

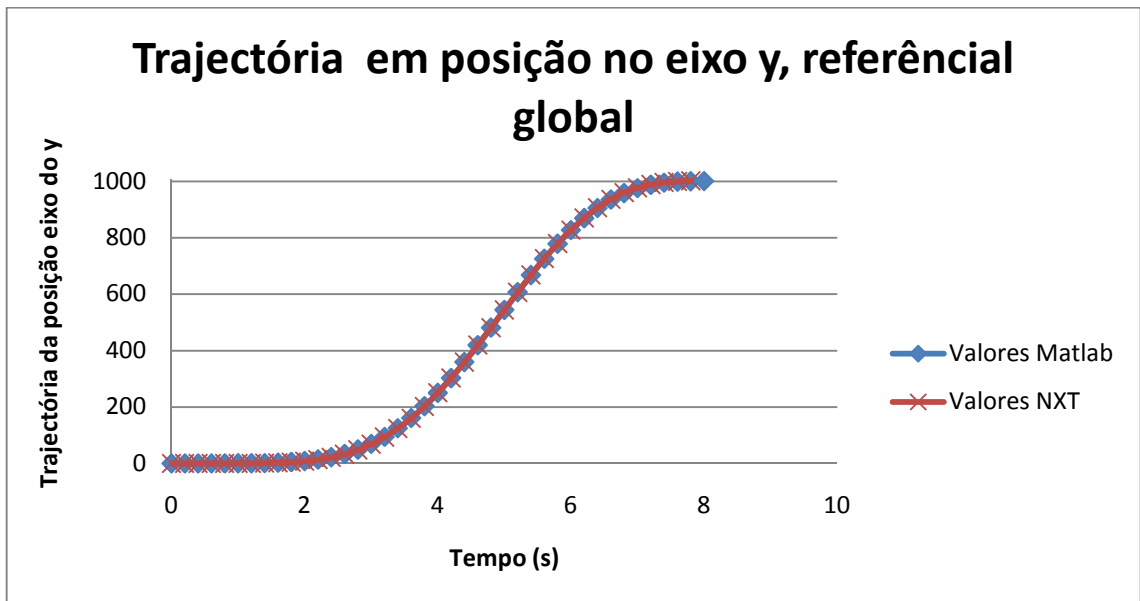


Figura 40 - Evolução da trajectória do veículo em posição, no eixo y do referencial global (caso 1).

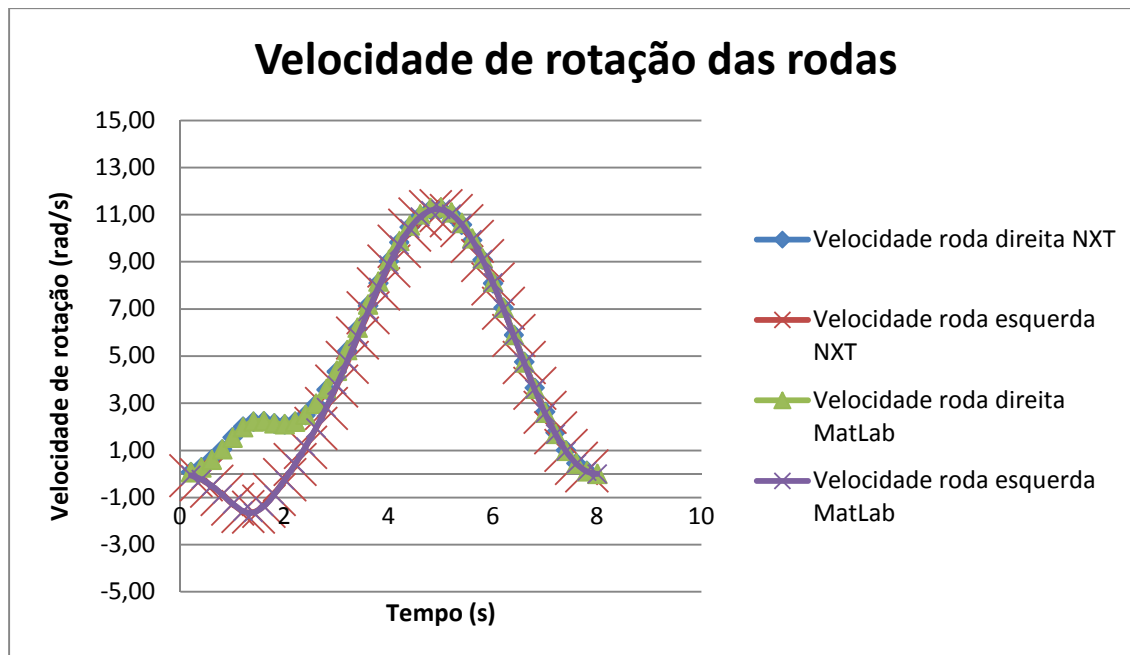


Figura 41 – Valores de velocidade de rotação das rodas calculados pelo NXT e *Matlab*®.

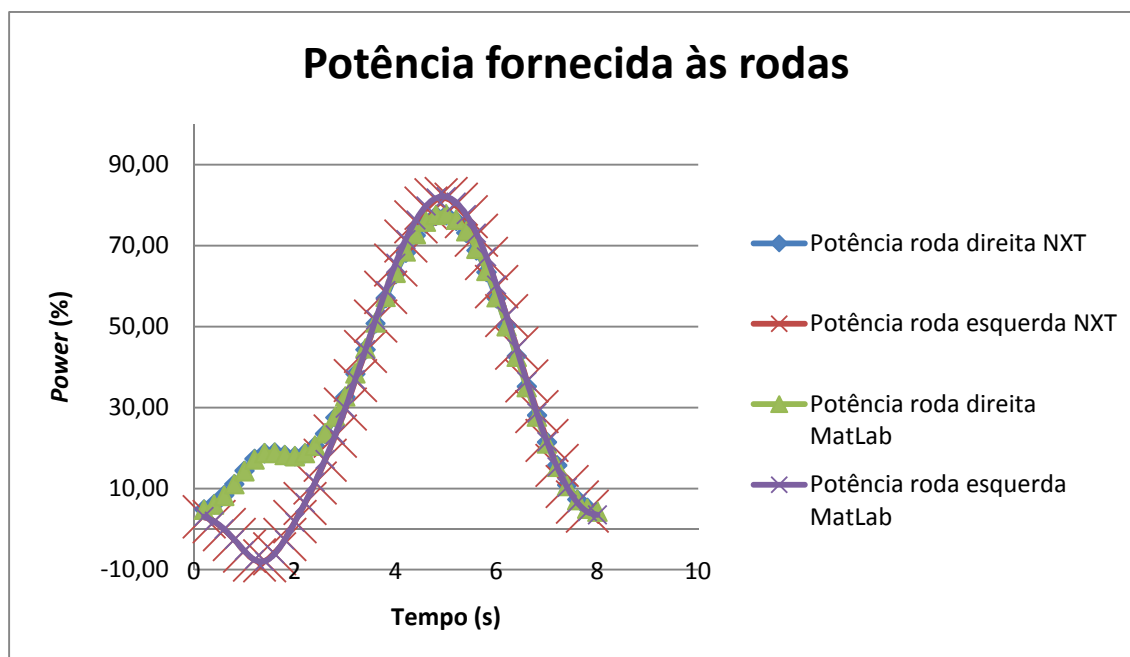


Figura 42 - Valores de *power* para cada roda, calculados pelo NXT e *Matlab*®.

Através da leitura dos *encoders* e utilizando odometria, é possível refazer a trajetória que o veículo móvel percorreu ao longo do tempo (Figura 43).

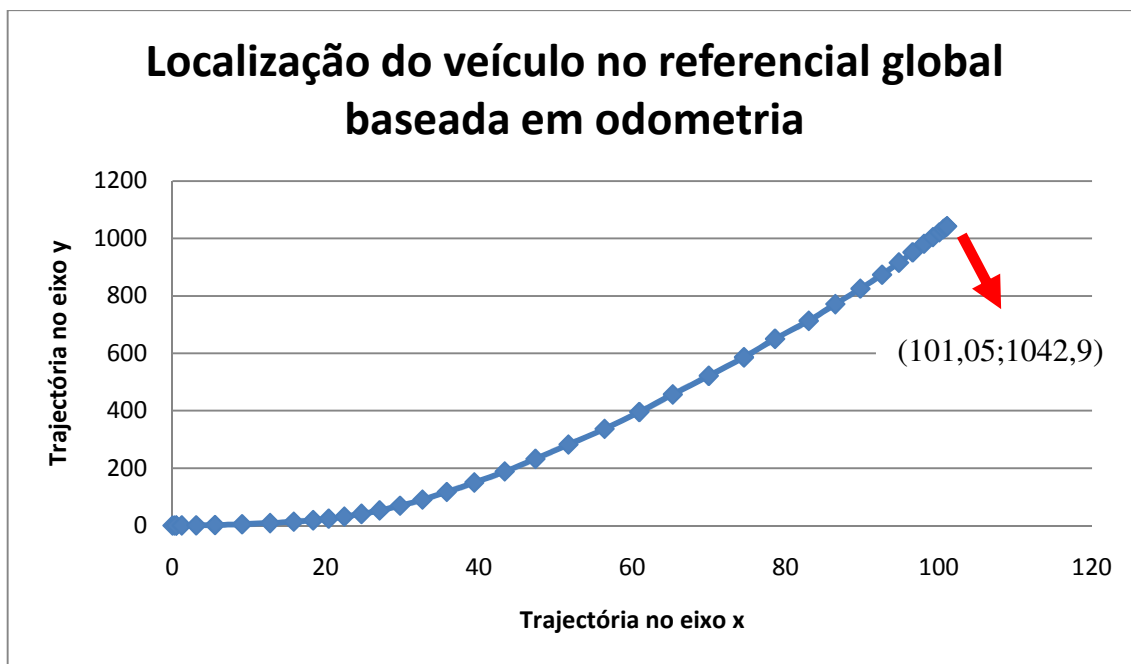


Figura 43 - Localização do veículo com auxílio de odometria.

Pode verificar-se, através da Figura 43 e dos valores apresentados na Tabela 7, que a posição final do veículo, medida directamente na implementação laboratorial (48; 960) e a obtida através da leitura e discretização do movimento através dos *encoders* (101,05; 1042,9), usando o modelo apresentado na secção 4.3, apresentam diferenças significativas.

Para essas diferenças podem contribuir os erros associados à resolução dos *encoders*, que em odometria são cumulativos, bem como o erro associado às medições directas atrás referidos.

### **Estratégia B1.2 – Perfil de velocidade trapezoidal**

Na estratégia B1.2 modifica-se o perfil de velocidade anterior para um perfil de velocidade trapezoidal (Figura 44). A alteração permite impor, com maior eficiência, a aceleração, velocidade máxima e a desaceleração do veículo mas mantendo a vantagem de estas poderem ser suaves. Os resultados obtidos são apresentados na Tabela 8.

**Tabela 8 - Valores medidos da implementação da trajectória pelo NXT, perfil de velocidade trapezoidal.**

	Caso 1	Caso 2
Posição inicial (X <sub>0</sub> ) [mm]	0	0
Posição inicial (Y <sub>0</sub> ) [mm]	0	0
Orientação inicial ( $\theta_0$ ) [graus]	0°	0°
Posição final (X <sub>f</sub> ) [mm]	45	270
Posição final (Y <sub>f</sub> ) [mm]	920	800
Orientação final ( $\theta_f$ ) [graus]	70°	85°

O perfil de velocidade obtido em *Matlab*® (Figura 44), neste caso, com um tempo de aceleração e desaceleração iguais.

Tal como para o caso anterior do perfil de velocidade sinusoidal a validação da implementação efectuada pode verificar-se nas Figuras 45 a 48.

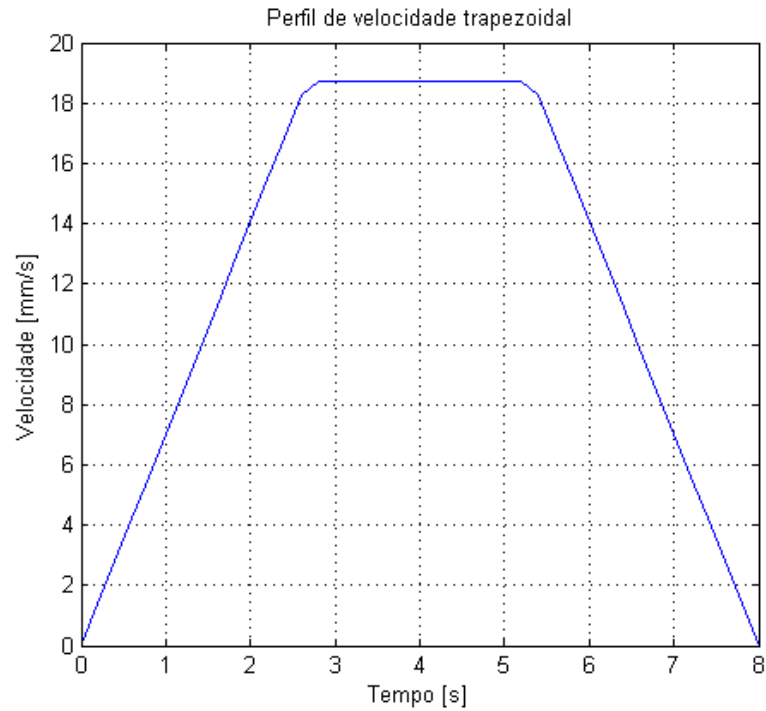


Figura 44 – Perfil de velocidade trapezoidal para o deslocamento em parábola.

A trajetória calculada para eixo do x, do referencial global, foi calculada em *Matlab*® e no controlador do LEGO® NXT e apresenta um erro menor que 1%.

### Caso 1

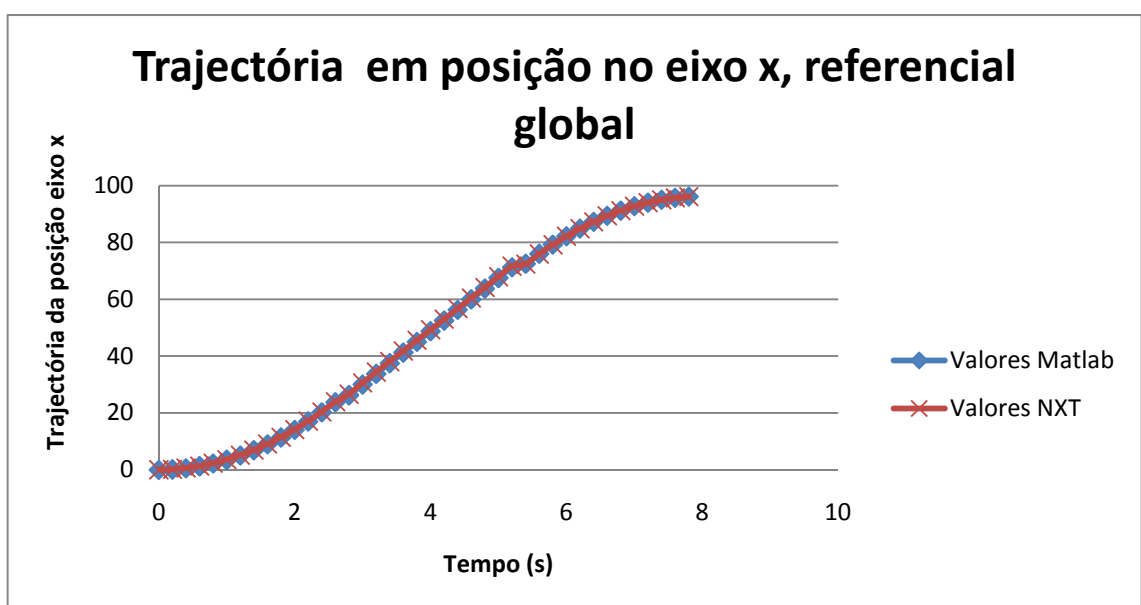


Figura 45 – Evolução da trajetória do veículo em posição, no eixo x do referencial global.

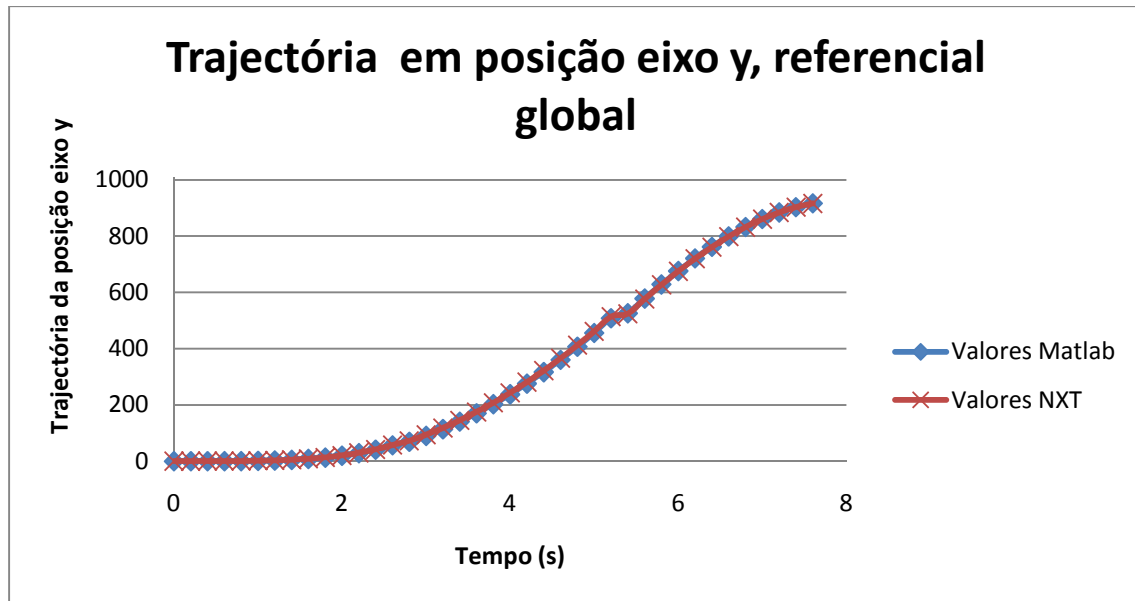


Figura 46 – Evolução da trajectória do veículo em posição, no eixo y do referencial global.

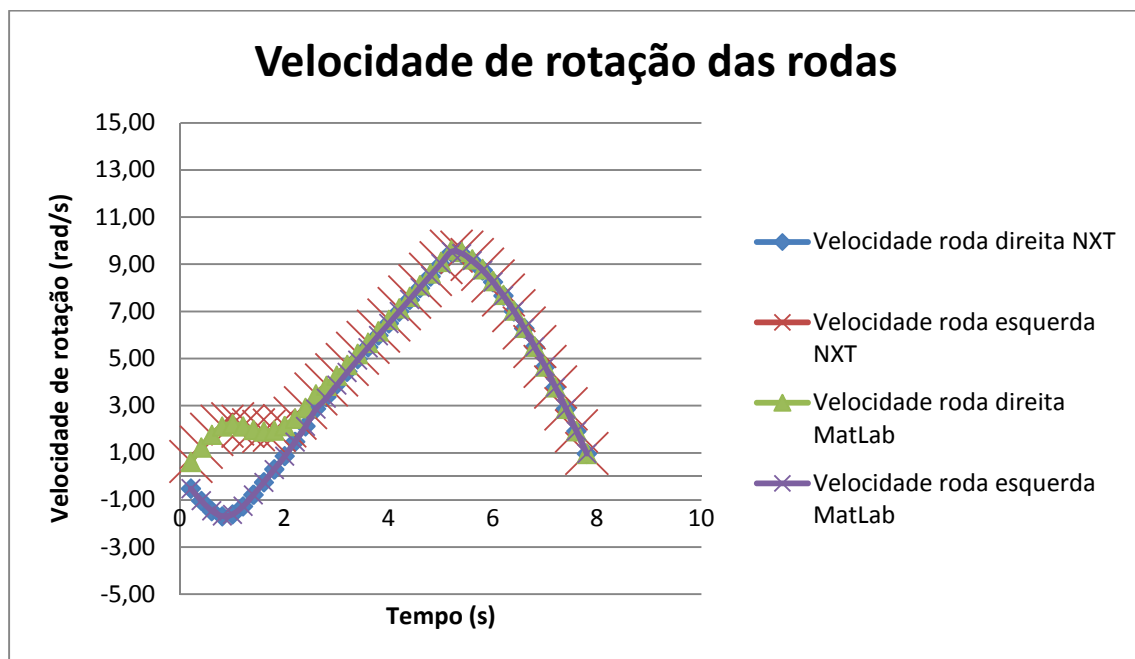


Figura 47 – Valores de velocidade de rotação das rodas calculados pelo NXT e *Matlab*®.

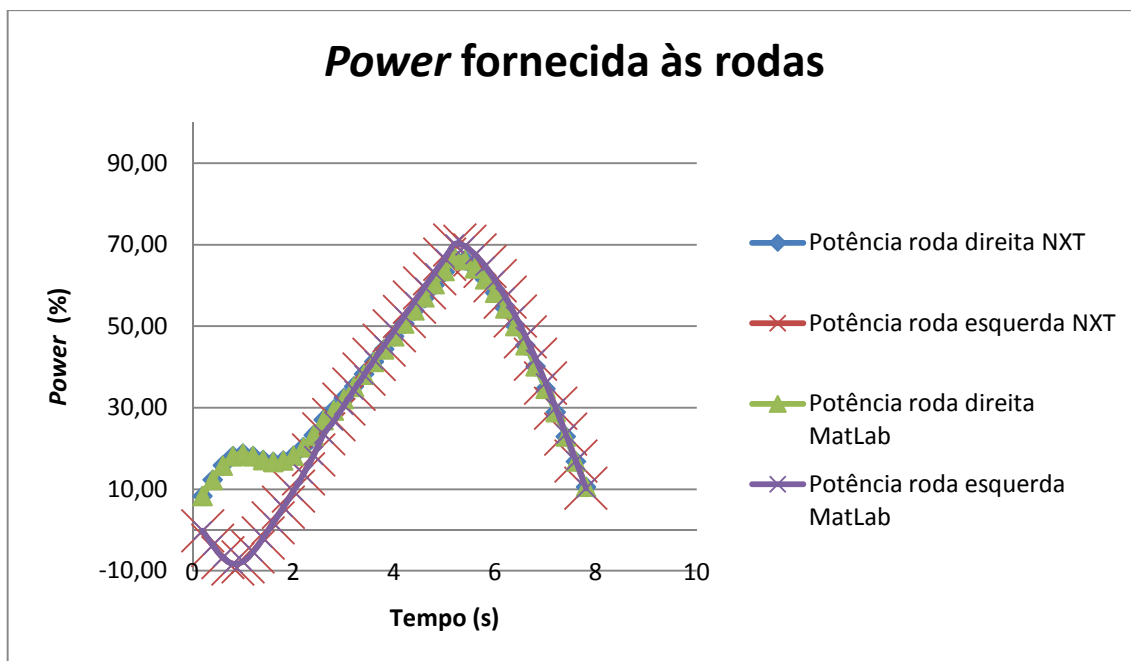


Figura 48 - Valores de *power* para cada roda, calculados pelo NXT e *Matlab*®.

### Estratégia B1.3 – Perfil de velocidade triangular

O perfil de velocidade triangular é um caso particular do perfil de velocidade trapezoidal. Apresentando-se igualmente as Figuras 49 a 50 que permitem validar o modelo implementado em NXT.

#### Caso 1

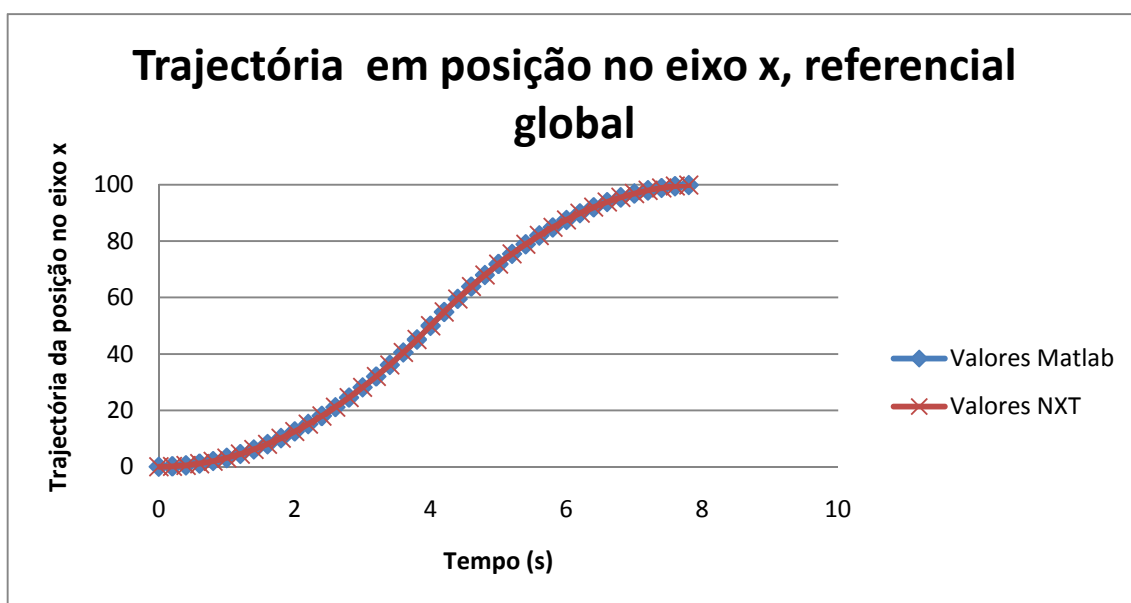


Figura 49 – Evolução da trajectória do veículo em posição, no eixo x do referencial global.

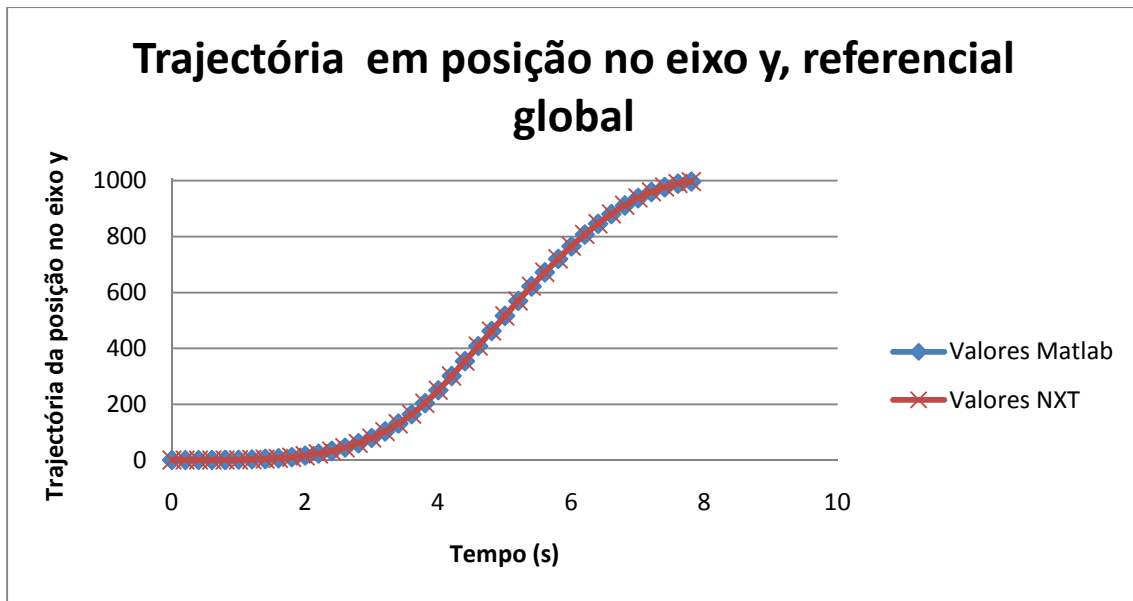


Figura 50 - Evolução da trajetória do veículo em posição, no eixo y do referencial global.

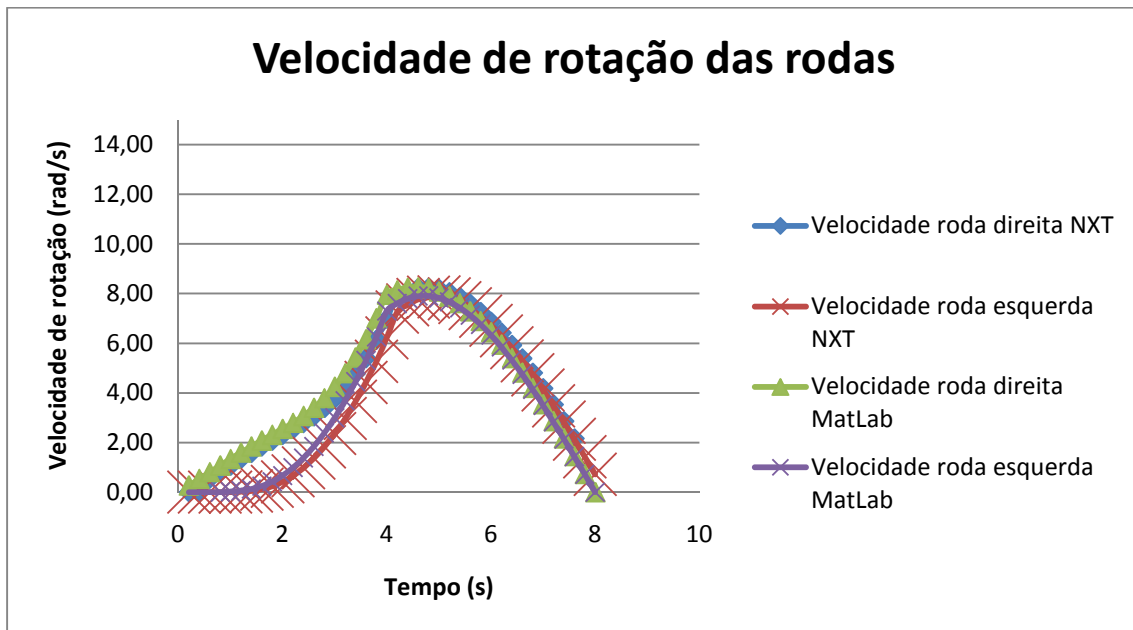


Figura 51 - Valores de velocidade de rotação das rodas calculados pelo NXT e *Matlab*®.

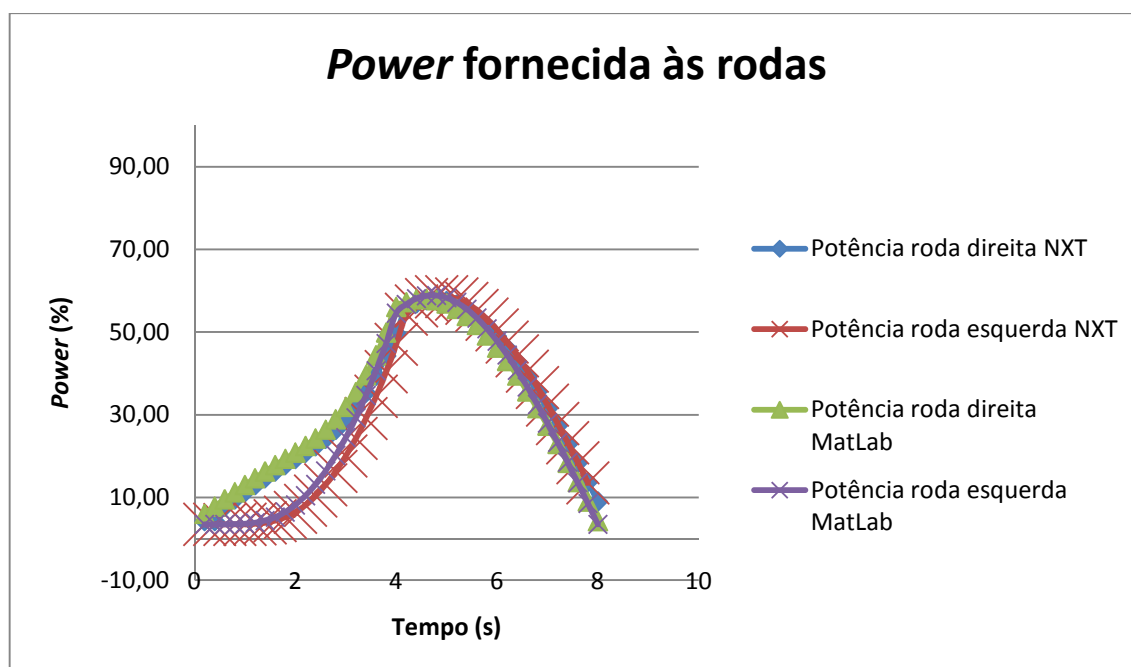


Figura 52 - Valores de *power* para cada roda, calculados pelo NXT e *Matlab*®.

### **Estratégia B2 – Perfil de deslocamento em semicírculo**

As estratégias B2.1 e B2.2 foram implementadas com um perfil de velocidade sinusoidal, trapezoidal e triangular.

#### **Estratégia B2.1 – Perfil de velocidade sinusoidal**

Nas duas trajetórias foram utilizados os seguintes valores de variáveis para a sua implementação (Tabela 9).

O perfil de velocidade é idêntico ao utilizado na estratégia B1.1. Os resultados obtidos estão apresentados na Tabela 10.

**Tabela 9 - Variáveis de entrada para as trajectórias.**

Tempo de ciclo [s]	8	
Tempo iteração [s]	0,2	
	Caso 1	Caso 2
Posição inicial (X_0) [mm]	0	0
Posição inicial (Y_0) [mm]	0	0
Orientação inicial ( $\theta_0$ ) [graus]	0°	0°
Posição final (X_f) [mm]	0	0
Posição final (Y_f) [mm]	-1000	-500
Orientação final ( $\theta_f$ ) [graus]	---	---

**Tabela 10 - Valores medidos da implementação da trajectória pelo NXT, perfil da velocidade sinusoidal.**

	Caso 1	Caso 2
Posição inicial (X_0) [mm]	0	0
Posição inicial (Y_0) [mm]	0	0
Orientação inicial ( $\theta_0$ ) [graus]	0°	0°
Posição final (X_f) [mm]	0	0
Posição final (Y_f) [mm]	-990	-490
Orientação final ( $\theta_f$ ) [graus]	180°	180°

A validade da implementação pode ser observada nas Figuras 53 a 56, tal como nos casos anteriores.

### Caso 1



Figura 53 – Evolução da trajectória do veículo em posição, no eixo x do referencial global.

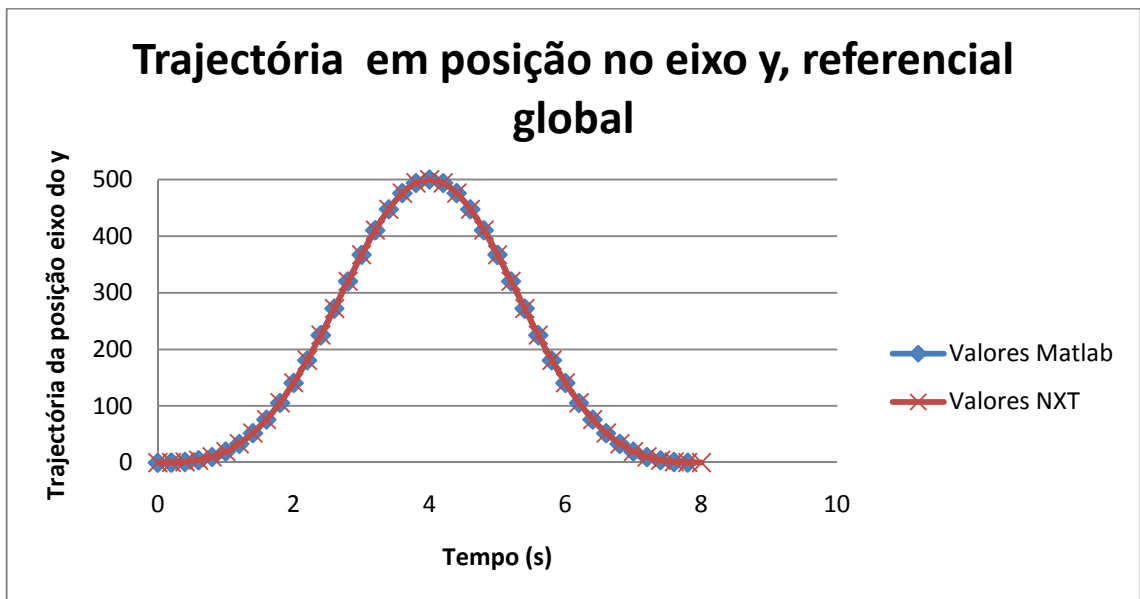


Figura 54 - Evolução da trajectória do veículo em posição, no eixo y do referencial global.

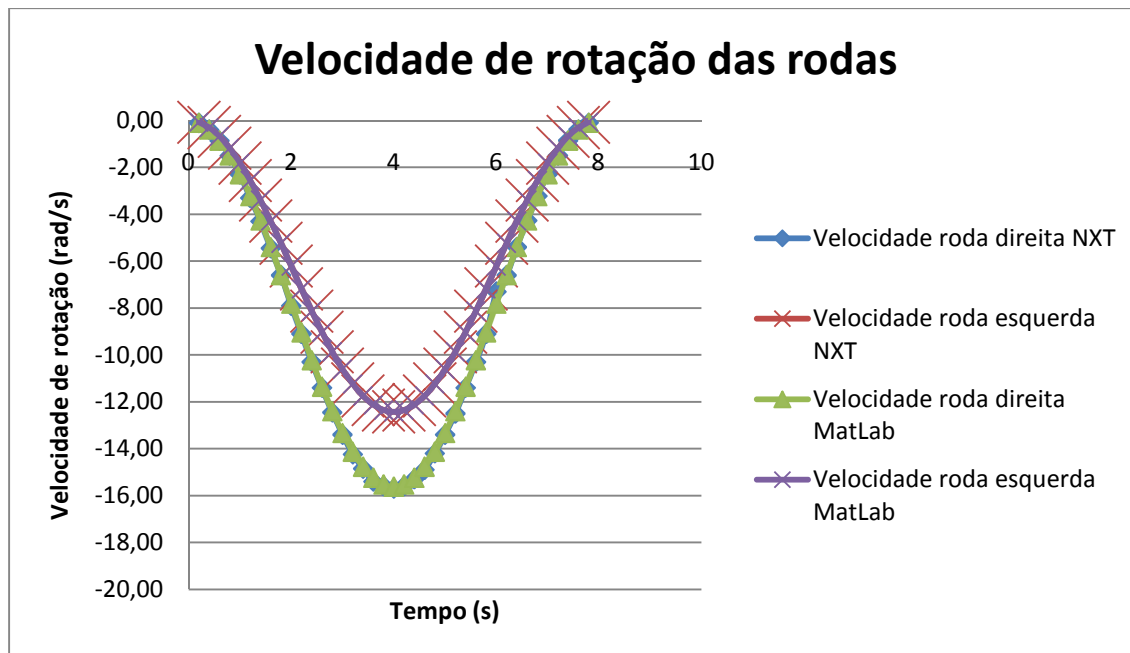


Figura 55 – Valores de velocidade de rotação das rodas calculados pelo NXT e *Matlab*®.

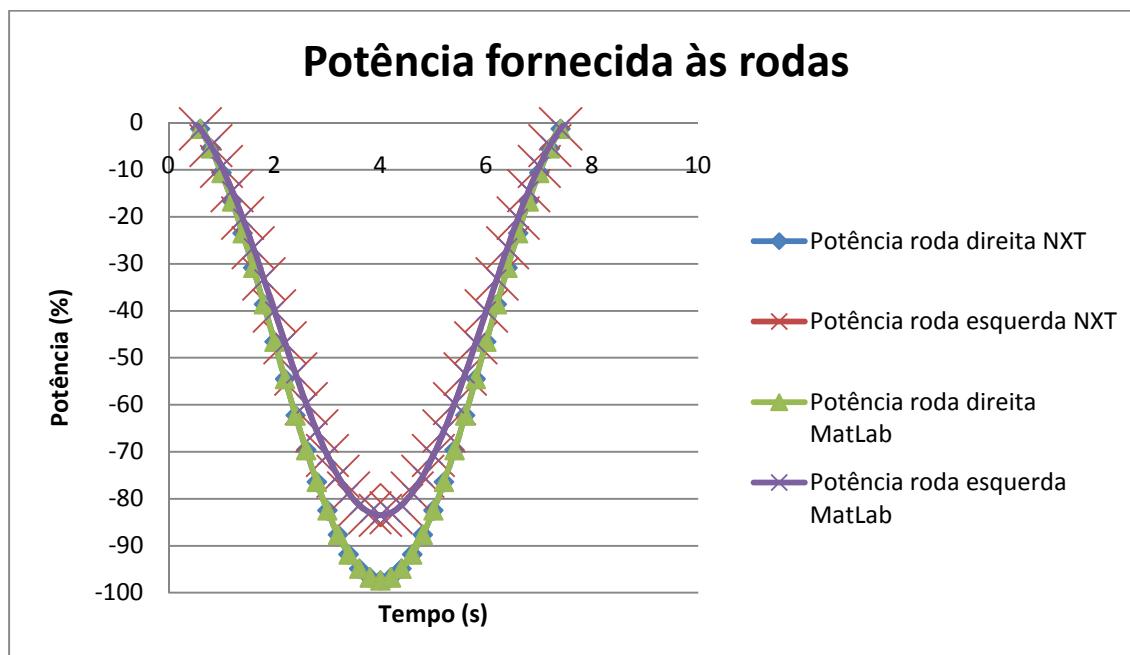


Figura 56 - Valores de *power* para cada roda, calculados pelo NXT e *Matlab*®.

Através da leitura dos *encoders* e utilizando odometria, refaz-se a trajetória que o veículo móvel percorreu ao longo do tempo.

O valor calculado a partir dos *encoders* permite calcular a posição do veículo no referencial global que para a estratégia B2.1 e caso 1, é apresentada na Figura 57.

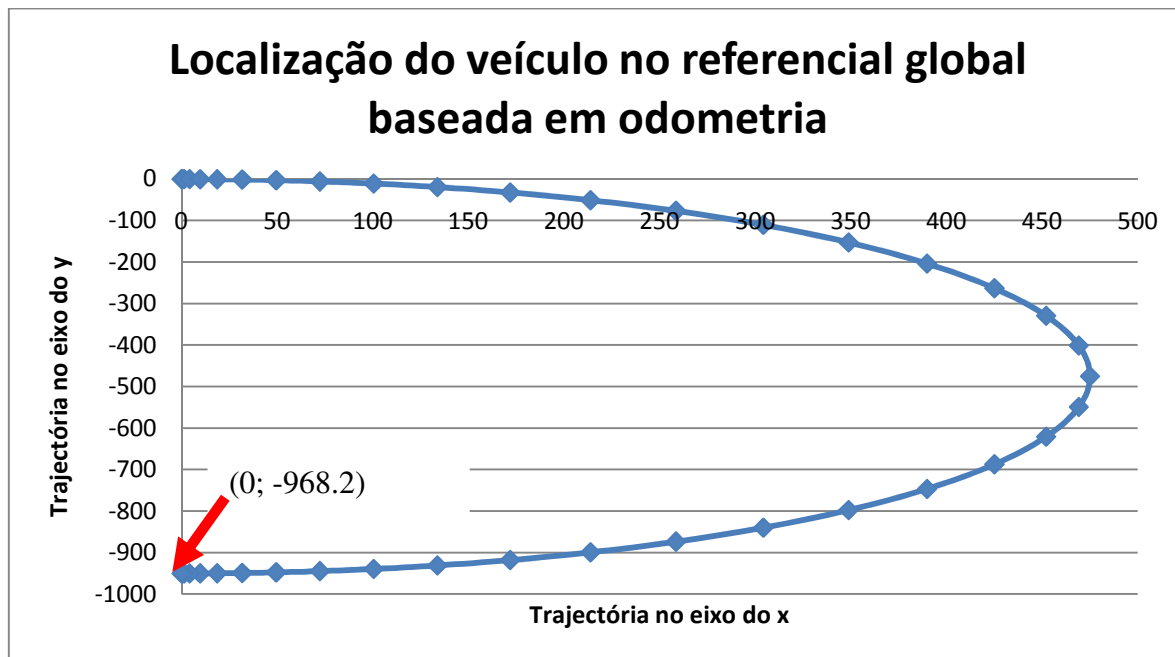


Figura 57 - Localização do veículo com auxílio de odometria.

Pode verificar-se, através da Figura 57, que a posição final do veículo, medida directamente na implementação laboratorial  $(0; -990)$  e a obtida através do modelo de odometria apresenta um erro substancial.

### Estratégia B2.2 – Perfil de velocidade trapezoidal

Nesta estratégia usa-se um perfil de velocidade trapezoidal, idêntico à da estratégia B2.2. Na Tabela 11 são apresentados os resultados obtidos.

Tabela 11 - Valores medidos da implementação da trajectória pelo NXT, perfil de velocidade trapezoidal.

	Caso 1	Caso 2
Posição inicial (X_0) [mm]	0	0
Posição inicial (Y_0) [mm]	0	0
Orientação inicial ( $\theta_0$ ) [graus]	0°	0°
Posição final (X_f) [mm]	20	15
Posição final (Y_f) [mm]	-980	-495
Orientação final ( $\theta_f$ ) [graus]	5°	5°

Tal como para os casos anteriores, as Figuras 58 a 61 permitem validar a implementação efectuada.

#### Caso 1

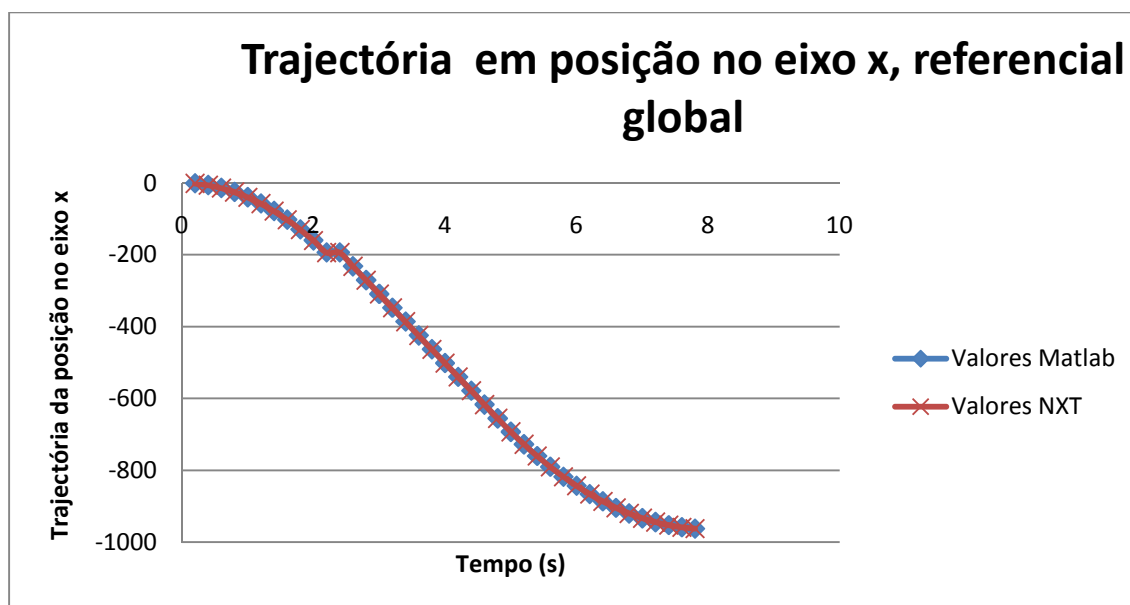


Figura 58 – Evolução da trajectória do veículo em posição, no eixo x do referencial global.

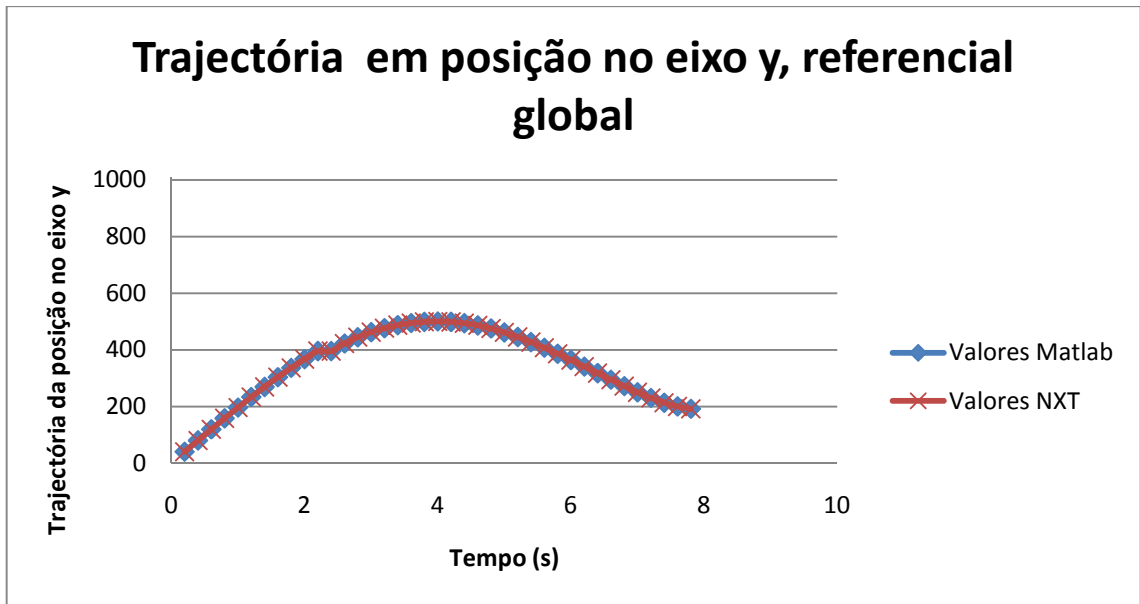


Figura 59 – Evolução da trajectória do veículo em posição, no eixo y do referencial global.

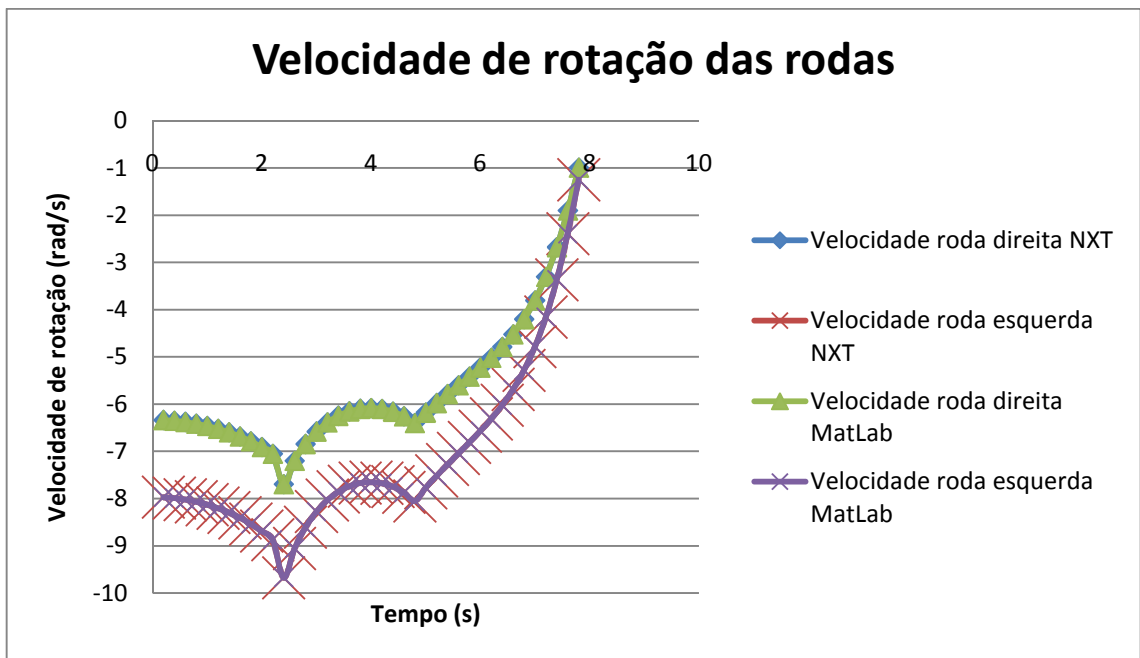


Figura 60 – Valores de velocidade de rotação das rodas calculados pelo NXT e *Matlab*®.

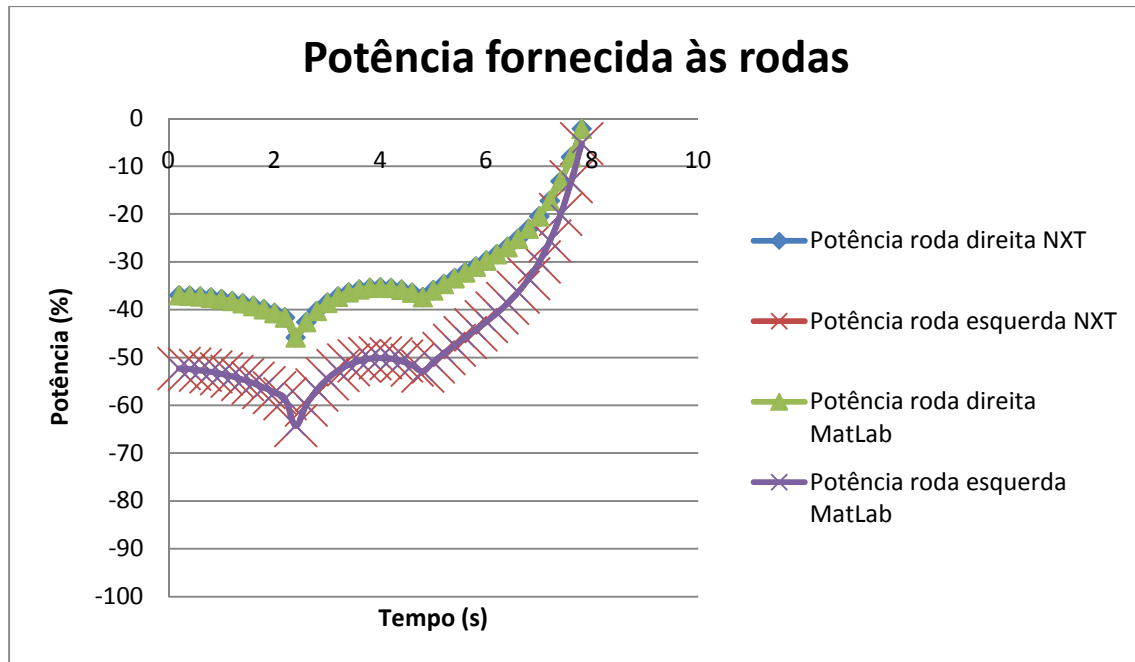


Figura 61 - Valores de *power* para cada roda, calculados pelo NXT e *Matlab*®.

### **Estratégia B3 – Deslocamento em linha recta**

Na estratégia B3 foi implementado um deslocamento em linha recta. O objectivo era deslocar o veículo de um ponto para o outro, mantendo a orientação inicial, e medir a posição e orientação final do mesmo. Foram utilizados três perfis de velocidade, sinusoidal B3.1, trapezoidal B3.2 e triangular B3.3.

Os pontos utilizados para a implementação desta estratégia foram os apresentados na Tabela 12.

**Tabela 12 – Ponto inicial e final do movimento em linha recta para os perfis B3.1, B3.2 e B3.3..**

	Caso 1	Caso 2
Posição inicial (X <sub>0</sub> ) [mm]	0	0
Posição inicial (Y <sub>0</sub> ) [mm]	0	0
Orientação inicial ( $\theta_0$ ) [graus]	0°	0°
Posição final (X <sub>f</sub> ) [mm]	900	500
Posição final (Y <sub>f</sub> ) [mm]	0	0
Orientação final ( $\theta_f$ ) [graus]	0°	0°

### **Estratégia B3.1 – Perfil de velocidade sinusoidal**

Para esta estratégia foi usado um perfil idêntico ao da estratégia B1, mas com os pontos inicial e final do movimento representados na Tabela 12. Neste tipo de deslocamento pretende-se avaliar a capacidade do veículo manter uma trajectória em linha recta.

Os resultados obtidos para os dois casos testados estão apresentados na Tabela 13.

**Tabela 13 – Valores medidos da implementação da trajectória pelo NXT.**

	Caso 1	Caso 2
Posição inicial (X <sub>0</sub> ) [mm]	0	0
Posição inicial (Y <sub>0</sub> ) [mm]	0	0
Orientação inicial ( $\theta_0$ ) [graus]	0°	0°
Posição final (X <sub>f</sub> ) [mm]	900	470
Posição final (Y <sub>f</sub> ) [mm]	30	40
Orientação final ( $\theta_f$ ) [graus]	5°	10°

Com o objectivo de validar o programa implementado no controlador do veículo, tal como nos casos anteriormente apresentados, foram aferidos os resultados obtidos em *Matlab* e em NXT (Figuras 62 a 65).

### Caso 1

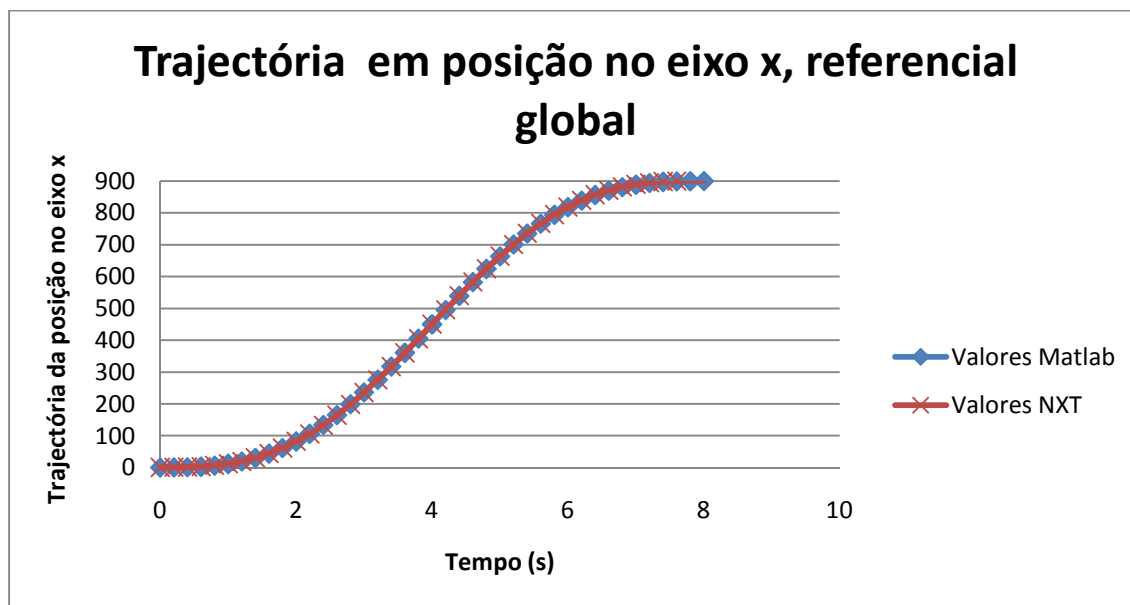


Figura 62 – Evolução da trajectória do veículo em posição, no eixo x do referencial global.

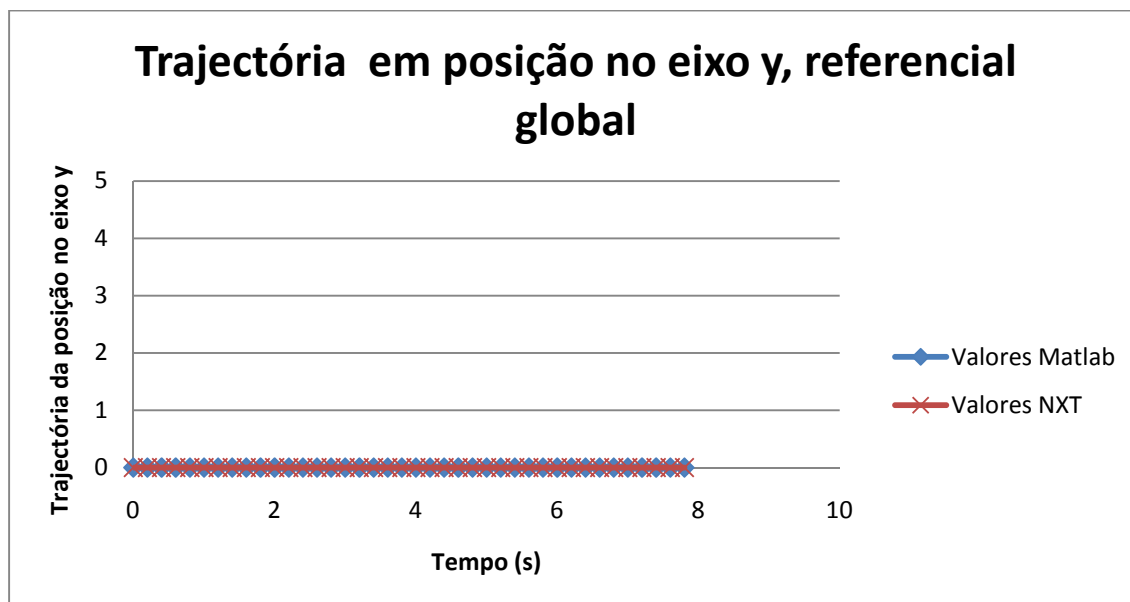


Figura 63 - Evolução da trajectória do veículo em posição, no eixo y do referencial global.

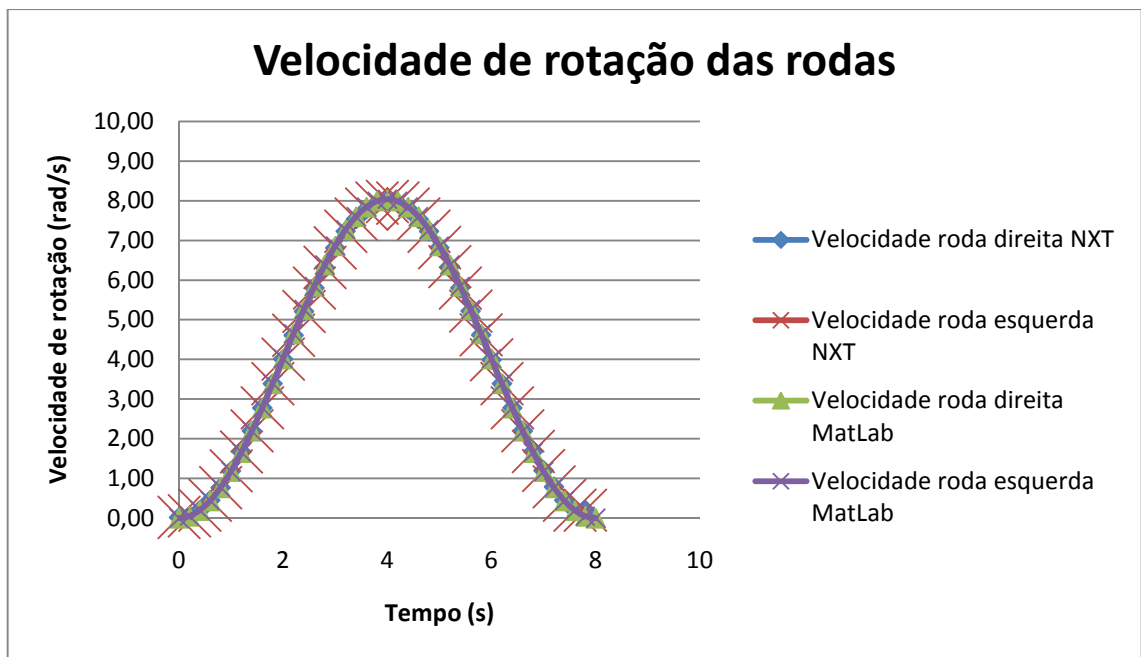


Figura 64 - Valores de velocidade de rotação das rodas calculados pelo NXT e *Matlab*®.

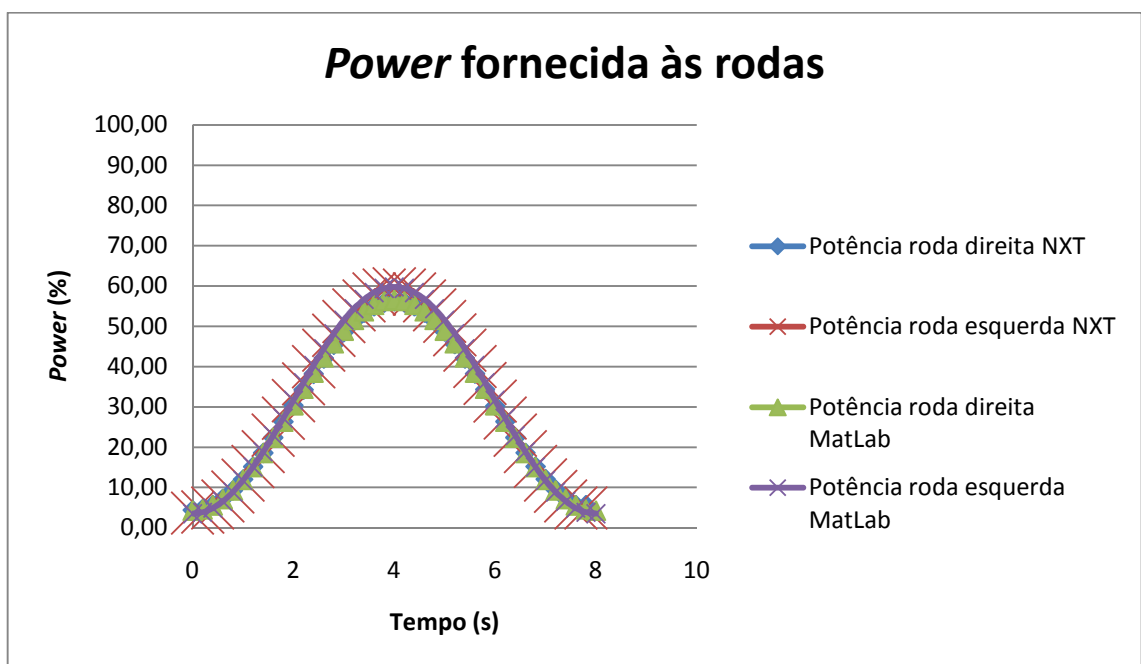


Figura 65 - Valores de *power* para cada roda, calculados pelo NXT e *Matlab*®.

A posição do veículo no referencial global, obtida a partir das medições efectuadas com os *encoders* das rodas é apresentada na Figura 66.

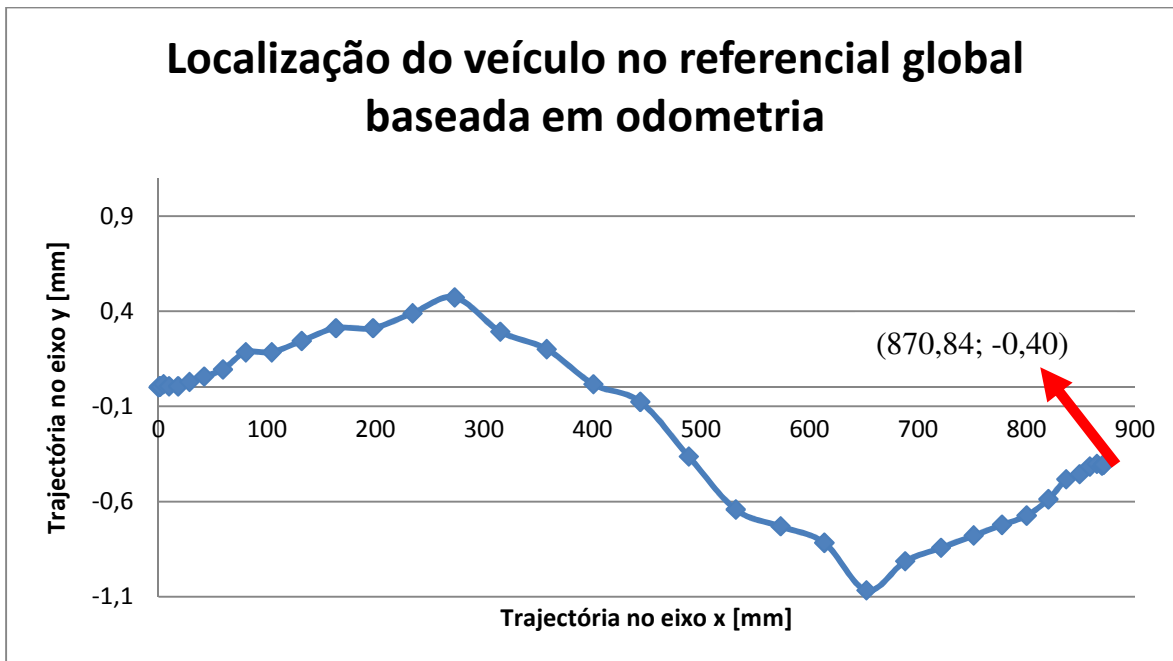


Figura 66 - Localização do veículo com auxílio base em odometria.

O erro baseado no modelo de odometria encontra-se dentro do intervalo  $\pm 1\text{mm}$ , aproximadamente, na direcção y. No entanto comparando a posição final obtida com este modelo com os valores medidos (900; 30), Tabela 13, pode concluir-se que o erro é bastante superior.

### Estratégia B3.2 – Perfil de velocidade trapezoidal

O perfil de velocidade anterior foi alterado para trapezoidal permitindo impor os tempos de aceleração e de desaceleração.

Os valores obtidos para os dois casos testados foram registados na Tabela 14.

Tabela 14 – Valores medidos da implementação no NXT para a trajectória B3.2.

	Caso 1	Caso 2
Posição inicial (X_0) [mm]	0	0
Posição inicial (Y_0) [mm]	0	0
Orientação inicial ( $\theta_0$ ) [graus]	0°	0°
Posição final (X_f) [mm]	900	500
Posição final (Y_f) [mm]	50	10
Orientação final ( $\theta_f$ ) [graus]	10°	5°

As Figuras 67 a 70 mostram que os resultados obtidos em *Matlab* e NXT são bastante semelhantes, validando o programa implementado no controlador no veículo.

#### Caso 1

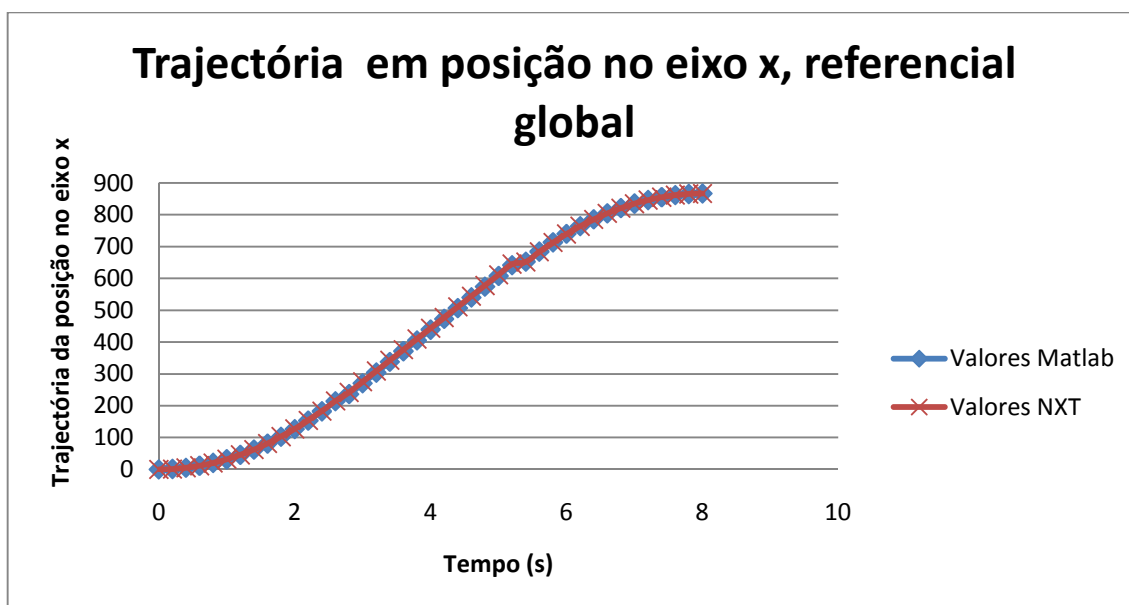


Figura 67 – Evolução da trajectória do veículo em posição, no eixo x do referencial global.

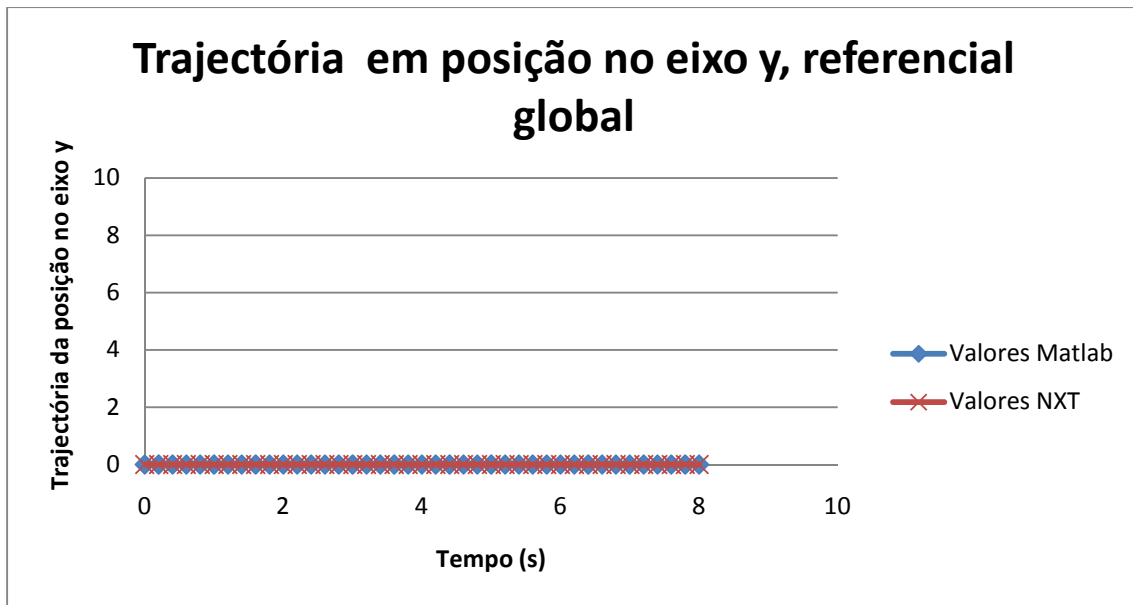


Figura 68 – Evolução da trajectória do veículo em posição, no eixo y do referencial global.

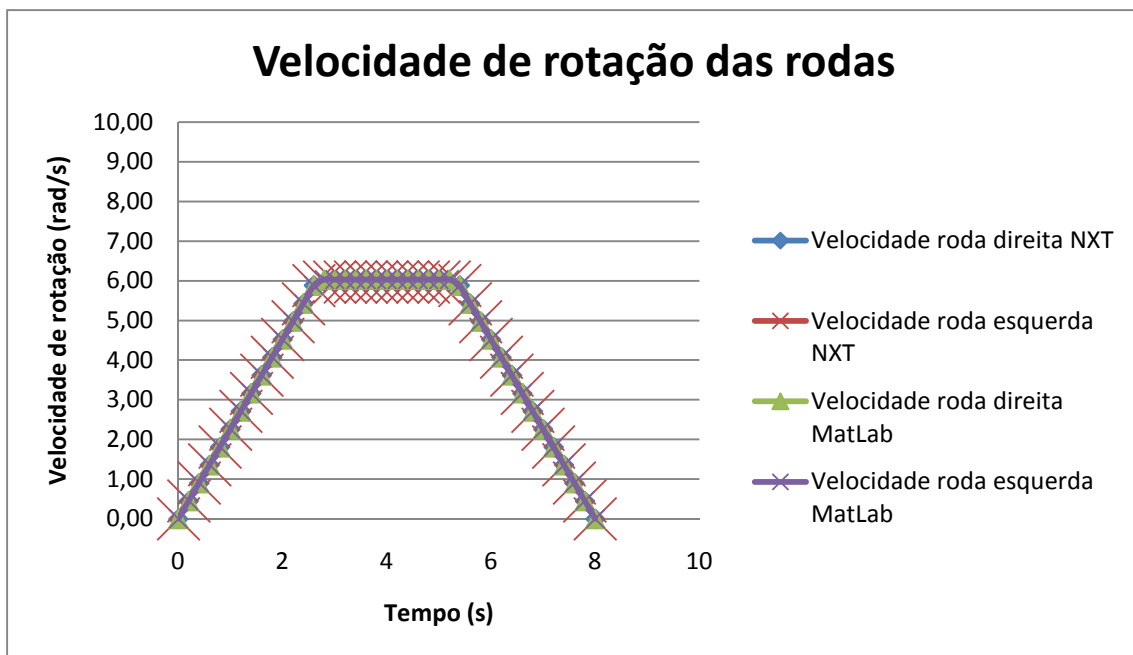


Figura 69 – Valores de velocidade de rotação das rodas calculados pelo NXT e *Matlab*®.

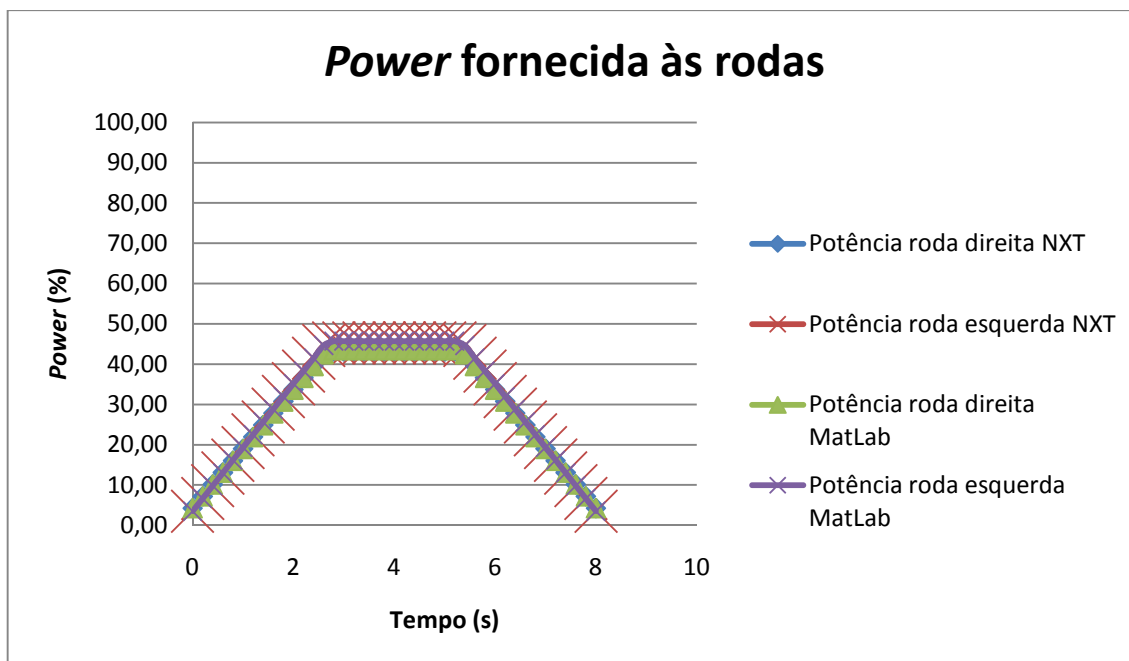


Figura 70 - Valores de *power* para cada roda, calculados pelo NXT e *Matlab*®.

### Estratégia B3.3 – Perfil de velocidade triangular

Por último foi implementado um perfil de velocidade triangular para se verificar se havia alteração significativa dos resultados obtidos.

Os valores obtidos para os dois casos testados estão listados na Tabela 15.

Tabela 15 – Valores medidos da implementação da trajectória pelo NXT, estratégia B3.3.

	Caso 1	Caso 2
Posição inicial (X_0) [mm]	0	0
Posição inicial (Y_0) [mm]	0	0
Orientação inicial ( $\theta_0$ ) [graus]	0°	0°
Posição final (X_f) [mm]	960	470
Posição final (Y_f) [mm]	40	30
Orientação final ( $\theta_f$ ) [graus]	10°	10°

As Figuras 71 a 74, tal como nos casos anteriores, permitem validar a implementação no sistema NXT.

**Caso 1**

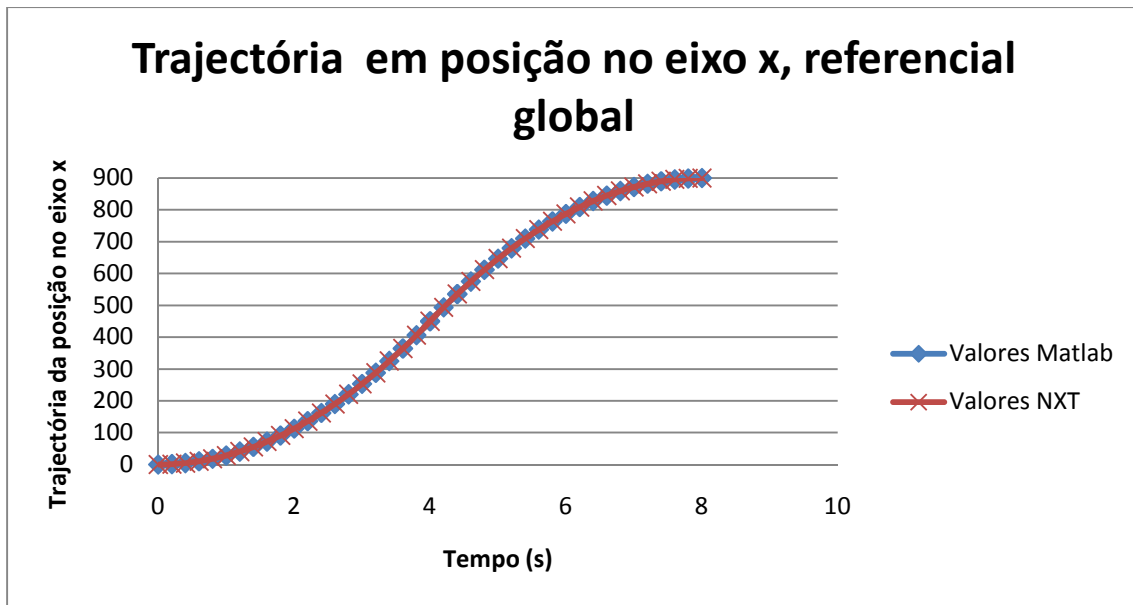


Figura 71 - Evolução da trajectória do veículo em posição, no eixo x do referencial global.

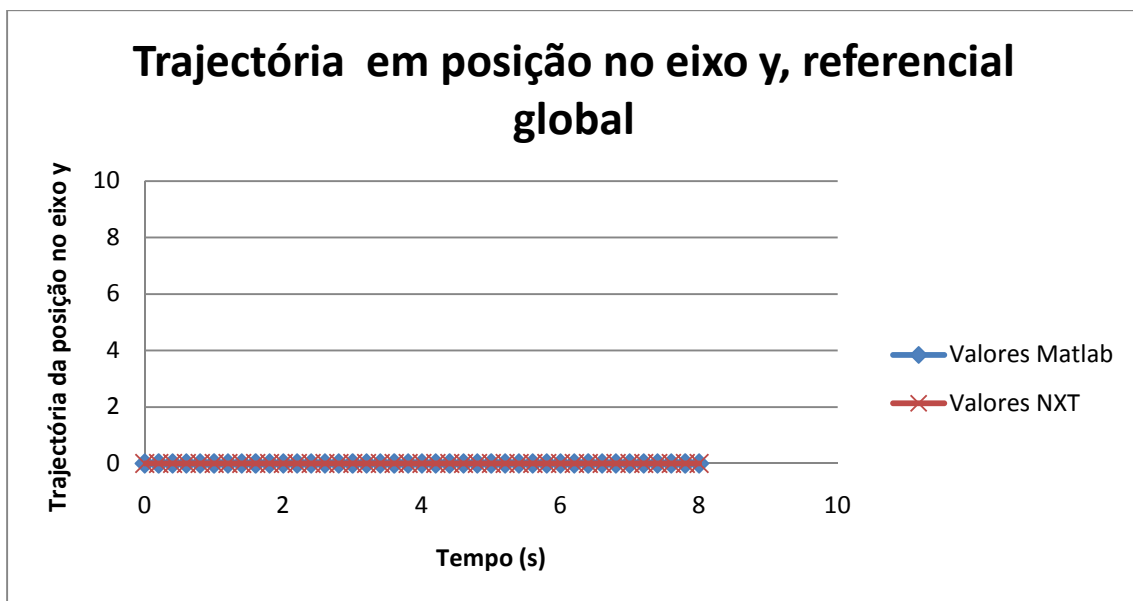


Figura 72 - Evolução da trajectória do veículo em posição, no eixo y do referencial global.

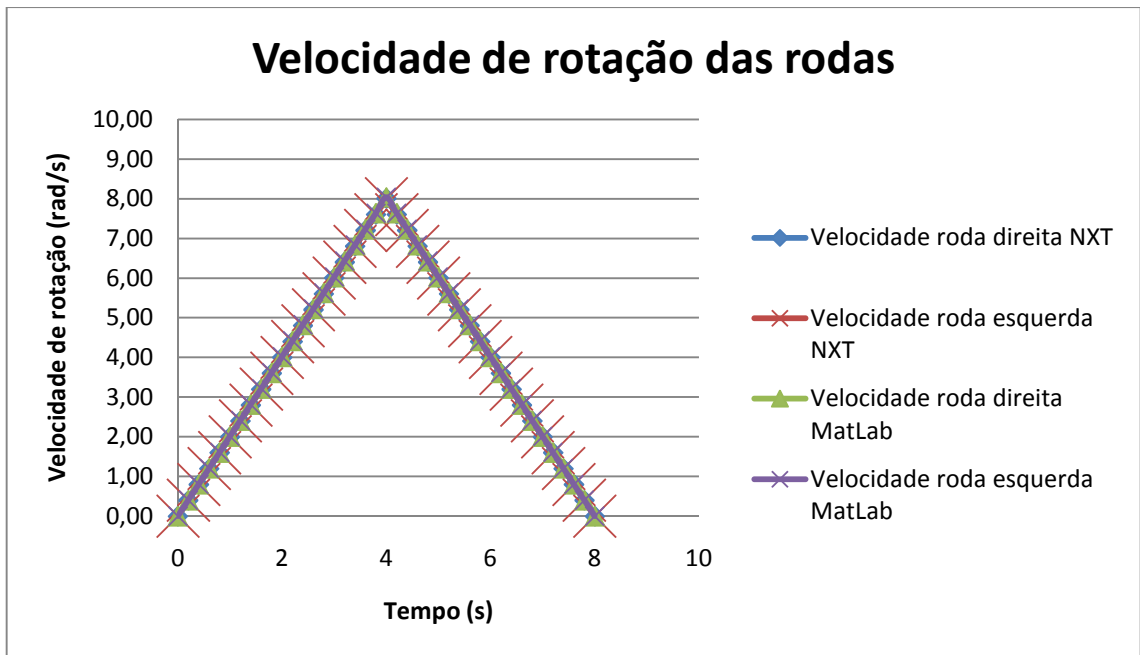


Figura 73 - Valores de velocidade de rotação das rodas calculados pelo NXT e *Matlab*®.

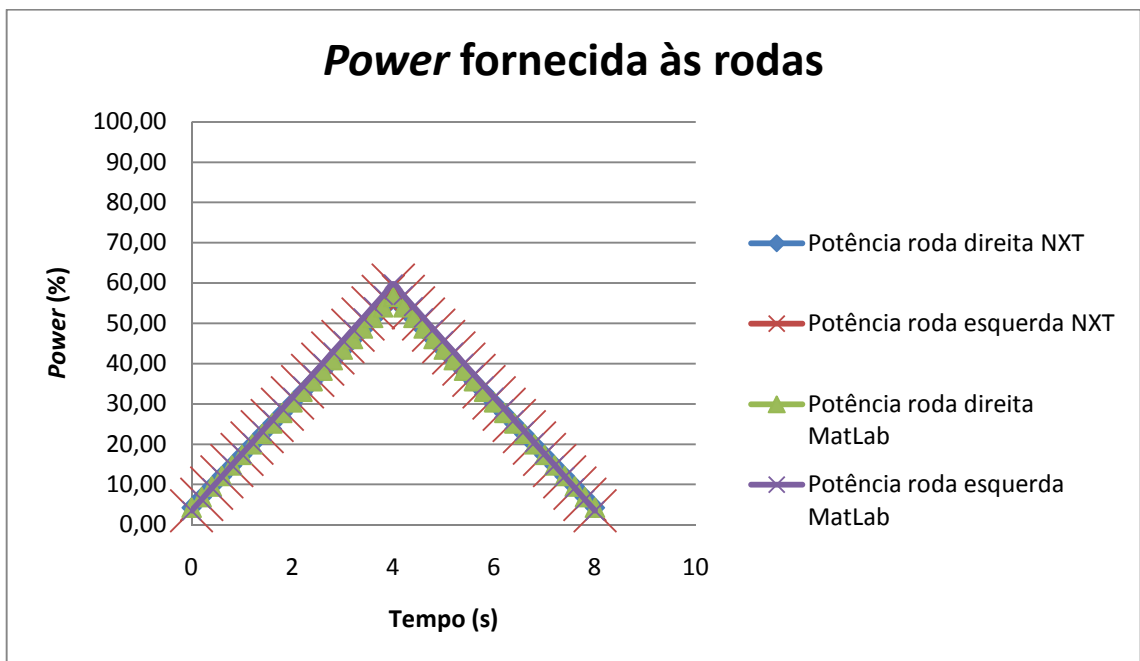


Figura 74 - Valores de *power* para cada roda, calculados pelo NXT e *Matlab*®.

**Estratégia C – Movimento de rotação e deslocamento linear independentes, com correcção de erros de orientação e posição**

A estratégia C consiste numa adaptação da estratégia A, ou seja movimentos de orientação e deslocamento linear independentes e sucessivos. Uma primeira alteração consiste em usar a informação de orientação de uma bússola digital para alinhar a plataforma na direcção pretendida. Para além desta correcção utilizou-se um sensor de distância (por infravermelhos) para obter os erros de posição relativamente a dois alvos fixos no referencial absoluto, e desta forma corrigir o erro de posição ( $\Delta x, \Delta y$ ).

A implementação desta estratégia está delineada na Figura 75.

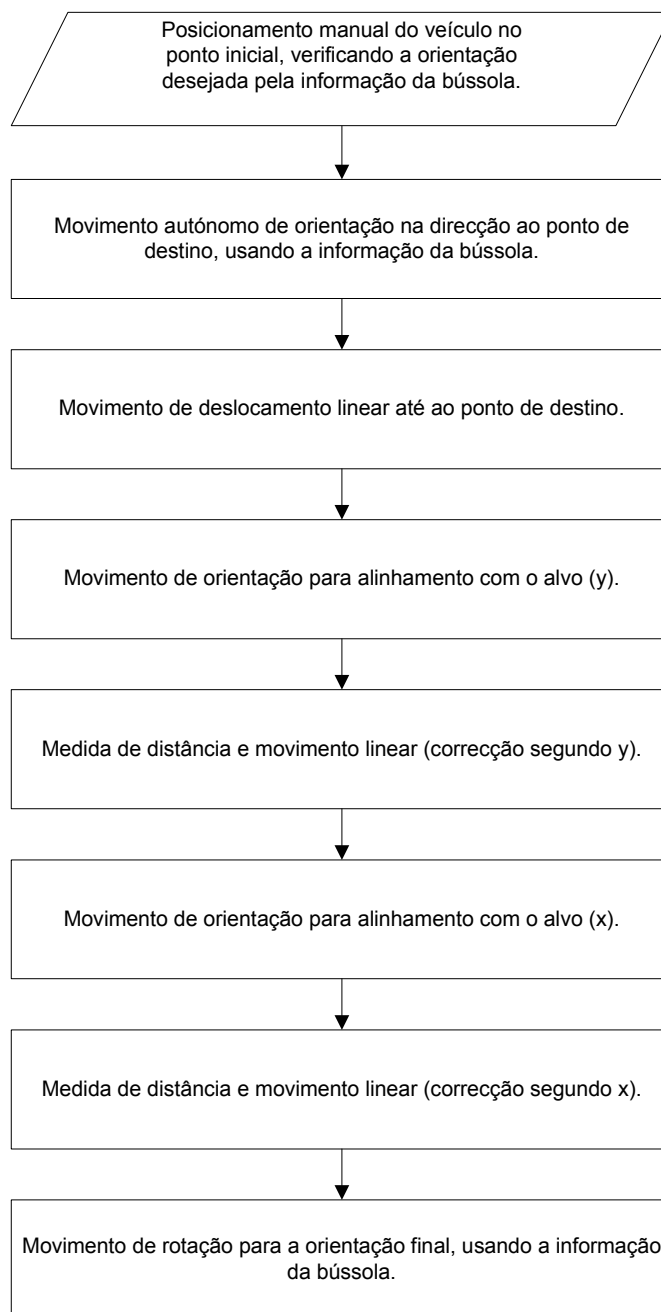
A utilização dos sensores pressupõe deslocamentos com velocidades reduzidas. Na Tabela 16 estão representadas as condições para os casos testados e na Tabela 17 medidos.

**Tabela 16 - Valores da posição inicial e final pretendida.**

	Caso 1	Caso 2
Posição inicial (X_0) [mm]	0	0
Posição inicial (Y_0) [mm]	0	0
Orientação inicial ( $\theta_0$ ) [graus]	0°	0°
Posição final (X_f) [mm]	200	100
Posição final (Y_f) [mm]	800	400
Orientação final ( $\theta_f$ ) [graus]	0°	0°

**Tabela 17 – Valores medidos da implementação da trajectória pelo NXT, trajectória C.**

	Caso 1	Caso 2
Posição inicial (X_0) [mm]	0	0
Posição inicial (Y_0) [mm]	0	0
Orientação inicial ( $\theta_0$ ) [graus]	0°	0°
Posição final (X_f) [mm]	200	100
Posição final (Y_f) [mm]	800	400
Orientação final ( $\theta_f$ ) [graus]	0°	0°



**Figura 75 - Estratégia de implementação de movimentos de rotação e deslocamento linear com correção utilizando sensores externos.**

**Estratégia D – Movimento circular, com um raio de curvatura conhecido e velocidades constantes**

Uma das vantagens do veículo diferencial é que a implementação de uma trajectória circular (de raio R) consiste num caso particular, simples, do modelo cinemático: a relação entre as velocidades das rodas mantém-se constante ao longo da trajectória.

Com a estratégia D pretendia-se, de uma forma simples, verificar a qualidade deste tipo de trajectória circular. Implementou-se a estratégia para várias velocidades ficando descrito na Tabela 18 os resultados obtidos.

**Tabela 18 - Movimentos de rotação em torno de um ponto fixo.**

	Caso 1	
Posição inicial (X <sub>0</sub> ) [mm]	500	
Posição inicial (Y <sub>0</sub> ) [mm]	0	
Orientação inicial ( $\theta_0$ ) [graus]	90°	
Raio da circunferência	500	
Power (%)	Caso 1 (40%)	Caso 2 (80%)
Posição final (X <sub>f</sub> ) [mm]	490	500
Posição final (Y <sub>f</sub> ) [mm]	0	0
Orientação final ( $\theta_f$ ) [graus]	90°	90°

### 4.3 Conclusões

Conseguiu-se implementar diferentes trajectórias representativas de movimentos típicos (rectilíneo, circular, parabólico) e com diferentes perfis de velocidade (sinusoidal, triangular, trapezoidal), num veículo de baixo custo. Os testes efectuados limitaram-se a um conjunto reduzido de casos, em parte devido às dificuldades derivadas das limitações da linguagem de programação e dos componentes do sistema.

A possibilidade de este sistema de baixo custo poder incluir sensores para correcção de posicionamento, estende a sua aplicação para além da baseada unicamente em odometria.

## 5 Conclusões e trabalhos futuros

O trabalho aqui apresentado teve como objectivo desenvolver um sistema de movimentação autónoma de robôs móveis com base num sistema de baixo custo (Lego® Mindstorms® NXT 2.0).

A área da robótica móvel é sem dúvida uma área em expansão. Tarefas tão variadas como armazenagem, exploração de locais desconhecidos, segurança ou serviços estão a exigir tecnologias e soluções inovadoras. No sentido de tornar possível uma maior utilização de robôs móveis, as empresas têm necessidade de criar soluções mais acessíveis e amigas do utilizador.

Ao longo do trabalho foram abordadas várias soluções para implementação de trajectórias. Estas envolvem essencialmente dois tipos de movimentação: movimentos de rotação e translação independentes por um lado e, comando de velocidade que resulta em movimento de orientação e translação executadas simultaneamente.

A programação do robô móvel foi feita no ambiente de programação fornecido pela Lego®, Mindstorms® NXT Programming 2.0. Todos os programas foram validados em *Matlab*®.

O ambiente de programação da Lego® Mindstorms® NXT 2.0 baseia-se numa linguagem gráfica em que o programa é definido por uma sequência de acções representadas por blocos. Estas características, por vezes, facilitam a elaboração de programas simples mas dificultam a programação de tarefas mais elaboradas e específicas.

Actualmente o veículo é capaz de efectuar trajectórias em parábola, semicirculares e em linha recta, com perfis de velocidade sinusoidais, trapezoidais e triangulares. Foi ainda testada a correcção da orientação do veículo através de uma bússola digital e a correcção da posição com auxílio a um sensor de infravermelhos.

A avaliação dos resultados foi dificultada pela não disponibilidade de meios expeditos para medição dos erros de posicionamento. Apesar destas dificuldades foi possível verificar que as trajectórias com perfis de velocidade trapezoidal, pelo facto de permitirem ajustar a aceleração/ desaceleração, minimizam os problemas de comando do veículo a baixas velocidades melhorando o seu desempenho.

Sendo um veículo de baixo custo, os problemas de pouca rigidez da plataforma, incerteza nos parâmetros dimensionais, folgas, entre outros, evidenciam as diferenças do modelo cinemático utilizado relativamente ao sistema real. A estas limitações somam-se ainda a baixa resolução dos *encoders* (1°), o comportamento a baixa velocidade dos motores e a capacidade de processamento do controlador (ex. resolução de 0.01, baixa velocidade de processamento).

O trabalho desenvolvido pode ser utilizado para testar mais casos e servir de base à utilização de outros métodos complementares de localização.

## 6 Referências

- [1] – Siegwart, R., Nourbakhsh, I. R., Introduction to autonomous mobile robots, A Bradford Book, MIT press, United States of America, 2004.
- [2]–Groover, M. P., Automation, production systems, and computer-integrated manufacturing, Prentice-Hall, Inc., Englewood Cliffs, NJ, 2000.
- [3] – [www.mobilerobots.com/researchrobots/researchrobots/pioneer3dx.aspx](http://www.mobilerobots.com/researchrobots/researchrobots/pioneer3dx.aspx) (consultado em 03/03/2010)
- [4] - [www.automation.siemens.com](http://www.automation.siemens.com) (consultado em 03/03/2010)
- [5] - [www.danahermotion.com](http://www.danahermotion.com) (consultado em 03/03/2010)
- [6] - [www.swisslog.com](http://www.swisslog.com) (consultado em 04/03/2010)
- [7] – H. Choset, “Principles of robot motion: theory, algorithms, and implementation, MIT Press, Cambridge, MA, 2005.”
- [8] - <http://botleague.net/robot-stats.asp> (consultado em 20/03/2010)
- [9] - <http://crasar.org/> (consultado em 21/03/2010)
- [10] - [www.fmcsgvs.com](http://www.fmcsgvs.com) (consultado em 10/03/2010)
- [11] - [www.gottwald.com](http://www.gottwald.com) (consultado em 10/03/2010)
- [12] - [www.omnixtechnology.com](http://www.omnixtechnology.com) (consultado em 30/03/2010)
- [13] - [www.robotshop.ca](http://www.robotshop.ca) (consultado em 30/03/2010)
- [14] - [www.globalsecurity.org](http://www.globalsecurity.org) (consultado em 01/04/2010)
- [15] - [www.softdesign.se/](http://www.softdesign.se/) (consultado em 02/04/2010)
- [16] – J. C. Latombe, Robot motion planning, kluwer Academic Publishers, Boston/Dordrecht/ London, 1991.
- [17] – Vieira, F. C., Controle dinâmico de robôs móveis com acionamento diferencial, Dissertação, Grau de Mestre, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Rio Grande do Norte, Brasil, 2005.