

**Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto**



**FEUP**

## **Clever Robot**

Héber Miguel Plácido Sobreira

Dissertação realizada no âmbito do  
Mestrado Integrado em Engenharia Electrotécnica e de Computadores  
Major Automação

Orientador: Prof. Dr. António Paulo Gomes Mendes Moreira

Co-orientador: Prof. Dr. Paulo José Cerqueira Gomes da Costa

Julho de 2009

Héber Sobreira, 2009

A Dissertação intitulada

“CLEVER ROBOT”

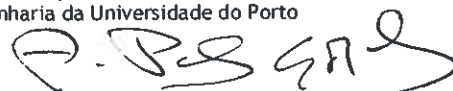
foi aprovada em provas realizadas em 20/Julho/2009

o júri

  
Presidente Professor Doutor Armando Jorge Miranda de Sousa  
Professor Auxiliar do Departamento de Engenharia Electrotécnica e de Computadores da  
Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto

  
Professor Doutor João Miguel Clemente Sena Esteves  
Professor Auxiliar do Departamento de Electrónica Industrial da Universidade do Minho

  
Professor Doutor António Paulo Gomes Mendes Moreira  
Professor Auxiliar do Departamento de Engenharia Electrotécnica e de Computadores da  
Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto

  
Professor Doutor Paulo José Cerqueira Gomes da Costa  
Professor Auxiliar do Departamento de Engenharia Electrotécnica e de Computadores da  
Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto

O autor declara que a presente dissertação (ou relatório de projecto) é da sua exclusiva autoria e foi escrita sem qualquer apoio externo não explicitamente autorizado. Os resultados, ideias, parágrafos, ou outros extractos tomados de ou inspirados em trabalhos de outros autores, e demais referências bibliográficas usadas, são correctamente citados.



Autor - HEBER MIGUEL PLACIDO SOBREIRA

Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto



# Agradecimentos

Aos meus orientadores Prof. Dr. António Paulo Moreira e Prof. Dr. Paulo Gomes Costa pela oportunidade de investigação no grupo de Controlo e Robótica (5DPO) da FEUP, e pelo apoio e suporte durante a execução deste trabalho.

Agradeço aos meus colegas de trabalho e amigos por todos os conselhos e ajuda. Neste sentido devo agradecer em especial ao Renato Caldas, Paulo Malheiros, Marcos Ferreira, Carlos Teixeira, Alexandre, Manuel Gouveia.

Deixo também um agradecimento ao Fábio Pedrosa do Departamento de Engenharia Informática da UC e ao Eduardo Dias do Departamento de Matemática da UC pelos seus conselhos e contribuições neste trabalho.

Agradeço especialmente à Helena Marinho por acreditar em mim, por toda a ajuda e apoio em todos os momentos.

Agradeço especialmente à minha família por todo o apoio e motivação, que se revelou fundamental para a conclusão deste trabalho, em especial ao meu pai pela sua valiosa contribuição.



# Resumo

A utilização de Robôs Móveis em áreas ligadas à publicidade e entretenimento têm sido alvo de diferentes abordagens que não tiveram grande sucesso devido, principalmente, ao custo elevado do robô e consequente manutenção. Por isso, no presente trabalho, sugere-se uma plataforma robótica de simples utilização, de baixo custo e, ao mesmo tempo, robusta, permitindo a sua valorização no mercado.

Para atingir este objectivo foram estudadas diferentes tecnologias de sensorização recorrendo a sensores de baixo custo, no que toca à detecção de obstáculos, degraus e balizas baseadas em infravermelhos. Desenvolveu-se também um método para estimar a velocidade de motores DC de forma a evitar recorrer a *encoders*.

Construiu-se um robô com o objectivo de estudar a temática da odometria e localização de baixo custo.

No que respeita à odometria, recorreu-se a um método de calibração com o objectivo de melhorar a precisão deste sistema, e implementou-se um modelo estocástico de forma a caracterizar a incerteza da pose obtida a partir da odometria.

Posteriormente, desenvolveu-se e implementou-se um sistema de localização de baixo custo baseado na detecção de duas balizas emisoras de infravermelhos. Aqui, recorrendo apenas à odometria do robô e a um simples receptor de infravermelhos, consegue-se medir a posição e orientação do robô em relação a um referencial externo. Foi desenvolvido um algoritmo, baseado em considerações geométricas, para o cálculo da pose do robô, e de forma a que este não exija grande poder de cálculo, o que torna a sua implementação possível em plataformas computacionais de baixo custo como, por exemplo, um pequeno micro-controlador.





# Abstract

The use of Mobile Robots in areas related with advertising and entertainment has been the target of many approaches that didn't have much success mainly due to the high cost of the robot and its maintenance. Therefore, it's suggested a robotic platform of simple use, low cost and, at the same time, robust, allowing its appreciation in the market.

To reach this goal it was studied different sensing technologies using low cost sensors, to detect obstacles, steps and infrared based beacons. A method to estimate the DC motors speed, avoiding the use of encoders, was also developed.

A robot was build using these low cost technologies to study odometry and localization.

In what concerns odometry, it was used a calibration method with the purpose of improve the precision of this system, and it was implemented a stochastic model in a way to feature the uncertainty on the position obtained through odometry.

Later on, it was developed and implemented a low cost location system based on the detection of two beacons emitting infrared. Using only the robot odometry and a simple infrared receptor, it's possible to measure the position of the robot in relation to an external referential. It was developed an algorithm, based on geometrical considerations, for the calculation of the robot position, so that it does not demand a great calculation power, which makes its implementation possible on low cost computer platform like, for instance, a small micro-controller.



# Índice

|  |           |
|--|-----------|
| Agradecimentos .....   | v         |
| Resumo .....   | vii       |
| Abstract .....   | ix        |
| Índice .....   | xi        |
| Lista de figuras .....   | xiv       |
| Abreviaturas e Símbolos .....  | xx        |
| <b>Capítulo 1 Introdução .....</b>   | <b>1</b>  |
| 1.1 Estado da Arte .....   | 1         |
| 1.1.1 Aplicações comerciais baseadas em robótica móvel.....                              | 2         |
| 1.1.2 Localização em aplicações robóticas de baixo custo .....                           | 5         |
| 1.2 Requisitos do robô e enquadramento do projecto.....                                  | 8         |
| 1.3 Estrutura do documento.....  | 8         |
| <b>Capítulo 2 Sensorização .....</b>   | <b>10</b> |
| 2.1 Sensores baseados em infravermelhos .....  | 10        |
| 2.1.1 Dispositivos básicos .....   | 11        |
| 2.1.2 Fotodetector de saída digital .....  | 15        |
| 2.1.3 Comutador óptico .....   | 16        |
| 2.1.4 Reflector óptico .....   | 16        |
| 2.1.5 Receptor de infravermelhos para controlo remoto .....                              | 17        |
| 2.1.6 Sensores de distância baseados em infravermelhos .....                             | 18        |
| 2.2 Sensores baseados em ultra-sons.....   | 19        |
| 2.3 Medição indirecta da velocidade de rotação de um motor DC de ímanes permanentes..... | 21        |
| 2.3.1 Modelo do motor DC de ímans permanentes.....                                       | 22        |
| 2.3.2 Descrição do hardware .....  | 23        |
| 2.3.3 Determinação dos parâmetros do motor .....   | 24        |
| 2.3.4 Validação do modelo.....   | 27        |

|                   |  |           |
|-------------------|--|-----------|
| 2.3.5             | Conclusões .....   | 29        |
| <b>Capítulo 3</b> | <b>Robô desenvolvido .....</b>   | <b>31</b> |
| <b>3.1</b>        | <b>Hardware.....</b>   | <b>31</b> |
| 3.1.1             | Traços gerais.....   | 31        |
| 3.1.2             | Sensores de chão.....  | 33        |
| 3.1.3             | Sensores de obstáculos.....  | 35        |
| 3.1.4             | Sensor das balizas.....  | 36        |
| 3.1.5             | Motores/ <i>encoders</i> .....   | 37        |
| 3.1.6             | Rodas.....   | 38        |
| 3.1.7             | Alimentação.....   | 38        |
| 3.1.8             | Driver - Generic atmega8.....  | 39        |
| 3.1.9             | Balizas .....  | 39        |
| 3.1.10            | Sistema de visão <i>SmHAL</i> .....  | 41        |
| <b>3.2</b>        | <b>Software.....</b>   | <b>41</b> |
| 3.2.1             | Descrição geral .....  | 42        |
| 3.2.2             | Descrição da camada de nível superior.....   | 44        |
| 3.2.3             | Descrição da camada de nível inferior .....  | 44        |
| 3.2.4             | Controladores da velocidade dos motores .....  | 45        |
| <b>Capítulo 4</b> | <b>Odometria .....</b>   | <b>52</b> |
| <b>4.1</b>        | <b>Modelo da odometria .....</b>   | <b>52</b> |
| <b>4.2</b>        | <b>Erros sistemáticos e calibração da odometria .....</b>  | <b>55</b> |
| 4.2.1             | Calibração UMBmark.....  | 55        |
| 4.2.2             | Calibração dos erros sistemáticos usando o método UMBmark .....  | 57        |
| <b>4.3</b>        | <b>Erros aleatórios e modelo do erro da odometria.....</b>   | <b>60</b> |
| 4.3.1             | Modelo estocástico do erro da odometria.....   | 60        |
| <b>Capítulo 5</b> | <b>Localização .....</b>   | <b>65</b> |
| <b>5.1</b>        | <b>Definição do problema .....</b>   | <b>65</b> |
| <b>5.2</b>        | <b>Autolocalização através de duas balizas.....</b>  | <b>66</b> |
| 5.2.1             | Medição do ângulo entre duas balizas .....   | 66        |
| 5.2.2             | Medição da distância às balizas.....   | 67        |
| 5.2.3             | Cálculo da posição e da orientação .....   | 68        |
| <b>5.3</b>        | <b>Caracterização da incerteza de posição e de orientação, métodos estatísticos e métodos de erros limitados .....</b> | <b>71</b> |
| <b>5.4</b>        | <b>Incerteza nas medições .....</b>  | <b>73</b> |
| <b>5.5</b>        | <b>Superfície de incerteza gerada pela medição do ângulo entre duas balizas .....</b>                                  | <b>74</b> |
| <b>5.6</b>        | <b>Superfície de incerteza gerada pela medição da distância às balizas .....</b>                                       | <b>75</b> |
| 5.6.1             | Derivada parcial em relação a $D$ .....  | 76        |

|                   |   |            |
|-------------------|---|------------|
| 5.6.2             | Derivada parcial em relação a $\alpha_{0/1,1}$ .....                      | 78         |
| 5.6.3             | Derivada parcial em relação a $\alpha_{0/1,2}$ .....                      | 79         |
| 5.6.4             | Soma do valor absoluto das derivadas parciais.....                        | 82         |
| 5.6.5             | Método para determinar a distância máxima e mínima às balizas.....        | 83         |
| <b>5.7</b>        | <b>Superfícies de incerteza no cálculo da posição e orientação.....</b>   | <b>84</b>  |
| 5.7.1             | Parametrização das superfícies de incerteza no cálculo da posição.....    | 86         |
| 5.7.2             | Parametrização das superfícies de incerteza no cálculo da orientação..... | 87         |
| <b>5.8</b>        | <b>Actualização da incerteza na pose do robô.....</b>                     | <b>88</b>  |
| <b>5.9</b>        | <b>Estrutura do algoritmo do sistema de localização.....</b>              | <b>89</b>  |
| 5.9.1             | Estado “ <i>Scan</i> ”.....   | 90         |
| 5.9.2             | Estado “ <i>Process_data</i> ”.....                                       | 91         |
| 5.9.3             | Estado “ <i>Analise_robo_state</i> ”.....                                 | 96         |
| 5.9.4             | Estado “ <i>Trajectory_control</i> ”.....                                 | 96         |
| <b>5.10</b>       | <b>Resultados experimentais.....</b>                                      | <b>98</b>  |
| 5.10.1            | Ângulo entre as duas balizas.....   | 99         |
| 5.10.2            | Distância às balizas.....   | 100        |
| 5.10.3            | Superfícies de incerteza.....   | 103        |
| 5.10.4            | Resultados obtidos durante o funcionamento do sistema de localização..... | 105        |
| <b>Capítulo 6</b> | <b>Conclusões e trabalhos futuros.....</b>                                | <b>113</b> |
|                   | <b>Referências.....</b>   | <b>115</b> |
| <b>Anexo A</b>    | <b><i>Layouts</i> e esquemas.....</b>                                     | <b>117</b> |
| A.1               | <i>Layout</i> dos sensores de chão.....                                   | 117        |
| A.2               | Esquema Generic Atmega8.....  | 117        |
| A.3               | <i>Layout</i> baliza.....   | 119        |
| <b>Anexo B</b>    | <b>Trigonometria.....</b>   | <b>120</b> |
| B.1               | Lei dos senos.....  | 120        |
| B.2               | Lei das tangentes.....  | 121        |
| <b>Anexo C</b>    | <b>Matlab.....</b>  | <b>122</b> |
| C.1               | Resultados das derivadas parciais.....                                    | 122        |

## Lista de figuras

|  |    |
|--|----|
| Figura 1.1.1 Lego Mindstorms NXT.....  | 2  |
| Figura 1.1.2 Aibo .....  | 2  |
| Figura 1.1.3 Roomba .....  | 3  |
| Figura 1.1.4 Automower.....  | 3  |
| Figura 1.1.5 Irobot Verro 600.....   | 3  |
| Figura 1.1.6 Wow Wee Rovio. ....   | 4  |
| Figura 1.1.7 RP7 Medical Robot. ....   | 4  |
| Figura 1.1.8 Autolocalização a partir da medição do ângulo $\lambda_{12}$ e de $L_1$ , retirada de [1]. ....                         | 5  |
| Figura 1.1.9 Autolocalização a partir da medição do ângulo $\lambda_{12}$ e da diferença entre $L_1$ e $L_2$ , retirada de [1]. .... | 6  |
| Figura 1.1.10 Visão geral do sistema, imagem retirada de [16]. ....  | 7  |
| Figura 1.1.11 Visão geral do sistema, imagem retirada de [16]. ....  | 7  |
| Figura 2.1.1 Potencia relativa irradiada em função do comprimento de onda.....   | 11 |
| Figura 2.1.2 Distribuição da intensidade luminosa em função da orientação com o emissor. .   | 12 |
| Figura 2.1.3 Curva característica tensão corrente para diferentes intensidades de luz. ....  | 12 |
| Figura 2.1.4 Circuito básico com corrente de polarização.....  | 13 |
| Figura 2.1.5 Circuito equivalente de fototransistor. ....  | 13 |
| Figura 2.1.6 Resposta típica de um fototransistor para diferentes intensidades de luz incidente. ....                                | 14 |
| Figura 2.1.7 Montagem básica de um fototransistor em emissor comum. ....   | 14 |
| Figura 2.1.8 Montagem básica de um fototransistor em colector comum.....   | 15 |
| Figura 2.1.9 Esquema interno de um fotodetector de saída digital.....  | 15 |
| Figura 2.1.10 Princípio de funcionamento de um comutador óptico.....   | 16 |

|  |    |
|--|----|
| Figura 2.1.11 Princípio de funcionamento de um reflector óptico. ....  | 16 |
| Figura 2.1.12 Discrição funcional de um receptor de infravermelhos para controlo remoto... ..  | 17 |
| Figura 2.1.13 Diferentes distâncias com diferentes ângulos medidos por um sensor de distância baseado em infravermelhos. ....              | 18 |
| Figura 2.1.14 Curva típica da saída analógica de um sensor de distância baseado em infravermelhos, em função da distância ao objecto. .... | 19 |
| Figura 2.1.15 Exemplo de como fixar um IR no robô, para que a medida não tenha a influência da “dead zone”.....                            | 19 |
| Figura 2.2.1 Esquema simplificado do funcionamento do Sonar. ....  | 20 |
| Figura 2.2.2 Reflexão dos ultra-sons na parede .....   | 20 |
| Figura 2.2.3 Exemplo da disposição de múltiplos sonares .....  | 20 |
| Figura 2.2.4 Abertura do sonar SRF04 / 05 (esquerda) e SRF235 (direita). ....  | 21 |
| Figura 2.3.1 Representação do modelo de um motor DC com caixa redutora com um ganho $K_r$ e uma carga de inércia $J$ . ....                | 22 |
| Figura 2.3.2 Esquema do hardware. ....   | 23 |
| Figura 2.3.3 Comparação entre a velocidade angular medida e estimada, após o ajuste de $K$ . ....  | 26 |
| Figura 2.3.4 Queda de tensão na resistencia $R$ para diferentes PWM's. ....  | 27 |
| Figura 2.3.5 Comparação entre $W_a$ medido e $W_a$ estimado pelo modelo, quando é aplicado um degrau de PWM com o valor de 155. ....       | 28 |
| Figura 2.3.6 Comparação entre $W_a$ medido e $W_a$ estimado pelo modelo quando se comuta o PWM de 78 para 156. ....                        | 28 |
| Figura 3.1.1 Robô desenvolvido .....   | 32 |
| Figura 3.1.2 Diagrama de blocos do hardware desenvolvido. ....   | 32 |
| Figura 3.1.3 Esquema da disposição do hardware no robô.....  | 33 |
| Figura 3.1.4 Esquema eléctrico dos sensores de chão. ....  | 34 |
| Figura 3.1.5 Sensor de chão.....   | 35 |
| Figura 3.1.6 Sonar SRF02 .....   | 35 |
| Figura 3.1.7 Receptor de infravermelhos para controlo remoto TSOP34836.....  | 36 |
| Figura 3.1.8 Dimensões do sensor das balizas.....  | 36 |
| Figura 3.1.9 Detalhe do sensor das balizas no robô. ....   | 37 |
| Figura 3.1.10 Motor/caixa redutora e encoder EMG30. ....   | 38 |
| Figura 3.1.11 Roda do robô. ....   | 38 |

|   |    |
|---|----|
| Figura 3.1.12 Bateria do robô. ....   | 39 |
| Figura 3.1.13 Driver - Generic atmega8. ....  | 39 |
| Figura 3.1.14 Balizas. ....   | 40 |
| Figura 3.1.15 Detalhe de um das balizas. ....   | 40 |
| Figura 3.1.16 Esquema de uma baliza. ....   | 41 |
| Figura 3.2.1 Descrição geral do software desenvolvido. ....   | 43 |
| Figura 3.2.2 Máquina de estados do robô. ....   | 44 |
| Figura 3.2.3 Estrutura hierárquica da camada de processamento inferior. ....  | 45 |
| Figura 3.2.4 Esquema do sistema de controlo da velocidade dos motores. ....   | 45 |
| Figura 3.2.5 Resposta ao degrau da velocidade das rodas. ....   | 46 |
| Figura 3.2.6 Resultados da aproximação a um sistema de primeira ordem. ....   | 47 |
| Figura 3.2.7 Diagrama de blocos do sistema controlado. ....   | 47 |
| Figura 3.2.8 Sistema simulado. ....   | 48 |
| Figura 3.2.9 Resposta ao degrau simulada. ....  | 48 |
| Figura 3.2.10 Sistema simulado com não linearidades. ....   | 49 |
| Figura 3.2.11 Resposta impulsional para tempo de estabelecimento de 0.25 s simulada com não linearidades. ....                      | 49 |
| Figura 3.2.12 Resposta ao degrau para tempo de estabelecimento de 0.75 s simulada com não linearidades. ....                        | 50 |
| Figura 3.2.13 Resposta impulsional final simulada com não linearidades. ....  | 50 |
| Figura 3.2.14 Resposta ao degrau da velocidade de uma das rodas do robô. ....   | 51 |
| Figura 4.1.1 Robô diferencial. ....   | 53 |
| Figura 4.1.2 Discretização por diferenças centradas. ....   | 54 |
| Figura 4.2.1 Efeito de $E_d$ durante o percurso quadrangular no sentido CPR (cima), e no sentido PR (baixo), retirada de [10]. .... | 56 |
| Figura 4.2.2 Efeito de $E_b$ durante o percurso quadrangular no sentido CPR (cima), e no sentido PR (baixo), retirada de [10]. .... | 57 |
| Figura 4.2.3 Erro na posição após a trajectória quadrangular bidireccional. ....  | 58 |
| Figura 4.2.4 Erro na posição após a trajectória quadrangular bidireccional após calibração da odometria. ....                       | 59 |
| Figura 4.3.1 Divisão do deslocamento efectuado em duas rotações e uma translação. ....  | 60 |
| Figura 5.1.1 Definição do problema. ....  | 66 |



|   |    |
|---|----|
| Figura 5.2.1 Medição do ângulo entre as duas balizas. ....  | 67 |
| Figura 5.2.2 Medição da distância às balizas. ....  | 68 |
| Figura 5.2.3 Determinação da posição através da intersecção de Circ2 com Circ0. ....  | 69 |
| Figura 5.2.4 Determinação da posição através da intersecção de Circ2 com Circ1. ....  | 69 |
| Figura 5.2.5 Resolução da ambiguidade gerada pela intersecção do Circ2 com Circ0 através da restrição do espaço de navegação. ....                                | 70 |
| Figura 5.2.6 Resolução da ambiguidade gerada pela intersecção do Circ2 com Circ0 através do Circ1. ....   | 70 |
| Figura 5.2.7 Cálculo da orientação do robô, $\theta$ . ....   | 71 |
| Figura 5.3.1 Caracterização da incerteza da posição por J. S. Esteves et al (2006). ....  | 72 |
| Figura 5.3.2 Caracterização da incerteza da orientação por J. S. Esteves et al (2006). ....   | 73 |
| Figura 5.5.1 Superfície de incerteza gerada pela incerteza de $\beta$ . ....  | 74 |
| Figura 5.6.1 Superfície de incerteza gerada pela incerteza de $R_{circ0}$ . ....  | 75 |
| Figura 5.6.2 Medida da distância às balizas. ....   | 76 |
| Figura 5.6.3 Derivada parcial da expressão do cálculo de $R_{cir0/1}$ em relação a $D$ . ....   | 77 |
| Figura 5.6.4 Exemplo da evolução de $R_{circ0/1}$ em relação a $D$ . ....   | 77 |
| Figura 5.6.5 Derivada parcial da expressão do cálculo de $R_{cir0/1}$ em relação a $\alpha_{0/1,1}$ ( $D=1$ m). ....  | 78 |
| Figura 5.6.6 Exemplo da evolução de $R_{circ0/1}$ em relação a $\alpha_{0/1,1}$ . ....  | 79 |
| Figura 5.6.7 Derivada parcial da expressão do cálculo de $R_{cir0/1}$ em relação a $\alpha_{0/1,2}$ ( $D=1$ m). ....  | 80 |
| Figura 5.6.8 Evolução de $R_{circ0/1}$ em função de $\alpha_{0/1,2}$ para $\alpha_{0/1,3}$ menor que $90^\circ$ . ....  | 81 |
| Figura 5.6.9 Evolução de $R_{circ0/1}$ em função de $\alpha_{0/1,2}$ para $\alpha_{0/1,3}$ maior que $90^\circ$ . ....  | 81 |
| Figura 5.6.10 Soma do valor absoluto das derivadas parciais de $R_{circ0/1}$ em relação a $\alpha_{0/1,1}$ , $\alpha_{0/1,2}$ e $D$ para um $D$ igual a 2 m. .... | 82 |
| Figura 5.6.11 Exemplo de um deslocamento em que se obtêm uma boa medida da distância às balizas ( $R_{circ0/1}$ ). ....   | 83 |
| Figura 5.7.1 Exemplo de superfície de incerteza na posição quando considerada a distância à baliza 0. ....  | 85 |
| Figura 5.7.2 Exemplo de superfície de incerteza na posição quando considerada a distância à baliza 1. ....  | 85 |
| Figura 5.7.3 Parametrização das superfícies de incerteza no cálculo da posição considerando a distância à baliza 0. ....  | 86 |
| Figura 5.7.4 Parametrização das superfícies de incerteza no cálculo da posição considerando a distância à baliza 1. ....  | 87 |

|   |     |
|---|-----|
| Figura 5.7.5 Parametrização do erro de orientação .....   | 88  |
| Figura 5.8.1 Incerteza da pose do robô.....   | 88  |
| Figura 5.9.1 Diagrama de estados do processo de localização.....  | 90  |
| Figura 5.9.2 Exemplo dos $x_{max}/min_{1/2}$ e $y_{max}/min_{1/2}$ em relação à baliza 0. ....  | 92  |
| Figura 5.9.3 Solução da ambiguidade recorrendo às restrições do espaço de navegação. ....   | 94  |
| Figura 5.9.4 Solução da ambiguidade recorrendo à medida da distância da outra baliza.....   | 95  |
| Figura 5.9.5 Solução da ambiguidade recorrendo à medida actual da pose do robô.....   | 95  |
| Figura 5.9.6 Densidade das linhas de posição, a verde Circ0, a azul Circ1 e a vermelho<br>Circ2. ....                                     | 97  |
| Figura 5.9.7 Máquina de estados da sequência de movimentos quando o robô quando está<br>com grande incerteza na pose (terceiro modo)..... | 98  |
| Figura 5.10.1 Circ2_max e Circ2_min obtidos na posição $x=100$ cm e $y=50$ cm<br>(aproximadamente).....                                   | 99  |
| Figura 5.10.2 Circ2_max e Circ2_min obtidos na posição $x=0$ cm e $y=200$ cm<br>(aproximadamente).....                                    | 100 |
| Figura 5.10.3 Circ2_max e Circ2_min obtidos na posição $x=0$ cm e $y=50$ cm<br>(aproximadamente).....                                     | 100 |
| Figura 5.10.4 Circ0_max e Circ0_min obtidos para um deslocamento de P1 ( $x=-140$ e $y=50$ )<br>a P2 ( $x=110$ e $y=170$ ). ....          | 101 |
| Figura 5.10.5 Circ0_max e Circ0_min obtidos para um deslocamento de P1 ( $x=110$ cm e<br>$y=50$ cm) a P2 ( $x=-140$ cm e $y=50$ cm). .... | 102 |
| Figura 5.10.6 Circ0_max e Circ0_min obtidos para um deslocamento de P1 ( $x=0$ cm e<br>$y=200$ cm) a P2 ( $x=-0$ cm e $y=50$ cm). ....    | 102 |
| Figura 5.10.7 Circunferências máximas e mínimas geradas com o deslocamento de P1<br>( $x=0$ , $y=100$ ) a P2 ( $x=100$ , $y=100$ ).....   | 103 |
| Figura 5.10.8 Circunferências máximas e mínimas geradas com o deslocamento de P1<br>( $x=0$ , $y=50$ ) a P2 ( $x=100$ , $y=50$ ). ....    | 104 |
| Figura 5.10.9 Xmin, Xmax, Ymin e Ymax calculados com o deslocamento de P1 ( $x=0$ ,<br>$y=100$ ) a P2 ( $x=100$ , $y=100$ ).....          | 104 |
| Figura 5.10.10 Xmin, Xmax, Ymin e Ymax calculados com o deslocamento de P1 ( $x=0$ ,<br>$y=50$ ) a P2 ( $x=100$ , $y=50$ ).....           | 105 |
| Figura 5.10.11 Representação da pose e da sua incerteza na interface gráfica. ....  | 106 |
| Figura 5.10.12 Início do processo de localização.....   | 106 |
| Figura 5.10.13 Após o deslocamento o robô obtêm uma medida da pose válida terminando<br>assim o processo de localização. ....             | 107 |
| Figura 5.10.14 Superfície inicial da estimativa da localização.....   | 108 |

|  |     |
|--|-----|
| Figura 5.10.15 Medidas obtidas após o robô afastar-se das balizas. ....  | 109 |
| Figura 5.10.16 Medidas obtidas após o robô aproximar-se da baliza 0.....   | 110 |
| Figura 5.10.17 Medidas após o robô mover-se numa direção perpendicular à sua<br>orientação relativa com a baliza 0. .... | 110 |
| Figura 5.10.18 Medida obtida após o robô mover-se para a posição P2 correspondente à<br>localização P03. ....            | 111 |

# Abreviaturas e Símbolos

## Abreviaturas

**FEUP** – Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto

**DEEC** – Departamento de Engenharia Electrotécnica e de Computadores

**IR** – Infravermelhos

**CPR** – Sentido contraria dos ponteiros do relógio

**PR** – Sentido dos ponteiros do relógio

## Símbolos

| <b>Símbolo</b>          | <b>Significado</b>  |
|-------------------------|---|
| P1                      | Posição anterior  |
| P2                      | Posição actual  |
| $\beta$                 | Ângulo entre duas as balizas                              |
| $\alpha_{0/1,1}$        | Ângulo entre a baliza e P2                                |
| $\alpha_{0/1,2}$        | Ângulo entre a baliza e P1                                |
| d                       | Distância entre P1 e P2                                   |
| $\Delta\beta$           | Erro do ângulo entre duas balizas                         |
| $\Delta\alpha_{0/1,1}$  | Erro do ângulo entre a baliza e P2                        |
| $\Delta\alpha_{0/1,2}$  | Erro do ângulo entre a baliza e P1                        |
| $\Delta d$              | Erro da distância entre Posição anterior e posição actual |
| $\tau$                  | Constante de tempo  |
| $\omega_a$              | Velocidade angular  |
| $V_a$                   | Tensão na armadura  |
| $I_a$                   | Corrente na armadura                                      |
| $U_e$                   | Deslocamento linear da roda esquerda                      |
| $U_d$                   | Deslocamento linear da roda direita                       |
| $D_e$                   | Diâmetro da roda esquerda                                 |
| $D_d$                   | Diâmetro da roda direita                                  |
| $R_{\text{circ}2}$      | Linha de posição gerada por $\beta$                       |
| $R_{\text{circ}0}$      | Distância à baliza 0                                      |
| $R_{\text{circ}0}$      | Linha de posição gerada por $R_{\text{circ}0}$            |
| $R_{\text{circ}0\_max}$ | Distância máxima à baliza 0                               |
| $R_{\text{circ}0\_min}$ | Distância mínima à baliza 0                               |
| $R_{\text{circ}0\_max}$ | Linha de posição gerada por $R_{\text{circ}0\_max}$       |
| $R_{\text{circ}0\_min}$ | Linha de posição gerada por $R_{\text{circ}0\_min}$       |
| $R_{\text{circ}1}$      | Distância à baliza 1                                      |
| $R_{\text{circ}1}$      | Linha de posição gerada por $R_{\text{circ}1}$            |
| $R_{\text{circ}1\_max}$ | Distância máxima à baliza 1                               |

|                         |  |
|-------------------------|--|
| $R_{\text{circ1\_min}}$ | Distância mínima à baliza 1  |
| $\text{Circ1\_max}$     | Linha de posição gerada por $R_{\text{circ1\_max}}$  |
| $\text{Circ1\_min}$     | Linha de posição gerada por $R_{\text{circ1\_min}}$  |
| $D_b$                   | Distância entre as duas balizas  |
| $X$                     | Valor da posição na coordenada x medida pelo robô  |
| $Y$                     | Valor da posição na coordenada y medida pelo robô  |
| $\theta$                | Valor da orientação medida pelo robô   |
| $\Delta x$              | Erro máximo de x   |
| $\Delta y$              | Erro máximo de y   |
| $\Delta \theta$         | Erro máximo de $\theta$  |
| $X_{\text{max}}$        | Valor máximo na coordenada x de uma superfície de incerteza                                |
| $X_{\text{min}}$        | Valor mínimo na coordenada x de uma superfície de incerteza                                |
| $Y_{\text{max}}$        | Valor máximo na coordenada y de uma superfície de incerteza                                |
| $Y_{\text{min}}$        | Valor mínimo na coordenada y de uma superfície de incerteza                                |
| $\Delta x_0$            | Erro máximo na coordenada x medido pelo sistema de localização considerando $\text{Circ0}$ |
| $\Delta x_1$            | Erro máximo na coordenada x medido pelo sistema de localização considerando $\text{Circ1}$ |
| $\Delta y_0$            | Erro máximo na coordenada y medido pelo sistema de localização considerando $\text{Circ0}$ |
| $\Delta y_1$            | Erro máximo na coordenada y medido pelo sistema de localização considerando $\text{Circ1}$ |
| $\Delta \theta_0$       | Erro máximo em $\theta$ medido pelo sistema de localização considerando a baliza 0         |
| $\Delta \theta_1$       | Erro máximo em $\theta$ medido pelo sistema de localização considerando a baliza 1         |



# Capítulo 1

## Introdução

A utilização de Robôs Móveis em campanhas publicitárias, de promoção de produtos, em entretenimento, em transporte de pequenos volumes tem sido alvo de diversas abordagens que não tiveram mais sucesso e um maior número de aplicações principalmente devido ao elevado custo do Robô em si e também a uma manutenção e *setup* demasiado complexos e onerosos.

O desenvolvimento de uma plataforma Robótica robusta e simultaneamente de baixo custo, com manutenção e instalação/utilização simples é um desafio e um objectivo difícil de atingir.

Neste trabalho pretende-se estudar e comparar diferentes tecnologias de baixo custo, no que respeita à motorização, aos sensores de obstáculos e às balizas de localização baseadas em infravermelhos.

Este trabalho é do interesse e será desenvolvido em colaboração com a empresa Clever House - Sistemas Inteligentes, Lda ([www.cleverhouse.pt](http://www.cleverhouse.pt)), representante em Portugal dos produtos da empresa Americana IROBOT ([www.irobot.com](http://www.irobot.com)), que, por sua vez, é proprietária de alguns dos Robôs Móveis com mais sucesso a nível mundial (Roomba, SUGV, PackBot).

### 1.1 Estado da Arte

Tem-se verificado nos últimos anos uma crescente utilização de robôs tanto a nível industrial, como ao nível dos serviços. No que respeita a estes dois níveis, os factores que determinam o sucesso de determinada aplicação são diferentes. No primeiro nível (industrial) a eficiência é um factor determinante, enquanto que ao nível dos serviços, são importantes outros factores para além da eficiência, como o preço, simplicidade de utilização, design apelativo e robustez (isto porque o ambiente em que estes robôs vão operar são menos controlados do que em ambientes industriais). Estes últimos, influenciam de forma directa o sucesso comercial de qualquer robô designado para a prestação de serviços.

Na secção 1.1.1 apresenta-se um conjunto de robôs que estão disponíveis no mercado. Na secção 1.1.2 serão abordadas algumas soluções direccionadas para aplicações robóticas de baixo custo.

### 1.1.1 Aplicações comerciais baseadas em robótica móvel

Neste momento encontramos um leque alargado de soluções robóticas para aplicações diversas. Nas próximas secções poderemos ver algumas ofertas disponíveis no mercado de diversos tipos de robôs: robôs educacionais, para entretenimento, robôs para realizar tarefas domésticas, navegação remota doméstica, e robôs de apoio à saúde.

#### 1.1.1.1 Robôs educacionais e para entretenimento

São fundamentalmente brinquedos com um conjunto de sensores e actuadores que lhes permitem reagir a estímulos externos. Além da vertente do entretenimento, possuem também o seu lado pedagógico, pois permitem aos seus utilizadores configurar a seu gosto tanto o *hardware*, como o *software*. Temos o exemplo do Lego Mindstorms NXT, Figura 1.1.1, Aibo Figura 1.1.2.



Figura 1.1.1 Lego Mindstorms NXT



Figura 1.1.2 Aibo

#### 1.1.1.2 Robôs para realizar tarefas domésticas



Estes robôs permitem realizar tarefas domésticas de forma autónoma, isto é, com mínimo de intervenção humana.

Temos o exemplo do Roomba (Figura 1.1.3), um pequeno robô móvel concebido para aspirar o chão de habitações domésticas. Este robô tem sido um sucesso comercial crescente, graças ao seu relativo baixo custo e simplicidade de utilização.



Figura 1.1.3 Roomba

Outro caso interessante é o do Automower, um robô concebido para cortar grandes áreas de relva, praticamente sem intervenção humana.



Figura 1.1.4 Automower

Encontramos também robôs concebidos para limpar piscinas como é o caso do Irobot Verro 600 (Figura 1.1.5).



Figura 1.1.5 Irobot Verro 600.

### 1.1.1.3 Robôs para navegação remota doméstica

Existem também robôs móveis que podem ser operados via Web, equipados com câmaras e microfones, que permitem ao seu utilizador monitorizar, a partir da internet e em qualquer parte do mundo, a sua casa. Temos o exemplo do Wow Wee Rovio (Figura 1.1.6), que fornece imagem e som e pode ser controlado através da internet. Além disso, possui um sistema de localização que lhe permite navegar de forma autónoma dentro de uma habitação. Esse sistema de localização consiste num dispositivo (baliza) que projecta dois sinais de infravermelhos no tecto. Através de uma câmara de infravermelhos equipada no topo do robô, este detecta esses sinais conseguindo, assim, medir a sua posição.



Figura 1.1.6 Wow Wee Rovio.

### 1.1.1.4 Robôs de apoio à saúde

Também na área da saúde têm surgido aplicações baseadas em robótica móvel, como é o caso do RP7 Medical Robot (Figura 1.1.7). Este robô foi concebido para navegar no interior dos hospitais, controlado por um médico remotamente. Este robô possui um sistema de teleconferência, possibilitando a interacção à distância do médico com os pacientes e permitindo assim fazer um diagnóstico quase como se estivesse no local.



Figura 1.1.7 RP7 Medical Robot.

### 1.1.2 Localização em aplicações robóticas de baixo custo

A capacidade de se localizar é uma característica inerente a qualquer robô móvel autônomo e existem vários estudos direcionados para esta área, sendo que importa aqui referir alguns estudos sobre sistemas de localização direcionados para robótica móvel de baixo custo.

J. S. Esteves et al (2006), [1] apresenta o Algoritmo Generalizado de Triangulação Geométrica. Este algoritmo permite a eliminação das limitações específicas do Algoritmo de Triangulação Geométrica de forma a conservar apenas as limitações que são comuns a qualquer algoritmo de autolocalização absoluta por triangulação com três balizas. Neste âmbito, é desenvolvido um método para caracterizar as incertezas na medição da posição e da orientação através da triangulação com três balizas. São também sugeridos dois novos métodos que permitem a autolocalização recorrendo apenas a duas balizas, sendo que um deles consiste na medição simultânea do ângulo formado pelos segmentos que unem o robô às balizas ( $\lambda_{12}$ ) e a distância a uma delas,  $L_1$  ou  $L_2$ , (Figura 1.1.8); o outro método consiste na medição simultânea do ângulo formado pelos segmentos que unem o robô às balizas ( $\lambda_{12}$ ) e a diferença das distâncias do robô a cada uma dessas balizas,  $L_1-L_2$ , (Figura 1.1.9).

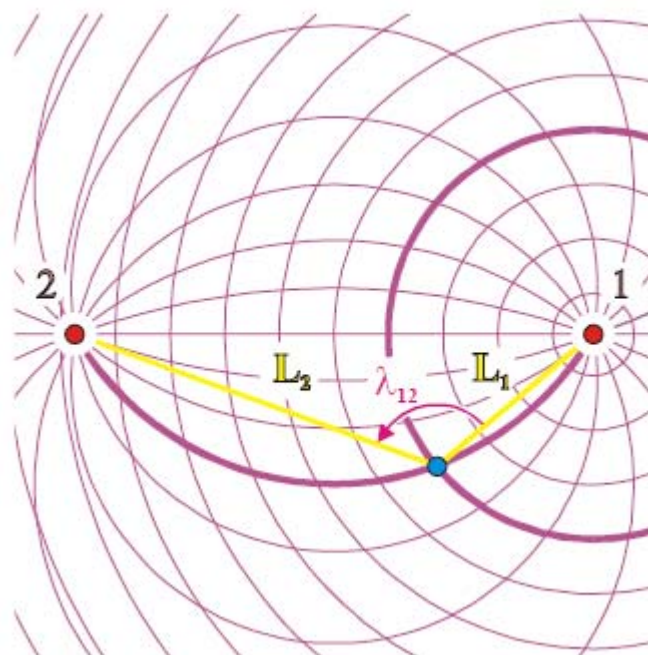


Figura 1.1.8 Autolocalização a partir da medição do ângulo  $\lambda_{12}$  e de  $L_1$ , retirada de [1].

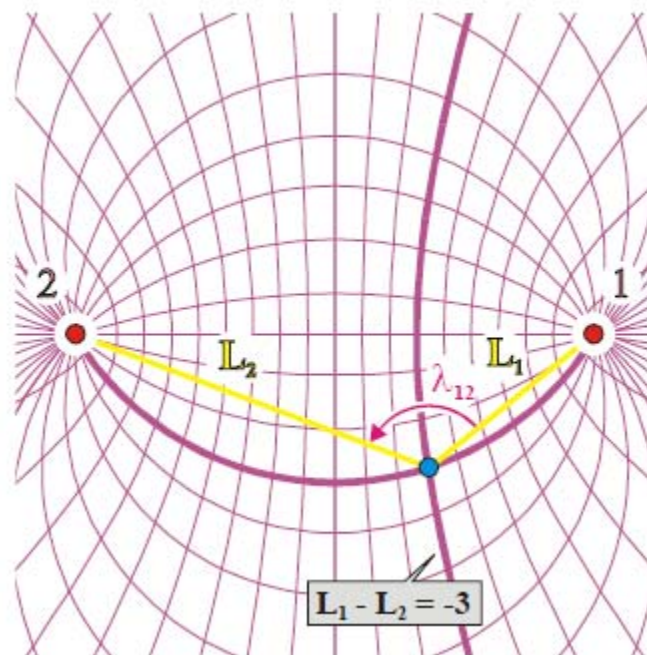


Figura 1.1.9 Autocalibração a partir da medição do ângulo  $\lambda_{12}$  e da diferença entre  $L_1$  e  $L_2$ , retirada de [1].

A. Sousa et al (2005), [13] propõem o uso de balizas coloridas, combinadas com cálculo geométrico e odometria, cuja robustez é, na prática, posta em causa se o ambiente não for bem tratado. Isto porque, as balizas coloridas são facilmente confundidas e misturadas com outros objectos coloridos nas imediações da mesma. Assim, quanto maior for a área de funcionamento do robô e menor a quantidade de balizas disponíveis, menor a viabilidade da utilização de balizas coloridas na autocalibração. Além disso, esta técnica implica o recurso a processamento de imagem, o que impossibilita o recurso a plataformas computacionais de baixo custo.

S. B. Lazarus et al (2008), [14] e C. Schroeter (2004), [15] estudam a localização baseada em correspondência com mapas, recorrendo a sensorização de baixo custo. O primeiro utiliza a transformada de Hough para reconhecimento de padrões e associação de dados; e ambos usam algoritmos baseados no filtro de Kalman estendido, para obter a localização do robô. Localização baseada em correspondência com mapas além de pesada a nível computacional, apenas se adequa a ambientes bem estruturados.

S. Hernández e al (2003), [16] desenvolvem um sistema de autocalibração que recorre apenas a uma baliza. A baliza é constituída por um *laser* rotativo e, por sua vez, o robô possui um sensor baseado num *array* de fotodetectores montados ao longo de um cilindro (Figura 1.1.10). A partir do tempo de intercepção do laser com o receptor, é calculada a distância a que este se encontra da baliza. Em relação ao ângulo a que o robô está em relação à baliza, este é obtido pela medição do tempo que decorre entre a emissão de um sinal rádio de sincronização e a altura em que o receptor detecta a baliza.

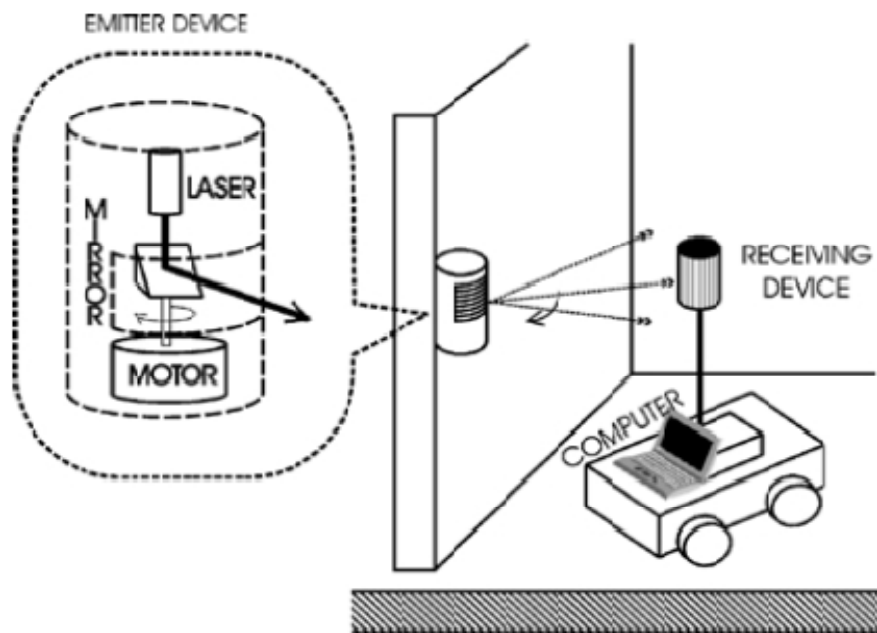


Figura 1.1.10 Visão geral do sistema, imagem retirada de [16].

Já [D. Wehdena et al \(2006\), \[17\]](#) apresenta um método de localização remota baseado na medição do tempo de propagação de sinais transmitidos entre o robô e cada baliza. O robô emite simultaneamente um sinal de rádio e um sinal de ultra-sons, sendo que cada baliza mede o tempo que decorre entre a detecção do sinal de rádio e o sinal sonoro. Considerando a velocidade de propagação dos sinais de rádio desprezáveis face aos sinais sonoros e a velocidade de propagação do som, cada baliza calcula a sua distância ao robô. Cruzando a informação medida por cada baliza é medida posição do robô.

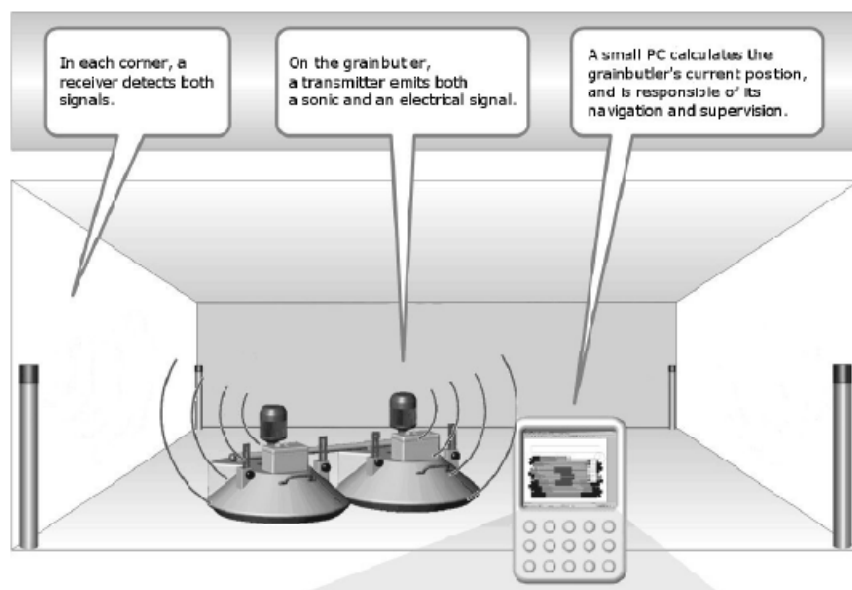


Figura 1.1.11 Visão geral do sistema, imagem retirada de [16].

## 1.2 Requisitos do robô e enquadramento do projecto

O presente trabalho foi desenvolvido no âmbito de um projecto designado por *Clever Robot*. Este projecto tem como objectivo o desenvolvimento um robô para fins publicitários, e para atingir este objectivo o robô deve obedecer aos seguintes requisitos:

- Plataforma móvel, autónoma, de baixo custo e de simples utilização.
- Evitar colisões e detectar a presença de degraus.
- Possuir um sistema de localização que permita a navegação dentro de uma área limitada, definida pelo utilizador. Tipicamente, um quadrado com 3 a 4 metros de lado.

Pretende-se, com este trabalho, o estudo e implementação de técnicas de sensorização/localização que permitam desenvolver uma plataforma robótica de baixo custo e de simples utilização, de forma a cumprir os requisitos acima enunciados, para que esta possa ter valor comercial.

Ao nível da localização, esta baseia-se na odometria e na detecção de balizas, pois “a localização absoluta com balizas é a solução mais adequada ao desenvolvimento de um sistema fiável, exacto e de custo relativamente baixo para a localização contínua em tempo real de robôs móveis que navegam, com velocidades de alguns metros por segundo, em ambientes (exteriores ou interiores) quase-estruturados e não muito obstruídos” [1]. Devemos, contudo, no presente estudo ter em consideração que o robô pretendido deva ser de simples utilização, ou seja, não se pretende que o utilizador final tenha de instalar várias balizas em diversas posições, nem que tenha de configurar o robô com a sua posição. Por este motivo, o sistema de localização é baseado num único dispositivo externo que incorpora duas balizas e define a área de navegação do robô.

## 1.3 Estrutura do documento

No Capítulo 1 introduz-se e contextualizamos o trabalho realizado, apresentando, assim, o estado da arte e os requisitos do projecto denominado de *Clever Robot*.

No Capítulo 2 aborda-se o estudo de sensores de baixo custo com interesse aplicacional no presente trabalho. São referenciados os sensores baseados em infravermelhos e ultra-sons, e ainda um método de medir indirectamente a velocidade de um motor DC de ímanes permanentes, de forma a evitar o recurso a *encoders*.

No Capítulo 3 descreve-se a implementação do robô desenvolvido neste trabalho, sendo também descritos os vários componentes do *hardware* e do *software*.

No Capítulo 4 trata do sistema de localização relativa. Aqui aborda-se a questão dos erros sistemáticos e aleatórios; é descrito um método de calibração; e implementado um modelo estocástico do erro da odometria.

O Capítulo 5 apresenta o sistema de localização desenvolvido.

Finalmente, no capítulo 6 apresentam-se as conclusões retiradas no desenvolvimento do presente trabalho e, tendo em conta o que foi apreendido, ainda remetemos para alguma propostas a realizar no futuro.

# Capítulo 2

## Sensorização

Na robótica móvel há necessidade de medir as características do ambiente envolvente usando, preferencialmente, sensores sem contacto com os objectos presentes.

Neste capítulo será apresentado o estudo de sensores de baixo custo com interesse no presente trabalho. O objectivo deste estudo é apresentar várias opções existentes no domínio da sensorização de baixo custo, as propriedades gerais de cada dispositivo, bem como as características técnicas apresentadas pelos fabricantes que permitem definir qual o dispositivo que mais se adequa para medir as variáveis ambientais pretendidas.

Apresenta-se ainda o estudo e implementação de um método para obter uma estimativa aproximada da velocidade de um motor DC de forma indirecta, utilizando sensores mais económicos que os normalmente utilizados *encoders*.

Na secção 2.1 serão apresentados dispositivos baseados em infravermelhos e na secção 2.2 serão apresentados dispositivos baseados em ultra-sons.

### 2.1 Sensores baseados em infravermelhos

Sensores baseados em infravermelhos fazem parte do conjunto de dispositivos optoelectrónicos. Dispositivos optoelectrónicos são dispositivos electrónicos que interagem com a luz, sendo esta visível ou não. Esta interacção tanto pode ser no sentido de converter energia luminosa em energia eléctrica, como no inverso, de energia eléctrica para luminosa.

Na secção 2.1.1 serão apresentados dispositivos básicos baseados em infravermelhos, ou seja os emissores de infravermelhos e seus detectores (fotodíodo e fototransistor). Será apresentado o seu princípio de operação e as suas propriedades técnicas tomadas em conta na selecção entre as várias soluções apresentadas pelos fabricantes. Por fim, serão comparados os fotodíodos e os fototransistores. Nas secções seguintes serão apresentados dispositivos igualmente baseados em infravermelhos compostos pelos dispositivos elementares. São estes os fotodetectores de saída digital,



comutadores ópticos, reflectores ópticos, receptor de infravermelhos para controlo remoto e sensores de distância baseados em infravermelhos.

## 2.1.1 Dispositivos básicos

### 2.1.1.1 Díodos emissores de infravermelhos

Díodos emissores de infravermelhos, são leds que emitem radiação na gama do infravermelhos quando directamente polarizado.

Uma das principais propriedades a considerar num emissor deste tipo é o comprimento de onda predominante no espectro de emissão, para que seja compatível com o seu par sensor. Na Figura 2.1.1 mostra-se um exemplo de como está distribuído o espectro de emissão.

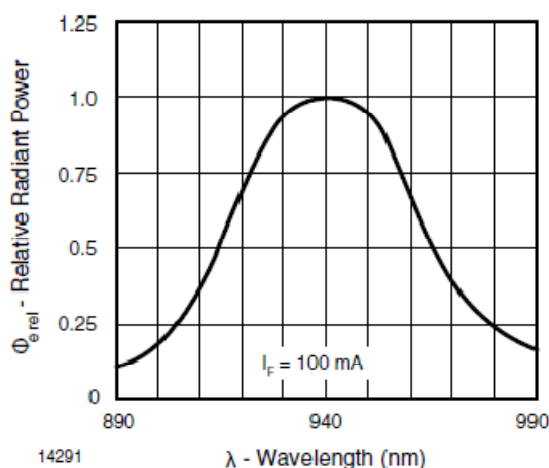


Figura 2.1.1 Potencia relativa irradiada em função do comprimento de onda.

Outras características consideradas na selecção deste tipo de dispositivo foram a intensidade de luz emitida por ângulo sólido, e a abertura do feixe luminoso. Estes dados são bons indicadores da qualidade deste tipo de emissor. A intensidade de luz emitida por ângulo sólido ( $I_e$ ) diz respeito à intensidade luminosa emitida pelo led para uma determinada corrente de polarização (normalmente 100 mA). A abertura do feixe indica como a potência luminosa emitida está distribuída espacialmente em relação à orientação do led. Normalmente, o valor apresentado corresponde ao ângulo para o qual a intensidade é metade do valor de  $I_e$ . Na Figura 2.1.2 é representado um exemplo da distribuição espacial da intensidade luminosa de um led emissor de infravermelhos.

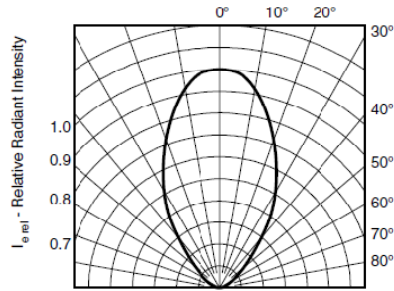


Figura 2.1.2 Distribuição da intensidade luminosa em função da orientação com o emissor.

### 2.1.1.2 Fotodíodo

Um fotodíodo é um fotodetector capaz de converter energia luminosa em energia eléctrica, é similar aos tradicionais díodos mas devido ao seu encapsulamento permite que luz atinja a sua zona activa. A luz absorvida é convertida numa corrente eléctrica designada por fotocorrente proporcional à intensidade da radiação luminosa incidente. Na Figura 2.1.3 está representada a resposta típica da corrente em função da tensão de um fotodíodo para diferentes intensidades de luz. Como se pode observar a resposta de um fotodíodo é similar à de um díodo somada com a fotocorrente que é proporcional à intensidade luminosa a que o dispositivo está exposto.

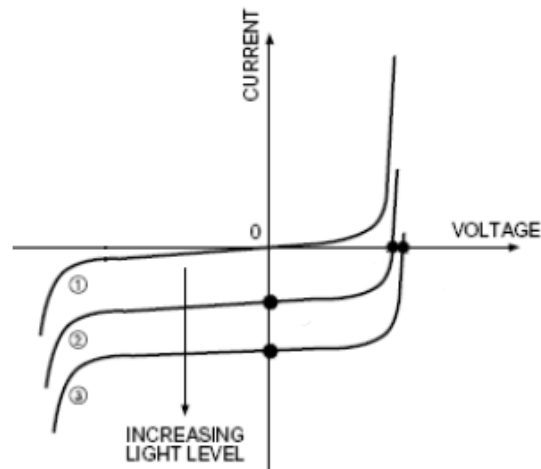


Figura 2.1.3 Curva característica tensão corrente para diferentes intensidades de luz.

Na Figura 2.1.4 apresenta-se um circuito básico de um fotodíodo com corrente de polarização inversa. A radiação luminosa  $E_v$  gera uma corrente  $I_p$  que por sua vez vai gerar uma queda tensão  $V_{out}$  na resistência  $R_L$ . Esta tensão terá de ser necessariamente amplificada de forma a atingir níveis adequados para serem adquiridos por um conversor A/D.

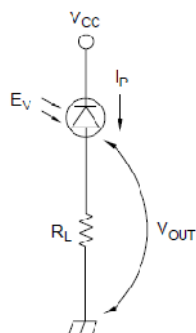


Figura 2.1.4 Circuito básico com corrente de polarização.

Propriedades consideradas na análise deste dispositivo foram:

- O comprimento de onda para qual o sensor é mais sensível;
- A sua sensibilidade que relaciona a potência da radiação incidente com a fotocorrente gerada. Tem como unidades ampere/watt (A/W) e é referente à radiação luminosa para o qual o fotodíodo é mais sensível;
- A corrente no escuro é a corrente gerada pelo sensor mesmo na ausência de luz e está presente na resposta do sensor de forma aditiva (offset);
- A potência equivalente de ruído (NEP) que diz respeito à potência mínima de radiação incidente para gerar fotocorrente;
- O ângulo de abertura do sensor, corresponde ao ângulo de incidência para o qual a sensibilidade do sensor é metade do seu valor máximo.

### 2.1.1.3 Fototransistor

Este dispositivo pode ser encarado como um fotodíodo em que a fotocorrente gerada na sua saída alimenta a base de um convencional transistor de sinal [2] Figura 2.1.5. Esta configuração confere assim ao dispositivo um ganho interno de, tipicamente, 100 a 1500.

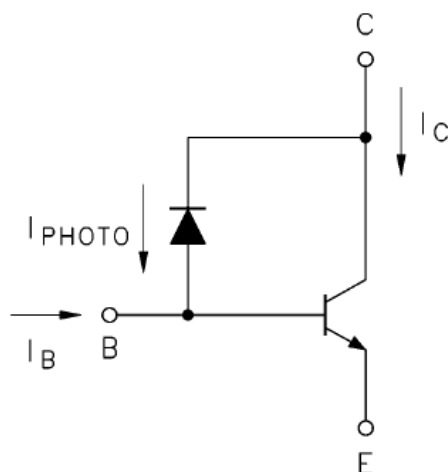


Figura 2.1.5 Circuito equivalente de fototransistor.

Na Figura 2.1.6 é apresentado um exemplo da resposta da corrente no colector em função da tensão colector emissor para várias intensidades de luz. Como se pode

observar esta resposta é semelhante à resposta de um transistor de sinal, com a diferença que a corrente na base é substituída pela intensidade da luz incidente no sensor.

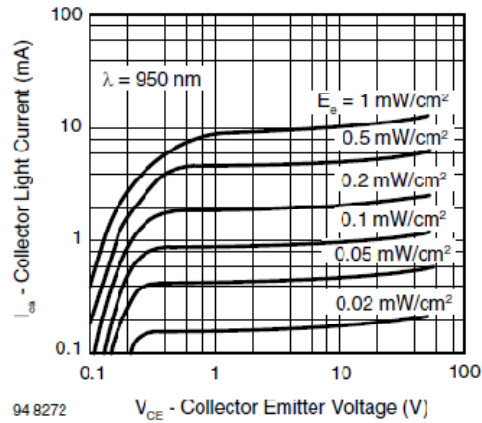


Figura 2.1.6 Resposta típica de um fototransistor para diferentes intensidades de luz incidente.

Na Figura 2.1.7 e Figura 2.1.8 estão representadas duas montagens básicas de um fototransistor em emissor comum e coletor comum, respectivamente. Graças ao ganho intrínseco a estes dispositivos não é necessária electrónica adicional para amplificar o sinal. Através dos valores de  $R_c$  e  $R_e$  é possível ter uma saída digital ou analógica, dependendo da zona de funcionamento do transistor em que se está a operar (na zona linear ou de saturação).

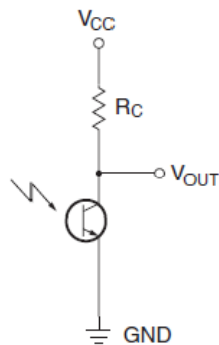


Figura 2.1.7 Montagem básica de um fototransistor em emissor comum.

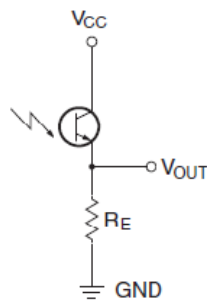


Figura 2.1.8 Montagem básica de um fototransistor em colector comum.

As características técnicas consideradas para a diferenciação das várias soluções apresentadas pelos fabricantes foram:

- A quantidade de corrente no colector gerada pela luz incidente com uma determinada intensidade e comprimento de onda;
- A abertura do sensor;
- A corrente no escuro; e
- O comprimento de onda para o qual o sensor é mais sensível.

#### 2.1.1.4 Comparação entre fotodíodo e fototransistor

Os fototransistores têm um ganho superior aos fotodíodos, a resposta de um fotodíodo necessita de ser amplificada. Mas, por outro lado, as características de um fotodíodo variam menos com a temperatura e têm tempos de resposta mais pequenos (nanosegundos em vez de microssegundos). Questões temporais na resposta tanto nos emissores de infravermelhos como nos fotodíodos e nos fototransistores não foram consideradas, pois estes parâmetros são importantes apenas no caso de transmissão de dados.

#### 2.1.2 Fotodetector de saída digital

A estrutura interna de um fotodetector de saída digital está apresentada na Figura 2.1.9. Como se pode observar, consiste num fotodíodo já com um circuito amplificador e um comparador com histerese de forma a obter-se uma saída digital.

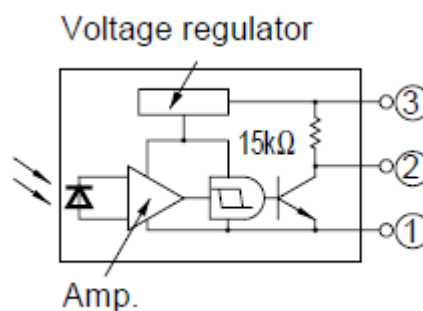


Figura 2.1.9 Esquema interno de um fotodetector de saída digital.

As principais características técnicas que descrevem este dispositivo são:

- O comprimento de onda para o qual o dispositivo tem uma sensibilidade máxima
- A intensidade mínima de luminosidade para a saída do dispositivo comutar para o nível alto
- A intensidade mínima para a saída do dispositivo comutar para o nível baixo.

### 2.1.3 Comutador óptico

São, basicamente, um emissor e um receptor num mesmo módulo mas, com uma abertura que permite a colocação de um anteparo para cortar o feixe ver Figura 2.1.10.

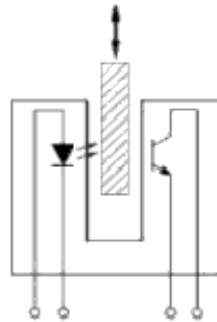


Figura 2.1.10 Princípio de funcionamento de um comutador óptico.

Estes dispositivos têm a vantagem, em relação aos comutadores tradicionais de serem mecanicamente mais robustos.

No caso destes dispositivos, as únicas propriedades a serem consideradas foram as suas dimensões.

### 2.1.4 Reflector óptico

Um refletor óptico consiste num díodo emissor infravermelho e um fotodíodo ou um fototransistor montados lado a lado num eixo convergente (Figura 2.1.11). O Fotodíodo/fototransistor responde à radiação somente quando um objecto reflector está no seu campo de visão.

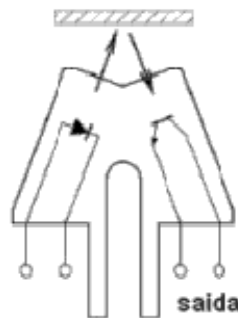


Figura 2.1.11 Princípio de funcionamento de um refletor óptico.

As características técnicas a considerar neste tipo de dispositivo são as correspondentes às características do par emissor receptor. Alguns fabricantes indicam uma distância de detecção nominal para uma superfície reflectora com determinadas características.

### 2.1.5 Receptor de infravermelhos para controlo remoto

Estes dispositivos são vocacionados para a transmissão de dados via infravermelhos. Usados como sensores, apresentam características vantajosas. Estes dispositivos estão preparados para serem robustos ao ruído ambiental, pois no meio ambiente existem emissores naturais de infravermelhos como por exemplo luzes fluorescentes, ecrãs de plasma e a própria luz solar.

Na Figura 2.1.12 está um exemplo de diagrama de blocos do receptor de infravermelhos para controlo remoto. Os blocos principais são: fotodíodo que converte o sinal luminoso num sinal electrico, por sua vez esse sinal é amplificado pelo bloco denominado por AGC (automatic gain control) [3] filtrado por um filtro passa banda e desmodulado.

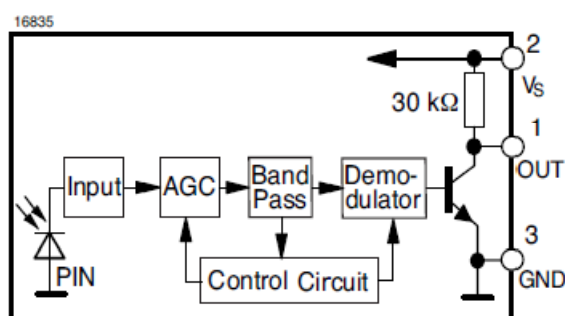


Figura 2.1.12 Descrição funcional de um receptor de infravermelhos para controlo remoto.

Podemos assim concluir que o sinal ao qual este dispositivo responde é modelado a dois níveis: no comprimento de onda do sinal luminoso incidente e na frequência da portadora. Isto torna este dispositivo mais imune ao ruído ambiental. É de referir que a saída deste dispositivo digital, um dos estados corresponde à presença de sinal e o outro à sua ausência.

As propriedades deste tipo de dispositivo são:

- O comprimento de onda e a frequência da portadora ao qual o dispositivo é sensível;
- A intensidade mínima da onda incidente que o dispositivo consegue detectar
- A abertura do sensor.
- Alguns fabricantes dividem a seus produtos em categorias em função da sua taxa máxima de transmissão de dados e imunidade ao ruído.

### 2.1.6 Sensores de distância baseados em infravermelhos

São sensores constituídos por um par emissor/receptor de infravermelhos. Da mesma forma que os reflectores ópticos, através da radiação reflectida medem a distância/detectam a presença de um objecto no seu campo de visão. A intensidade da radiação reflectida por um objecto é dependente da textura e da cor do objecto reflector, o que torna a amplitude da resposta do detector de um reflector óptico pouco precisa em relação à distância a que encontra o objecto reflector. Os sensores de distância baseados em infravermelhos resolvem esta limitação, atendendo ao ângulo de incidência do sinal reflectido e não à sua intensidade de forma a medir a distância a que se encontra um obstáculo (Figura 2.1.13).

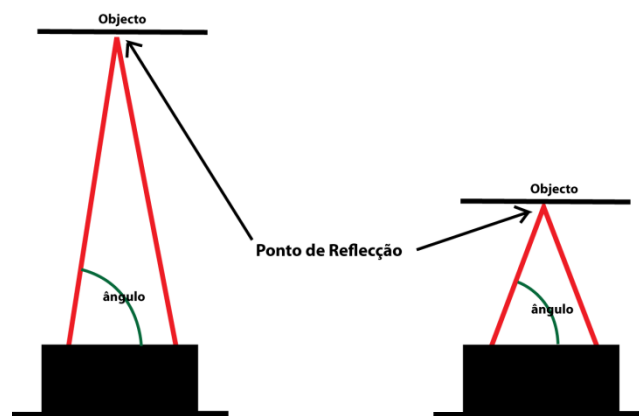


Figura 2.1.13 Diferentes distâncias com diferentes ângulos medidos por um sensor de distância baseado em infravermelhos.

Estes modelos têm uma lente especial, de precisão, que transmite a luz reflectida para um CCD linear. O CCD determina o ângulo, sendo calculado o correspondente valor analógico da distância medida. Além disso, o circuito integrado destes sensores aplica uma frequência modulada sobreposta ao feixe infra-vermelho. Estas características são as que tornam este sensor quase imune à luz ambiente e indiferente à cor do obstáculo [4].

Este sensor apresenta-se no mercado com 3 tipos de saída:

- Binária;
- Analógica;
- Digital;

Saída binária, indica a presença ou não de um obstáculo a uma distância menor que um determinado valor característico do dispositivo. A resposta típica do dispositivo com saída analógica está representado na Figura 2.1.14, a subida rápida no início do gráfico deve-se à incapacidade deste dispositivo efectuar medidas a curtas distâncias, e designa-se por *dead band*. Para evitar esta zona de medida deve-se colocar, fisicamente, os sensores de forma que a zona de medida errada se encontre dentro do limite do robô, como está representado na Figura 2.1.15.



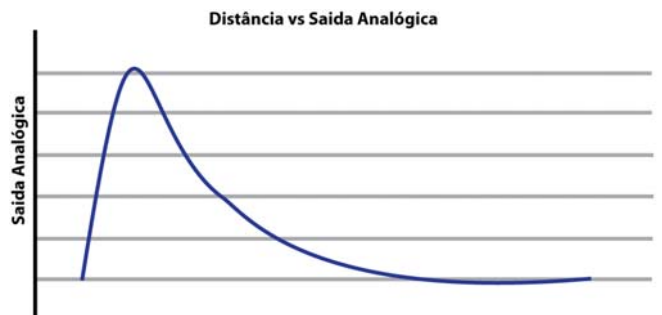


Figura 2.1.14 Curva típica da saída analógica de um sensor de distância baseado em infravermelhos, em função da distância ao objecto.

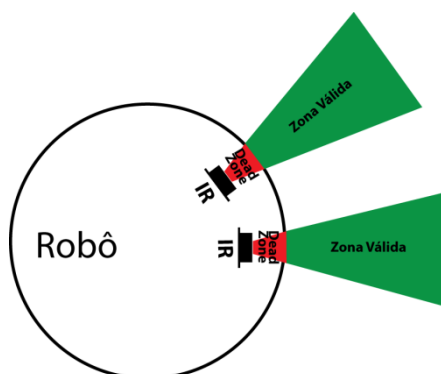


Figura 2.1.15 Exemplo de como fixar um IR no robô, para que a medida não tenha a influência da “dead zone”.

O ângulo de abertura de detecção deste sensor é tipicamente muito estreito.

Em suma as características apresentadas pelo fabricante que caracterizam os diferentes dispositivos existentes no mercado são o tipo de saída do dispositivo, e a distância máxima e mínima de detecção.

## 2.2 Sensores baseados em ultra-sons

Os sensores de ultra-sons, também conhecidos por sonares, usam o tempo de propagação de uma onda sonora para medir a distância a um objecto. Estes dispositivos são constituídos por um emissor e um receptor de ultra-sons, e um micro-controlador responsável por controlar o dispositivo e efectuar o cálculo da medida da distância. O micro-controlador gera uma onda com determinada frequência (geralmente na gama dos 40 KHz) que é transmitida por um emissor de ultra-sons. Quando o sensor receptor de ultra-sons detecta o eco do sinal enviado, o micro-controlador, que mantém o registo do tempo decorrido, desde que o sinal foi enviado até que o eco foi detectado, sabendo a velocidade do som, calcula a distância a que o objecto se encontra [5]. Na Figura 2.2.1 está representado o funcionamento de um sonar.

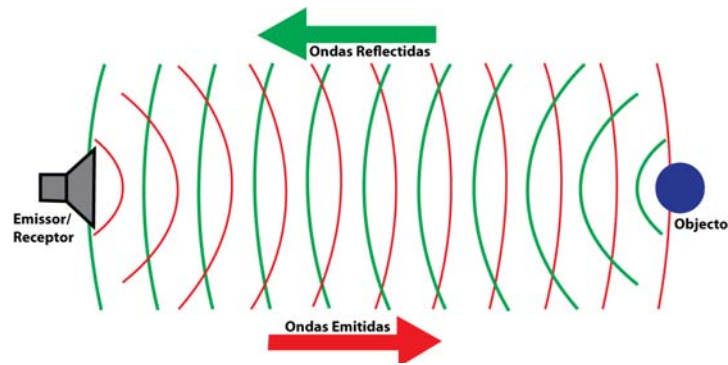


Figura 2.2.1 Esquema simplificado do funcionamento do Sonar.

Estes sensores podem ser usados em qualquer tipo de ambiente e permitem efectuar medidas da distância com alguma precisão embora a sua medida possa ser ruidosa devido a obstáculos capazes de absorverem o som, como, por exemplo, materiais esponjosos.

A precisão deste sensor também pode ser afectada pelo fenómeno designado por eco fantasma representado na Figura 2.1.1 [6].

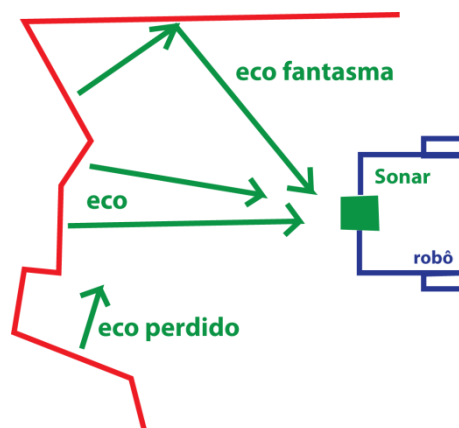


Figura 2.2.2 Reflexão dos ultra-sons na parede

Outro fenómeno a ter em conta quando se usa múltiplos sonares é a questão de um sensor detectar o eco proveniente de outro sonar fenómeno designado por *cross-talk*. [7]. De forma a diminuir o efeito deste fenómeno, abordagem a seguir é colocar os sonares apontados em diferentes ângulos (Figura 2.2.3), e usar os sonares alternadamente.

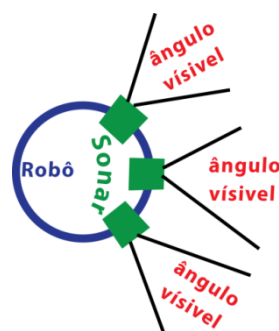


Figura 2.2.3 Exemplo da disposição de múltiplos sonares

As características principais deste dispositivo são:

- O tipo de comunicação disponível com o dispositivo esta pode ser por exemplo serie ou I2C;
- A distância máxima e mínima mensurável pelo sensor, a distância máxima está relacionada principalmente com a potência do emissor de ultra sons como com a sensibilidade do sensor, enquanto a distância mínima deve-se à velocidade de processamento do micro-controlador do sonar e da electrónica envolvida;
- Outra característica importante neste dispositivo é a abertura do ângulo do sensor de ultra-sons, a Figura 2.2.4 representa a distribuição da sensibilidade de dois sonares em função do ângulo em relação ao sensor.

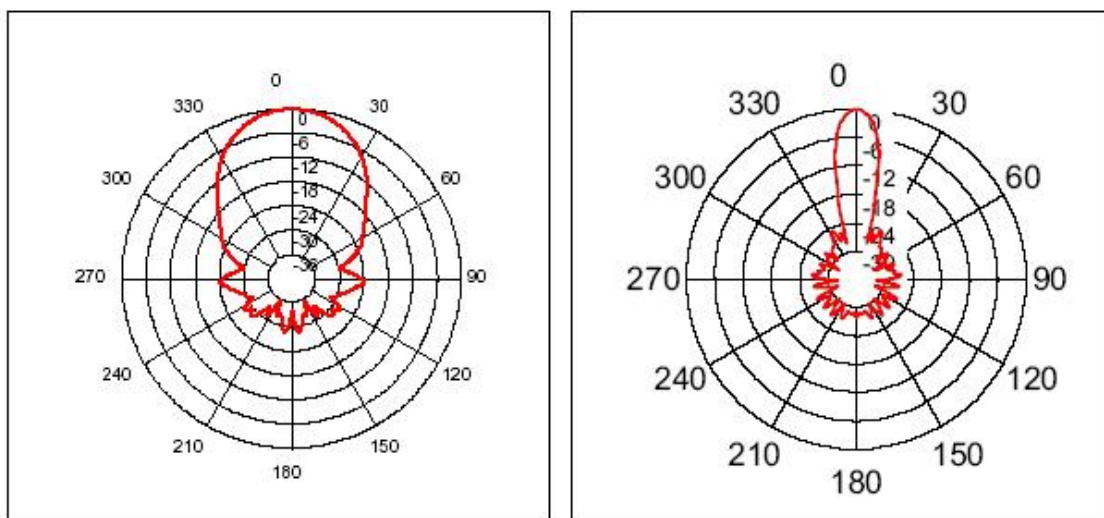


Figura 2.2.4 Abertura do sonar SRF04 / 05 (esquerda) e SRF235 (direita).

Estes dispositivos têm normalmente uma abertura do ângulo de detecção maior que os sensores de distâncias baseados em infravermelhos.

### 2.3 Medição indirecta da velocidade de rotação de um motor DC de ímanes permanentes

A odometria é largamente utilizada para determinar o deslocamento relativo<sup>1</sup> de um robô, recorrendo-se então a *encoders* de forma a medir a velocidade de rotação das suas rodas e converter essa informação em deslocamento efectuado pelo robô. Contudo, os *encoders* são um sensor caro e por este motivo pretende-se aqui demonstrar que é possível obter uma estimativa aproximada da velocidade de um motor DC de forma indirecta utilizando sensores mais baratos. Para tal, é preciso conhecer alguns parâmetros do motor e medir outras grandezas, tais como a corrente e a tensão no *driver* do motor.

<sup>1</sup> Deslocamento relativo consiste no cálculo da posição e da orientação actuais de um veículo mediante a actualização de uma posição e orientação medidas anteriormente [1].

Pretende-se então obter uma estimativa da velocidade de um motor DC de ímãs permanentes ( $\omega_a$ ) a partir das medidas da tensão aplicada ( $V_a$ ) e da corrente na armadura ( $I_a$ ), de forma a evitar a medição da velocidade através de *encoders*. Com estas medidas, aplicando as equações que modelizam um motor DC, é possível obter uma estimativa da velocidade de rotação do motor.

Para atingir o objectivo acima descrito é necessário medir os parâmetros do motor de forma a encontrar o modelo matemático que descreva o funcionamento do motor em estudo.

### 2.3.1 Modelo do motor DC de ímãs permanentes

O modelo que descreve o circuito eléctrico e mecânico de um motor DC é apresentado na Figura 2.3.1. Este modelo é descrito pelas seguintes equações [18]:

$$V_a = R_a * I_a + L_a * \frac{\partial(I_a)}{\partial(t)} + V_c \quad (2.1)$$

$$V_c = K_r * K_e * \omega_a \quad (2.2)$$

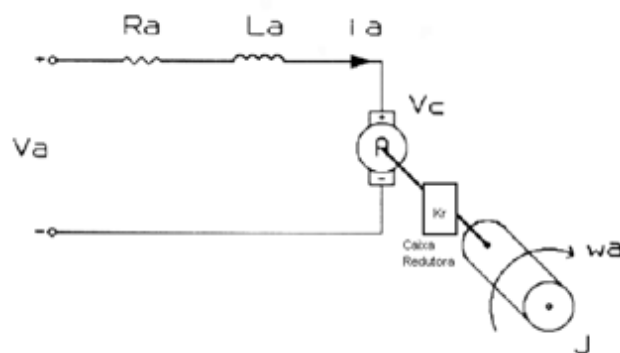


Figura 2.3.1 Representação do modelo de um motor DC com caixa redutora com um ganho  $K_r$  e uma carga de inércia  $J$ .

A equação (2.1) diz respeito ao circuito eléctrico do motor, sendo  $R_a$  e  $L_a$  a resistência e a indutância da armadura respectivamente. E a equação (2.2) relaciona a tensão gerada pela força electromotriz induzida ( $V_c$ ) com a velocidade ( $\omega_a$ ). Sendo que  $K_r$  corresponde à redução da caixa redutora, e  $K_e$  à proporção entre a velocidade do veio do motor e a força electromotriz. Podemos então concluir que  $V_c$  é directamente proporcional à velocidade, e que é independente da carga  $J$ , se a corrente  $I_a$  for conhecida.

Definiu-se:

$$K = K_r * K_e \quad (2.3)$$

Portanto, os parâmetros a determinar são  $R_a$ ,  $L_a$  e  $k$ . Foi considerado  $L_a=0$ , pois a constante de tempo  $R_a/L_a$  é desprezável, isto porque o seu valor é muito pequeno quando comparada com a constante de tempo mecânica.

### 2.3.2 Descrição do hardware

Foi usado um robô de tracção diferencial, sendo que o esquema do hardware correspondente ao controlo de uma das rodas está representado na Figura 2.3.2. A tensão média aplicada aos terminais dos motores é aplicada através de uma ponte em H, que, por sua vez, é controlada por um micro-controlador (uC) através de um sinal de PWM. Note-se que o sinal de PWM é gerado pelo uC usando um registo de oito *bits*, logo este sinal é referido numa escala de 0-255, correspondendo a 0-100% de *duty-cycle* respectivamente.

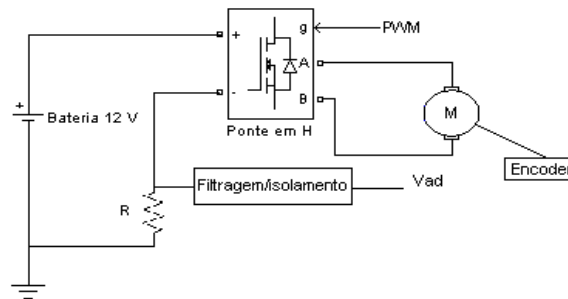


Figura 2.3.2 Esquema do hardware.

#### 2.3.2.1 Medição de $I_a$

De forma a medir  $I_a$  foi colocada a resistência  $R$  em série com a ponte em H. A queda de tensão provocada pela corrente  $I_a$  na resistência  $R$  passa por um filtro passa-baixo resultando na tensão média ( $V_{ad}$ ), depois de isolada pode ser medida directamente por um conversor analógico digital do micro-controlador do robô. Temos então acesso a esta grandeza através de um circuito pouco dispendioso, que pressupõe apenas a utilização de um opto acoplador e algumas resistências e condensadores.

A relação entre  $V_{ad}$  e  $I_a$  é dada pela seguinte equação:

$$I_a = \left( V_{ad} * \frac{255}{PWM} \right) / R \quad (2.4)$$

É de notar nesta relação a dependência em relação ao sinal de PWM. A resistência  $R$  deve ter um valor baixo de forma a não dissipar muita potência.

A resistência  $R$  tem valor de  $1\Omega$  com uma tolerância de  $0.01\Omega$  ( $\Delta R$ ), o AD tem uma sensibilidade de  $9.67mV$  ( $\Delta V_{ad}$ ). De modo a ter uma estimativa do erro da medição de  $I_a$  ( $E_{I_a}$ ) aplica-se a expressão geral dos erros à equação (2.4) [19] e obtém-se a relação em (2.5):

$$E_{I_a} = \frac{255}{PWM * R} * \Delta V_{ad} + \frac{255 * V_{ad}}{PWM * R^2} * \Delta R \quad (2.5)$$

Analisando (2.5) conclui-se que a precisão da medição de  $I_a$  está condicionada pelo valor de PWM aplicado à ponte, isto é, quanto mais pequeno for o valor de PWM, maior é o erro na medição de  $I_a$ , sendo impossível medi-la quando se aplica um PWM igual a 0.

O driver do motor limita a corrente a 1 A, sendo R (Figura 2.3.2) igual a  $1\Omega$ , temos um  $V_{ad}$  máximo de 1V, os motores utilizados têm uma zona morta até um valor de PWM de cerca de 25. Considerando esta corrente máxima e este valor de PWM; ao aplicar a equação (2.5) temos um  $E_{Ia}$  máximo de 201 mA. Se tivermos em conta a situação mais favorável, PWM igual a 255, temos um  $E_{Ia}$  de 19,7 mA.

### 2.3.2.2 Medição de $V_a$

A tensão aplicada aos terminais do motor é descrita pela seguinte equação:

$$V_a = \frac{255}{PWM} * (V^+ - I_a * R) \quad (2.6)$$

A tensão  $V^+$  corresponde à tensão de alimentação da ponte em H. Esta tensão é fornecida por uma bateria, de momento ainda não foi implementado a sensorização desta grandeza no hardware do robô, mas houve a preocupação de utilizar durante os ensaios as baterias completamente carregadas. Foram efectuadas medidas de  $V^+$  no início e no fim de cada ensaio e verificou-se uma variação nunca superior a 10mV ( $\Delta V^+$ ). Esta variação não compromete os resultados deste trabalho, mas no caso de se utilizar esta técnica em aplicações em que o tempo de ciclo de descarga das baterias seja maior torna-se necessário sensorizar esta grandeza.

A seguinte relação dá-nos uma estimativa do erro da medida de  $V_a$ :

$$E_{V_a} = \frac{PWM}{255} * \Delta V + \frac{PWM}{255} * R * E_{I_a} + \frac{PWM}{255} * I_a * \Delta R \quad (2.7)$$

Em (2.7) observa-se que o PWM tem um efeito inverso no erro de  $V_a$  em relação ao erro de  $I_a$ . A estimativa menos favorável do erro  $E_{V_a}$  ocorre para PWM igual a 255 e para um  $I_a$  máximo (1 A) tem um valor de (considerando  $\Delta V^+$  10mV) 39.4 mV.

### 2.3.2.3 Medição de $W_a$

Foram acoplados provisoriamente *encoders*, de forma a medir a rotação de motores. Esta medida será usada para determinar o parâmetro K do motor e para avaliar o desempenho desta técnica. A medida de  $W_a$  tem uma resolução de 0,392 Rad/s.

## 2.3.3 Determinação dos parâmetros do motor

Neste ponto serão abordados os métodos utilizados para determinação dos parâmetros do motor.

### 2.3.3.1 Medição de $R_a$

Para proceder à medição da resistência do rotor ( $R_a$ ) o eixo do motor foi bloqueado, de modo a impossibilitar a sua rotação. Assim na equação (2.1)  $V_c=0$ , o que faz com que  $R_a=V_a/I_a$ . Através de um voltímetro e de uma pinça amperimétrica, com uma precisão de +/-0,5% e +/-3% respectivamente. Obtiveram-se os resultados apresentados na Tabela 2.3.1:

Tabela 2.3.1 Resultados na determinação de Ra.

| Voltage (V) | Current (A) | Resistance ( $\Omega$ ) |
|-------------|-------------|-------------------------|
| 0,537       | 0,235       | 2,28                    |
| 1,91        | 0,683       | 2,80                    |
| 3,10        | 1,15        | 2,70                    |
| 4,32        | 1,65        | 2,61                    |
| 5,45        | 1,89        | 2,88                    |
| 5,59        | 2,14        | 2,61                    |

Média=2,72  $\Omega$

Desvio padrão=0,206  $\Omega$

Verifica-se um desvio padrão de cerca 7,8%, este desvio deve-se ao facto do valor desta grandeza ser influenciado por factores como, a temperatura a que se encontram os enrolamentos do rotor e a posição do eixo (o contacto das escovas não é uniforme ao longo do colector). Sendo Ra uma resistência relativamente pequena torna-se necessário ter algum cuidado na escolha da instrumentação utilizada para medir esta grandeza. Neste trabalho recorreu-se a uma pinça amperimétrica para medir a corrente do rotor.

### 2.3.3.2 Determinação de K

Para a determinação de K foi aplicado um conjunto de diferentes valores de PWM, e para cada um desses valores foi registado  $I_a$  e  $W_a$ . Também o valor de  $V^+$  inicial e final da experiência.

Cada valor de  $W_a$  registado corresponde à média de 125 amostras. Cada valor de  $I_a$  registado corresponde à média de 1250 amostras (isto porque o valor de cada amostra de  $I_a$  enviado pelo micro-controlador corresponde à média de 10 amostras).

De seguida, com este conjunto de dados e através da seguinte relação, derivada das equações (1) e (2):

$$W_a = (V_a - I_a * R_a) / K \quad (2.8)$$

Recorreu-se a um algoritmo de minimização numérica, de forma a encontrar o valor de K que minimiza o erro quadrático entre o valor de  $W_a$  dado pela equação (2.8) e o valor de  $W_a$  medido pelo encoder ao longo da gama de valores de PWM. O algoritmo de procura utilizado para encontrar K foi o newtoniano.

Os valores medidos de  $W_a$  e os obtidos pelo modelo, depois do ajuste de K na experiência anterior em função do valor de PWM, estão representados no gráfico da Figura 2.3.3.

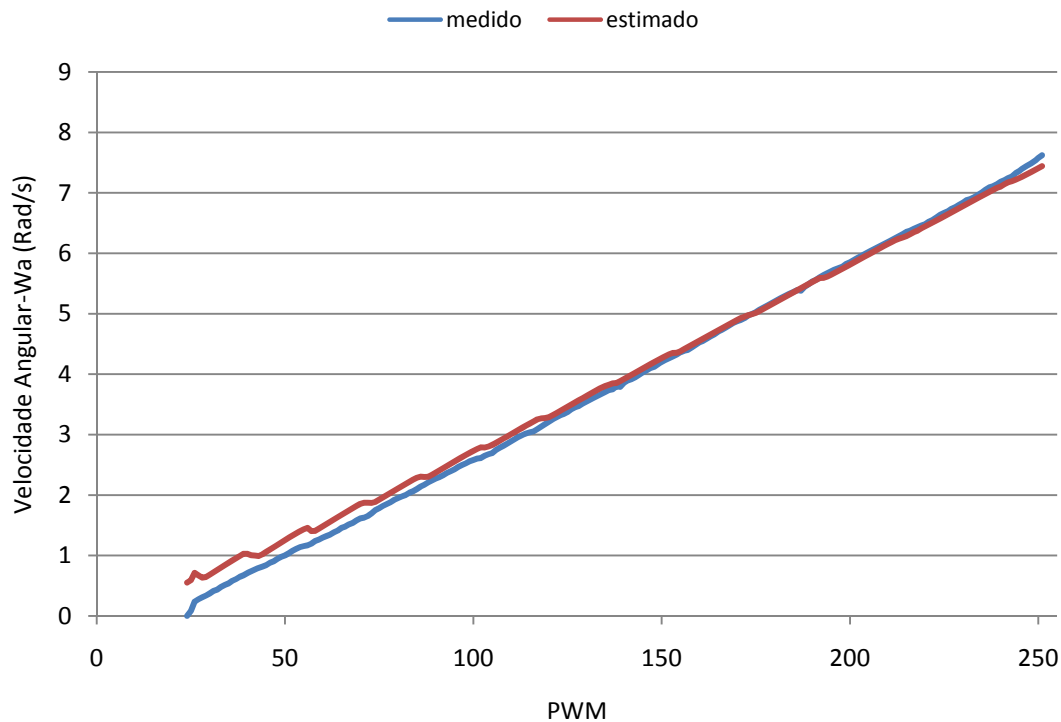


Figura 2.3.3 Comparação entre a velocidade angular medida e estimada, após o ajuste de K.

Como podemos comprovar nesta figura, o modelo calculado aproxima-se do real para valores intermédios de PWM. Contudo, verifica-se um desvio acentuado para valores de PWM na gama compreendida no intervalo de 0 até cerca de 76; e a partir de 235 também se verifica um desvio apesar de menos acentuado. Estes desvios devem-se aos seguintes factores:

Para a zona de PWM's baixos, o desvio observado deve-se, como já foi referido na secção 2.3.2.1, em grande parte ao erro elevado na medição de  $I_a$ . Na zona de PWM's elevados o desvio observado deve-se em parte ao erro na medição de  $V_a$ , anteriormente referido na secção 2.3.2.2. Outra condicionante que pode fazer o modelo divergir tanto para zonas de PWM elevado e baixo, prende-se ao facto de a equação (2.4) desprezar o tempo de comutação da ponte em H. Para extremos de PWM, o tempo de comutação,  $T_s$ , dos transístores da ponte deixam de ser desprezáveis face a  $T_{on}$  e  $T_{off}$ . Este fenómeno pode ser observado na Figura 2.3.4.



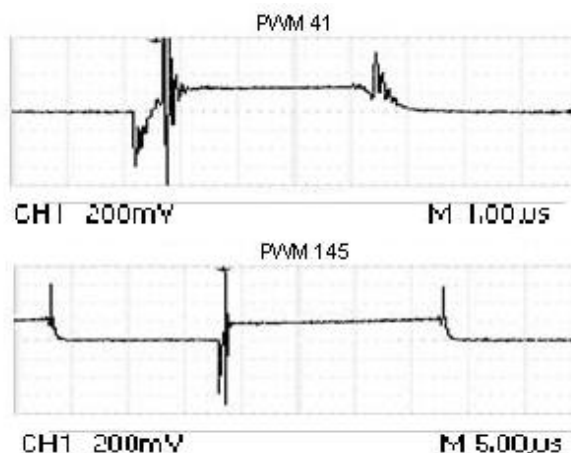


Figura 2.3.4 Queda de tensão na resistencia R para diferentes PWM's.

Falta ainda referir que na determinação de K, o intervalo [0, 76] e [235, 255] de PWM não foi considerado no ajuste de K, devido aos desvios do modelo que aqui ocorrem.

Os resultados obtidos foram  $K=1,53$  V/rad/s, e o erro quadrático médio entre  $W_a$  medido e o dado pela equação (2.8) foi de  $0.00343$  (rad/s)<sup>2</sup> (excluindo o intervalo [0, 76] e [235, 255] de PWM); considerando a gama completa de PWM [0, 255] temos um erro quadrático médio de  $0,02$  (rad/s)<sup>2</sup> e um erro quadrático máximo de  $0,305$  (rad/s)<sup>2</sup>.

### 2.3.4 Validação do modelo

Realizaram-se várias experiências com o robô no chão. Experiências essas com diferentes valores de PWM, e com diferentes cargas, de forma a termos diferentes condições de funcionamento. Aqui, os valores dados pela medição dos *encoders* e pelo modelo da equação (2.8), com os parâmetros determinados na secção 2.3.3, são comparados de maneira a observar a qualidade do modelo determinado neste trabalho.

No gráfico da Figura 2.3.5 é comparada a medição dos *encoders* e a velocidade estimada pelo modelo quando é aplicado um degrau de PWM com o valor de 155. Verifica-se que em regime permanente o valor estimado está dentro da gama de resolução do encoder. Na fase inicial do transitório da resposta verifica-se um desvio, mas após duas amostras (80 ms) o modelo considerado acompanha também a componente transitória da resposta do modelo.

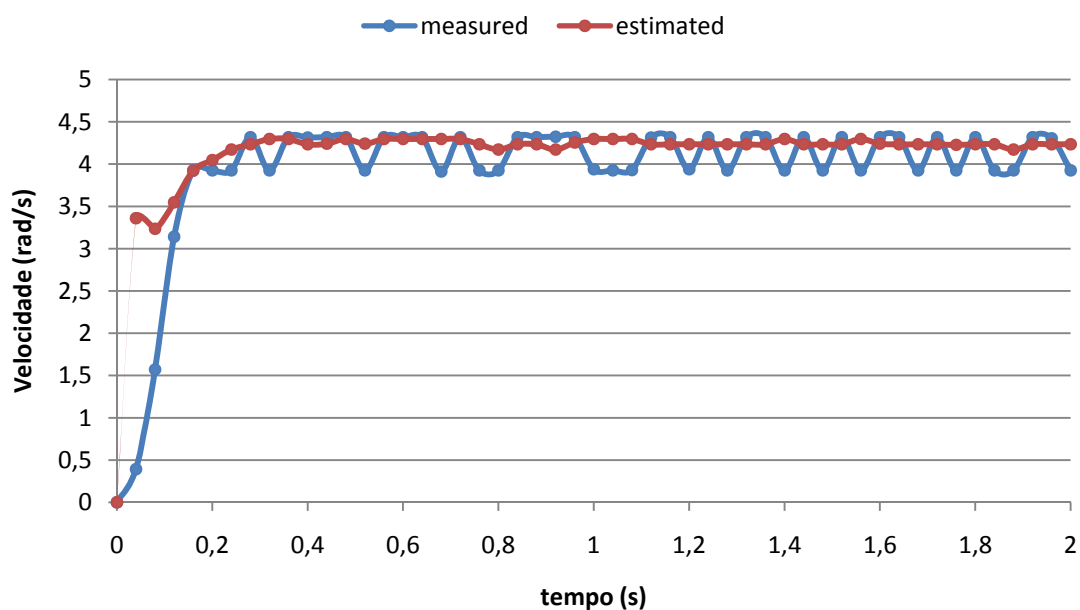


Figura 2.3.5 Comparação entre  $W_a$  medido e  $W_a$  estimado pelo modelo, quando é aplicado um degrau de PWM com o valor de 155.

No gráfico da Figura 2.3.6 estão representados os resultados obtidos com a aplicação de dois degraus sucessivos de PWM de 78 e 156, respectivamente, sendo que as observações são idênticas ao acima mencionado.

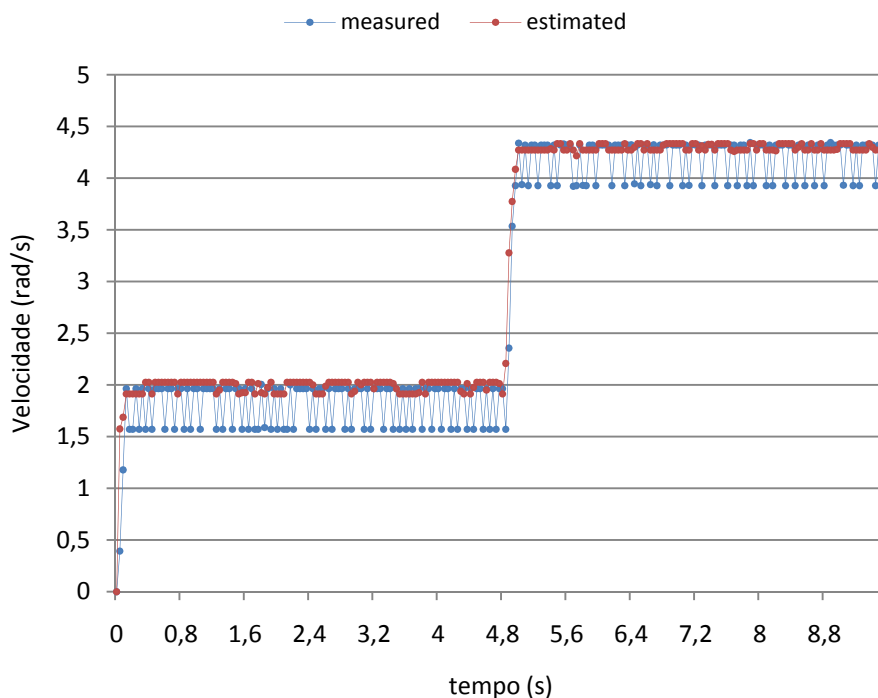


Figura 2.3.6 Comparação entre  $W_a$  medido e  $W_a$  estimado pelo modelo quando se comuta o PWM de 78 para 156.

Na Tabela 2.3.1 estão registados os resultados obtidos (em regime permanente) nas várias experiências efectuadas: o  $W_a$  medido pelo encoder médio; o  $W_a$  estimado médio; a corrente média; o valor do degrau de PWM e o erro que corresponde à diferença entre o  $W_a$  medido e o estimado. Sendo a resolução dos *encoders* utilizados de 0,392 Rad/s, verifica-se que nos resultados dos ensaios representados na tabela II a maior diferença entre o valor de velocidade medido directamente e o estimado é de 0,17 rad/s.

Tabela 2.3.2 Resumo dos resultados das experiencias.

|                        | Exp. 1 | Exp. 2 | Exp. 3 | Exp. 4 | Exp. 5 | Exp. 6 | Exp. 7 |
|------------------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| <b>Wa med. (rad/s)</b> | 1,812  | 2,496  | 4,200  | 5,574  | 5,376  | 1,758  | 7,136  |
| <b>Wa est. (rad/s)</b> | 1,990  | 2,665  | 4,297  | 5,615  | 5,490  | 1,933  | 7,165  |
| <b>Corrente (A)</b>    | 0,245  | 0,350  | 0,301  | 0,321  | 0,371  | 0,605  | 0,319  |
| <b>PWM</b>             | 78     | 100    | 156    | 200    | 200    | 200    | 250    |
| <b>Erro (rad/s)</b>    | 0,177  | 0,169  | 0,0968 | 0,0413 | 0,113  | 0,174  | 0,0287 |

### 2.3.5 Conclusões

Podemos neste momento afirmar que é possível medir indirectamente a velocidade de um motor DC de ímans permanentes de forma eficiente e com baixos custos de implementação. Para tal recorreremos a outras medidas mais simples e económicas de medir directamente, tais como, a tensão e a corrente de alimentação do conversor (que controla o motor DC), evitando assim o recurso a *encoders*. Isto é conseguido através da determinação dos parâmetros do motor DC e da aplicação das equações do modelo que relacionam a tensão e a corrente no rotor com a velocidade de rotação. Apesar da técnica apresentada perder alguma qualidade quando se consideram valores de PWM baixos, na aplicação em causa não representa um problema significativo. Isto porque, o robô utilizado nesta aplicação possui uma caixa redutora elevada permitindo assim ao robô deslocar-se a velocidades baixas, mas com um PWM com um valor suficientemente alto para o erro da estimação não ser muito significativo, como pode ser observado na Tabela 2.3.2.

Também se verificou um ligeiro desvio do modelo no inicio da resposta ao degrau.

Com os resultados obtidos mostra-se que a odometria medida indirectamente sem o recurso a *encoders* é viável, na perspectiva da robótica móvel de baixo custo.

De momento este método ainda não foi utilizado no sistema de localização desenvolvido no presente trabalho (Capítulo 5), por este estar fortemente dependente da precisão das medidas obtidas a partir da odometria. Mas pretende-se como trabalho futuro testar esta técnica de forma a observar a sua viabilidade no sistema de localização desenvolvido.



## Capítulo 3

# Robô desenvolvido

Depois de definidos os requisitos do robô, e a partir do estudo apresentado na secção anterior, procedeu-se ao desenvolvimento e montagem do *hardware* do robô.

Na secção 3.1 será apresentado o *hardware* desenvolvido e será feita uma apresentação geral do sistema, para de seguida ser descrita cada parte do sistema com mais pormenor. Na secção 3.2 apresenta-se em traços gerais o *software* desenvolvido, onde irá ser dado destaque à questão dos controladores de velocidade dos motores.

### 3.1 *Hardware*

#### 3.1.1 Traços gerais

Na Figura 3.1.1, podemos ver o robô desenvolvido no presente trabalho. Trata-se de um robô de tracção diferencial de pequenas dimensões, com 33 cm de diâmetro e 15 cm de altura. Também se pode observar, à esquerda, as balizas implementadas.

A arquitectura de processamento do robô dividiu-se em duas camadas. Uma camada inferior, responsável pelo controlo dos actuadores e pelo processamento do sinal dos diferentes sensores, e uma camada superior responsável por decisões de alto nível e processamentos mais complexos como é o caso da localização. Sobre o robô podemos observar a existência de um portátil, por isso importa adiantar desde já tratar-se de uma solução provisória, pois aqui foi implementada a camada de processamento de nível superior para facilitar questões relacionadas com *debug*, e observação de resultados. O próximo passo a dar no que refere a trabalho futuro é, sem dúvida, implementar também esta camada de processamento numa plataforma de baixo custo e menor consumo. O marcador colorido que observamos no tampo do portátil faz parte de um sistema de localização que será descrito na secção 3.1.10; os dados da posição e orientação fornecidos por este sistema servem para validar os resultados obtidos no sistema de localização baseado em balizas do robô, descrito no Capítulo 5.



Figura 3.1.1 Robô desenvolvido

Podemos observar na Figura 3.1.2 o esquema funcional do hardware desenvolvido, e na Figura 3.1.3 a disposição espacial dos diferentes dispositivos no robô. Nas secções seguintes cada bloco da Figura 3.1.2 será descrito com mais pormenor.

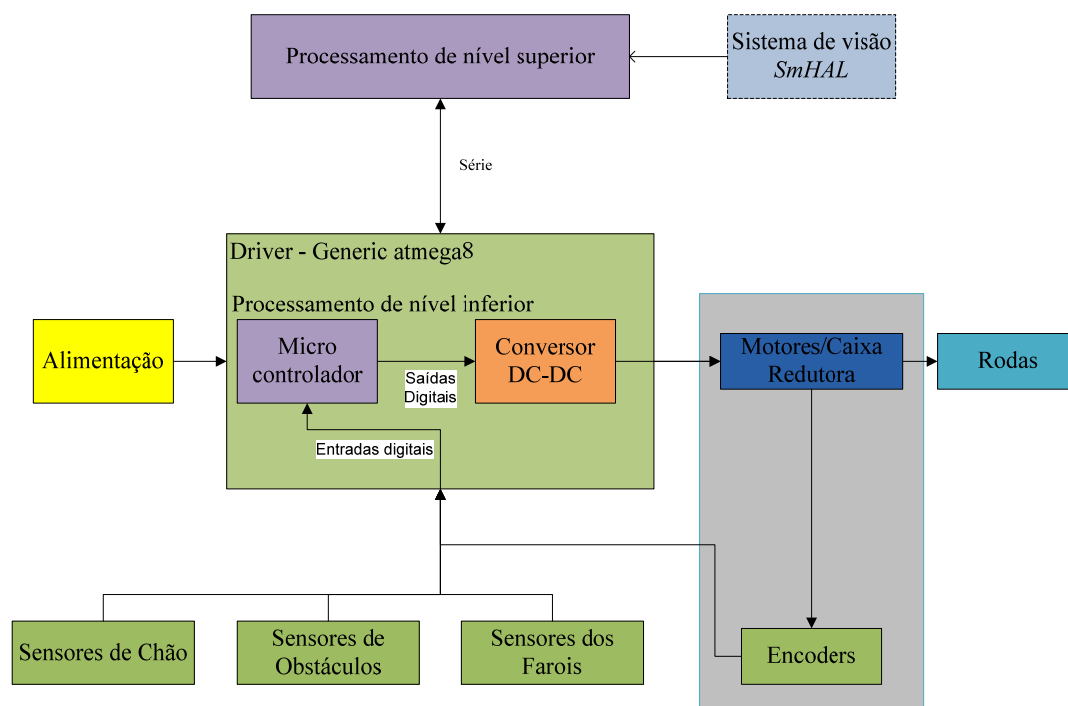


Figura 3.1.2 Diagrama de blocos do hardware desenvolvido<sup>2</sup>.

<sup>2</sup> O sistema de visão *SmHAL* não foi desenvolvido no âmbito do presente trabalho, mas foi integrado no *software* desenvolvido na camada de nível superior. Este sistema de localização foi utilizado para validar os resultados obtidos pelo sistema de localização do robô.

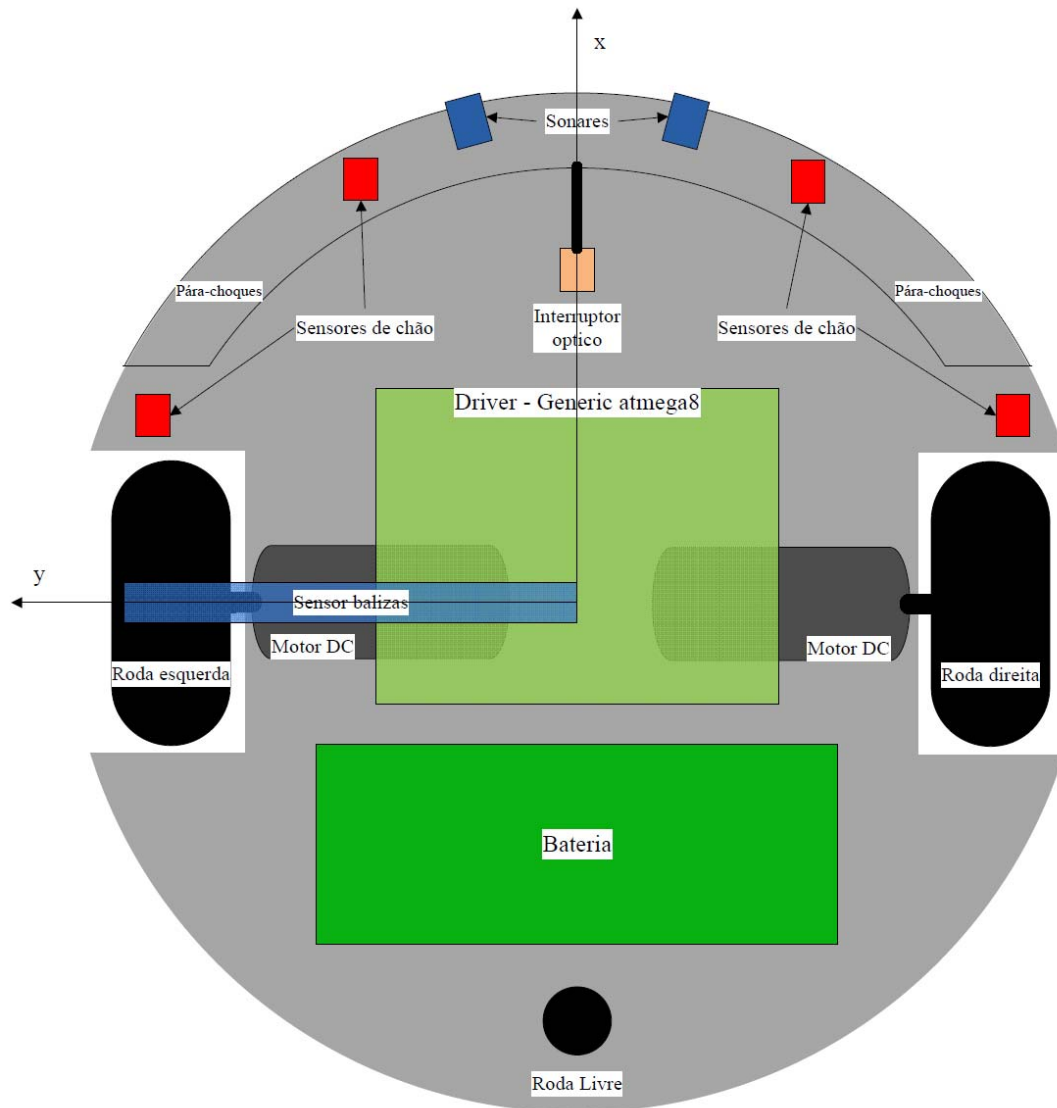


Figura 3.1.3 Esquema da disposição do hardware no robô.

### 3.1.2 Sensores de chão

Os sensores de chão são responsáveis por detectar a presença de degraus ou buracos. A solução implementada consiste num conjunto de quatro reflectores ópticos instalados na base do robô (Figura 3.1.3) e a apontar para o chão.

Os infravermelhos emitidos por estes dispositivos são reflectidos no chão e detectados por um fotodetector.

A razão da escolha dos reflectores ópticos deve-se à curta distância que estes sensores têm de medir (a distância da base do robô ao chão é cerca de 3 cm) e ao facto de se pretender uma saída binária. Aqui não se recorreu à modelação do sinal emitido, pois, estando estes sensores a apontar para o chão, não são determinantes questões relacionadas com o ruído ambiental.

A implementação deste sensor consistiu na escolha de um par emissor receptor, e o desenho e implementação de uma placa de circuito impresso.

Em relação ao emissor de infravermelhos, escolheu-se diodo emissor de infravermelhos com uma abertura do feixe de emissão pequeno e com elevada intensidade. Em relação ao fotodetector, recorreu-se a um fototransistor, pois graças ao seu ganho interno não é necessário recorrer a electrónica extra para amplificar o sinal. No fototransistor houve também a preocupação de escolher um com grande sensibilidade. Tendo um emissor de grande intensidade de emissão e um detector de grande sensibilidade, possuímos as condições necessárias para que a corrente de polarização do emissor seja menor e assim conseguimos diminuir o consumo de energia destes dispositivos.

Na Figura 3.1.4 está representado o esquema eléctrico implementado, o fototransistor encontra-se montado em emissor comum, e R3 é ajustado de modo a que o fototransistor trabalhe na zona de saturação para que saída seja binária.

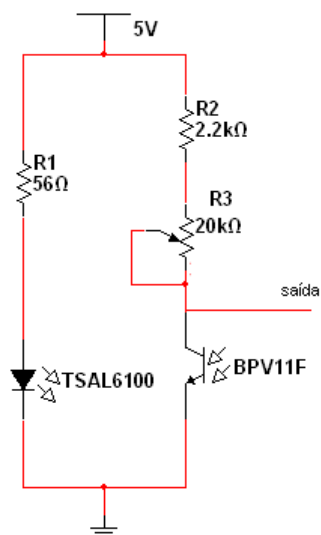


Figura 3.1.4 Esquema eléctrico dos sensores de chão.

Na Figura 3.1.5 conseguimos observar o sensor de chão construído. No anexo A.1 pode-se também encontrar o desenho do layout desenvolvido. Este sensor foi testado e mostrou ser eficaz em diferentes superfícies.



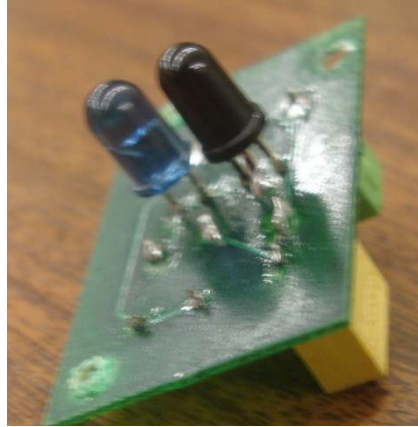


Figura 3.1.5 Sensor de chão

### 3.1.3 Sensores de obstáculos

A detecção de obstáculos é feita de duas formas.

Uma das formas não implica contacto do robô com o obstáculo. Para tal são usados dois sonares na zona frontal do robô (Figura 2.1.1). Apesar da precisão na medida de distâncias ser maior nos sensores baseados em infravermelhos, os sonares têm uma maior abertura do ângulo de detecção, o que torna a área coberta por cada sensor maior. Além disso não há necessidade de ter uma grande precisão da distância a que se encontra o obstáculo, mas sim de detectar a sua presença. O sonar escolhido está representado na Figura 3.1.6, sendo que as razões da selecção deste dispositivo se prendem ao seu preço, à sua abertura, 55°, e a uma gama de medição entre os 15 cm e os 6 m.



Figura 3.1.6 Sonar SRF02

A outra forma de detecção de obstáculos implica contacto entre o robô e o obstáculo. A parte frontal do robô, pára-choques, não é fixa e no caso de uma colisão, ele desloca-se, movimento esse que é detectado por um sensor óptico.

### 3.1.4 Sensor das balizas

De forma a detectar uma baliza recorreu-se a um receptor de infravermelhos para controlo remoto, pois estes são os mais imunes ao ruído ambiental. Na Figura 3.1.7 está representado o sensor utilizado.



Figura 3.1.7 Receptor de infravermelhos para controlo remoto TSOP34836.

No conjunto de soluções oferecidas pelo fabricante escolheu-se aquela que proporcionava uma maior imunidade ao ruído ambiental. Como já foi referido em 2.1.5, a saída deste dispositivo é digital, não nos dando assim informação acerca da intensidade do sinal incidente. Pretende-se como trabalho futuro implementar o esquema representado na Figura 2.1.12, de forma discreta para ser possível ter acesso à intensidade do sinal recebido. Uma das vantagens desta informação adicional reside no facto deste sensor ser muito sensível conseguindo detectar facilmente reflexões dos sinais. Tendo acesso à intensidade de sinal detectado é mais fácil distinguir entre o sinal original e uma reflexão. Além disso, podemos também a partir desta grandeza ter uma estimativa da distância a que se encontra o emissor.

De modo a possibilitar a obtenção da orientação a que se encontra a baliza em relação ao robô, este receptor é colocado dentro de um tubo opaco aos infravermelhos, como podemos verificar na Figura 3.1.8.

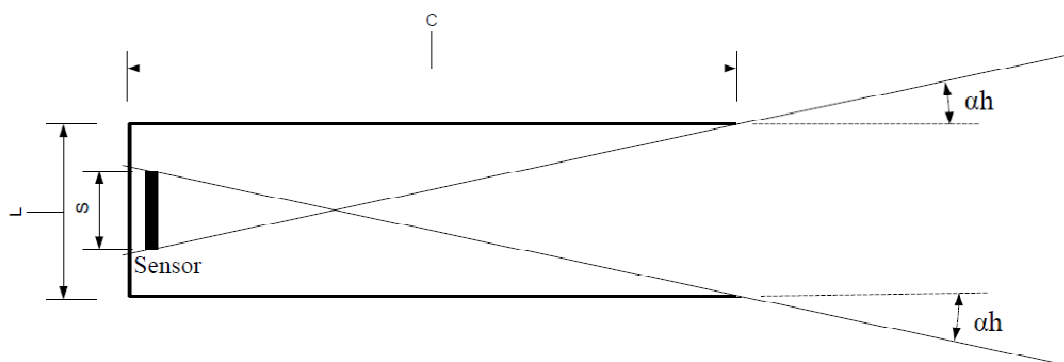


Figura 3.1.8 Dimensões do sensor das balizas.

Assim, a abertura do sensor é reduzida para um valor  $\alpha_h$  no plano horizontal igual a:

$$\tan(\alpha_h) = (L - (L - S)/2)/C \quad (3.1)$$

Sendo que com as dimensões de L, C e S utilizadas no trabalho temos:

$$\alpha_h = 2.51^\circ \quad (3.2)$$

Como se pode observar na Figura 3.1.3, o sensor das balizas está a  $90^\circ$  em relação ao referencial (x, y) do robô, assim, quando uma baliza é detectada, sabe-se que está a  $90^\circ \pm \alpha_h$  em relação ao robô, o valor de  $\alpha_h$  foi confirmado na prática.

Na Figura 3.1.9, dá-se destaque ao sensor das balizas.

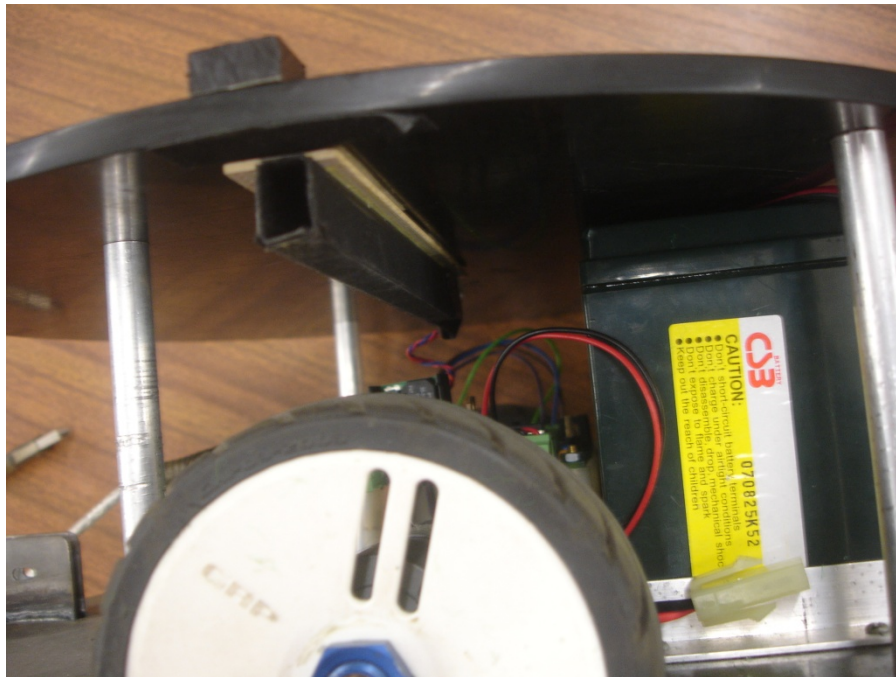


Figura 3.1.9 Detalhe do sensor das balizas no robô.

### 3.1.5 Motores/*encoders*

Recorreu-se à solução representada na Figura 3.1.10, que consiste num motor DC, já equipado com caixa redutora e *encoder*. O motor DC tem uma tensão nominal de 12 V, uma potência nominal de 4.22 W, a relação da caixa redutora é de 30:1, o número de impulsos do *encoder* a cada volta completa do eixo (à saída da caixa redutora) é de 360, é um *encoder* de efeito de Hall incremental. Este sistema permite uma velocidade (sem carga) máxima de 200 rpm, e mínima (não nula) de 1.5 rpm.



Figura 3.1.10 Motor/caixa redutora e encoder EMG30.

### 3.1.6 Rodas

Na Figura 3.1.10, podemos ver uma das rodas do robô. Estas rodas permitem uma superfície de contacto com o chão elevada graças à sua largura, o que aumenta a aderência do robô ao chão, e ajuda a evitar situações de derrapagem.



Figura 3.1.11 Roda do robô.

### 3.1.7 Alimentação

A alimentação do robô é fornecida por uma bateria de chumbo, preparada para ciclos de descarga completos (Figura 3.1.12). A escolha destas baterias deveu-se ao seu baixo custo.



Figura 3.1.12 Bateria do robô.

### 3.1.8 Driver - Generic atmega8

Trata-se de uma placa de circuito impresso que contém um micro-controlador, várias entradas/saídas digitais e analógicas e dois conversores DC-DC (pontes em H) que alimentam os motores, Figura 3.1.13 (o esquema da placa está no anexo A.2).

Esta placa é responsável pelo controlo da velocidade dos motores e pelo pré-processamento dos dados dos sensores, que são, de seguida, enviados para a camada de processamento superior via comunicação série.



Figura 3.1.13 Driver - Generic atmega8.

### 3.1.9 Balizas

Podemos ver na Figura 2.1.1 uma imagem das balizas implementadas, um dos elementos do sistema de localização do robô. As balizas são constituídas por dois conjuntos de emissores de infravermelhos, ver Figura 3.1.14, fixados numa barra de

alumínio, de forma a que a distância entre elas seja fixa. Este dispositivo é ainda controlado por um micro-controlador responsável por gerar os sinais que são emitidos.

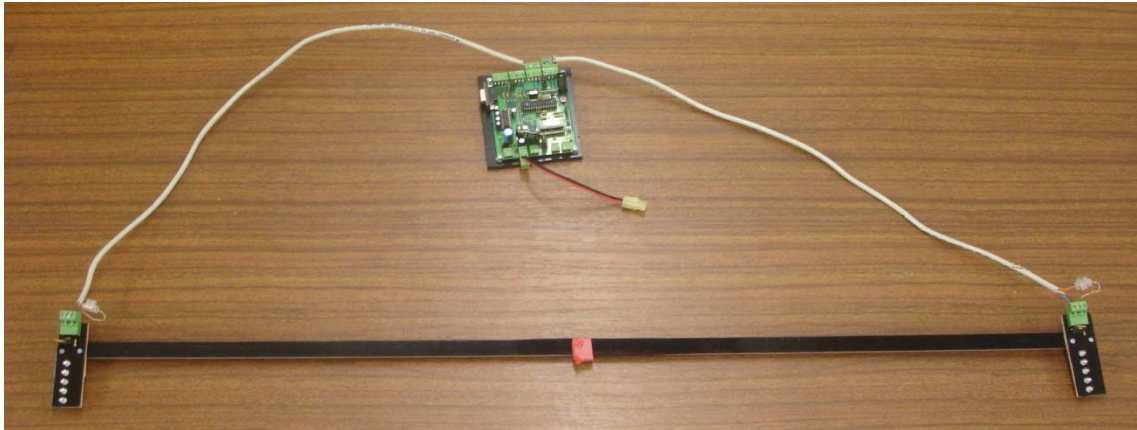


Figura 3.1.14 Balizas.



Figura 3.1.15 Detalhe de um das balizas.

Cada baliza emite um sinal modulado por uma portadora a 44 kHz a uma frequência específica (1900 Hz e 950 Hz), que identifica uma baliza da outra. Cada uma é constituída por uma fila de emissores na vertical para que, mesmo que o robô não esteja perfeitamente na horizontal em relação às balizas, estas continuem a ser detectadas.

Na Figura 3.1.16 podemos ver o esquema eléctrico de uma baliza, e no anexo A.3 está o layout desenvolvido.

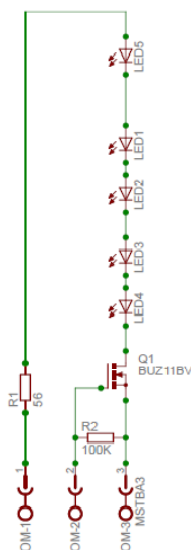


Figura 3.1.16 Esquema de uma baliza.

Recorreu-se a díodos emissores de infravermelhos (com a referencia TSAL7600) com grande abertura do feixe de emissão,  $\pm 30^\circ$ , de maneira a que as balizas sejam detectadas mesmo quando o robô se encontrar num ângulo elevado em relação aos emissores.

### 3.1.10 Sistema de visão SmHAL

Como já foi referido anteriormente, recorreu-se a um sistema externo de localização para medir a posição e orientação do robô de forma a ter informação de referência para validar os resultados obtidos com a técnica que será apresentada no Capítulo 5. Este sistema foi desenvolvido no âmbito do Futebol Robótico Small Size League (SSL) da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto e é constituído por uma câmara colocada num pórtilco e direccionada para o chão. Através da imagem enviada pela câmara o sistema detecta o marcador colorido colocado no topo do robô, e assim calcula a posição e orientação do robô. A posição e orientação medida por este sistema é enviada directamente para o portátil responsável pela camada de processamento de nível superior, via wireless através do protocolo UDP.

A precisão deste sistema é afectada por diversos factores, como a calibração, a posição do robô em relação à câmara. Considerando a área total de navegação do robô a resolução deste sistema é inferior a 2 cm. Uma explicação com maior detalhe acerca deste sistema pode ser encontrada em [8].

## 3.2 Software

Nesta secção será apresentado o *software* desenvolvido para este trabalho.

### 3.2.1 Descrição geral

No que respeita ao software, já neste trabalho foi referido que a arquitectura de processamento do robô está distribuído em duas camadas. Na Figura 3.2.1 está descrito o funcionamento geral do software desenvolvido e a interacção entre essas duas camadas de processamento.

O processamento de nível inferior foi implementado num micro-controlador, enquanto o processamento de nível superior foi implementado num portátil.

A camada inferior envia dados para a camada superior a cada 40 ms. Se entre esse intervalo de tempo não se receber uma resposta, o robô entra no estado designado por *time-out* em que os actuadores são desligados (os motores) e volta ao estado normal quando recebe uma resposta válida da camada superior.

A camada superior trabalha então a uma cadência de 40 ms, processa os dados enviados pela camada inferior e envia uma resposta.

Os dados enviados pela camada inferior para a camada superior são:

- O número total de impulsos dos *encoders* de cada roda no intervalo;
- Os valores actuais dos sinais de controlo aplicados aos conversores DC-DC do driver;
- A informação referente ao sensor das balizas e o número total de impulsos dos *encoders* de cada roda, no momento em que uma baliza foi detectada.

Os dados enviados pela camada superior para a camada inferior são as velocidades de referência para os controladores de cada roda.



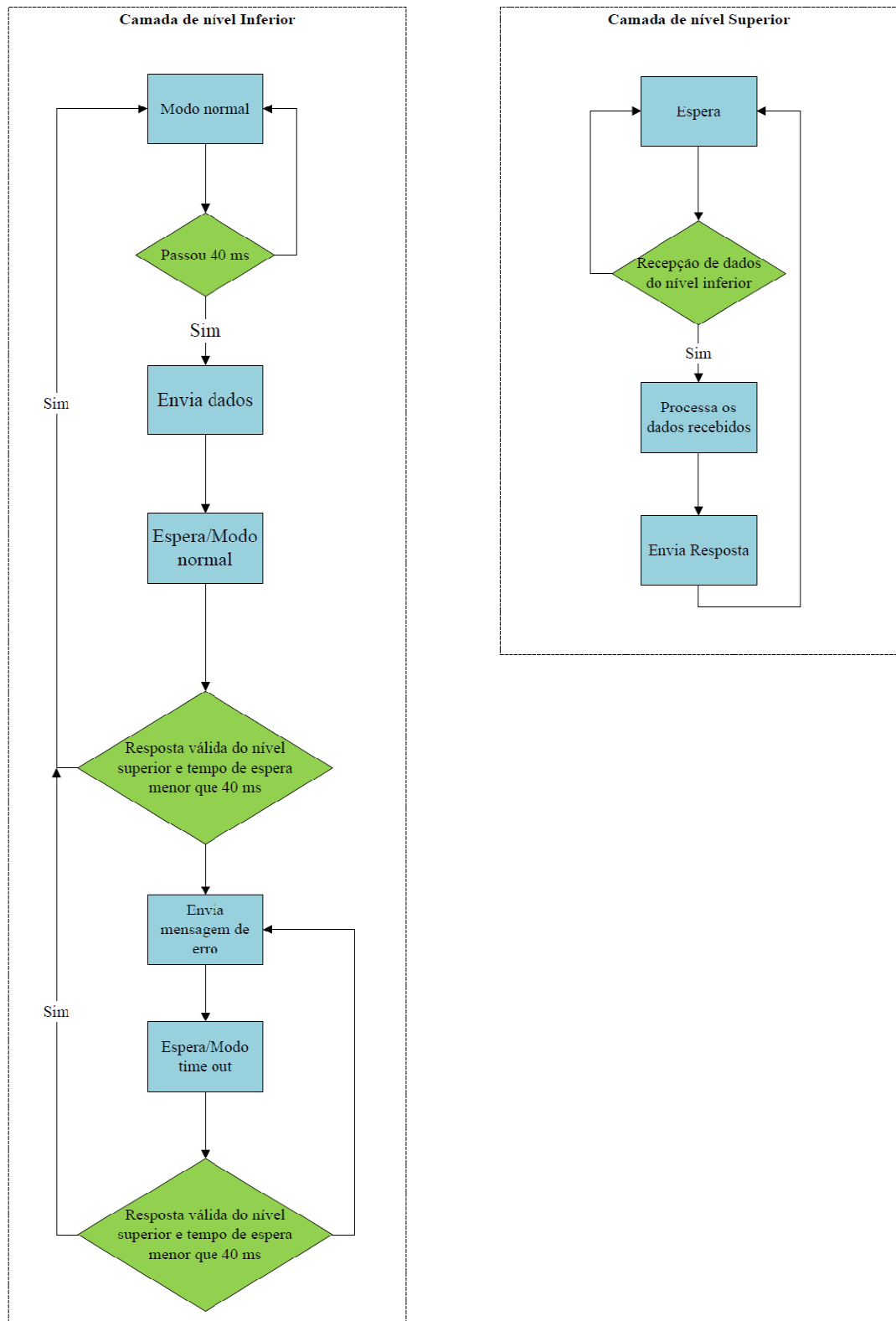


Figura 3.2.1 Descrição geral do software desenvolvido.

### 3.2.2 Descrição da camada de nível superior

É nesta camada onde ocorrem os processamentos mais complexos e onde são tomadas as decisões referentes ao comportamento do robô. As ações efectuadas pelo robô são feitas em função do estado em que encontra. A Figura 3.2.2, representa a máquina de estados principal que controla o robô.

O estado *inicialização* correspondente ao estado inicial do robô e é aqui onde as variáveis internas são inicializadas e onde o robô irá calcular a sua posição pela primeira vez.

No estado *missão* o robô corresponde modo de funcionamento em que ele se encontra a executar a tarefa para o qual foi programado. De momento a tarefa executada pelo robô consiste simplesmente em navegar entre três pontos (configuráveis) no plano de navegação.

Em determinada altura o robô irá calcular a sua posição e orientação a partir das balizas, o que corresponde ao último estado representado na figura. Mais detalhes acerca do software implementado nesta camada serão abordados nos capítulos seguintes.

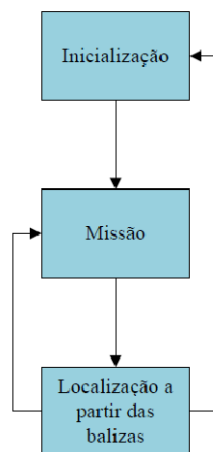


Figura 3.2.2 Máquina de estados do robô.

### 3.2.3 Descrição da camada de nível inferior

Esta camada é a responsável pelo pré-processamento da informação enviada pelos sensores e pelo encaminhamento dessa informação para o nível superior. Além disso, controla a velocidade dos motores em função da referência que lhe é enviada.

O software aqui desenvolvido tem de efectuar três tarefas principais: ler os diferentes sensores, processar os controladores de velocidade das rodas e gerir as trocas de informação com a camada superior. Cada uma destas tarefas tem restrições temporais diferentes, por exemplo, um atraso de 1 ms na leitura de uma entrada digital pode implicar a perda de informação, enquanto que um atraso de 1 ms o envio de um byte para o nível superior não trás qualquer problema. Assim, as tarefas desta camada de

processamento foram divididas hierarquicamente como está representado na Figura 3.2.3. São transmitidos/recebidos dados de 40 em 40 ms, mas essa tarefa pode ser interrompida momentaneamente por uma tarefa de prioridade superior como é o caso da leitura dos sensores que é efectuada de 0.2 em 0.2 ms.

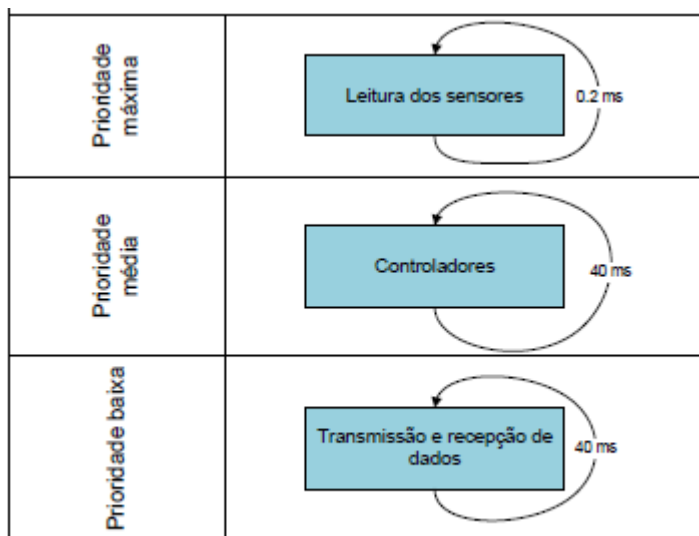


Figura 3.2.3 Estrutura hierárquica da camada de processamento inferior.

### 3.2.4 Controladores da velocidade dos motores

Os controladores da velocidade são responsáveis por actuar nas rodas para que a velocidade atinja o valor desejado.

Na Figura 3.2.4, está representado o esquema do sistema de controlo da velocidade dos motores. O micro-controlador gera um sinal em PWM que é convertido numa tensão através de um conversor DC-DC, tensão essa que é aplicada aos terminais do motor.

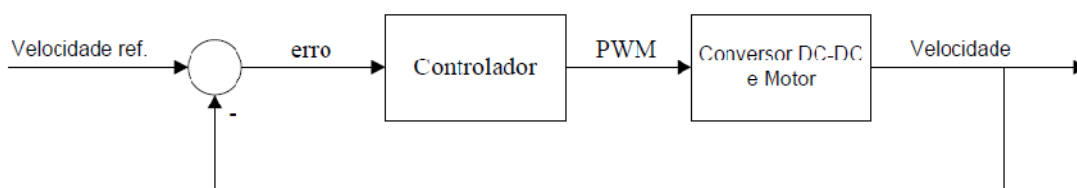


Figura 3.2.4 Esquema do sistema de controlo da velocidade dos motores.

Nas secções seguintes serão descritos os procedimentos seguidos para o dimensionamento e implementação dos controladores de velocidade das rodas.

#### 3.2.4.1 Identificação do sistema a controlar

O primeiro passo quando se está a projectar um controlador consiste na identificação do modelo, neste caso, o sistema constituído pelo conversor DC-DC e o motor. Para tal, aplicou-se um degrau na roda esquerda e um degrau de sinal oposto na roda direita e observaram-se as seguintes respostas representadas na Figura 3.2.5. A razão por se ter

escolhido o movimento de rotação do robô para o dimensionamento dos controladores deveu-se ao facto de este movimento ter um papel importante no sistema de localização absoluto.

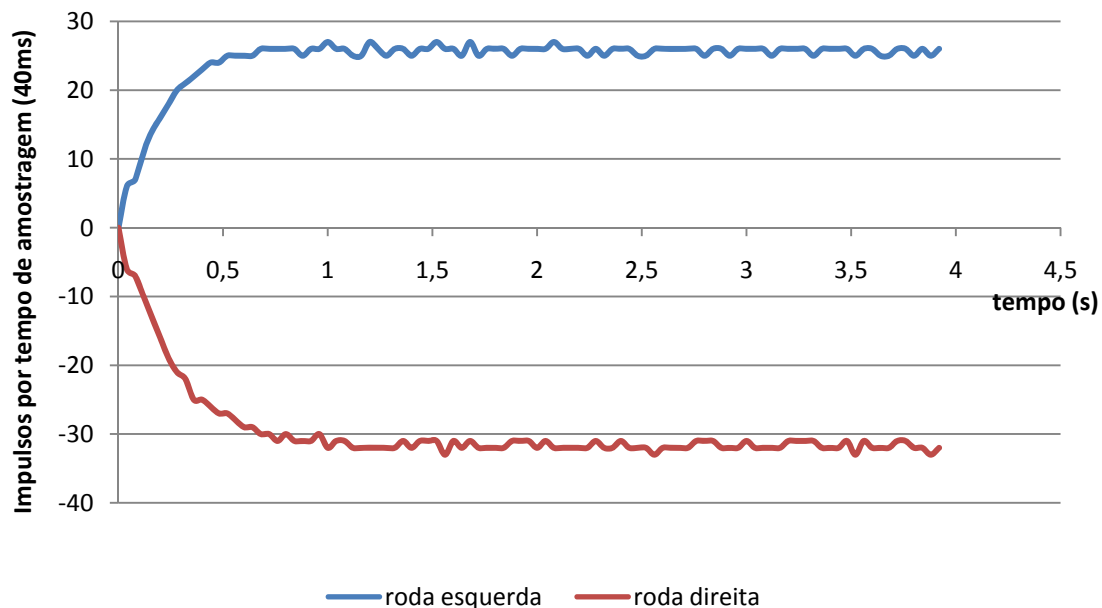


Figura 3.2.5 Resposta ao degrau da velocidade das rodas.

Analisando a Figura 3.2.5, observa-se uma resposta estável com um tempo de estabelecimento, sem sobreelongação. Este tipo de resposta ao degrau é típico de um sistema de primeira ordem modelado pela seguinte equação:

$$v(t) = G_{DC} * \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau}}\right) * U \quad (3.3)$$

Em que  $v(t)$  é a saída,  $U$  é a amplitude do degrau aplicado,  $G_{DC}$  é o ganho DC em regime permanente e  $\tau$  é a constante de tempo. O modelo vai ser então aproximado a um sistema de primeira ordem em que os parâmetros a calcular são, portanto, o ganho e a constante de tempo. Para tal, recorreu-se a um algoritmo de minimização numérica (newton), de forma a calcular os valores de  $G_{DC}$  e  $\tau$  que minimiza o erro quadrático entre a resposta impulsional do sistema e a equação 3.3. Obtiveram-se os seguintes resultados representados na Figura 3.2.6, exp1 e exp2 corresponde à expressão 3.3 com os parâmetros ( $G_{DC}$  e  $\tau$ ) estimados para a roda esquerda e a roda direita respectivamente. Como seria de esperar 3.3 é uma boa representação do sistema. É feita a média entre os parâmetros calculados entre a roda esquerda e direita, os parâmetros da planta considerada para o dimensionamento do controlador são  $G_{DC}=0,144$  s e  $\tau=0,229$  s.

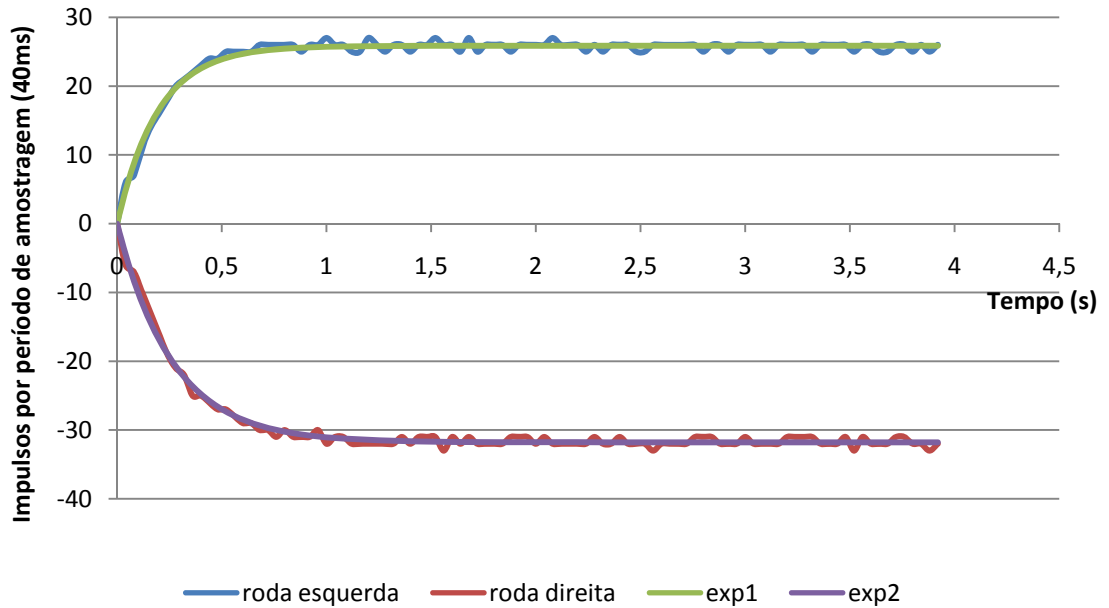


Figura 3.2.6 Resultados da aproximação a um sistema de primeira ordem.

### 3.2.4.2 Dimensionamento do controlador

O tipo de controlador escolhido para esta aplicação foi um controlador proporcional integrativo digital (PI). Isto porque este tipo de controlador é o suficiente para um sistema de 1ª ordem. Ou seja é o controlador mais simples que consegue ter erro nulo a entradas constantes e estabilizar devidamente o processo.

Começou-se por dimensionar o controlador para tempo contínuo, e depois de determinados os parâmetros do controlador, implementou-se no micro-controlador o seu equivalente discreto.

Na figura seguinte está o diagrama de blocos da função de transferência em Laplace do sistema controlado.

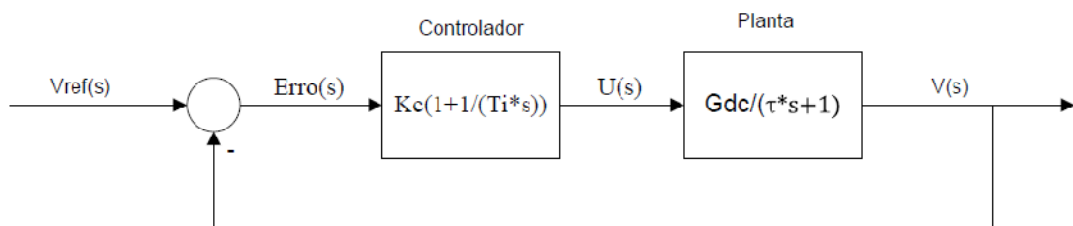


Figura 3.2.7 Diagrama de blocos do sistema controlado.

Em que a sua função de transferência em malha fechada é igual a:

$$\frac{V(s)}{V_{ref}(s)} = \frac{N(s)}{D(s)} = \frac{\left[ K_c \left( 1 + \frac{1}{T_i s} \right) \right] \left[ \frac{G_{DC}}{\tau s + 1} \right]}{1 + \left[ K_c \left( 1 + \frac{1}{T_i s} \right) \right] \left[ \frac{G_{DC}}{\tau s + 1} \right]} \quad (3.4)$$

$$N(s) = K_c * G_{DC} * (T_i * s + 1) \quad (3.5)$$

$$D(s) = s^2 + \left( \frac{1+K_c*G_{DC}}{\tau} \right) * s + \frac{K_c*G_{DC}}{Ti*\tau} \quad (3.6)$$

Temos então um sistema com dois pólos e um zero.

Os parâmetros do controlador a calcular são  $K_c$  e  $T_i$ . Definiu-se inicialmente um tempo de estabelecimento de 0.25 s sem sobreelongação acentuada. Os pólos foram calculados em função do protótipo de Bessel e o efeito do zero foi anulado pela colocação de um filtro entre  $V_{ref}$  e o sistema. Obteve-se  $K_c=44.67$  e  $T_i=0.08$ .

Antes de implementar o controlador no robô simulou-se o sistema. Na Figura 3.2.8, está o diagrama de blocos utilizado na simulação e obteve-se a resposta ao degrau representada na Figura 3.2.9.

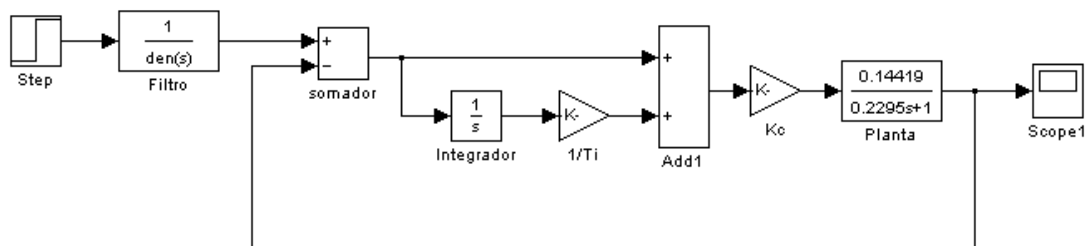


Figura 3.2.8 Sistema simulado.

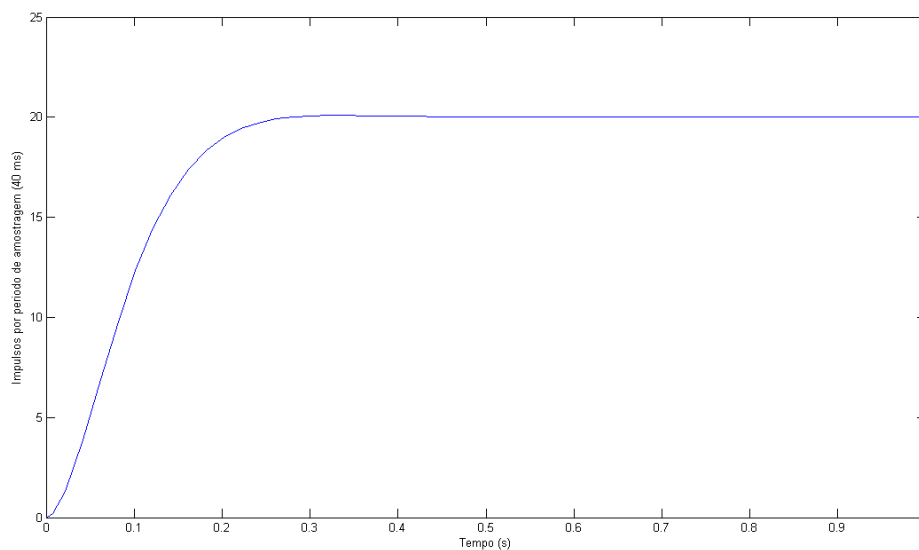


Figura 3.2.9 Resposta ao degrau simulada.

Como era de esperar, obteve-se a resposta pretendida, mas no modelo usado na simulação não foram consideradas não linearidades importantes do sistema e por isso a resposta real não se aproximou nada do esperado. Adicionaram-se então algumas não linearidades importantes ao sistema simulado (Figura 3.2.10), entre as quais, o atraso do controlador, pois este será implementado no seu modelo digital equivalente, com um atraso igual ao período de amostragem; a saturação do controlador; a zona

morta do motor que corresponde ao intervalo de valores de tensão para os quais a velocidade é zero; e a folga no motor, que é provocada pela caixa redutora.

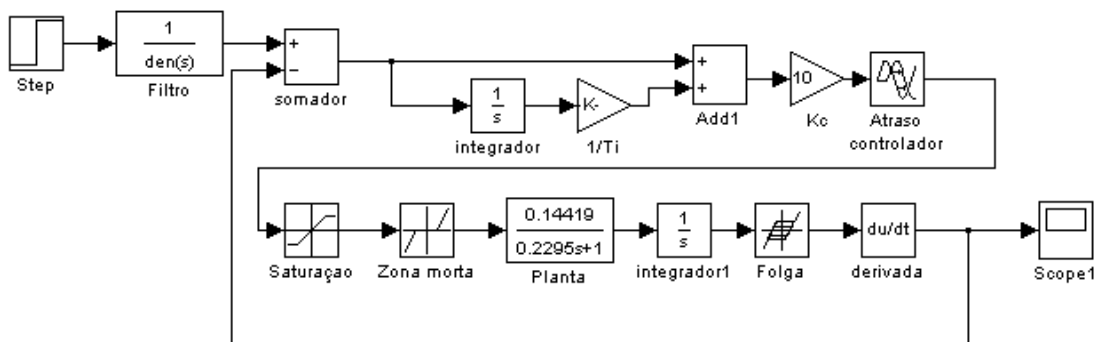


Figura 3.2.10 Sistema simulado com não linearidades.

Com este novo modelo mais próximo do real a resposta simulada já não é estável, Figura 3.2.11, e ficou mais de acordo com o que se observava na realidade.

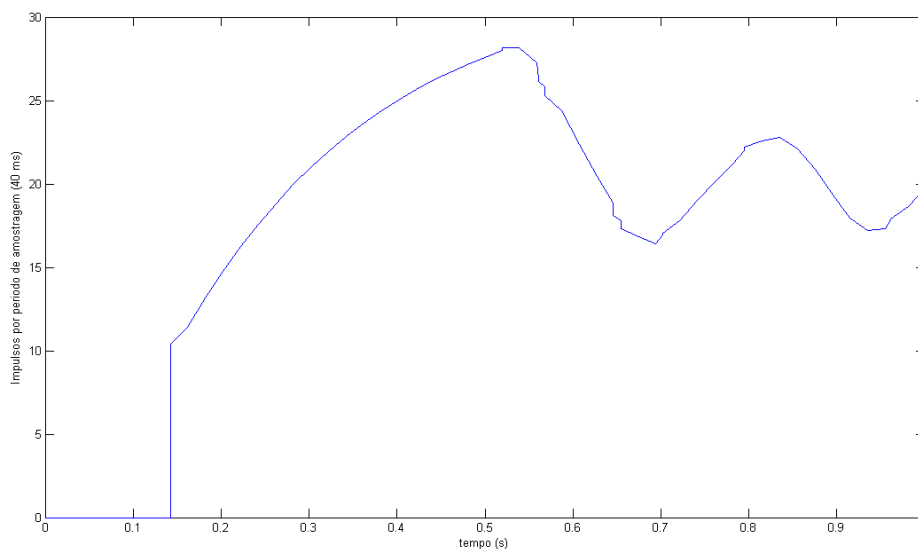


Figura 3.2.11 Resposta impulsional para tempo de estabelecimento de 0.25 s simulada com não linearidades.

Redefiniu-se então o tempo de estabelecimento 0.75 s e, recorrendo mais uma vez ao protótipo de Bessel, obteve-se  $k_c = 10.2665$  e  $T_i = 0.1657$ , através do modelo da Figura 3.2.10 obteve-se a resposta da Figura 3.2.12.

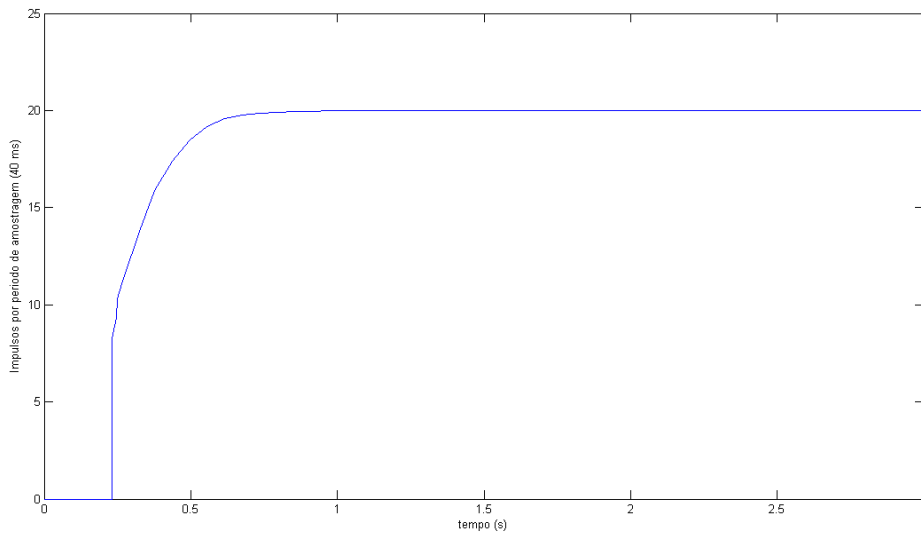


Figura 3.2.12 Resposta ao degrau para tempo de estabelecimento de 0.75 s simulada com não linearidades.

A especificação inicial de tempo de estabelecimento 0.25 segundos era exagerada fazendo com que o efeito das não linearidades do sistema de manifestassem, de forma a tornar a resposta do sistema instável, provocando oscilações no sistema. O mesmo não acontece para um tempo de estabelecimento de 0.75 segundos.

De seguida retirou-se o filtro do sinal de referência e ajustaram-se um pouco os parâmetros de maneira a que a saída ficasse sem sobreelongação. Com os parâmetros do controlador  $K_c=10$  e  $T_i=0.2$  obteve-se a resposta ao degrau representada Figura 3.2.13. Repara-se que desta forma conseguimos que o efeito do zero na função de transferência seja benéfico.

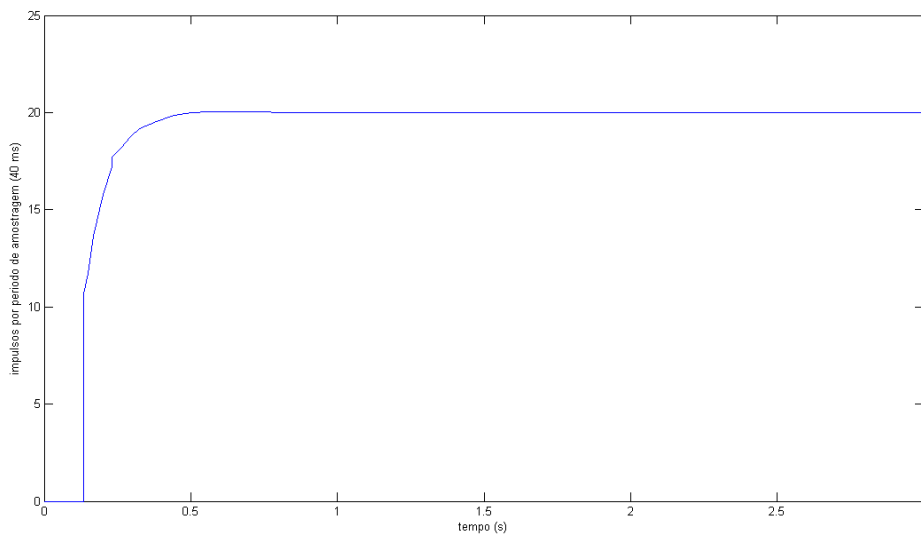


Figura 3.2.13 Resposta impulsional final simulada com não linearidades.



Com estes últimos parâmetros, implementou-se o equivalente digital do controlador no robô e obteve-se a resposta ao degrau representado na Figura 3.2.14, como se pode observar a resposta é muito similar à resposta simulada.

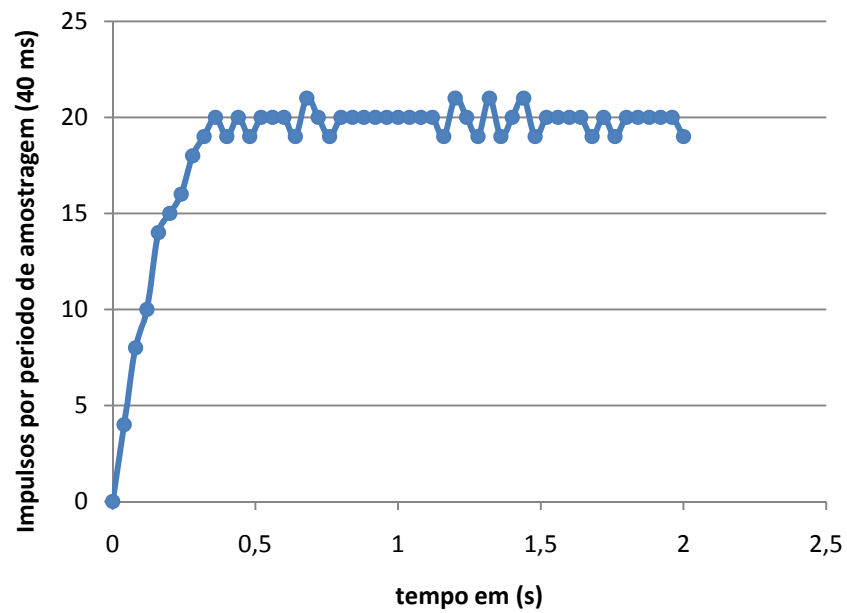


Figura 3.2.14 Resposta ao degrau da velocidade de uma das rodas do robô.

# Capítulo 4

## Odometria

Odometria é um dos métodos mais usados na determinação momentânea da pose<sup>3</sup> de um robô. Consiste na integração da informação incremental do movimento linear das rodas ao longo do tempo, de forma a medir o deslocamento efectuado pelo robô.

A grande limitação deste método deve-se à acumulação de erro ao longo da trajectória fazendo a medida da pose divergir do seu valor real. Isto porque, o deslocamento do robô é obtido a partir da integração das medidas do deslocamento linear de cada roda do robô, medidas essas afectadas por erros que serão então integrados ao longo do tempo. Os erros que afectam a odometria podem ser tanto de natureza sistemática como aleatória.

Mas, apesar disso, a odometria proporciona uma boa precisão a curto prazo, é económica de implementar e permite taxas de amostragem muito altas. Muitas vezes, na prática, o método utilizado consiste em ter a odometria a medir a pose actual do robô e existir outro método de localização que periodicamente corrige a pose medida pela odometria do robô.

Na secção 4.1 será apresentado o modelo da odometria; na secção 4.2 será discutida a questão dos erros sistemáticos que afectam a odometria, e será ainda descrito um método de calibração da mesma; a secção 4.3 abordada os erros aleatórios e apresenta uma forma de quantificar a certeza da medida da pose, através de um modelo do erro da odometria.

### 4.1 Modelo da odometria

Como está representado na Figura 4.1.1, a pose de um robô é definida pela sua posição  $(x, y)$  e orientação  $(\theta)$  em relação a um referencial cartesiano.  $U_e$ ,  $U_d$ ,  $D_e$  e  $D_d$  são o deslocamento e o diâmetro da roda esquerda e direita respectivamente,  $U$  o deslocamento linear efectuado pelo robô.

---

<sup>3</sup> Entenda-se por pose a posição cartesiana e a orientação do robot em relação a um referencial externo ao robô.

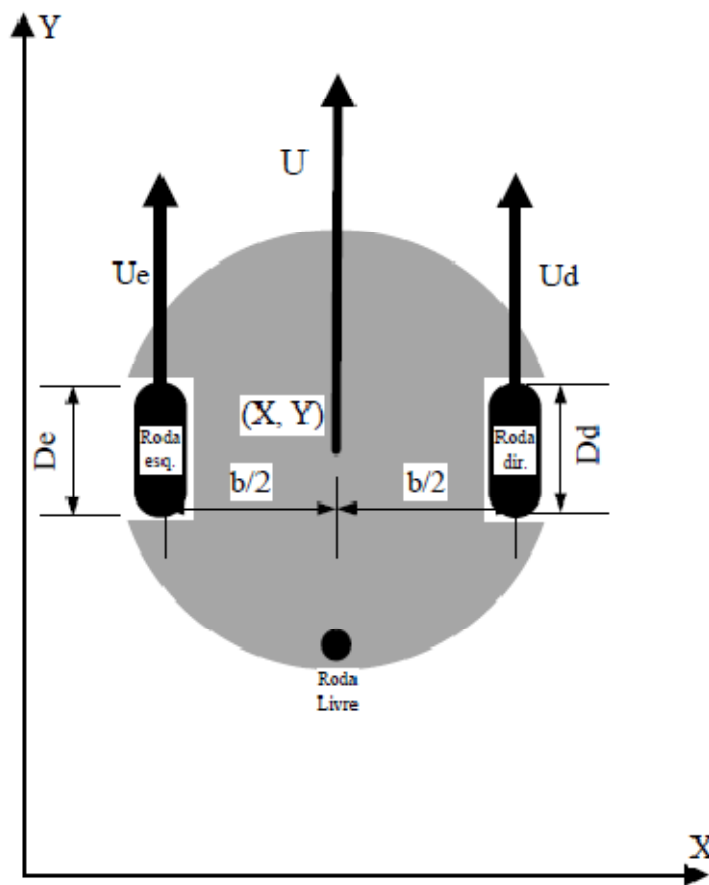


Figura 4.1.1 Robô diferencial

O modelo da odometria permite, a partir da informação dada periodicamente pelos *encoders* de cada roda,  $N_{e/d}(i)$ , medir a pose do robô entre intervalos de amostragem,  $i$ . A relação entre  $N_{e/d}(i)$  e o deslocamento de cada roda efectuado no período de amostragem  $i$ ,  $\Delta U_{e/d}(i)$ , é dada pelas seguintes expressões:

$$c_{e/d} = \frac{\pi \cdot D_{e/d}}{n \cdot R_e} \quad (4.1)$$

$$\Delta U_{e/d}(i) = c_{e/d} \cdot N_{e/d}(i) \quad (4.2)$$

Onde  $c_{e/d}$  é o factor de conversão entre os impulsos dos *encoders* e o deslocamento horizontal da respectiva roda,  $n$  é a relação da caixa redutora e  $R_e$  a resolução dos *encoders*.

A variação de deslocamento linear efectuado no período de amostragem  $i$  pelo robô,  $U(i)$ , será:

$$\Delta U(i) = \frac{\Delta U_d(i) + \Delta U_e(i)}{2} \quad (4.3)$$

A variação de rotação será:

$$\Delta \theta(i) = \frac{\Delta U_d(i) - \Delta U_e(i)}{b} \quad (4.4)$$

Em que  $b$  é a distância entre cada ponto de contacto das rodas com o chão.

A partir de  $U(i)$  e  $\theta(i)$  actualiza-se a pose da seguinte forma:

$$x(i+1) = x(i) + \Delta U(i) * \cos\left(\theta(i) + \frac{\Delta\theta(i)}{2}\right) \quad (4.5)$$

$$y(i+1) = x(i) + \Delta U(i) * \sin\left(\theta(i) + \frac{\Delta\theta(i)}{2}\right) \quad (4.6)$$

$$\theta(i+1) = \theta(i) + \Delta\theta(i) \quad (4.7)$$

O termo  $\Delta\theta(i)/2$  em 4.4 e 4.5 é utilizado de modo a centrar a discretização aqui efectuada (ver Figura 4.1.2) [9]. Desta forma, diminui-se o erro introduzido pela discretização em 4.5, 4.6 e 4.7.

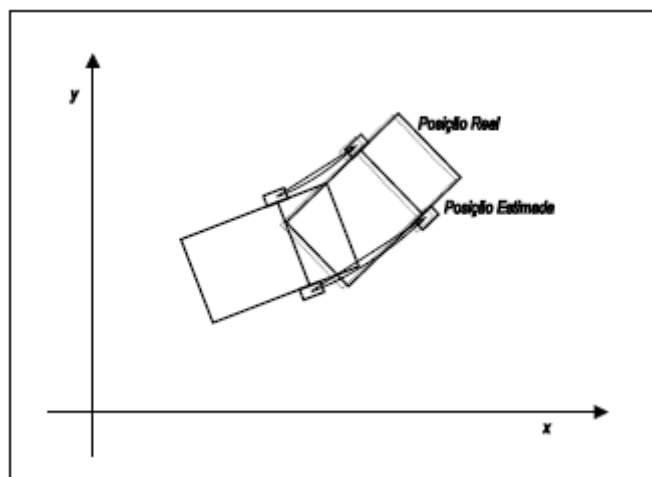


Figura 4.1.2 Discretização por diferenças centradas

Neste ponto, podemos concluir que os parâmetros necessários para o modelo da odometria são: o factor de conversão entre os impulsos dos *encoders* e o deslocamento horizontal da respectiva roda,  $C_{e/d}$ ; e a distância entre cada ponto de contacto das rodas com o chão,  $b$ .

Para  $C_{e/d}$ , a redução da caixa e a resolução obtêm-se directamente. De maneira a medir o diâmetro das rodas começou-se por considera-lo igual para ambas; através do controlo manual implementado no robô percorreu-se uma longa distância em linha recta, a baixa velocidade; e durante este percurso é guardada a quantidade total de impulsos medidos pelos *encoders*. Com estes dados e com 4.1, 4.2 e 4.3 obtêm-se a média do diâmetro das duas rodas ( $D_m$ ).

Para uma distância de 17,042 m, a quantidade total de impulsos medidos pelos encoder da roda esquerda e da roda direita foi, respectivamente, 20861 e 20845, sendo  $R_e * n = 360$ . Através das equações 4.1, 4.2 e 4.3 obtêm-se um diâmetro médio,  $D_m$ , para as duas rodas de 9,3649 cm, valor esse utilizado inicialmente em ambas as rodas.

Para a distância entre cada ponto de contacto das rodas com o chão ( $b$ ), aplicou-se uma velocidade igual de sinais opostos às rodas, de forma a que o robô rode em torno de si próprio. Após 10 voltas completas registou-se o valor total dos impulsos medidos pelos *encoders*: obteve-se 9979 para a roda esquerda e 9955 impulsos para a roda direita. Através da expressão 4.4 obtêm-se o valor de 25,93 cm.

## 4.2 Erros sistemáticos e calibração da odometria

Os erros sistemáticos são específicos do robô e podem ter as seguintes origens: as rodas terem diâmetros diferentes uma da outra; erro na medida do diâmetro médio das rodas; erro na medida da distância entre rodas ( $b$ ); rodas mal alinhadas. Geralmente este tipo de erros não se alteram significativamente ao longo do tempo, mas alterações da carga que o robô transporta, ou a sua distribuição, podem alterar a deformação dos pneus e alterar tanto o diâmetro das rodas como o ponto de contacto das rodas com o chão, e conseqüentemente alterar o valor de  $b$  [10].

O efeito dos erros sistemáticos é particularmente importante, pois, sendo estes mais ou menos constantes e estando integrados juntamente com as medidas ao longo do tempo, o seu efeito está a cada período de amostragem a ser adicionado à medida da pose.

Tratando-se de erros sistemáticos, é possível diminuir o seu efeito recorrendo a uma calibração. Quanto melhor calibrado tiver um sistema de odometria num robô menos vezes será necessário corrigir a pose do robô através do sistema de localização, o que no caso específico deste trabalho representa uma enorme vantagem.

De forma a identificar e compensar os erros sistemáticos recorreu-se a uma técnica de calibração designada por UMBmark [10].

Na secção 4.2.1 serão abordados os princípios gerais do método de calibração UMBmark, sendo que uma explicação com maior detalhe poderá ser encontrada em [10]. Na secção 4.2.2 será descrito o método experimental e apresentados os resultados obtidos através deste método de calibração.

### 4.2.1 Calibração UMBmark

K. S. Chong e L. Kleeman (1997), [10] apresentam um método sistemático de calibração do sistema de odometria de um robô de tracção diferencial, de forma a compensar o efeito dos erros sistemáticos.

São identificadas três fontes dominantes de erros sistemáticos:

O erro devido a diâmetros das rodas diferentes, definido por:

$$E_d = \frac{D_d}{D_e} \quad (4.8)$$

Normalmente as rodas utilizadas em robótica móvel recorrem a pneus de borracha de modo a melhorar a tracção (como é o caso do presente trabalho). Conseqüentemente ocorrem pequenos desvios do valor nominal do diâmetro das rodas, desvios esses que podem ter origem na própria construção do pneu ou numa distribuição não uniforme da carga do robô. Este último pode provocar uma deformação dos pneus que seja diferente entre a roda esquerda e a roda direita.

O erro devido à incerteza da distância entre os pontos de contacto das rodas com o chão é definido por:

$$E_b = \frac{b_{\text{real}}}{b_{\text{actual}}} \quad (4.9)$$

Consiste na razão entre o valor real  $b$  e o valor actual usado no sistema de odometria. Esta incerteza deve-se ao facto de a superfície de contacto das rodas com o chão não ser pontual. No caso particular do robô aqui desenvolvido esta incerteza é maior, pois são usadas rodas com uma grande espessura (ver secção 3.1.6).

Erro de escala,  $E_s$  definido por:

$$E_s = \frac{D_{m,\text{real}}}{D_{m,\text{actual}}} \quad (4.10)$$

Consiste na razão entre o valor real do diâmetro médio das duas rodas e o valor usado na odometria.  $D_m$  é de fácil de obter e a sua medição encontra-se descrita na secção anterior. Considera-se que este erro já está correctamente compensado, e que o seu efeito já não é significativo no sistema de odometria.

O método de calibração UMBmark permite identificar separadamente o erro provocado por  $E_d$  e  $E_b$  e, desta forma, compensar correctamente o efeito que cada um provoca na odometria. Esta identificação é conseguida medindo a diferença entre a pose real e a pose medida pelo sistema de odometria, após o robô percorrer uma trajectória em forma de quadrado no sentido dos ponteiros do relógio (PR) e repetir a mesma mas no sentido contrario dos ponteiros do relógio (CPR).

A Figura 4.2.1 mostra o efeito de  $E_d$  durante a trajectória quadrangular no sentido PR e CPR.

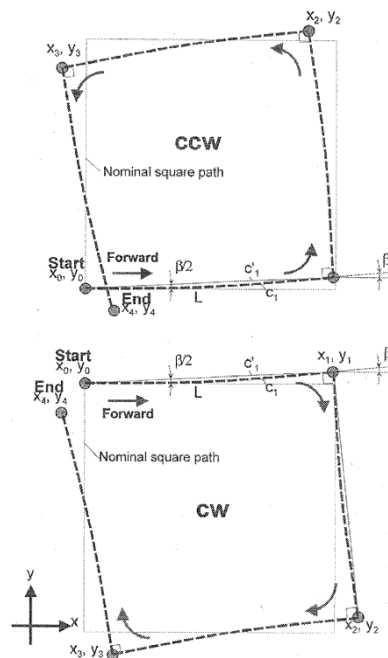


Figura 4.2.1 Efeito de  $E_d$  durante o percurso quadrangular no sentido CPR (cima), e no sentido PR (baixo), retirada de [10].

Observa-se que  $E_d$  afecta apenas o movimento de translação do robô, efeito que se traduz numa ligeira curvatura da trajectória ao longo dos seus quatro lados. Devido a essa curvatura, o robô acumula um erro de orientação em cada lado da trajectória, denominado por  $\beta$ .

A Figura 4.2.2 mostra o efeito de  $E_b$  durante a trajectória quadrangular no sentido PR e CPR.

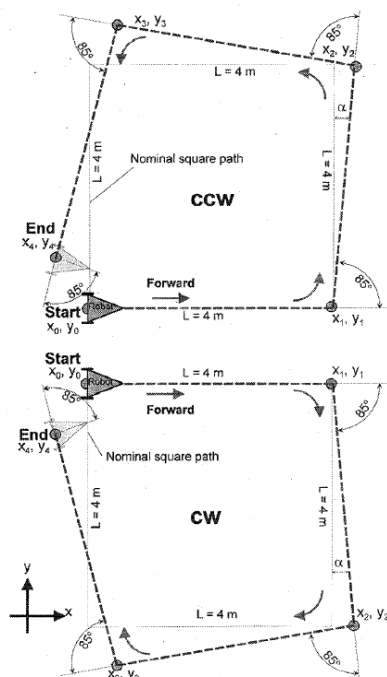


Figura 4.2.2 Efeito de  $E_b$  durante o percurso quadrangular no sentido CPR (cima), e no sentido PR (baixo), retirada de [10].

Observa-se que  $E_b$  afecta a odometria apenas no movimento de rotação do robô, o que se traduz num erro da medição da quantidade de rotação do robô ( $\alpha$ ).

Conclui-se observando a Figura 4.2.1 que  $E_d$  reduz (ou aumenta) a quantidade total de rotação efectuada durante o percurso quadrangular no sentido contrário dos ponteiros do relógio, mas aumenta (ou reduz) a quantidade total de rotação no percurso efectuada no sentido dos ponteiros do relógio. Contrariamente, observa-se na Figura 4.2.2 que  $E_b$  aumenta (ou reduz) a quantidade total de rotação efectuada tanto no percurso efectuada no sentido PR como no sentido CPR. Dai, este método permitir isolar os efeitos de  $E_d$  e  $E_b$ , pois se na trajectória quadrangular, quando realizada num determinado sentido, estes efeitos se compensam mutuamente (dando uma ideia errada da qualidade da odometria), o mesmo não acontece quando efectuamos essa mesma trajectória no sentido inverso. No último caso, os efeitos  $E_d$  e  $E_b$  somam-se um ao outro de forma a aumentar o erro total da pose.

#### 4.2.2 Calibração dos erros sistemáticos usando o método UMBmark

Recorrendo ao sistema de visão SmHAL descrito em 3.1.10, mediu-se o erro em x ( $\Delta x$ ) e em y ( $\Delta y$ ) da odometria quando o robô acabara de percorrer uma trajectória

quadrangular com 3,10 m de lado (D). A trajectória foi efectuada a baixa velocidade, de maneira a evitar a derrapagem das rodas. Foram realizados seis ensaios tanto no sentido dos ponteiros do relógio, como no sentido contrário ao sentido dos ponteiros dos relógio. Obtiveram-se os resultados representados na Figura 4.2.3.

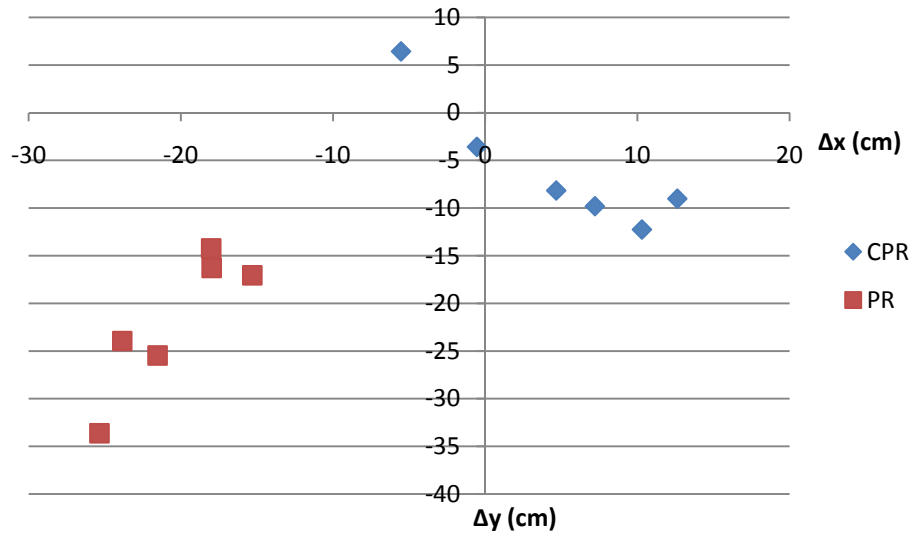


Figura 4.2.3 Erro na posição após a trajectória quadrangular bidireccional

Observa-se que os resultados estão agrupados em duas regiões correspondentes ao sentido em que o percurso foi efectuada, evidenciando o efeito dos erros sistemáticos provocados por  $E_d$  e  $E_b$ . Cada região apresenta, também, uma certa dispersão provocada pelos erros aleatórios. (Questão que será abordada nas secções seguintes).

A partir destes dados, calcula-se o centro de massa do erro em x ( $X_{cm}$ ) e em y ( $Y_{cm}$ ) para cada região, a partir das seguintes expressões:

$$X_{cm,PR,CPR} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \Delta x_{i,PM,CPR} \quad (4.11)$$

$$Y_{cm,PR,CPR} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \Delta y_{i,PM,CPR} \quad (4.12)$$

Obteve-se os seguintes valores apresentados na Tabela 4.2.1.

Tabela 4.2.1 Centros de massa obtidos

|                      | CPR    | PR     |
|----------------------|--------|--------|
| $X_{cm,PR,CPR}$ (cm) | 4,786  | -20,34 |
| $Y_{cm,PR,CPR}$ (cm) | -6,068 | -21,77 |

Com estes resultados calcula-se o ângulo  $\alpha$  e  $\beta$  através das seguintes expressões:

$$\alpha = \text{média} \left( \frac{X_{cm,PR} + X_{cm,CPR}}{-4 * D}, \frac{Y_{cm,PR} - Y_{cm,CPR}}{-4 * D} \right) \quad (4.13)$$

$$\beta = \text{média} \left( \frac{X_{cm,PR} - X_{cm,CPR}}{-4 * D}, \frac{Y_{cm,PR} + Y_{cm,CPR}}{-4 * D} \right) \quad (4.14)$$



Em que  $D$  é a dimensão do lado da trajectória quadrangular. Obteve-se  $\alpha=0,7220^\circ$  e  $\beta=1,224^\circ$ .

A partir de  $\alpha$  calcula-se  $E_b$  com a seguinte expressão:

$$E_b = \frac{90^\circ}{90^\circ - \alpha} \quad (4.15)$$

Com  $E_b=1,006$  calcula-se o novo  $b$  ( $b_{\text{real}}$ ) com a expressão 4.9, em que  $b_{\text{actual}}$  corresponde ao valor medido na experiência descrita na secção 4.1. Obtém-se, assim, um novo  $b_{\text{real}}=26,08$  cm.

A partir de  $\beta$  calcula-se  $E_d$  com a seguintes expressões:

$$R = \frac{D/2}{\text{sen}(\beta/2)} \quad (4.16)$$

$$E_d = \frac{R+b/2}{R-b/2} \quad (4.17)$$

Em que  $R$  é o raio da trajectória do movimento de translação do robô e  $b$  é o  $b_{\text{real}}$  calculado anteriormente. Calcula-se o novo diâmetro de cada roda a partir da equação 4.8 e de forma a não alterar o diâmetro médio ( $D_m$ ) medido na secção 4.1, o que resulta nas seguintes equações:

$$D_e = \frac{2}{E_d+1} * D_m \quad (4.18)$$

$$D_d = \frac{2}{(1/E_d)+1} * D_m \quad (4.19)$$

Obtém-se assim um novo diâmetro para a roda esquerda, de  $D_e=9,357$  cm; e para a roda direita de  $D_d=9,374$  cm.

Com estes novos parâmetros voltou-se a repetir a experiência e obteve-se os resultados representados na Figura 4.2.4.

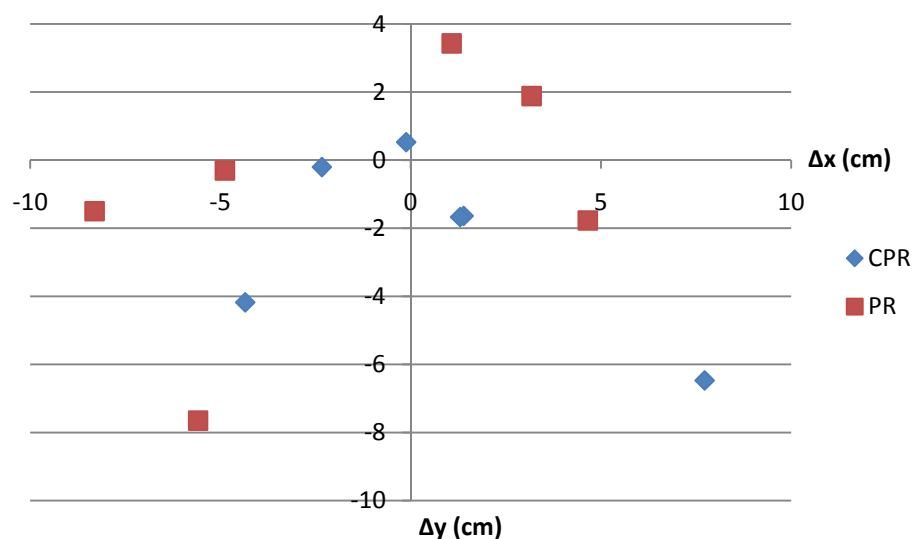


Figura 4.2.4 Erro na posição após a trajectória quadrangular bidireccional após calibração da odometria

Como podemos constatar, já não se verificam dois conjuntos de pontos, o que indica uma boa compensação dos erros sistemáticos. Comparando a Figura 4.2.3 e a Figura 4.2.4 observa-se uma clara melhoria da precisão da odometria.

### 4.3 Erros aleatórios e modelo do erro da odometria

Erros aleatórios ou não sistemáticos devem-se em grande parte a eventos externos ao robô, sendo portanto impossíveis de prever. Podem ser originados pelo resvalamento das rodas (piso escorregadio, aceleração excessiva, forças externas), por pavimentos irregulares ou devido a objectos inesperados no chão. Outra fonte de erros aleatórios deve-se à resolução dos *encoders*, à discretização e aproximações introduzidas nas equações usadas no modelo da odometria [9], embora esta fonte de erro seja de pouca importância no caso de o tempo de amostragem dos *encoders* ser elevado em relação à velocidade do robô.

Apesar da natureza aleatória destes erros, é necessário quantificar a certeza da pose calculada pela odometria, de forma a decidir em que altura recorrer ao sistema de localização do robô para corrigir a sua pose actual. Daí a importância de um modelo estocástico do erro da odometria.

#### 4.3.1 Modelo estocástico do erro da odometria

Sebastian Thrun et al (2005), [11], propõe um modelo para o erro da odometria. A informação dada pela odometria é decomposta em três movimentos, duas rotações e uma translação, como está representado na Figura 4.3.1.

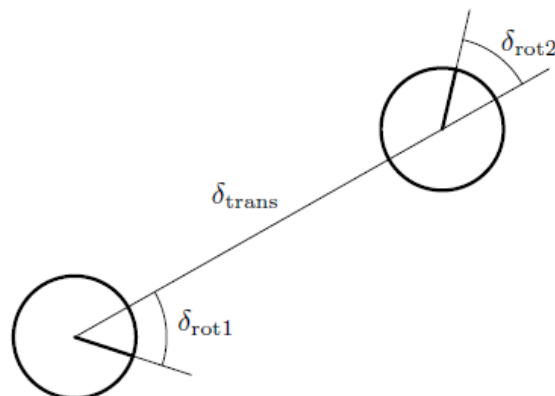


Figura 4.3.1 Divisão do deslocamento efectuado em duas rotações e uma translação.

Cada um desses movimentos é afectado de forma independente, por ruído de distribuição normal de média nula. Este modelo possui quatro parâmetros que são utilizados para calcular a distribuição da probabilidade de cada um dos movimentos. Este modelo é apropriado para a aproximação, através de partículas, da função de distribuição da probabilidade o que requer algum poder de cálculo que poderemos não ter disponível.

Recorreu-se então ao modelo apresentado em [12], que apresenta a seguinte forma:

$$\begin{bmatrix} x(t+1) \\ y(t+1) \\ \theta(t+1) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x(t) + \Delta U * \cos(\theta(t) + \Delta\theta/2) \\ Y(t) + \Delta U * \text{sen}(\theta(t) + \Delta\theta/2) \\ \theta(t) + \Delta\theta \end{bmatrix} + W(t) \quad (4.20)$$

Alternativamente:

$$X(t+1) = F(X(t), \Delta U, \Delta\theta) + W(t) \quad (4.21)$$

Temos então as equações 4.5, 4.6 e 4.7 adicionadas por um ruído  $W(t)$  a cada período de amostragem. O ruído  $W(t)$  considera-se com uma distribuição normal de média nula e uma matriz de covariância  $Q(t)$  definida por:

$$E[W(t)] = 0 \quad (4.22)$$

$$E[W(t) * W(t)^T] = Q(t) \quad (4.23)$$

Em que  $E$  representa o valor esperado.

Considerando que os ruídos que afectam a medição de  $x$ ,  $y$  e  $\theta$  pelo sistema de odometria são independente entre si,  $Q(t)$  é então uma matriz diagonal:

$$Q(t) = \begin{bmatrix} Q_{11} & 0 & 0 \\ 0 & Q_{22} & 0 \\ 0 & 0 & Q_{33} \end{bmatrix} \quad (4.24)$$

Os seus termos  $Q_{11}$ ,  $Q_{22}$  e  $Q_{33}$  são aproximados por:

$$Q_{11} = K_{uu} |\Delta U * \cos(\theta(t))| \quad (4.25)$$

$$Q_{22} = K_{uu} |\Delta U * \text{sen}(\theta(t))| \quad (4.26)$$

$$Q_{33} = K_{u\theta} |\Delta U| + K_{\theta\theta} |\Delta\theta| \quad (4.27)$$

$K_{uu}$  é o coeficiente que relaciona o erro da odometria ao longo de  $U$  (translação do robô) em relação a  $\Delta U$ ;  $K_{u\theta}$  relaciona o erro da odometria ao longo de  $\theta$  (rotação do robô) em relação a  $\Delta U$ ;  $K_{\theta\theta}$  relaciona o erro da odometria ao longo de  $\theta$  em relação a  $\Delta\theta$ .

Define-se a matriz de covariância do erro da pose  $C(t)$ :

$$C(t) = \begin{bmatrix} \text{Var}(x(t)) & \text{Cov}(x(t), y(t)) & \text{Cov}(x(t), \theta(t)) \\ \text{Cov}(x(t), y(t)) & \text{Var}(y(t)) & \text{Cov}(y(t), \theta(t)) \\ \text{Cov}(x(t), \theta(t)) & \text{Cov}(y(t), \theta(t)) & \text{Var}(\theta(t)) \end{bmatrix} \quad (4.28)$$

Onde  $\text{Var}$  e  $\text{Cov}$  significa respectivamente variância e covariância.

Em que  $C(t+1)$  é obtido a partir da seguinte expressão:

$$C(t+1) = \frac{dF(t)}{dX(t)} * C(t) * \left(\frac{dF(t)}{dX(t)}\right)^T + Q(t) \quad (4.29)$$

Em que  $d(F(t))/dX(t)$  corresponde à seguinte matriz:

$$\frac{dF(t)}{dX(t)} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & -\Delta U * \text{sen}(\theta(t) + \Delta\theta/2) \\ 0 & 1 & \Delta U * \text{cos}(\theta(t) + \Delta\theta/2) \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4.30)$$

A expressão 4.29 corresponde à propagação do erro da odometria a partir da linearização de F em relação a X do instante t, adicionada por uma incerteza em x, y,  $\theta$  dependente de  $\Delta U$  e  $\Delta\theta$ .

Realizaram-se duas experiências com o objectivo de observar os erros aleatórios no sistema de odometria, e determinar os parâmetros do modelo do erro descrito acima.

A primeira experiência consistiu em percorrer uma distância de 7 metros em linha recta (recta na direcção do referencial x) e registar no fim do percurso o erro da odometria através do sistema de visão SmHAL. Foram realizados 40 ensaios de forma a observar a dispersão dos resultados. A partir destes resultados, e considerando a média das distâncias percorridas ( $\text{med}(x_{\text{total}})$ ), a variância da medida de x ( $\text{VAR}(x)$ ) e  $\theta$  ( $\text{VAR}(\theta)$ ) observadas, definiu-se  $K_{uu}$  e  $K_{u\theta}$  da seguinte forma:

$$K_{uu} = \frac{\text{VAR}(x)}{\text{med}(x_{\text{total}})} \quad (4.31)$$

$$K_{u\theta} = \frac{\text{VAR}(\theta)}{\text{med}(x_{\text{total}})} \quad (4.32)$$

A segunda experiência consistiu em registar o erro da odometria após uma rotação. De um modo similar ao da experiência anterior foram realizados 40 ensaios e definiu-se  $K_{\theta\theta}$ :

$$K_{\theta\theta} = \frac{\text{VAR}(\theta)}{\text{med}(\theta_{\text{total}})} \quad (4.33)$$

Durante a segunda experiência verificou-se que o movimento de rotação é especialmente crítico. Apesar da calibração efectuada, aumentando a velocidade de rotação (mas não ao ponto de ocorrer derrapagens) ou alterando a superfície onde o robô rodava, verificou-se um aumento do erro sistemático da orientação. Isto deve-se ao facto de as rodas utilizadas terem uma espessura considerável, ver secção 3.1.6, fazendo com que o ponto de contacto das rodas com o chão varie mais facilmente.

Os valores obtidos para os parâmetros do modelo do erro da odometria estão apresentados na Tabela 4.3.1.

Tabela 4.3.1 Valores dos parâmetros do modelo do erro da odometria

|                    |                               |
|--------------------|-------------------------------|
| $K_{uu}$           | 6,53E-4 cm <sup>2</sup> /cm   |
| $K_{u\theta}$      | 1,91E-07 rad <sup>2</sup> /cm |
| $K_{\theta\theta}$ | 7,12E-5 rad <sup>2</sup> /rad |

É de referir que os parâmetros aqui calculados são específicos do ambiente em que o robô navega. Por exemplo, se as experiências fossem efectuadas num piso mais rugoso certamente obteríamos valores de  $K_{uu}$ ,  $K_{u\theta}$  e  $K_{\theta\theta}$  maiores. Estes valores traduzem a confiança que temos no sistema de odometria. No presente trabalho o valor de  $K_{\theta\theta}$  foi duplicado relativamente ao apresentado na Tabela 4.3.1, para se ter uma estimativa mais pessimista mas que aumenta a robustez do sistema em relação à sua localização global.



# Capítulo 5

## Localização

A capacidade de um robô móvel conhecer a sua localização em relação a um referencial externo é um dos requisitos fundamentais para a autonomia do mesmo. Neste capítulo será apresentado o sistema de autolocalização desenvolvido e, tendo sempre presente de que se trata de um robô móvel de baixo custo, pretende-se que o sistema de localização não exija grande poder de cálculo, possibilitando a sua implementação em plataformas computacionais de baixo custo como é o caso, por exemplo, de um micro-controlador.

Dado isto, pretende-se que o robô se localize de forma a navegar autonomamente dentro de uma área limitada definida a partir de uns sensores que se designam por balizas.

### 5.1 Definição do problema

O problema consiste em determinar a posição  $x$ ,  $y$  e a orientação  $\theta$  do robô em relação a um referencial definido por duas balizas distinguíveis entre si (ver Figura 5.1.1). A distância entre as duas balizas,  $D_b$ , é conhecida e fixa (ver secção 3.1.9). O robô possui um sistema de localização relativo baseado em odometria e um sensor que detecta a presença de uma baliza quando esta se encontra com uma determinada orientação em relação ao robô (ver secção 3.1.4).

A detecção das balizas só é possível em posições com um valor  $y$  maior que zero.

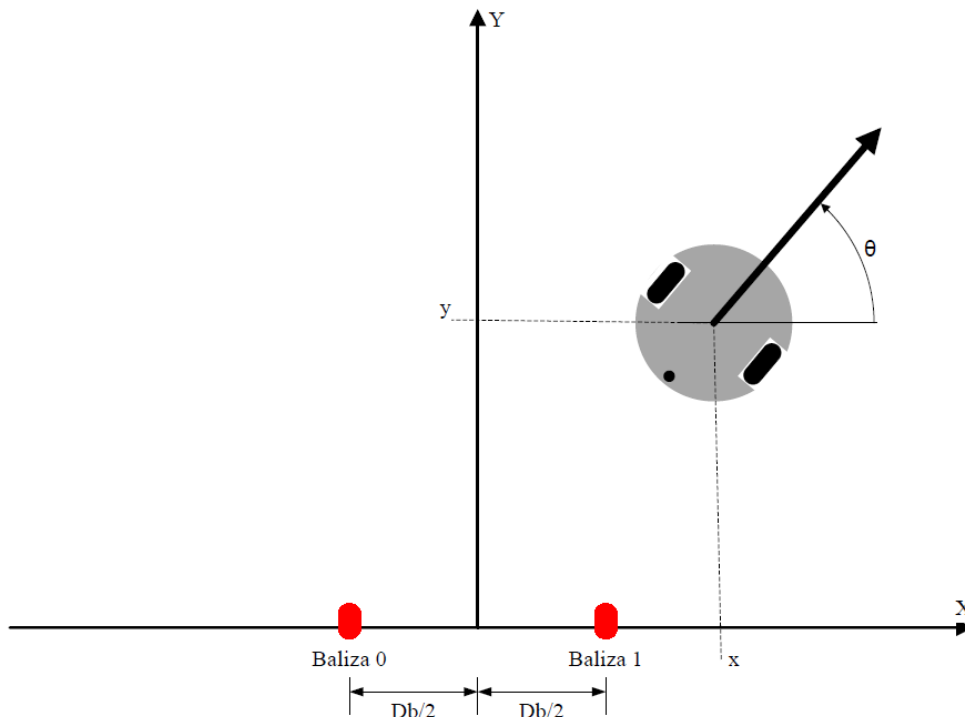


Figura 5.1.1 Definição do problema.

## 5.2 Autolocalização através de duas balizas

A solução adoptada para o problema apresentado consiste na medição simultânea de duas grandezas: o ângulo formado entre os segmentos que unem o robô e as duas balizas e a distancia do robô às balizas. Contudo, como o robô apenas consegue medir o ângulo relativo a que se encontra uma baliza, a medição da distância é feita de forma indirecta. Cada uma dessas medidas irá definir o lugar geométrico de todos os pontos nos quais o robô se pode encontrar. Quando a localização se faz a duas dimensões, esse lugar geométrico é geralmente uma linha que recebe o nome de linha de posição. A determinação da posição do robô faz-se mediante a intersecção de várias linhas de posição [1].

### 5.2.1 Medição do ângulo entre duas balizas

De forma a medir o ângulo formado entre os segmentos de recta que unem as balizas ao robô ( $\beta$ ), este executa um movimento de rotação de  $360^\circ$ . Através do sensor das balizas e da odometria é medido o ângulo  $\beta$ . A medida de  $\beta$  define uma linha de posição que consiste numa circunferência (circ2) de raio  $R_{cir2}$  e centro em  $x_2$  e  $y_2$  (Figura 5.2.1).



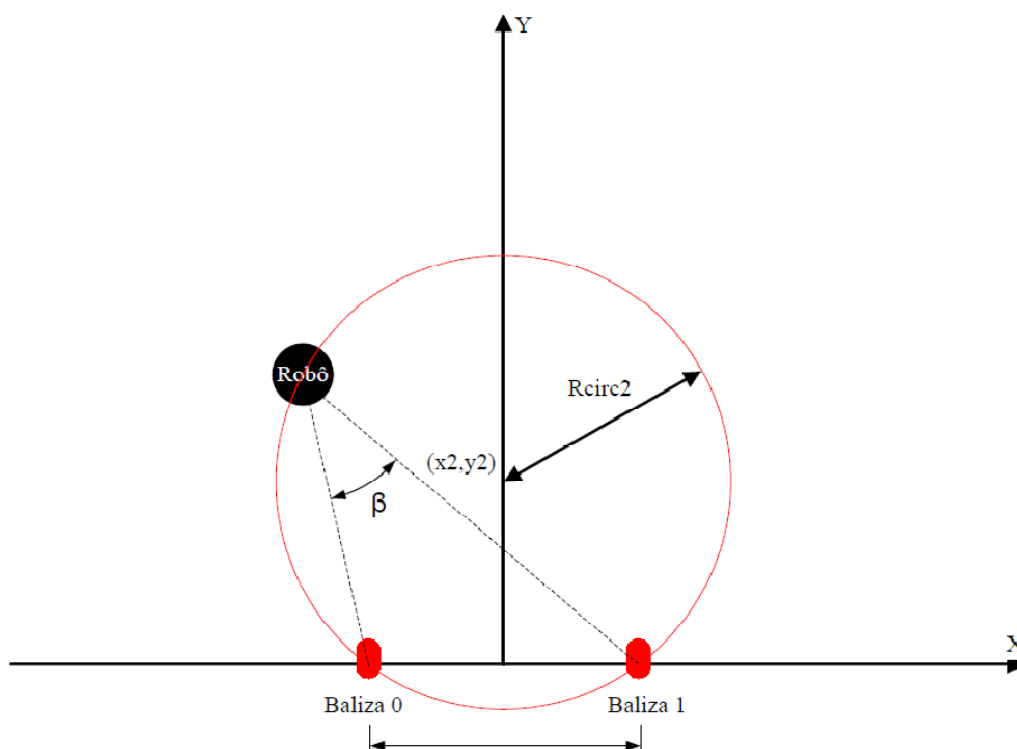


Figura 5.2.1 Medição do ângulo entre as duas balizas.

Em que  $x_2$  é igual a zero e  $y_2$  e  $R_{circ2}$  são obtidos a com as seguintes expressões a partir da lei dos senos (ver secção B.1):

$$R_{circ2} = \frac{Db}{2 * \text{sen}(\beta)}, \beta \in ]0^\circ, 180^\circ[ \quad (5.1)$$

$$y_2 = \sqrt{R_{circ2}^2 - \left(\frac{Db}{2}\right)^2} \text{ se } \beta \in ]0^\circ, 90^\circ[ \quad (5.2)$$

ou

$$y_2 = -\sqrt{R_{circ2}^2 - \left(\frac{Db}{2}\right)^2} \text{ se } \beta \in [90^\circ, 180^\circ[ \quad (5.3)$$

### 5.2.2 Medição da distância às balizas

Para medir a distância a cada baliza, o robô roda  $360^\circ$  na posição 1 (P1), move-se até a posição 2 (P2) e volta a executar uma rotação de  $360^\circ$  (Figura 5.2.2). A partir da odometria e do sensor das balizas são medidas as seguintes grandezas: a distância entre P1 e P2 (D); o ângulo definido pelo segmento de recta que une a baliza 0/1 ( $b_0/1^4$ ) a P1 com o segmento de recta que une P1 a P2 ( $\alpha_{0/1,1}^5$ ); o ângulo definido pelo segmento de recta que une  $b_0/1$  a P2 com o segmento de recta que une P1 e P2 ( $\alpha_{0/1,2}^6$ ). Na Figura

<sup>4</sup> A notação  $b_0/1$  refere-se a uma balizas, a baliza 0 ou a baliza 1.

<sup>5</sup> A notação  $\alpha_{0/1,1}$  refere-se simultaneamente ao ângulo  $\alpha_{0,1}$  e  $\alpha_{1,1}$  da Figura 5.2.2.

<sup>6</sup> A notação  $\alpha_{0/1,2}$  refere-se simultaneamente ao ângulo  $\alpha_{0,2}$  e  $\alpha_{1,2}$  da Figura 5.2.2.

5.2.2 está representado o método de determinação da distância às balizas, bem como a definição dos ângulos acima descritos.

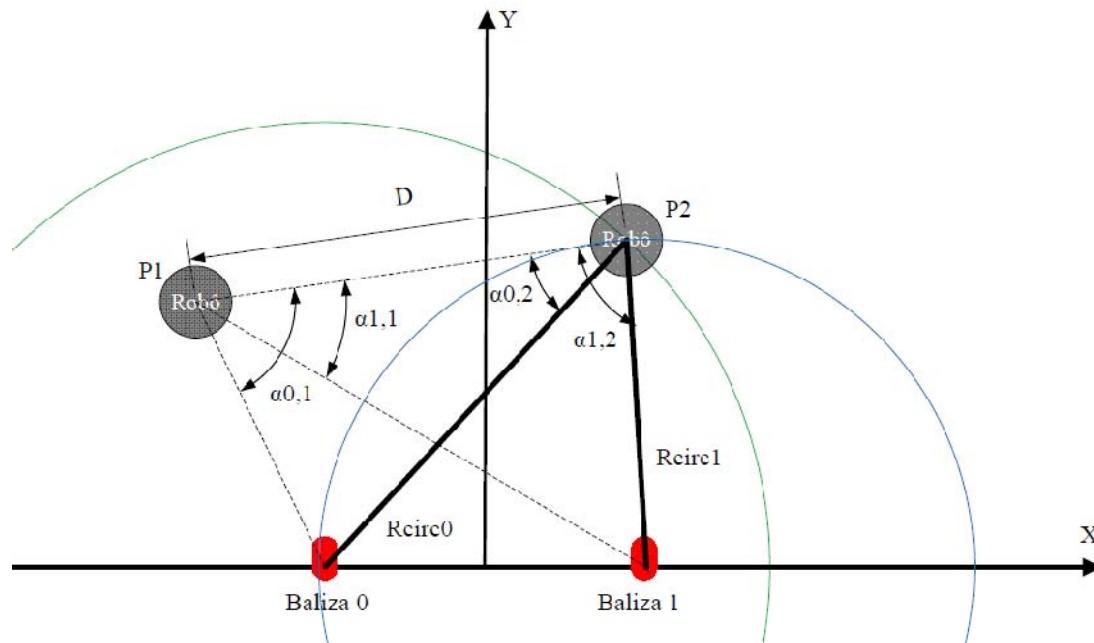


Figura 5.2.2 Medição da distância às balizas.

A partir de  $D$ ,  $\alpha_{0/1,1}$  e  $\alpha_{0/1,2}$  são geradas duas linhas de posição correspondentes a duas circunferências, designadas por círculo 0 (circ0) e círculo 1 (circ1). Circ0 é centrado em  $Y=0$  e  $X=-Db/2$  e tem um raio de  $R_{circ0}$ . Circ1 é centrado em  $Y=0$  e  $X=Db/2$  e tem um raio de  $R_{circ1}$ . Os valores  $R_{circ0/1}$  são obtidos recorrendo à lei das tangentes (ver secção B.2), e o seu cálculo é definido pela seguinte expressões:

$$K_{0/1} = \frac{\tan[0.5*(180-2*\alpha_{0/1,1}-\alpha_{0/1,2})]}{\tan[0.5*(180-\alpha_{0/1,2})]} \quad (5.4)$$

$$R_{circ_{0/1}} = \Delta D * \frac{1-K_{0/1}}{1+K_{0/1}} \quad (5.5)$$

### 5.2.3 Cálculo da posição e da orientação

Em suma, o método apresentado tem como variáveis de entrada o ângulo  $\beta$ , a distância  $D$ , e os ângulos  $\alpha_{0/1,0}$  e  $\alpha_{0/1,1}$ . A partir destas medidas são geradas três circunferências (Circ0, Circ1 e Circ2) que definem o conjunto de soluções para a localização do robô. A partir da intersecção destas circunferências é calculada a posição do robô.

Sendo Circ2 obtido a partir de uma medida de um ângulo numa determinada localização  $(x,y)$ , enquanto que Circ0 e Circ1 são obtidos a partir de três medidas, dois ângulos e uma distância, obtidas em duas localizações diferentes, as soluções consideradas serão a intersecção de Circ2 com Circ0 (Figura 5.2.3) ou Circ1 (Figura 5.2.4), Circ2 é a medida mais robusta. A escolha entre Circ0 ou Circ1 será baseada na

precisão do cálculo da pose que cada uma destas grandezas oferece, esta questão será abordada nas secções seguintes.

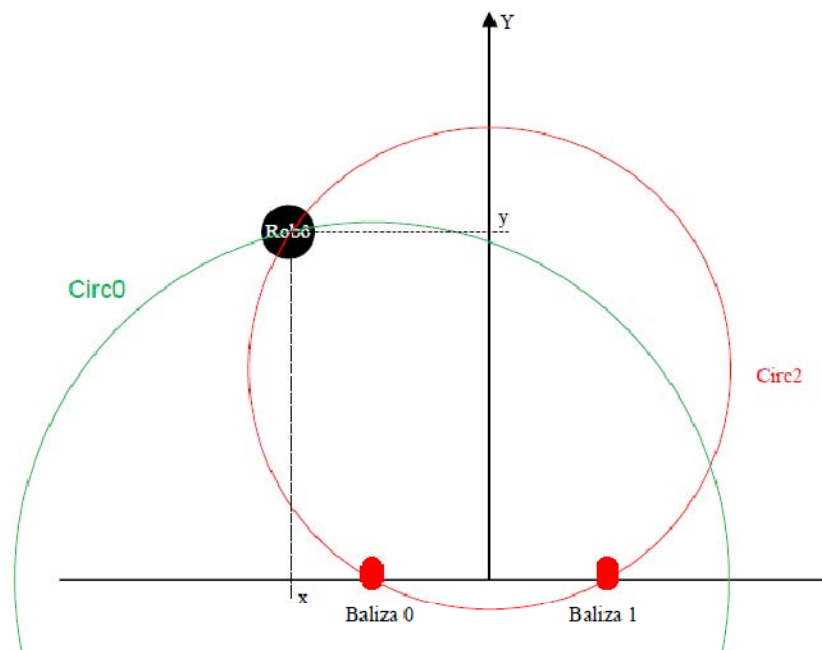


Figura 5.2.3 Determinação da posição através da intersecção de Circ2 com Circ0.

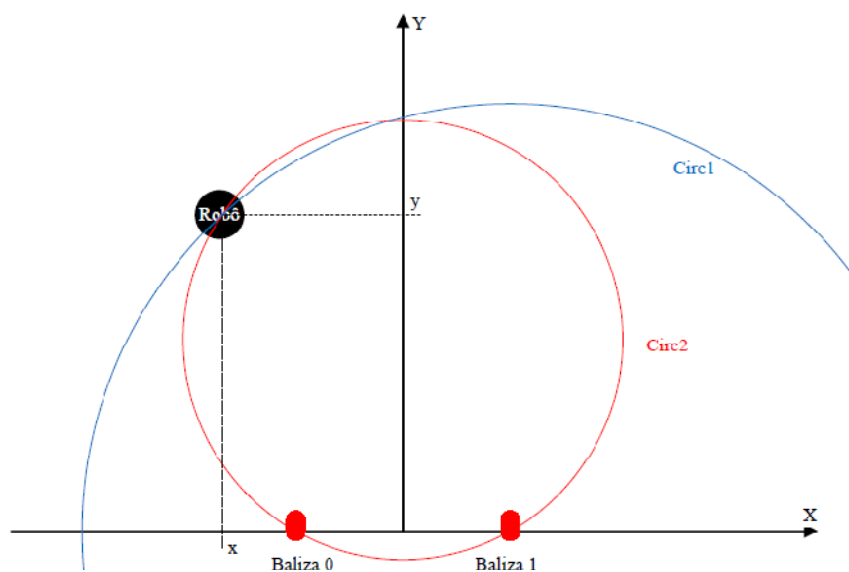


Figura 5.2.4 Determinação da posição através da intersecção de Circ2 com Circ1.

Como já foi referido, a posição do robô é obtida a partir da intersecção de duas circunferências, o que origina duas possíveis soluções para a posição do robô. Esta ambiguidade pode ser ultrapassada das seguintes formas:

- Considerando as restrições no espaço de navegação do robô as, balizas apenas podem ser detectadas para um valor de  $Y$  positivo, por isso se uma das intersecções tiver um valor de  $Y$  negativo pode ser descartada com segurança

[esta situação acontece quando a distância à baliza considerada é menor que  $D_b$  (Figura 5.2.5)];

- Recorrendo à outra circunferência (Circ0/1). Por exemplo, considerando as linhas de posição geradas por Circ2 e Circ0 obtemos duas posições possíveis para o robô -  $P\_int1$  e  $P\_int2$  -, sendo que a partir de Circ1 torna-se evidente que a intersecção a considerar é  $P\_int1$  (Figura 5.2.6);
- Recorrendo à pose actual do robô é possível em certas condições resolver esta ambiguidade. À partida, o robô, através da odometria, conhece aproximadamente a sua localização; a intersecção que ocorrer muito longe dessa posição pode ser excluída [1].

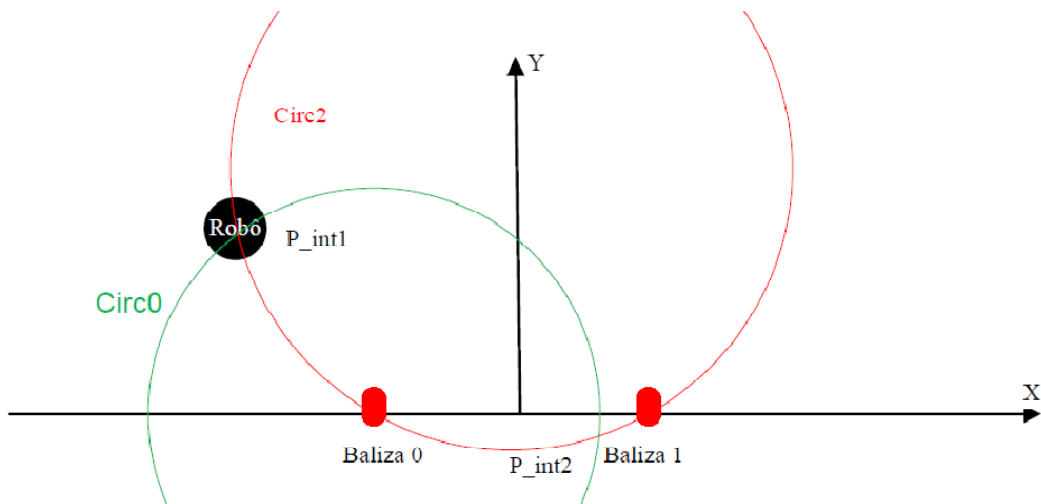


Figura 5.2.5 Resolução da ambiguidade gerada pela intersecção do Circ2 com Circ0 através da restrição do espaço de navegação.

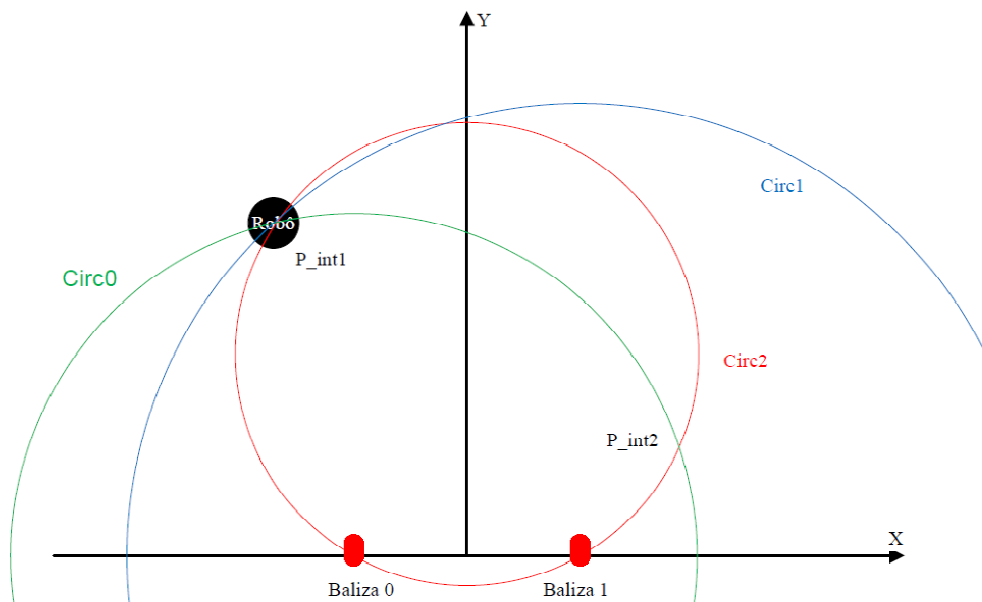


Figura 5.2.6 Resolução da ambiguidade gerada pela intersecção do Circ2 com Circ0 através do Circ1.

Uma vez calculada a posição do robô  $(x,y)$ , a sua orientação,  $\theta$ , pode determinar-se a partir da medição do ângulo orientado formado por um semieixo de referência fixo no

robô com o segmento de recta que une o robô a uma das balizas, (b0 ou b1). Como será descrito nas secções seguintes, a escolha da baliza a partir da qual se calcula  $\theta$  do robô será feita em função daquela que oferece mais precisão. Na Figura 5.2.7 apresentam-se as grandezas em causa no cálculo da orientação.

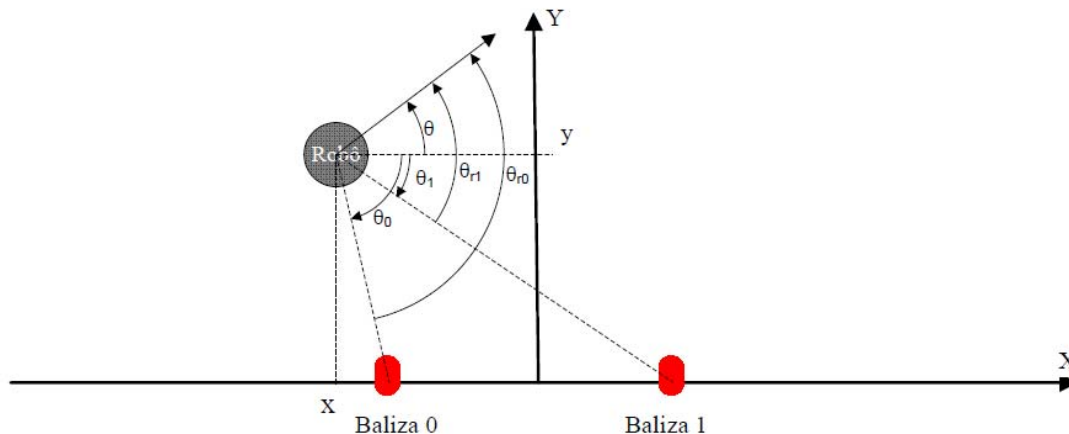


Figura 5.2.7 Cálculo da orientação do robô,  $\theta$ .

A partir do valor calculado da posição do robô  $(x,y)$  e dos valores medidos da orientação relativa das balizas ao robô ( $\theta_{r0/1}$ <sup>7</sup>), a orientação do robô ( $\theta$ ) é calculada através das seguintes relações:

$$\theta = \theta_{r0/1} - \theta_{0/1} \quad ^8 \quad (5.6)$$

$$\theta_{0/1} = \text{Atan2}(-y, x_{b0/1} - x) \quad (5.7)$$

Note-se que  $\text{Atan2}(y,x)$  implementa a função arcotangente tendo em conta os quadrantes, isto é, distingue um ângulo  $\tau$  de  $\tau+\pi$ . E  $x_{b0/1}$  representa o valor de  $x$  da baliza 0 ou 1.

### 5.3 Caracterização da incerteza de posição e de orientação, métodos estatísticos e métodos de erros limitados

As medidas efectuadas pelo robô são afectadas por erros, o que origina uma incerteza nos valores medidos de  $\beta$ ,  $\alpha_{0/1,0}$ ,  $\alpha_{0/1,1}$  e  $D$ . Estas incertezas causam naturalmente uma incerteza no cálculo da pose do robô, isto porque as linhas de posição geradas por estas medidas deixam de ser linhas para passarem a ser superfícies, gerando então uma superfície de incerteza associada à posição calculada [1]. A dimensão dessa superfície além de depender da incerteza das medidas, depende também das duas posições nas quais o robô efectuou as medidas. O sistema de localização do robô tem de ser capaz de caracterizar as incertezas associadas ao cálculo da posição e da orientação, caso contrário essa informação é inútil para a navegação do robô.

<sup>7</sup>  $\theta_{r0/1}$  refere-se ao ângulo  $\Theta_{r0}$  ou  $\Theta_{r1}$ .

<sup>8</sup>  $\theta_{0/1}$  refere-se ao ângulo  $\Theta_0$  ou  $\Theta_1$ .

No trabalho apresentado em [1], J. S. Esteves et al (2006) mostra uma divisão dos métodos de localização de robôs móveis em métodos probabilísticos ou de erros limitados. Os métodos probabilísticos modelizam a incerteza das medições como distribuições de probabilidade e retomam igualmente uma distribuição de probabilidade referente à pose do robô. Nestes métodos recorre-se a técnicas de fusão sensorial (como por exemplo filtros de Kalman, filtros de partículas), que costumam aproximar as equações não lineares utilizadas no cálculo da pose do robô por equações lineares. Estas aproximações só são válidas para erros de medição abaixo de um determinado limiar, além disso geralmente estes métodos requerem alto poder de cálculo e a obtenção de derivadas parciais difíceis de calcular. Já nos métodos de erros limitados, as incertezas são modelizadas por um intervalo dentro do qual se assume que se encontra o verdadeiro valor da grandeza medida. As medidas são afectadas por um erro com um valor máximo finito e conhecido. Estes métodos modelizam também a incerteza do cálculo da pose como um intervalo, costumam ser mais fáceis de implementar que os métodos probabilísticos quando as equações usadas são não lineares – como é o caso da autolocalização por triangulação e alguns não requerem a aproximação dessas funções por funções lineares.

J. S. Esteves et al (2006) desenvolve então um método para caracterizar a incerteza do cálculo da pose através da triangulação com três balizas, considerando que as medidas têm um erro máximo. Não é necessário aproximar equações não lineares o que não implica o cálculo de derivadas parciais que, neste caso, são complicadas de obter, nem pressupõe que os erros das medidas têm um valor baixo. Através das propriedades geométricas das superfícies de incerteza de posição, é calculado um erro máximo de posição ( $\Delta P_{\max}$ ) e um erro máximo de orientação ( $\Delta \theta_{\max}$ ).  $\Delta P_{\max}$  e  $\Delta \theta_{\max}$  estão representados nas imagens Figura 5.3.1 e Figura 5.3.2 respectivamente.

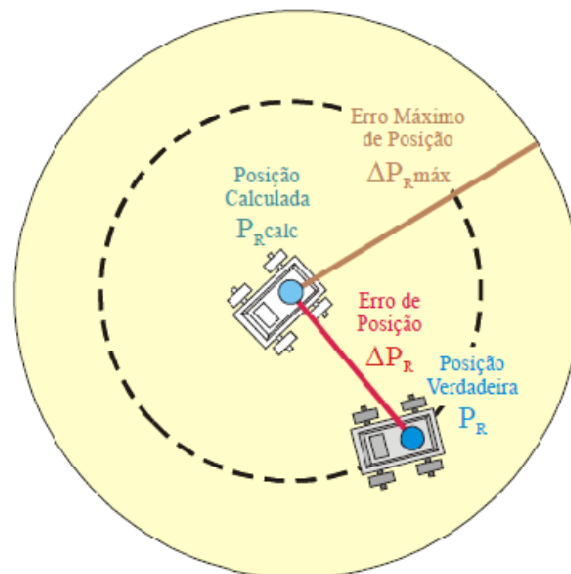


Figura 5.3.1 Caracterização da incerteza da posição por J. S. Esteves et al (2006).

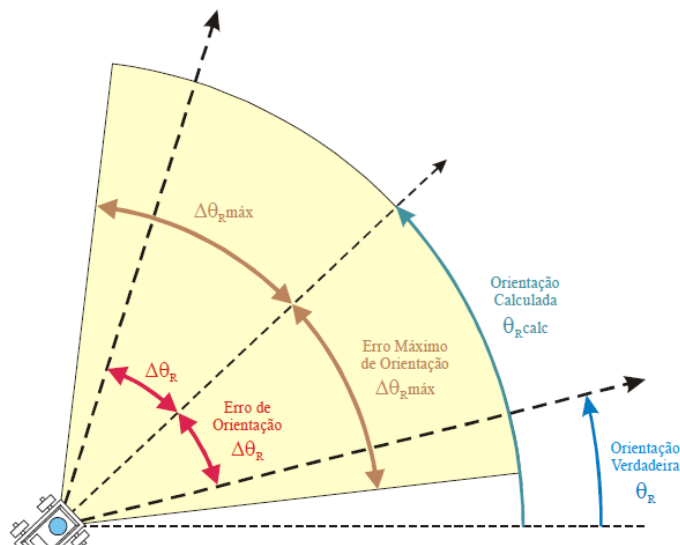


Figura 5.3.2 Caracterização da incerteza da orientação por J. S. Esteves et al (2006).

No presente trabalho será desenvolvido um método de caracterização da incerteza da medida da pose baseado no trabalho apresentado em [1]. Este método permite a sua implementação em plataformas de baixo custo, pois não exige grande poder de cálculo quando comparado com os tradicionais métodos probabilísticos e de erros limitados.

### 5.4 Incerteza nas medições

Considera-se então que o verdadeiro valor dos ângulos  $\beta$ ,  $\alpha_{0/1,0}$ ,  $\alpha_{0/1,1}$  e a distância  $D$ , estão contidos no intervalo centrado no valor medido mais ou menos um erro ( $\Delta$ erro) finito e de valor conhecido. Foi considerado um valor de  $\Delta$ erro constante e determinado tendo em conta a abertura do sensor das balizas (secção 3.1.4) e a precisão da odometria (secção 4.3.1). Foram também efectuados alguns ajustes com base na observação dos resultados experimentais. Os valores utilizados estão representados na seguinte tabela:

Tabela 5.4.1 Erros máximos nas medições

| Medida                 | $\Delta E$  |
|------------------------|-------------|
| $\Delta\beta$          | $3^\circ$   |
| $\Delta\alpha_{0/1,1}$ | $3,5^\circ$ |
| $\Delta\alpha_{0/1,2}$ | $3,5^\circ$ |
| $\Delta D$             | 0,5 cm      |

Note-se uma maior incerteza para os ângulos  $\alpha_{0/1,1}$  e  $\alpha_{0/1,2}$  quando comparados com  $\beta$ , isto porque a medição de  $\alpha_{0/1,1}$  e  $\alpha_{0/1,2}$  implica maior movimentação do robô.  $\Delta\alpha_{0/1,1}$ ,  $\Delta\alpha_{0/1,2}$ ,  $\Delta D$  estão associados a um erro máximo de medida para um deslocamento do robô de P1 até P2 que se encontram a uma distância máxima de 3m.

Como trabalho futuro pretende-se a determinação destes intervalos de erro de forma mais optimizada, recorrendo ao modelo do erro da odometria apresentado na secção 4.3.1.

## 5.5 Superfície de incerteza gerada pela medição do ângulo entre duas balizas

Como já mencionado na secção 5.2.1, a partir de medição de  $\beta$  é gerada a linha de posição correspondente à circunferência 2. Considera-se que o verdadeiro valor de  $\beta$  está contido no intervalo definido por  $[\beta - \Delta\beta, \beta + \Delta\beta]$ . Então, em vez de uma linha de posição, teremos uma superfície de posição delimitada por duas circunferências (Circ2\_max e Circ2\_min) como está representado na Figura 5.5.1.

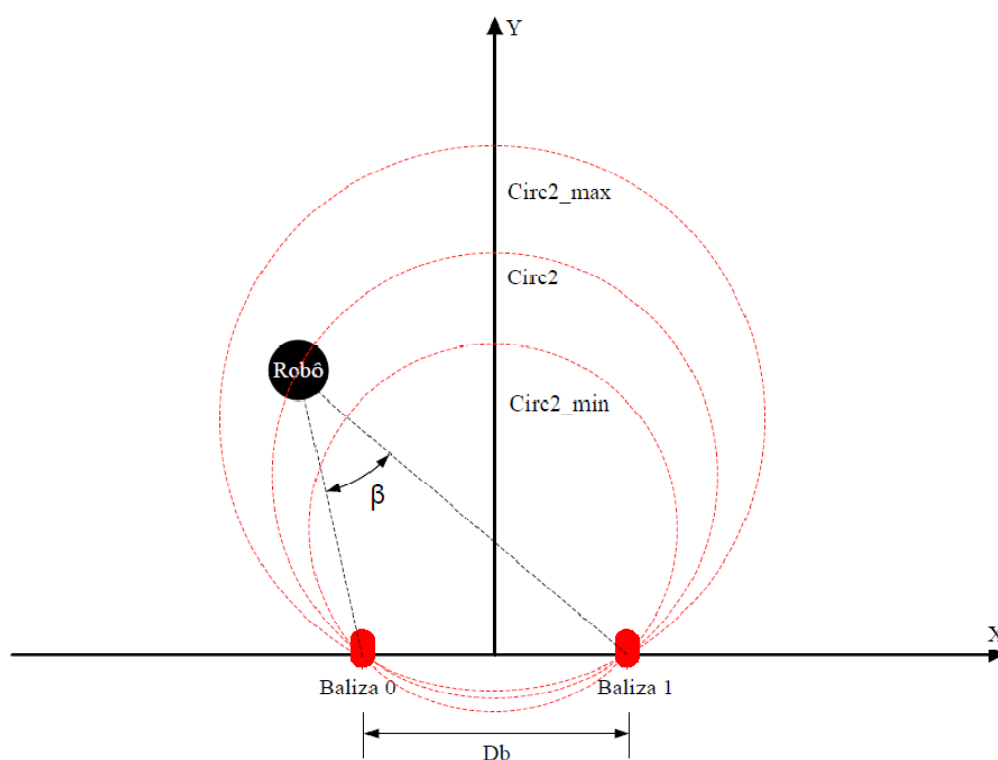


Figura 5.5.1 Superfície de incerteza gerada pela incerteza de  $\beta$ .

A circunferência Circ2\_max obtêm-se através das equações 5.1 a 5.3 aplicando  $\beta$  subtraído por  $\Delta\beta$ . A circunferência Circ2\_min obtêm-se aplicando  $\beta$  somado por  $\Delta\beta$ .

A partir desta superfície de posição é possível delimitar de forma simples a localização do robô no referencial X,Y. A coordenada x da posição do robô está dentro do intervalo  $[-R_{\text{Circ2\_max}}, R_{\text{Circ2\_max}}]$  e a coordenada y está no intervalo  $[0, R_{\text{Circ2\_max}} + y_{2\_max}]$  em que  $R_{\text{Circ2\_max}}$  é o raio de Circ2\_max e  $y_{2\_max}$  é o valor de y do centro de Circ2\_max.



## 5.6 Superfície de incerteza gerada pela medição da distância às balizas

Na Figura 5.6.1, está representada a superfície de incerteza na localização gerada pela medida da distância à baliza 0 ( $R_{circ0}$ ), cujo verdadeiro valor está no intervalo  $[R_{circ0\_min}, R_{circ0\_max}]$ . Através desta medida, sabe-se que o robô está dentro da superfície delimitada por  $Circ0\_max$  e  $Circ0\_min$ . O mesmo raciocínio aplica-se a distância à baliza 1.

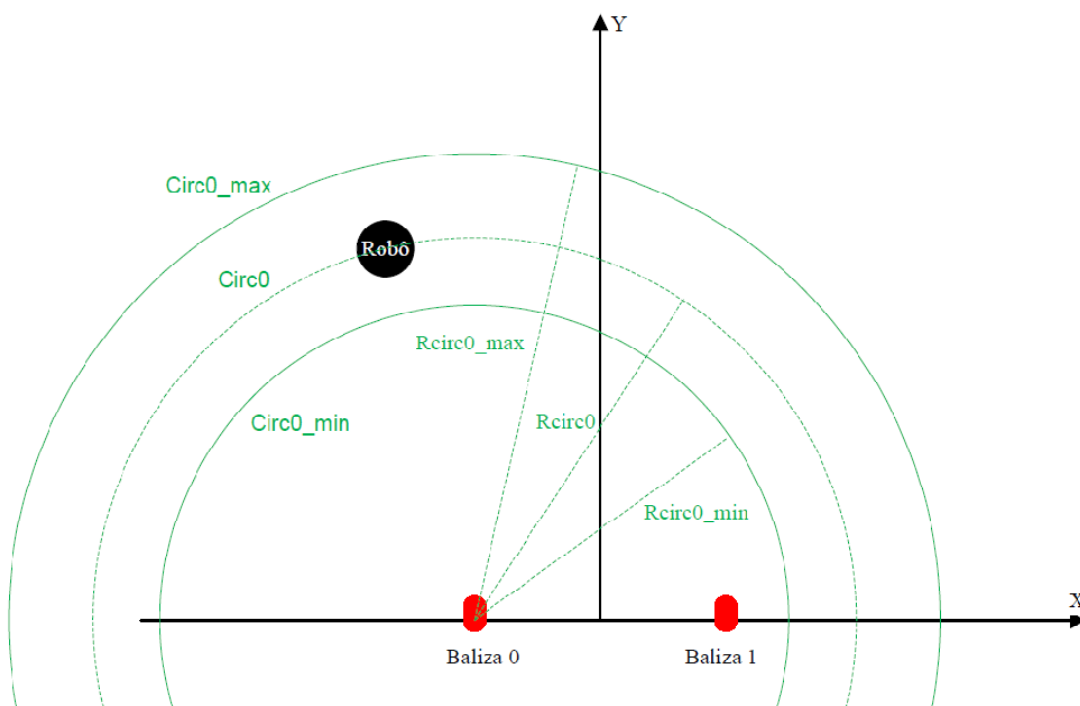


Figura 5.6.1 Superfície de incerteza gerada pela incerteza de  $R_{circ0}$ .

As medidas das distâncias às balizas são obtidas de forma indirecta através de medições efectuadas em duas localizações diferentes, como já foi mencionado na secção 5.2.2.

O robô executa uma volta completa em P1 desloca-se até P2 e volta a executar mais uma volta, através da odometria e do sensor das balizas são medidos os ângulos  $\alpha_{0/1,0}$ ,  $\alpha_{0/1,1}$  e a distância  $D$ . Com estas medidas é calculada a distância a que este se encontra de cada baliza através das expressões 5.4 e 5.5 ( $R_{circ0/1}$ ). Neste ponto o problema a resolver consiste em como obter a distância mínima e máxima do robô a cada baliza a partir dos valores das incertezas das medidas  $\Delta\alpha_{0/1,1}$ ,  $\Delta\alpha_{0/1,2}$  e  $\Delta D$ . A próxima figura exemplifica as grandezas em causa no cálculo da distância às balizas, define-se também o ângulo  $\alpha_{0/1,3}$ , o ângulo complementar a  $\alpha_{0/1,0}$  e  $\alpha_{0/1,2}$ .

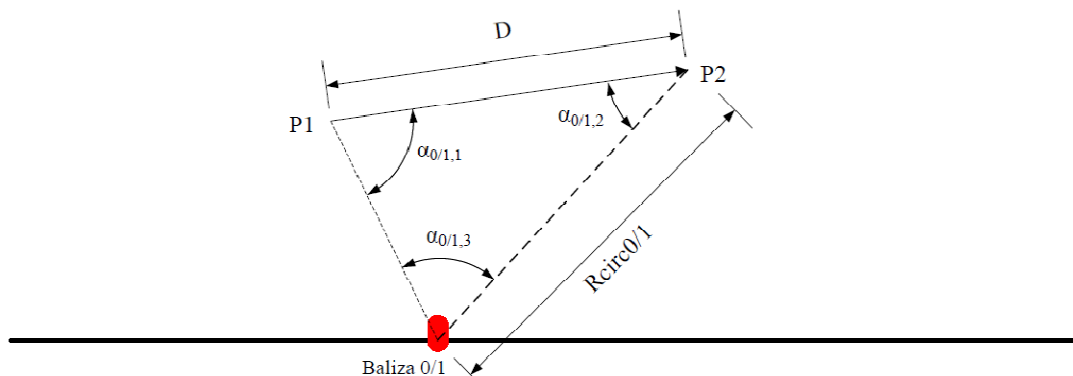


Figura 5.6.2 Medida da distância às balizas.

Começou-se por estudar as derivadas parciais de 5.4 e 5.5, recorrendo à ferramenta de cálculo simbólico do *matlab*. As expressões obtidas para as derivadas parciais da expressão de  $R_{circ0/1}$  (5.4 e 5.5) podem ser consultadas no anexo C.1. As expressões obtidas são extensas e exigem alto poder de cálculo, o que torna a sua utilização em plataformas computacionais de baixo custo inviável; além disso na aproximação de 5.4 e 5.5 a derivada de primeira ordem só é válida para erros nas medidas abaixo de um determinado limiar. Mas estes resultados são importantes de forma a perceber a monotonia do cálculo de  $R_{circ0/1}$  em função de  $\alpha_{0/1,0}$ ,  $\alpha_{0/1,1}$  e  $\Delta D$  o que leva a saber que valores dos intervalos  $[\alpha_{0/1,0}-\Delta\alpha_{0/1,1}, \alpha_{0/1,1}+\Delta\alpha_{0/1,1}]$ ,  $[\alpha_{0/1,2}-\Delta\alpha_{0/1,2}, \alpha_{0/1,2}+\Delta\alpha_{0/1,2}]$  e  $[D-\Delta D, D+\Delta D]$  aplicar a 5.4 e 5.5. Assim, é possível obter  $R_{circ0/1}$  mínimo e máximo. Para além de tudo isto, esta análise permite ainda compreender quais os deslocamentos a efectuar pelo robô (P1 e P2) de maneira a obter uma boa estimativa de  $R_{circ0/1}$ .

### 5.6.1 Derivada parcial em relação a D

Na Figura 5.6.3, está representado o valor da derivada parcial de  $R_{circ0/1}$  em relação a D em função de  $\alpha_{0/1,1}$  e  $\alpha_{0/1,2}$ . Observa-se que o valor desta derivada parcial é maior que zero em todo o domínio considerado, o que indica que o erro no cálculo de  $R_{circ0/1}$  é crescente com o erro em D. Além disso, verifica-se um aumento da sensibilidade em relação a D para valores baixos do ângulo  $\alpha_{0/1,3}$ , ou seja quando  $\alpha_{0/1,1} + \alpha_{0/1,2}$  se aproxima de  $180^\circ$  e principalmente quando  $\alpha_{0/1,1}$  e  $\alpha_{0/1,2}$  estão ambos próximos de  $90^\circ$ .

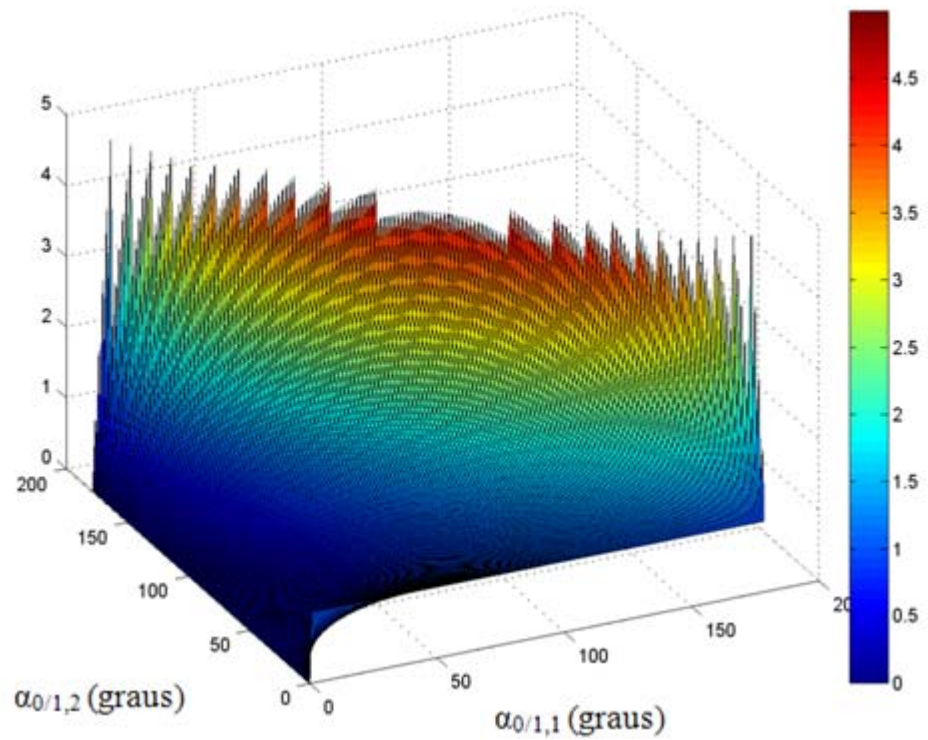


Figura 5.6.3 Derivada parcial da expressão do cálculo de  $R_{circ0/1}$  em relação a  $D$ .

A Figura 5.6.4 exemplifica geometricamente a relação da variação de  $R_{circ0/1}$  com a variação de  $D$ . Observa-se que à medida que o valor de  $D$  aumenta ( $D_1 < D_2 < D_3$ ) o valor de  $R_{circ0/1}$  aumenta também.

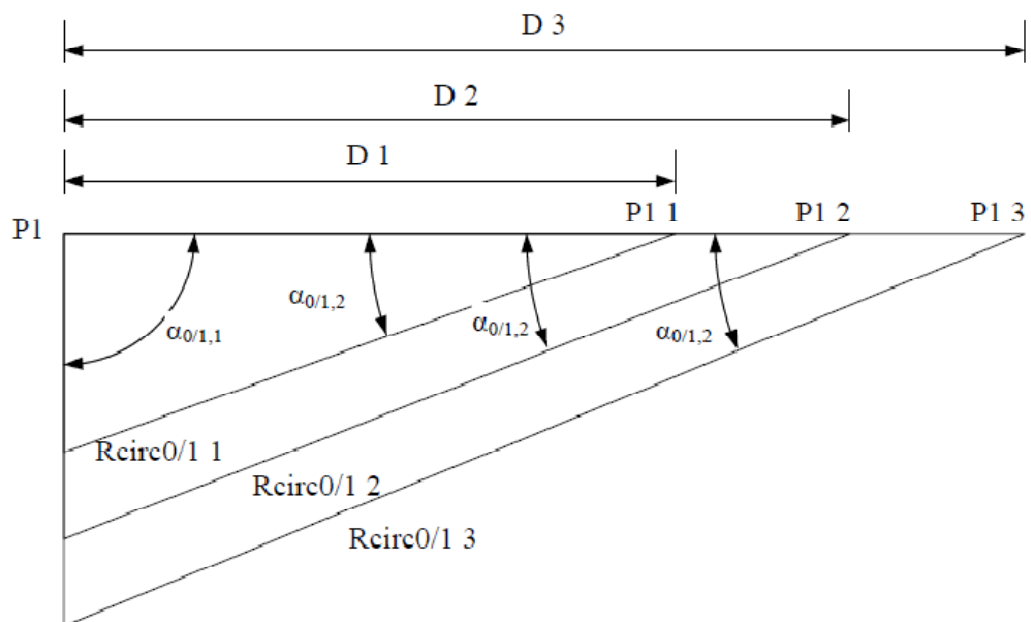


Figura 5.6.4 Exemplo da evolução de  $R_{circ0/1}$  em relação a  $D$ .

### 5.6.2 Derivada parcial em relação a $\alpha_{0/1,1}$

Da mesma forma que a derivada parcial em relação a  $D$ , a derivada parcial em relação a  $\alpha_{0/1,1}$  (arbitrou-se  $D=1$  m) também é sempre positiva (Figura 5.6.5). Verifica-se também um aumento da sensibilidade ao erro no cálculo da distância para valores de  $\alpha_{0/1,3}$  elevados (ou seja  $\alpha_{0/1,1}$  e  $\alpha_{0/1,2}$  próximos de zero) ou baixos (ou seja  $\alpha_{0/1,1} + \alpha_{0/1,2}$  próximos de  $180^\circ$ ). A Figura 5.6.6 exemplifica geometricamente a relação da variação de  $R_{\text{circ}0/1}$  com a variação de  $\alpha_{0/1,1}$ . Observa-se que à medida que o valor de  $\alpha_{0/1,1}$  aumenta ( $\alpha_{0/1,1} 1 < \alpha_{0/1,1} 2 < \alpha_{0/1,1} 3$ ) o valor de  $R_{\text{circ}0/1}$  aumenta também.

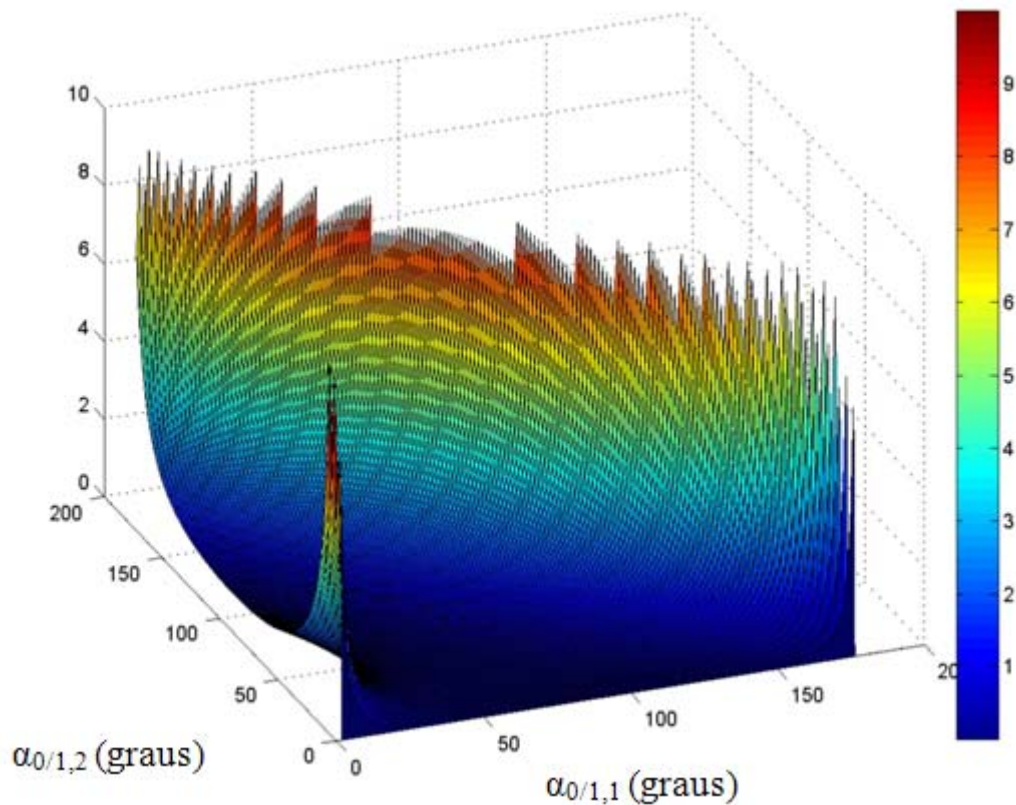


Figura 5.6.5 Derivada parcial da expressão do cálculo de  $R_{\text{circ}0/1}$  em relação a  $\alpha_{0/1,1}$  ( $D=1$  m).

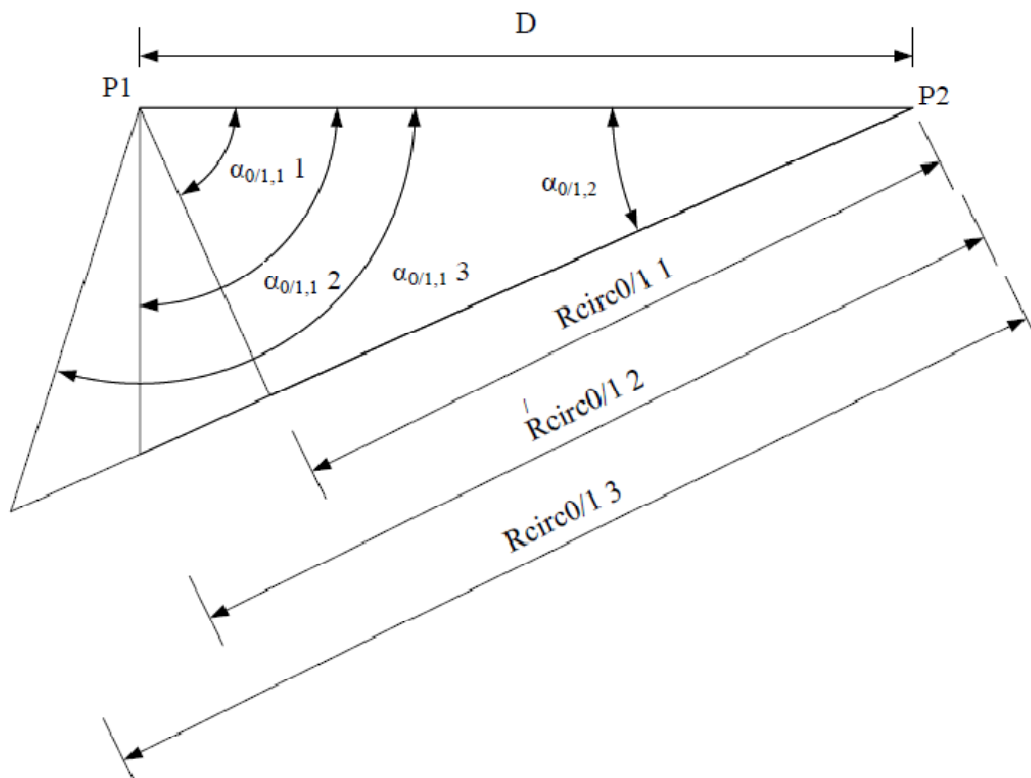


Figura 5.6.6 Exemplo da evolução de  $R_{circ0/1}$  em relação a  $\alpha_{0/1,1}$ .

### 5.6.3 Derivada parcial em relação a $\alpha_{0/1,2}$

Na Figura 5.6.7 está representado o valor da derivada parcial do cálculo da distância às balizas em relação a  $\alpha_{0/1,2}$  (arbitrou-se  $D=1$  m). Observa-se que esta derivada parcial tem tanto valores positivos como negativos, o que indica que dentro do domínio considerado existe um mínimo ou um máximo local. De forma similar à derivada anterior em relação a  $\alpha_{0/1,1}$ , esta derivada parcial em relação a  $\alpha_{0/1,2}$  toma valores elevados para  $\alpha_{0/1,3}$  próximo de zero ou próximo de  $180^\circ$ , ou seja  $\alpha_{0/1,1} + \alpha_{0/1,2}$  próximos de  $180^\circ$  ou  $\alpha_{0/1,1}$  e  $\alpha_{0/1,2}$  próximos de zero.

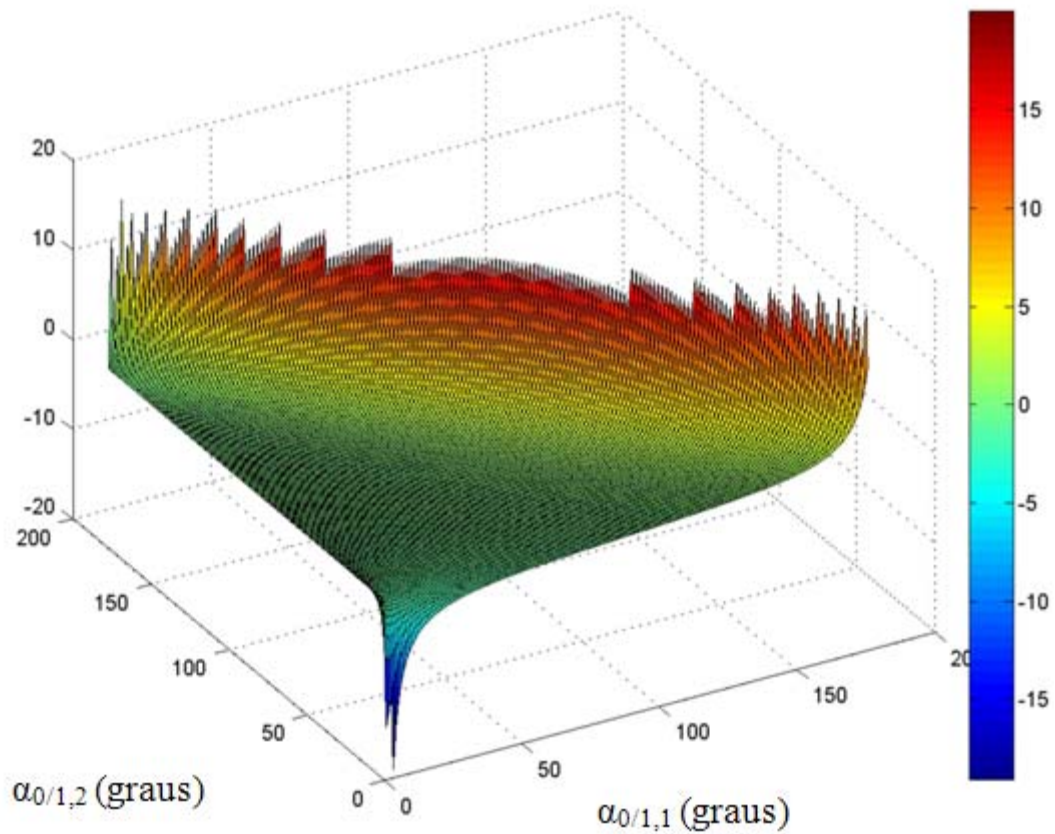


Figura 5.6.7 Derivada parcial da expressão do cálculo de Rcir0/1 em relação a  $\alpha_{0/1,2}$  ( $D=1\text{m}$ ).

Observou-se que a derivada parcial de  $\alpha_{0/1,2}$  é igual a zero para  $\alpha_{0/1,3}=90^\circ$  é menor que zero para  $\alpha_{0/1,3}>90^\circ$  e maior que zero para  $\alpha_{0/1,3}<90^\circ$ , o que corresponde a um mínimo local. A Figura 5.6.8 e a Figura 5.6.9, permitem observar geometricamente esta propriedade. Na Figura 5.6.8, podemos constatar que para  $D$  e  $\alpha_{0/1,1}$  constantes, variando-se  $\alpha_{0/1,2}$  de forma crescente ( $\alpha_{0/1,2} 1 < \alpha_{0/1,2} 2 < \alpha_{0/1,2} 3$ ), observa-se que Rcir0/1 é crescente em relação a  $\alpha_{0/1,2}$  para  $\alpha_{0/1,3}$  menor que  $90^\circ$ . Já na Figura 5.6.9, para  $\alpha_{0/1,3}$  maior que  $90^\circ$  Rcir0/1 é decrescente em relação a  $\alpha_{0/1,2}$ .

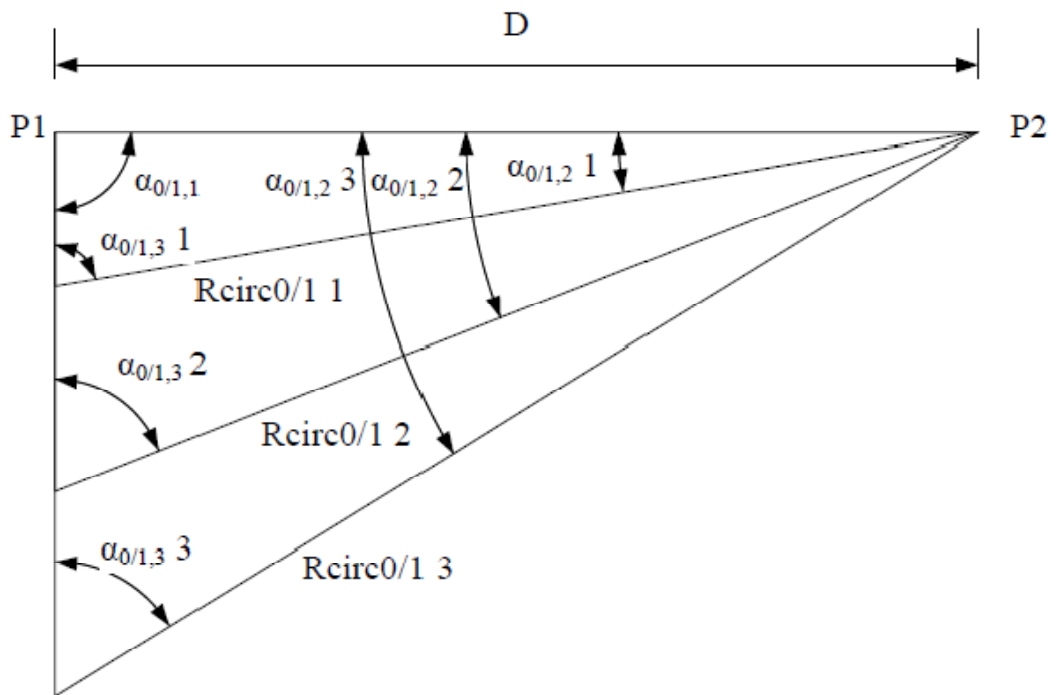


Figura 5.6.8 Evolução de  $R_{circ0/1}$  em função de  $\alpha_{0/1,2}$  para  $\alpha_{0/1,3}$  menor que  $90^\circ$ .

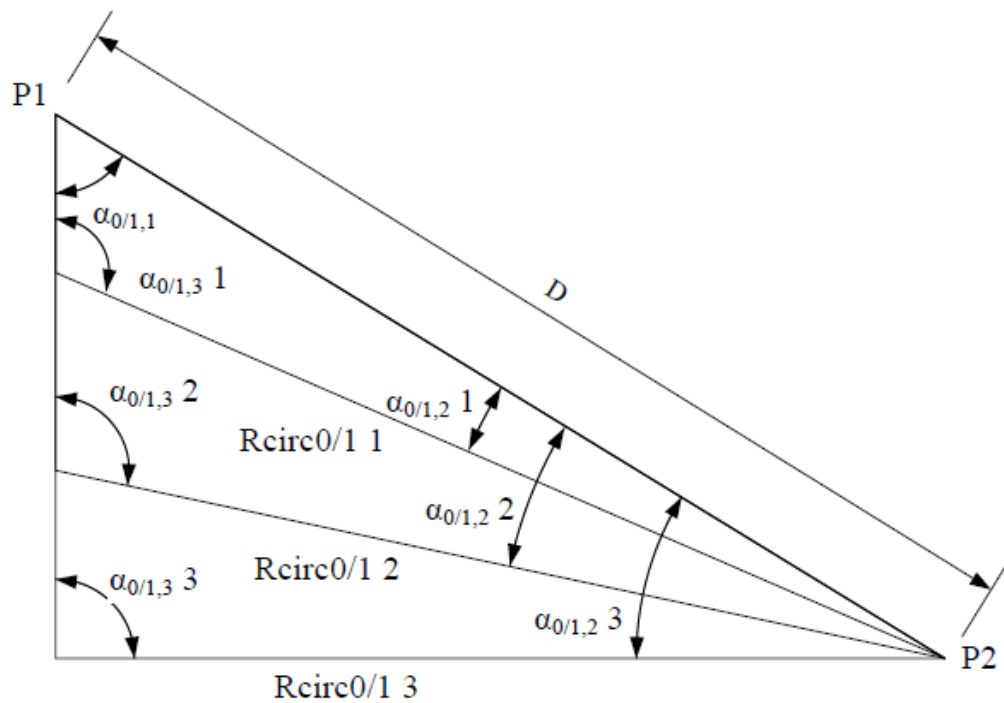


Figura 5.6.9 Evolução de  $R_{circ0/1}$  em função de  $\alpha_{0/1,2}$  para  $\alpha_{0/1,3}$  maior que  $90^\circ$ .

### 5.6.4 Soma do valor absoluto das derivadas parciais

De forma a compreender as deslocações a efectuar, ou seja a escolha de dois pontos P1 e P2 (ver Figura 5.6.2), que optimizam a medida da distância às balizas, considerou-se a soma do valor absoluto das derivadas parciais em relação a  $\alpha_{0/1,1}$ ,  $\alpha_{0/1,2}$  e D para um D de 2 m. Obteve-se assim o gráfico apresentado na Figura 5.6.10. Este apresenta um mínimo local na linha definida por  $\alpha_{0/1,3}$  igual a  $90^\circ$ .

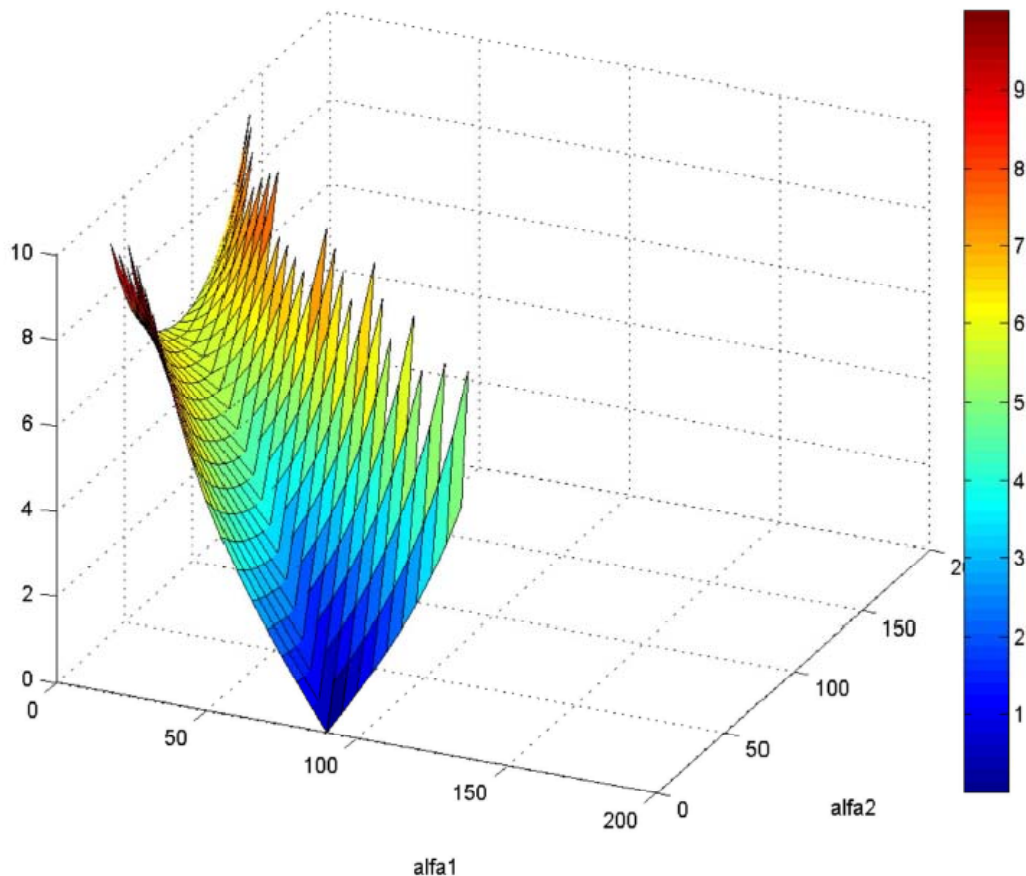


Figura 5.6.10 Soma do valor absoluto das derivadas parciais de  $R_{circ0/1}$  em relação a  $\alpha_{0/1,1}$ ,  $\alpha_{0/1,2}$  e D para um D igual a 2 m.

A Figura 5.6.10 dá-nos uma ideia de como o robô se deve deslocar de modo a ter uma boa medida da distância às balizas. Deve deslocar-se de maneira a que o ângulo de  $\alpha_{0/1,3}$  seja  $90^\circ$  e quanto menor for  $\alpha_{0/1,2}$  melhor. Desta forma diminui-se os efeitos dos erros nas medidas dos ângulos  $\alpha_{0/1,1}$  e  $\alpha_{0/1,2}$ . A figura seguinte exemplifica um deslocamento para que o robô obtenha uma boa medida da distância a uma baliza.



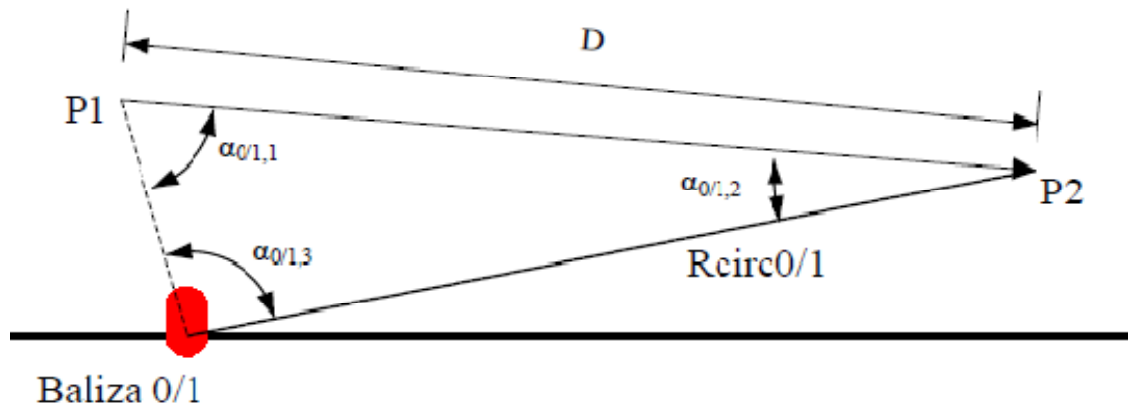


Figura 5.6.11 Exemplo de um deslocamento em que se obtêm uma boa medida da distância às balizas ( $R_{\text{circ}0/1}$ ).

### 5.6.5 Método para determinar a distância máxima e mínima às balizas

Neste ponto estamos preparados para responder ao problema apresentado na secção 5.6, ou seja que valores dos intervalos  $[\alpha_{0/1,1}-\Delta\alpha_{0/1,1}, \alpha_{0/1,1}+\Delta\alpha_{0/1,1}]$ ,  $[\alpha_{0/1,2}-\Delta\alpha_{0/1,2}, \alpha_{0/1,2}+\Delta\alpha_{0/1,2}]$  e  $[D-\Delta D, D+\Delta D]$  a aplicar a 5.4 e 5.5 de forma a obter  $R_{\text{circ}0/1}$  mínimo e máximo. Sabe-se que  $R_{\text{circ}0/1}$  é crescente em relação a  $D$  e  $\alpha_{0/1,1}$ ; e que  $R_{\text{circ}0/1}$  é decrescente em relação a  $\alpha_{0/1,2}$  para  $\alpha_{0/1,3} > 90^\circ$  ou crescente para  $\alpha_{0/1,3} < 90^\circ$ . Com base nesta informação desenvolve-se um método simples que permite calcular os limites máximo e mínimo da distância a que se encontra o robô de cada baliza, conhecendo os limites máximo e mínimo dos erros das medidas efectuadas sem ser necessário calcular as derivadas parciais.

Define-se  $\alpha_{0/1,3,\text{max}}$  e  $\alpha_{0/1,3,\text{min}}$ :

$$\alpha_{0/1,3,\text{max}} = 180^\circ - (\alpha_{0/1,1} - \Delta\alpha_{0/1,1}) - (\alpha_{0/1,2} - \Delta\alpha_{0/1,2}) \quad (5.8)$$

$$\alpha_{0/1,3,\text{min}} = 180^\circ - (\alpha_{0/1,1} + \Delta\alpha_{0/1,1}) - (\alpha_{0/1,2} + \Delta\alpha_{0/1,2}) \quad (5.9)$$

Para calcular  $R_{\text{circ}0/1}$  máximo:

Utilizar nas equações 5.4 e 5.5 os valores de  $D=D+\Delta D$  e  $\alpha_{0/1,1}=\alpha_{0/1,1}+\Delta\alpha_{0/1,1}$ , em relação a  $\alpha_{0/1,2}$ :

- Se  $\alpha_{0/1,3,\text{max}}$  e  $\alpha_{0/1,3,\text{min}}$  maiores que  $90^\circ$  utilizar  $\alpha_{0/1,2}-\Delta\alpha_{0/1,2}$ ;
- Se  $\alpha_{0/1,3,\text{max}}$  e  $\alpha_{0/1,3,\text{min}}$  menores que  $90^\circ$  utilizar  $\alpha_{0/1,2}+\alpha_{0/1,2}$ ;
- Se  $\alpha_{0/1,3,\text{max}}$  maior que  $90^\circ$  e  $\alpha_{0/1,3,\text{min}}$  menor que  $90^\circ$  é porque o intervalo das medidas envolve o mínimo local, utilizar  $\alpha_{0/1,2}-\Delta\alpha_{0/1,2}$  e  $\alpha_{0/1,2}+\alpha_{0/1,2}$  verificar para qual valor ocorre  $R_{\text{circ}0/1}$  máximo;

Para calcular  $R_{\text{circ}0/1}$  mínimo:

Utilizar nas equações 5.4 e 5.5 os valores de  $D=D-\Delta D$  e  $\alpha_{0/1,1}=\alpha_{0/1,1}-\Delta\alpha_{0/1,1}$ , em relação a  $\alpha_{0/1,2}$ :

- Se  $\alpha_{0/1,3,\max}$  e  $\alpha_{0/1,3,\min}$  maiores que  $90^\circ$  utilizar  $\alpha_{0/1,2} + \Delta\alpha_{0/1,2}$ ;
- Se  $\alpha_{0/1,3,\max}$  e  $\alpha_{0/1,3,\min}$  menores que  $90^\circ$  utilizar  $\alpha_{0/1,2} - \alpha_{0/1,2}$ ;
- Se  $\alpha_{0/1,3,\max}$  maior que  $90^\circ$  e  $\alpha_{0/1,3,\min}$  menor que  $90^\circ$  é porque o intervalo das medidas envolve o mínimo local, utilizar  $\alpha_{0/1,2} = 90^\circ - (\alpha_{0/1,1} - \Delta\alpha_{0/1,1})$ , ou seja utiliza-se um  $\alpha_{0/1,2}$  para o qual  $\alpha_{0/1,3} = 90^\circ$ ;

## 5.7 Superfícies de incerteza no cálculo da posição e orientação

Até ao momento estão definidos os métodos para calcular os limites das superfícies de incertezas geradas pela medição  $\beta$  (ângulo entre balizas, ver Figura 5.2.1),  $R_{\text{circ}0}$  e  $R_{\text{circ}1}$  (distâncias às balizas 0 e 1 respectivamente). Como referido na secção 5.2.3, a localização do robô é calculada através da intersecção da circunferência 2 com a circunferência 0 (Figura 5.2.3) ou com a circunferência 1 (Figura 5.2.4). O sistema de localização vai ter de decidir qual das linhas de posição definidas por  $\text{circ}0$  e  $\text{circ}1$  é a mais adequada para o cálculo da posição. Esta decisão será baseada no tamanho da superfície de posição gerada pela intersecção da superfície definida por  $\text{Circ}2_{\text{max}}$  e  $\text{Circ}2_{\text{min}}$  com a superfície  $\text{Circ}0_{\text{max}}$  e  $\text{Circ}0_{\text{min}}$  ou  $\text{Circ}1_{\text{max}}$  e  $\text{Circ}1_{\text{min}}$ . Na Figura 5.7.1 podemos observar um exemplo de uma superfície de posição gerada pela intersecção de  $\text{Circ}2_{\text{max/min}}$  e  $\text{Circ}0_{\text{max/min}}$ . Na figura imediatamente a seguir podemos ver para a mesma posição a incerteza gerada considerando a distância à baliza 1. Apesar da incerteza das distâncias ser semelhante, a área da superfície de localização gerada por  $\text{Circ}1$  é bastante maior que  $\text{Circ}0$ . Isto deve-se ao ângulo de intersecção das linhas de posição. Quanto mais próximo de  $90^\circ$  for o ângulo de intersecção entre  $\text{Circ}2$  e  $\text{Circ}0$  ou  $\text{Circ}1$  menor será a incerteza na localização calculada. Ou seja, a incerteza do cálculo da localização por este método depende tanto da posição actual do robô como da sua posição anterior.

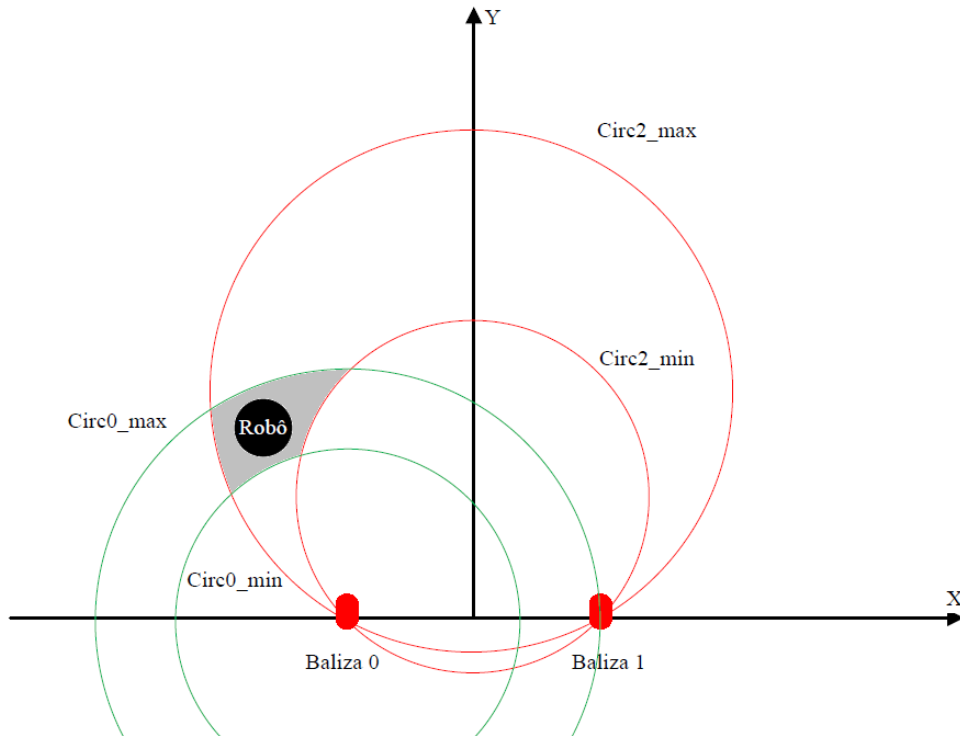


Figura 5.7.1 Exemplo de superfície de incerteza na posição quando considerada a distância à baliza 0.

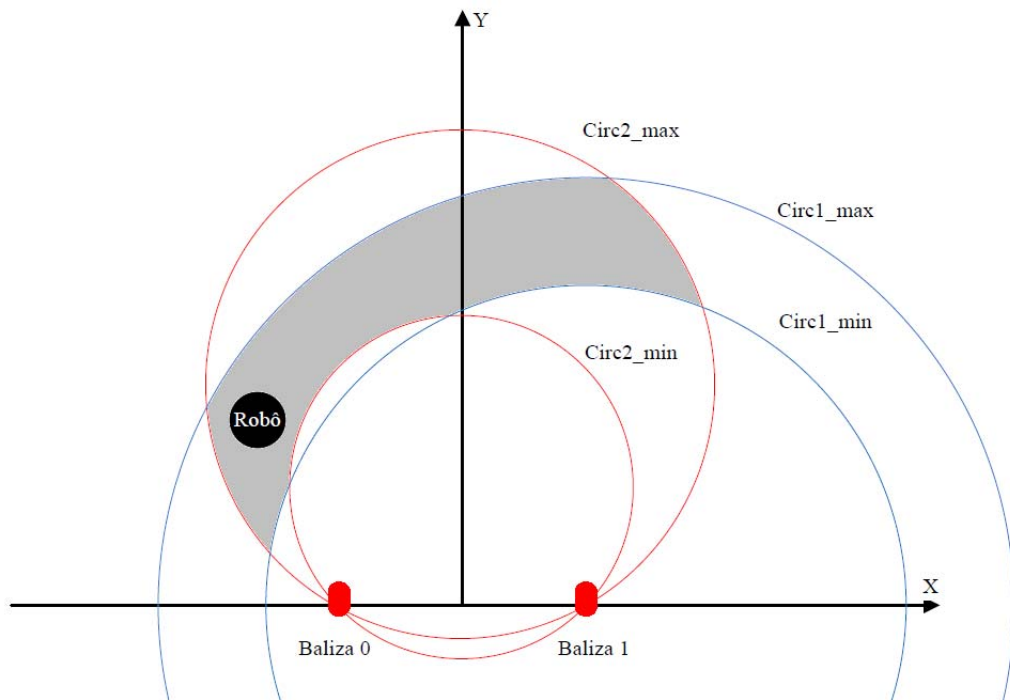


Figura 5.7.2 Exemplo de superfície de incerteza na posição quando considerada a distância à baliza 1.

### 5.7.1 Parametrização das superfícies de incerteza no cálculo da posição

Torna-se então necessário parametrizar o tamanho da superfície da incerteza do cálculo da posição. Para tal, calcula-se o rectângulo que envolve as superfícies geradas quando considerada a distância à baliza 0 e 1. Como se pode ver na Figura 5.7.3 e na Figura 5.7.4, a incerteza de uma medida da posição pelo sistema de localização é caracterizada por um valor máximo e mínimo quer segundo a coordenada X quer segundo a coordenada Y ( $X_{max}$ ,  $X_{min}$ ,  $Y_{max}$  e  $Y_{min}$ ). A partir destes valores é calculada a área dos rectângulos que envolvem a superfície de incerteza, e a medida que tiver uma área menor será aquela considerada no cálculo da posição. No exemplo exposto será então considerada a intersecção de  $Circ2$  com  $Circ0$  para o cálculo da posição.

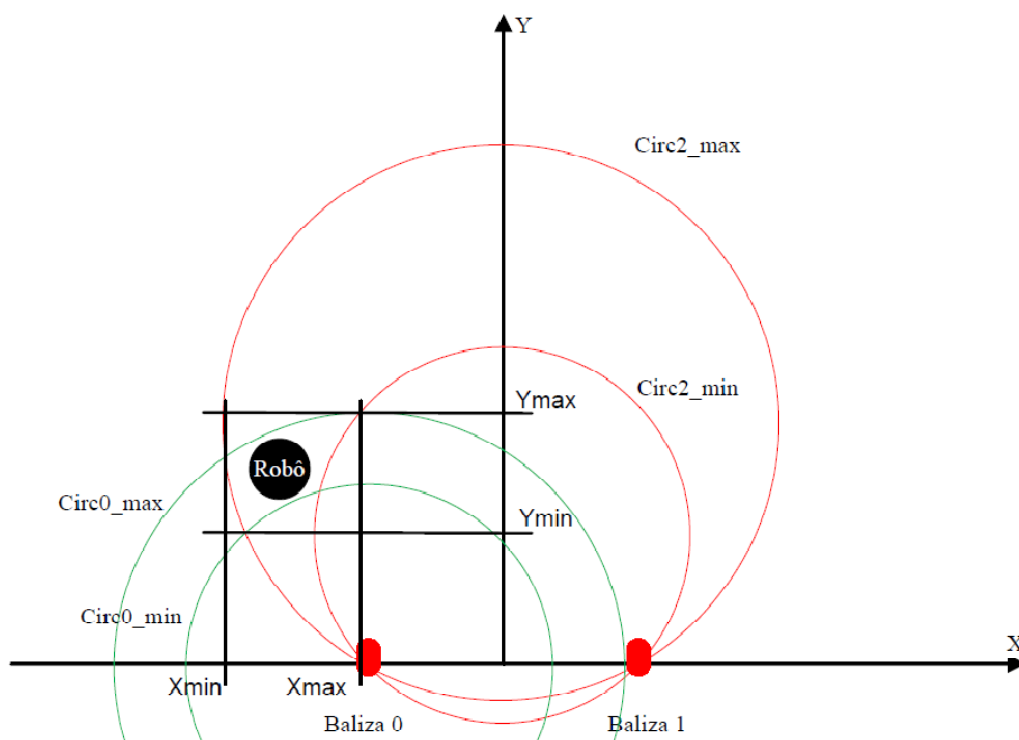


Figura 5.7.3 Parametrização das superfícies de incerteza no cálculo da posição considerando a distância à baliza 0.

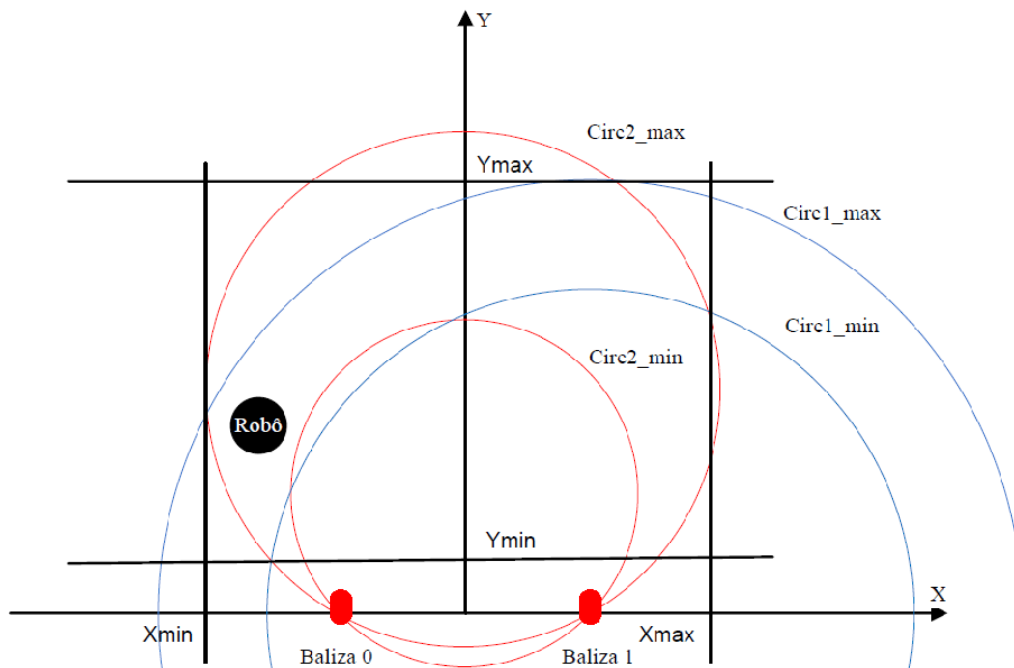


Figura 5.7.4 Parametrização das superfícies de incerteza no cálculo da posição considerando a distância à baliza 1.

### 5.7.2 Parametrização das superfícies de incerteza no cálculo da orientação

Uma vez calculada a posição, a orientação pode ser medida a partir da orientação relativa em relação à baliza 0 ou da baliza 1 (secção 5.2.3). Aqui, o sistema de localização vai novamente efectuar uma escolha. A partir dos vértices que delimitam a superfície de incerteza são calculados os erros máximos de orientação (Figura 5.7.5), obtendo-se assim para a baliza 0  $\Delta\theta_{01}$  e  $\Delta\theta_{02}$  e para a baliza 1  $\Delta\theta_{11}$  e  $\Delta\theta_{12}$ . A baliza considerada para o cálculo da posição será aquela que tiver um  $\Delta\theta_{0/1}$  menor em que  $\Delta\theta_{1/0}$  será o maior erro entre os dois erros de orientação ( $\Delta\theta_{01}$ ,  $\Delta\theta_{02}$  e  $\Delta\theta_{11}$ ,  $\Delta\theta_{12}$ ) calculados para cada baliza. Neste exemplo, seria considerada a baliza 1 no cálculo da posição.

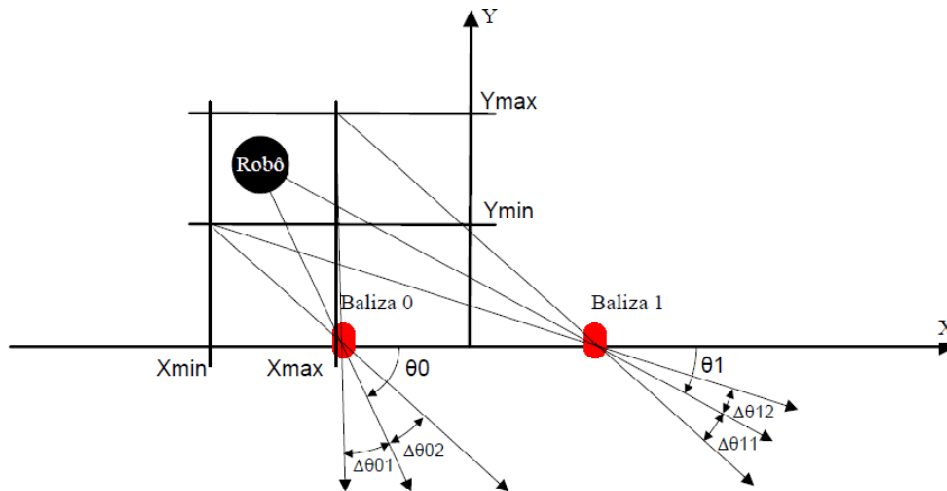


Figura 5.7.5 Parametrização do erro de orientação

## 5.8 Actualização da incerteza na pose do robô

A pose do robô é definida por uma posição  $x, y$  e uma orientação  $\theta$ , sendo que a incerteza destas grandezas é caracterizada por  $\Delta x$ ,  $\Delta y$  e  $\Delta \theta$  como está representado na figura seguinte:

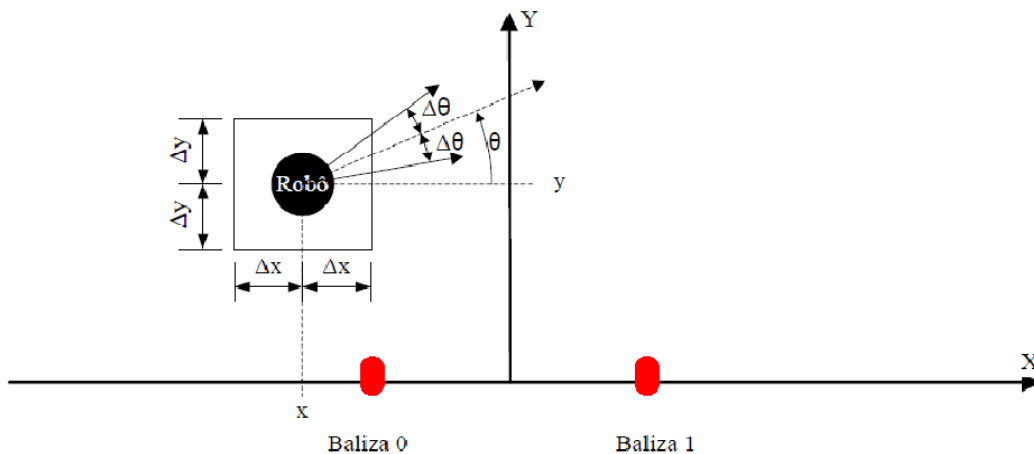


Figura 5.8.1 Incerteza da pose do robô

A pose do robô e respectiva incerteza é calculada a partir do modelo da odometria e corrigida periodicamente, através do método de localização descrito até ao momento neste capítulo. Enquanto o robô está a actualizar a sua localização utilizando apenas a odometria, os valores de  $\Delta y$ ,  $\Delta x$  e  $\Delta \theta$  são obtidos a partir da diagonal da matriz de covariância do erro da odometria apresentada na secção 4.3.1.

Definiu-se que  $\Delta y$ ,  $\Delta x$  e  $\Delta \theta$  como o dobro do desvio padrão de  $y$ ,  $x$  e  $\theta$ . Quando  $\Delta y$  ou  $\Delta x$  é maior que determinado valor máximo de incerteza de posição (no presente

trabalho utilizou-se 40 cm) o robô abandona o estado missão e vai corrigir a sua pose a partir do algoritmo de localização que utiliza as balizas.

Embora a descrição do erro da pose dada pela odometria seja probabilística, esta é depois encarada como sendo de erros limitados. É considerado que o verdadeiro valor da pose do robô está contido no intervalo definido por  $\Delta x$ ,  $\Delta y$  e  $\Delta \theta$ , (neste caso, sendo o erro da odometria considerado como uma distribuição normal, o robô encontra-se dentro da área definida por  $\Delta x$ ,  $\Delta y$  com um grau de confiança de 95.45%).

Quando o robô efectua uma medida válida pelo sistema de localização baseada nas balizas, são corrigidos tanto os valores de  $x$ ,  $y$  e  $\theta$  (secção 5.2.3), como a matriz da covariância do erro. A matriz apresentada na expressão 4.28 é alterada da seguinte forma:

$$\text{Var}(x(t)) = \left(\frac{\Delta x_{0/1}}{2}\right)^2 \quad (5.10)$$

$$\text{Var}(y(t)) = \left(\frac{\Delta y_{0/1}}{2}\right)^2 \quad (5.11)$$

$$\text{Var}(\theta(t)) = \left(\frac{\Delta \theta_{0/1}}{2}\right)^2 \quad (5.12)$$

Em que  $\Delta x_{0/1}$  representa a maior das duas distâncias entre a posição  $x$  obtida pela intersecção de  $\text{Circ}2$  e  $\text{Circ}0/1$  e  $X_{\min}$  e  $X_{\max}$  correspondente (o mesmo se aplica ao  $\Delta y_{0/1}$ ). Isto porque o modelo do erro proposto no capítulo anterior pressupõe que a distribuição de probabilidade do erro da pose seja simétrica. Considerou-se ainda que as incertezas de  $x$ ,  $y$  e  $\theta$  são independentes; o que é verdade em relação a  $x$  e  $y$ , pois a superfície de erro da localização é parametrizada como um rectângulo. Já no caso da incerteza de  $\theta$ , existe realmente uma correlação entre  $\Delta x$  e  $\Delta y$  com  $\Delta \theta$ , mas esta aproximação é mais válida quanto melhor for a medida, o que faz com que esta aproximação não tenha muita importância a nível prático.

## 5.9 Estrutura do algoritmo do sistema de localização

Nesta secção é apresentado o diagrama de estados do processo de localização (Figura 5.9.1). Para cada estado será dada uma descrição das tarefas efectuadas.

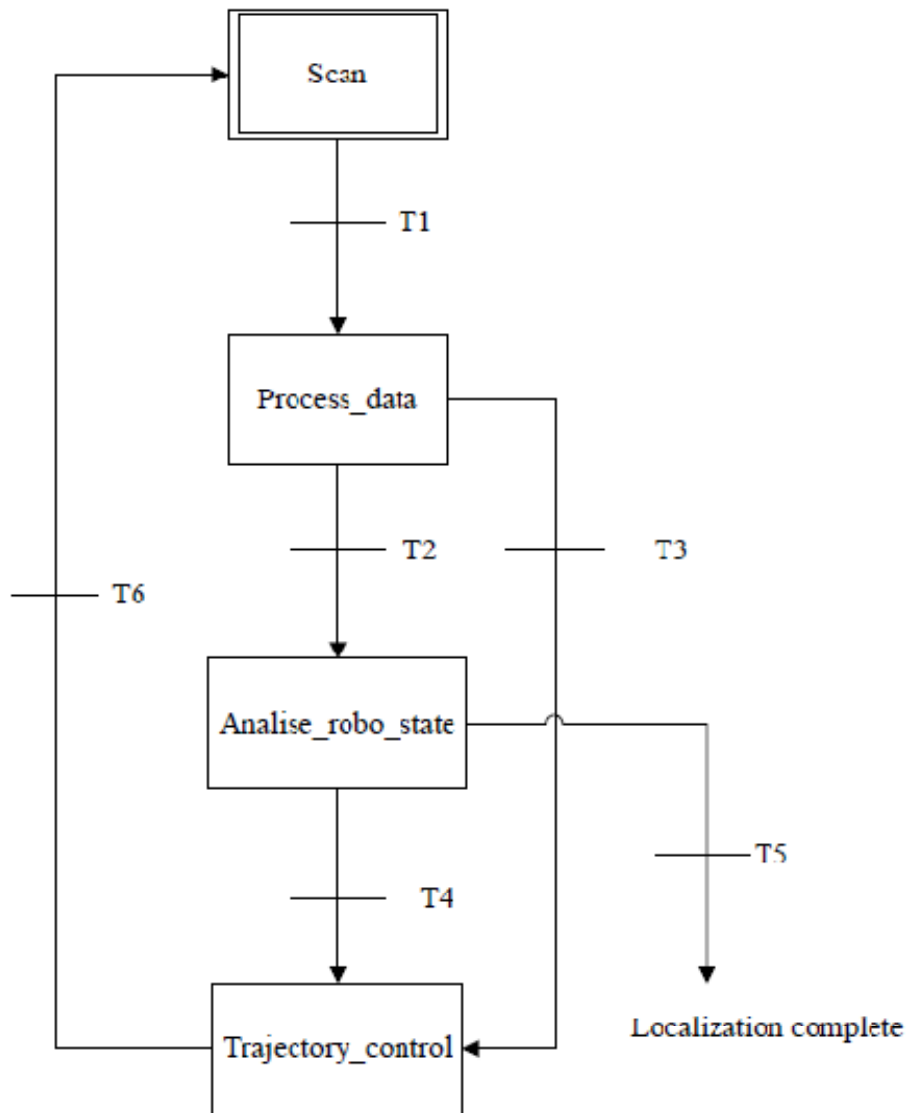


Figura 5.9.1 Diagrama de estados do processo de localização.

### 5.9.1 Estado “Scan”

É neste estado em que o robô mede a orientação relativa das balizas.

Neste estado, o robô executa uma volta completa e regista a posição actual e duas orientações, correspondentes à altura em que as balizas foram detectadas. É efectuada uma volta completa para detectar a presença de reflexões. Se algum sensor for detectado duas vezes o processo é repetido. Este bloco ainda não se encontra completamente implementado, mas como trabalho futuro pretende-se que o robô reaja tanto à situação de detectar reflexões como à não detecção de algum dos sensores.

A transição T1 é então activa quando foram detectadas as duas balizas, não foram detectadas reflexões e o robô executou uma volta completa.



### 5.9.2 Estado “*Process\_data*”

Neste bloco o robô executa os cálculos necessários à obtenção da pose e da sua incerteza.

Se for a primeira vez que este bloco é executado no processo de localização passa directamente para o estado “*Tragectory\_control*” (transição T3 activa).

Caso contrario efectua as seguintes tarefas (numeradas de I a VI) e passa para o estado “*Analise\_robo\_state*” (transição T2 activa).

Neste estado são efectuadas as seguintes tarefas aqui apresentadas e numeradas de 1 a 6, sendo que algumas das quais interessam apresentar com algum detalhe.

- I.** Cálculo dos ângulos  $\beta$ ,  $\alpha_{0/1,1}$ ,  $\alpha_{0/1,2}$  e D.
- II.** São geradas as circunferências *Circ2*, *Circ2\_max*, *Circ2\_min*, *Circ0*, *Circ0\_max*, *Circ0\_min*, *Circ1\_max* e *Circ1\_min*.
- III.** São calculadas as intercepções entre *Circ2* e *Circ0*, *Circ2\_max* e *Circ0\_max*, *Circ2\_min* e *Circ0\_min*, *Circ2* e *Circ1*, *Circ2\_max* e *Circ1\_max*, *Circ1\_min* e *Circ1\_min*. O calculo das intercepções é feito recorrendo ao método apresentado em [20].
- IV.** São calculados *x\_max*, *x\_min*, *y\_max* e *y\_min* referentes às superfícies de incerteza que dizem respeito à distância à baliza 0 e baliza 1.

No cálculo dos *x\_max/min* e *y\_max/min* referentes à medida da distância à baliza 0 e à baliza 1 é necessário ter em conta que nem sempre ocorrem as intercepções referidas no ponto III, e para cada situação o método de calcular os valores de *x\_max/min* e *y\_max/min* é diferente.

Apresenta-se um exemplo para o caso em que todas as intercepções referidas no ponto III ocorrem (melhor situação) em relação à medida da distância à baliza 0 (o mesmo se aplica à baliza 1), nesta situação vamos ter duas superfícies, como está apresentado na Figura 5.9.2. Aqui teremos então dois conjuntos de valores para *x\_max/min\_1/2* e *y\_max/min\_1/2*.

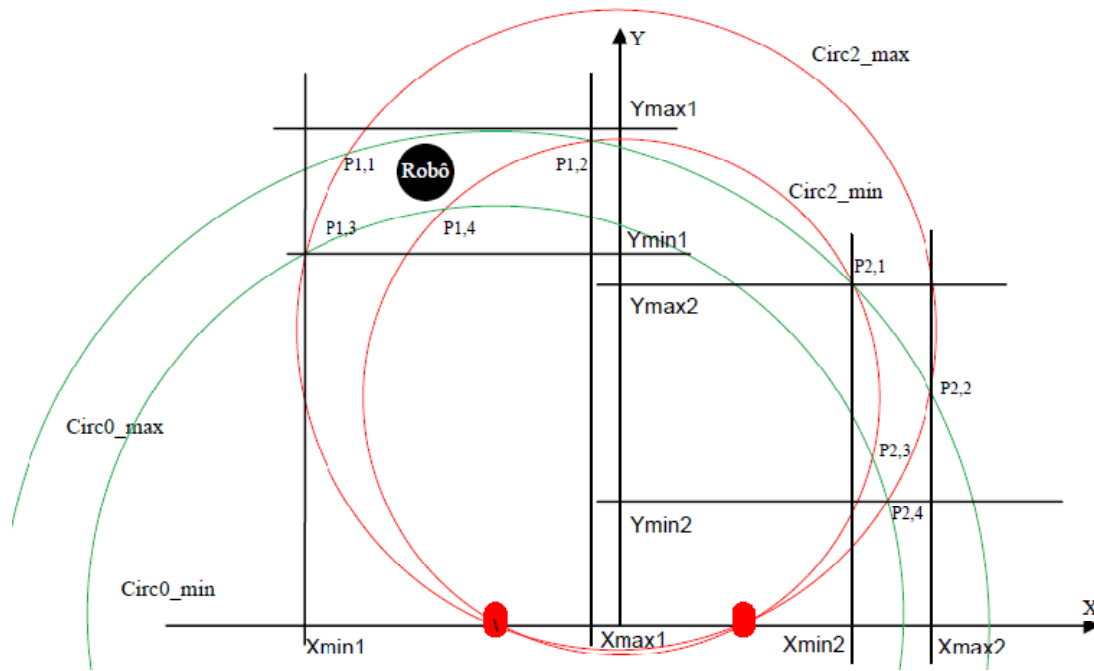


Figura 5.9.2 Exemplo dos  $x_{\max}/\min_{1/2}$  e  $y_{\max}/\min_{1/2}$  em relação à baliza 0.

Os valores de  $x_{\max}/\min_{1/2}$  e  $y_{\max}/\min_{1/2}$  referentes à baliza 0 serão o maior valor para  $x$  e  $y$  das interseções (P1,1, P1,2, P1,3, P1,4, P2,1, P2,2, P2,3 e P2,4) que delimitam as superfícies de incerteza com a exceção de algumas situações como a da Figura 5.9.2 em relação ao  $Y_{\max 1}$ . Em relação à superfície 1 (delimitada por  $X_{\min 1}$ ,  $X_{\max 1}$ ,  $Y_{\min 1}$  e  $Y_{\max 1}$ ) temos as seguintes exceções:

- Se o valor de  $X_{\min 1}$  for menor que o valor da coordenada  $x$  da baliza 0 e se o valor de  $X_{\max 1}$  for maior que o valor da coordenada  $x$  da baliza 0 então  $Y_{\max 1}$  é igual a  $R_{\text{circ0\_max}}$ .
- Se o valor de  $Y_{\min 1}$  for menor que o valor da coordenada  $y$  do centro da circunferência  $\text{Circ2\_max}$  e se o valor de  $Y_{\max 1}$  for maior que o valor da coordenada  $y$  do centro da circunferência  $\text{Circ2\_max}$  então  $X_{\min 1}$  é igual a  $-R_{\text{circ2\_max}}$ .

Em relação à superfície 2 (delimitada por  $X_{\min 2}$ ,  $X_{\max 2}$ ,  $Y_{\min 2}$  e  $Y_{\max 2}$ ) temos a seguinte exceção:

- Se o valor de  $Y_{\min 2}$  for menor que o valor da coordenada  $y$  do centro da circunferência  $\text{Circ2\_max}$  e se o valor de  $Y_{\max 2}$  for maior que o valor da coordenada  $y$  do centro da circunferência  $\text{Circ2\_max}$  então  $X_{\min 2}$  é igual a  $R_{\text{circ2\_max}}$ .

Foi descrita situação em que  $\text{Circ2\_max}$  intercepta  $\text{Circ0\_max}$  e  $\text{Circ2\_min}$  e  $\text{Circ2\_min}$  intercepta  $\text{Circ0\_max}$  e  $\text{Circ2\_min}$ . Para outras situações teremos apenas um conjunto de valores máximos e mínimos para  $x$  e  $y$  ( $x_{\max}/\min$  e  $y_{\max}/\min$ ), temos essa situação retratada na Figura 5.7.4. O método de determinar os limites das superfícies de incerteza para situações diferentes são similares ao anteriormente apresentado.

#### V. São tratadas as situações de ambiguidade.

Como já foi referido na secção 5.2.3 a posição é calculada a partir da intersecção de duas circunferências (Circ2 com Circ0 ou Circ1) e que esta intersecção gera duas soluções possíveis para a posição do robô (pode ocorrer o caso de haver apenas uma posição ou mesmo nenhuma mas estas situações ocorrem para más medidas da posição). O sistema de localização tem de ser capaz de escolher com segurança qual das soluções considerar, caso contrário podem ocorrer erros grosseiros na medida da pose. Na secção 5.2.3 já foram enunciadas sumariamente os métodos de resolver esta ambiguidade, mas têm-se de ter em conta a incerteza das grandezas em causa na escolha da solução a considerar.

São efectuadas três tipos de verificações sequencialmente até que alguma resolva a situação de ambiguidade. Se mesmo assim a situação de ambiguidade não for resolvida a solução considerada é a média das duas soluções com uma incerteza que corresponde à soma da incerteza das duas soluções.

Na secção 5.2.3 são apresentadas três formas de resolver a ambiguidade das soluções da posição: considerando as restrições no espaço de navegação do robô, recorrendo à outra circunferência (Circ0/1) e recorrendo à pose actual do robô. A isto é adicionada também a questão da incerteza das grandezas em causa na escolha da solução.

Para exemplificar as verificações efectuadas apresenta-se o caso das intercepções de Circ2 com Circ0, o raciocínio é similar às intercepções de Circ2 com Circ1.

A primeira verificação consiste então em verificar se a superfície de incerteza na posição gerada por uma solução está completamente fora do espaço de navegação (e não apenas a posição calculada pela intersecção entre Circ2 e Circ0) apresenta-se o exemplo da Figura 5.9.3, aqui a medida correspondente a  $P_{int2}$  pode ser descartada com segurança.

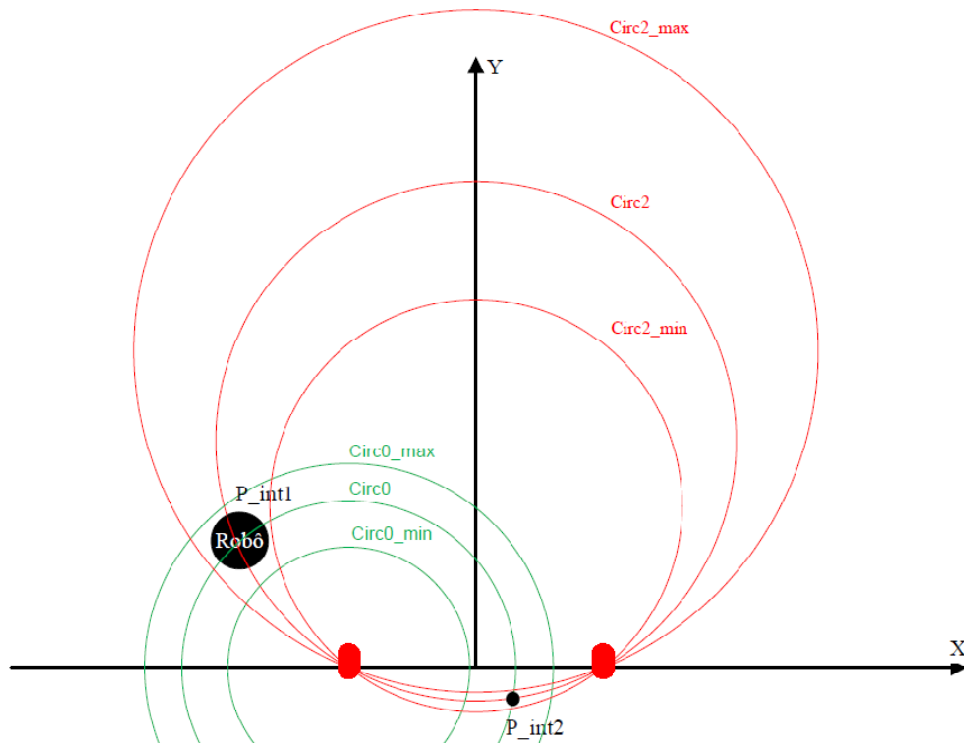


Figura 5.9.3 Solução da ambiguidade recorrendo às restrições do espaço de navegação.

Se a verificação a cima enunciada não resolver a situação de ambiguidade recorre-se então à medida da distância à outra baliza (no presente exemplo será então  $R_{circ1}$ ). Em certas condições o valor de  $R_{circ1}$  pode ter uma incerteza muito grande o que pode fazer com que a verificação apresentada na Figura 5.2.5 leve a uma escolha errada. Desta forma na escolha da solução gerada pela intersecção de  $Circ2$  com  $Circ0$  considera-se os limites da incerteza de  $R_{circ1}$  ( $R_{circ1\_max}$  e  $R_{circ1\_min}$  e não  $R_{circ1}$ ). A solução considerada será aquela que estiver contida na incerteza da medida de  $R_{circ1}$ , mas só se a outra solução não estiver contida na superfície de incerteza de  $R_{circ1}$ . Esta situação está retratada na Figura 5.9.4, como podemos observar será de considerar com segurança a solução correspondente a  $P_{int2}$ .

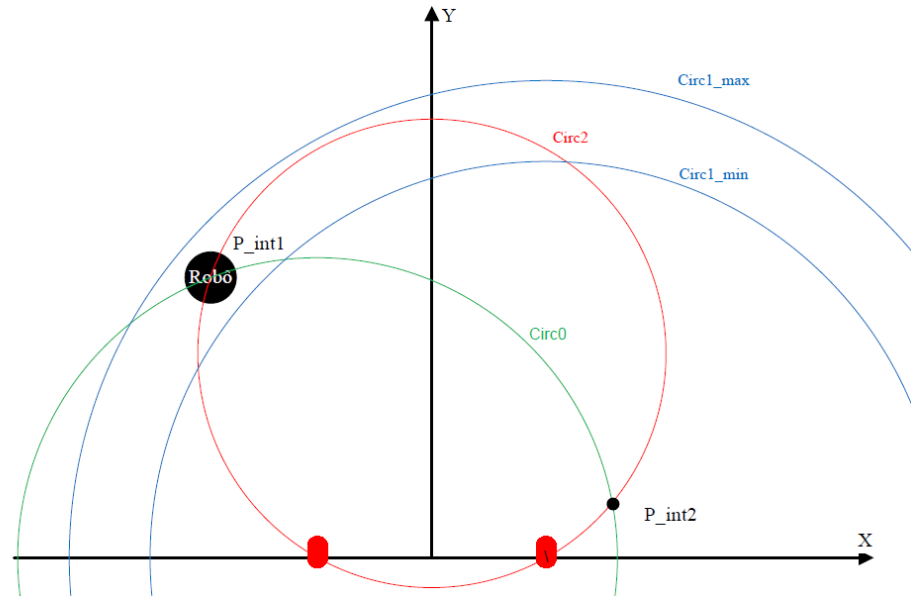


Figura 5.9.4 Solução da ambiguidade recorrendo à medida da distância da outra baliza.

Em último caso recorre-se à medida actual da pose. Uma solução é descartada se estiver fora da área definida por  $\Delta x$  e  $\Delta y$  contrariamente a outra solução que esteja contida na área definida por  $\Delta x$  e  $\Delta y$ . A Figura 5.9.5 ilustra esta situação, considera-se então a solução dada por P\_int1.

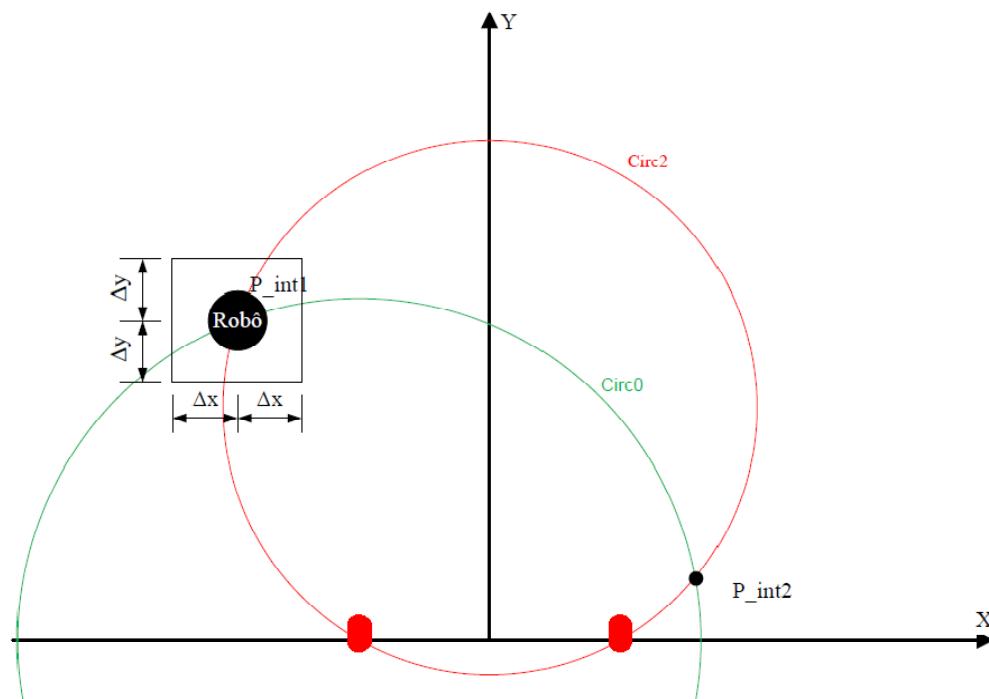


Figura 5.9.5 Solução da ambiguidade recorrendo à medida actual da pose do robô.

- VI. É calculada a orientação partir da medida de posição que apresentar a superfície de incerteza menor (secção 5.7.1) e é calculada a incerteza de orientação (secção 5.7.2).

### 5.9.3 Estado “*Analise\_roboto\_state*”

Este estado é o responsável por corrigir a pose e a sua incerteza e analisar a condição de paragem do processo de localização.

- A pose e a sua incerteza é corrigida se a área definida por  $\Delta x_{0/1}$  e  $\Delta y_{0/1}$  for menor que a área definida por  $\Delta x$  e  $\Delta y$  (secção 5.8).

A localização é dada por concluída se  $\Delta x$  e  $\Delta y$  forem menores que determinado valor (presentemente 30 cm), ou seja transição T5 activa. Caso contrário o robô desloca-se para uma nova posição (transição T4 activa).

### 5.9.4 Estado “*Trajectory\_control*”

Este bloco é o responsável por decidir e controlar as trajectórias do robô no processo de localização, ou seja calcular P2 e controlar a trajectória do robô de P1 a P2. A transição T6 fica activa quando o robô chega então à posição P2, e passa então novamente para o estado Scan.

O robô tem que efectuar medidas entre duas posições, de modo a medir a sua distancia a cada baliza. Como já foi enunciado, as incertezas das medidas obtidas depende da posição actual e da posição anterior. O robô tem que percorrer distâncias consideráveis para conseguir uma boa medida da distância às balizas, mas por outro lado este não deve afastar-se demasiado da sua área de navegação definida. Este problema agrava-se quando a incerteza da pose do robô é muito grande, o que acontece quando é efectuada pela primeira vez a medida da localização.

Este bloco pode eventualmente ser melhorado, no entanto apresenta-se aqui um algoritmo simples desenvolvido de forma a poder obter desde já alguns resultados práticos. A figura seguinte permite ter uma ideia da densidade das linhas de posição e do ângulo com que estas se interceptam.

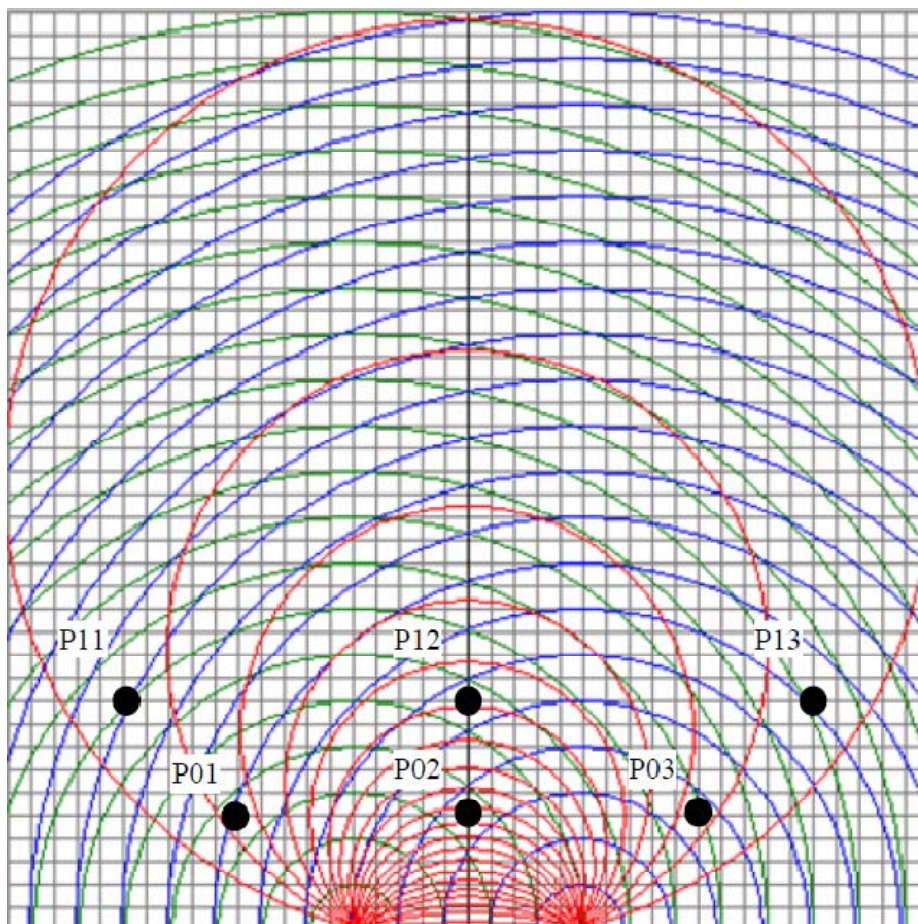


Figura 5.9.6 Densidade das linhas de posição, a verde Circ0, a azul Circ1 e a vermelho Circ2.

A partir da Figura 5.9.6 e tendo em conta a densidade de linhas e o ângulo de intersecção, definiram-se dois conjuntos de pontos (P01, P02, P03, com  $Y=50$  cm e P11, P12, P13, com  $Y=100$  cm). Considera-se que nestas zonas o sistema de localização consegue obter boas medidas da pose.

Definiu-se também dois *thresholds* (min e max) em relação à incerteza da pose do robô através de dois conjuntos de valores  $\Delta x_{\max}$ ,  $\Delta y_{\max}$ ,  $\Delta \theta_{\max}$  e  $\Delta x_{\min}$ ,  $\Delta y_{\min}$ ,  $\Delta \theta_{\min}$ . Além disso definiram-se três modos de funcionamento em relação à forma como o robô se move para se localizar.

O primeiro modo corresponde à situação em que  $\Delta x$  é menor que  $\Delta x_{\min}$ ,  $\Delta y$  menor que  $\Delta y_{\min}$  e  $\Delta \theta$  menor que  $\Delta \theta_{\min}$ . Estamos numa situação em que o robô possui uma boa certeza da pose suficiente para poder navegar entre os pontos P01, P02 e P03 sem sair da área de navegação, nomeadamente sem correr o risco de passar para lá da linha definida pelas balizas (valor  $y$  da pose menor que 0 ver Figura 5.1.1).

O segundo modo corresponde à situação em que  $\Delta x$  está entre  $\Delta x_{\min}$  e  $\Delta x_{\max}$ ;  $\Delta y$  está entre  $\Delta y_{\min}$  e  $\Delta y_{\max}$ ;  $\Delta \theta$  está entre  $\Delta \theta_{\min}$  e  $\Delta \theta_{\max}$ . O grau de certeza aqui é médio. Neste caso o robô irá navegar entre os pontos P11, P12 e P13.

Um terceiro modo corresponde ao caso em que o robô possui uma incerteza elevada que não lhe permite navegar entre pontos pré-determinados do plano de navegação, sem correr o risco de ir para zonas não desejadas (este modo é executado quando a localização é efectuada pela primeira vez). O robô executa então uma sequência de movimentos a fim de obter medidas que diminuam a sua incerteza, e que permitam a este bloco entrar nos modos anteriormente enunciados. A máquina de estados que modeliza a sequência de movimentos deste modo de funcionamento esta apresentada na figura seguinte.

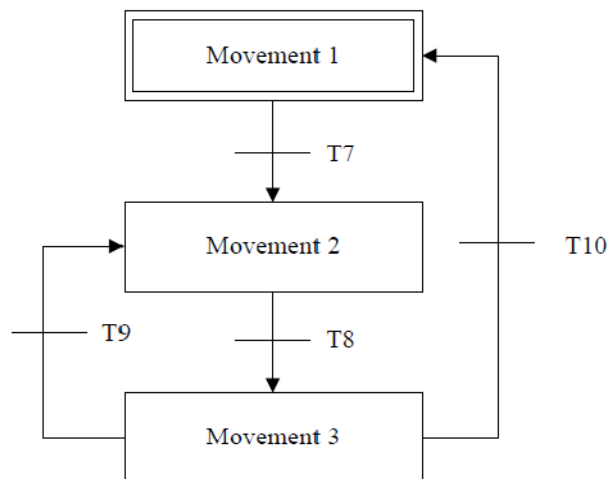


Figura 5.9.7 Máquina de estados da sequência de movimentos quando o robô quando está com grande incerteza na pose (terceiro modo).

Em “*Movement 1*” o robô move-se em sentido contrário em relação ao centro das balizas.

Em “*Movement 2*” o robô move-se em direcção à baliza que tiver um  $R_{circ0/1\_min}$  maior, uma distância igual a  $R_{circ0/1\_min} - 50\text{cm}$ .

Em “*Movement 3*” o robô roda  $90^\circ$ , em relação à baliza do qual se aproximou, e avança uma distância igual a  $R_{circ0/1\_min}$  da outra baliza.

Se após “*Movement 3*” o robô não tiver ainda uma certeza suficiente na pose de forma a poder ir para os outros modos de funcionamento volta para o estado “*Movement 2*” se a  $R_{circ0/1\_min}$  de ambas as balizas for maior que 50 cm (T9 activa) caso contrário vai para o estado “*Movement 1*” (T10 activa).

## 5.10 Resultados experimentais

Nesta secção serão expostos os resultados obtidos a partir da interface desenvolvida no computador portátil utilizado no robô.



### 5.10.1 Ângulo entre as duas balizas

Começa-se por apresentar os resultados referentes à superfície de incerteza gerada pela medida do ângulo entre as duas balizas, em três posições distintas: uma lateralmente em relação às balizas e as outras duas na zona central das balizas, uma perto e outra mais afastada. A Figura 5.10.1 apresenta alguns dos elementos visuais implementados (estes vão sendo apresentados à medida que são expostos os resultados). Esta representa a área de navegação do robô, cada quadrícula tem de lado 10 cm. Temos aqui os limites da superfície de posição gerados pela medida de  $\beta$  (Circ2\_max e Circ2\_min) aproximadamente na posição  $x=100$  cm e  $y=50$ . Podemos também visualizar a medida obtida a partir do sistema de visão SmHal (secção 3.1.10), esta será assumida como "verdadeira" posição do robô. Na interface, esta medida é representada por uma cruz vermelha que indica a posição, essa cruz possui também uma prolongação que representa a medida da orientação.

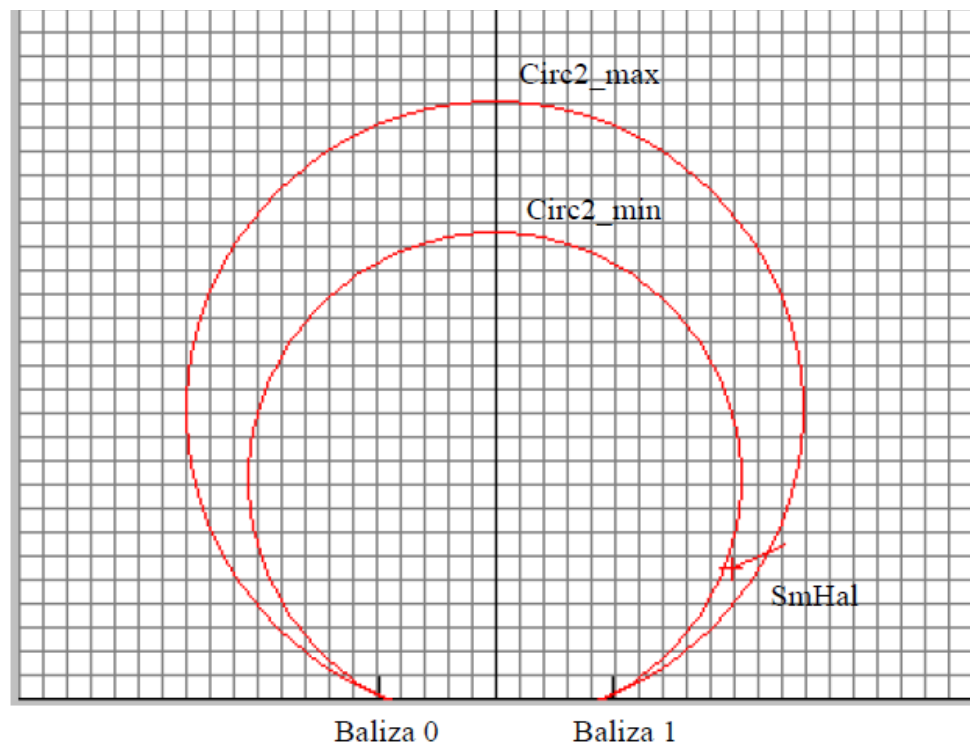


Figura 5.10.1 Circ2\_max e Circ2\_min obtidos na posição  $x=100$  cm e  $y=50$  cm (aproximadamente).

Na Figura 5.10.2 apresenta a superfície de incerteza gerada em  $x=0$  e  $y=200$  cm, aproximadamente.

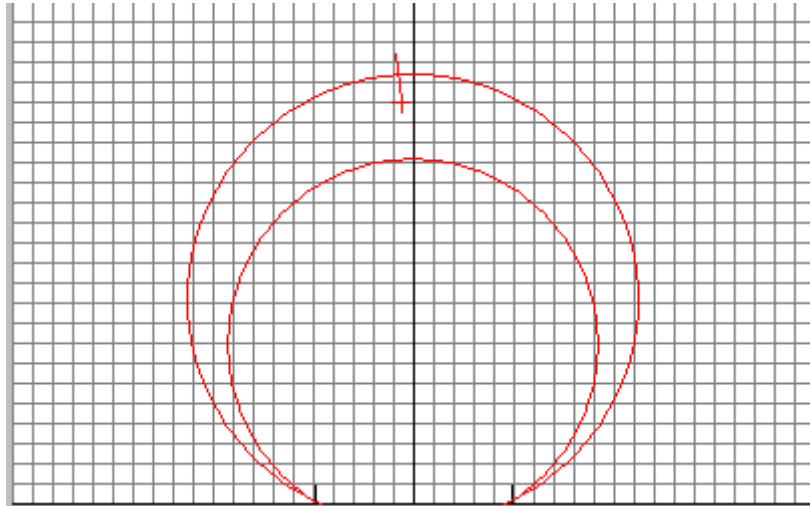


Figura 5.10.2 Circ2\_max e Circ2\_min obtidos na posição  $x=0$  cm e  $y=200$  cm (aproximadamente).

A figura seguinte apresenta os resultados obtidos na posição próxima de  $x=0$  cm e  $y=50$  cm.

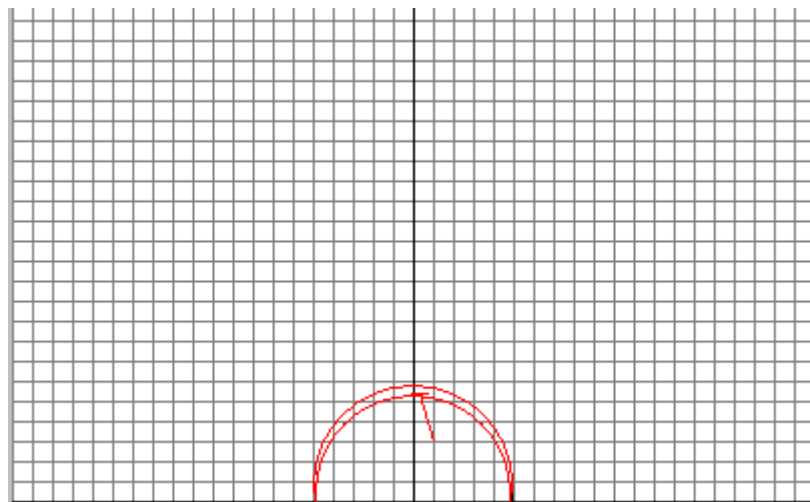


Figura 5.10.3 Circ2\_max e Circ2\_min obtidos na posição  $x=0$  cm e  $y=50$  cm (aproximadamente).

Observa-se que as superfícies geradas pela medida de  $\beta$  envolvem a posição verdadeira do robô. Conclui-se também que quanto maior é o ângulo  $\beta$  menor é a área da superfície de incerteza gerada por esta medida.

### 5.10.2 Distância às balizas

Nesta secção serão apresentados os resultados referentes à incerteza na medida da distância à baliza 0. Aqui as circunferências geradas referentes a Circ0\_max e Circ0\_min são representadas a cor verde. Verifica-se que os resultados estão de acordo com as conclusões retiradas na secção 5.6.4 e valida-se a implementação do algoritmo descrito na secção 5.6.5.

A Figura 5.10.4 apresenta a incerteza da medida obtida para deslocamento de P1 ( $x=-140$  cm e  $y=50$  cm) até P2 ( $x=110$  cm e  $y=170$  cm). Este deslocamento retrata a situação apresentada na Figura 5.6.11, na qual se obtêm uma boa medida da distância.

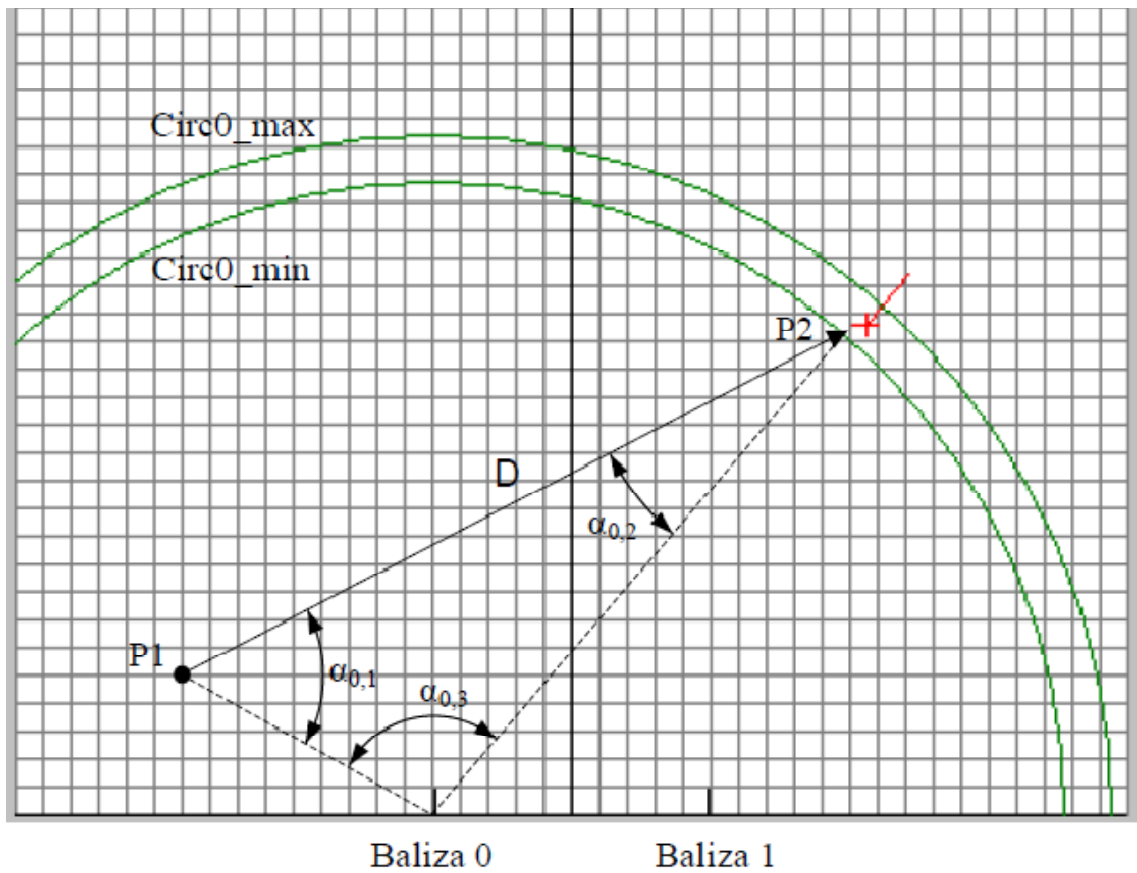


Figura 5.10.4 Circ0\_max e Circ0\_min obtidos para um deslocamento de P1 ( $x=-140$  e  $y=50$ ) a P2 ( $x=110$  e  $y=170$ ).

Na figura seguinte observa-se os resultados obtidos fazendo o deslocamento no sentido oposto ao da situação anterior. Observa-se, como era esperado, que a incerteza em relação à distância à baliza 0 é maior.

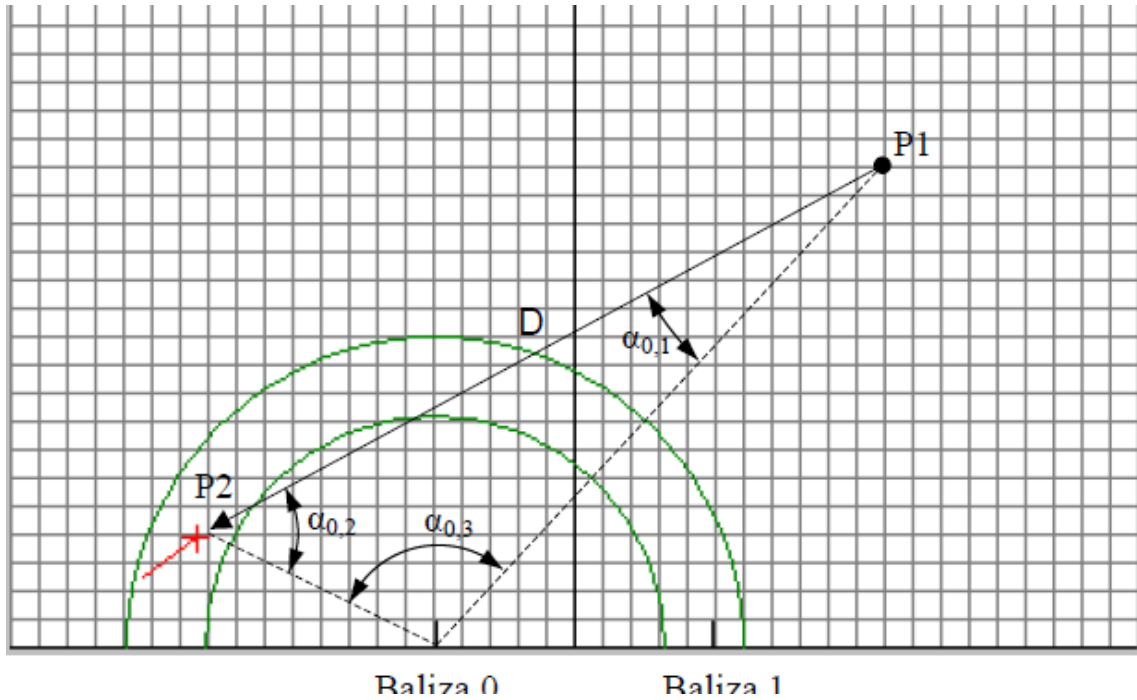


Figura 5.10.5 Circ0\_max e Circ0\_min obtidos para um deslocamento de P1 ( $x=110$  cm e  $y=50$  cm) a P2 ( $x=-140$  cm e  $y=50$  cm).

Na Figura 5.10.6 mostra um deslocamento no qual se obtêm uma má medida.

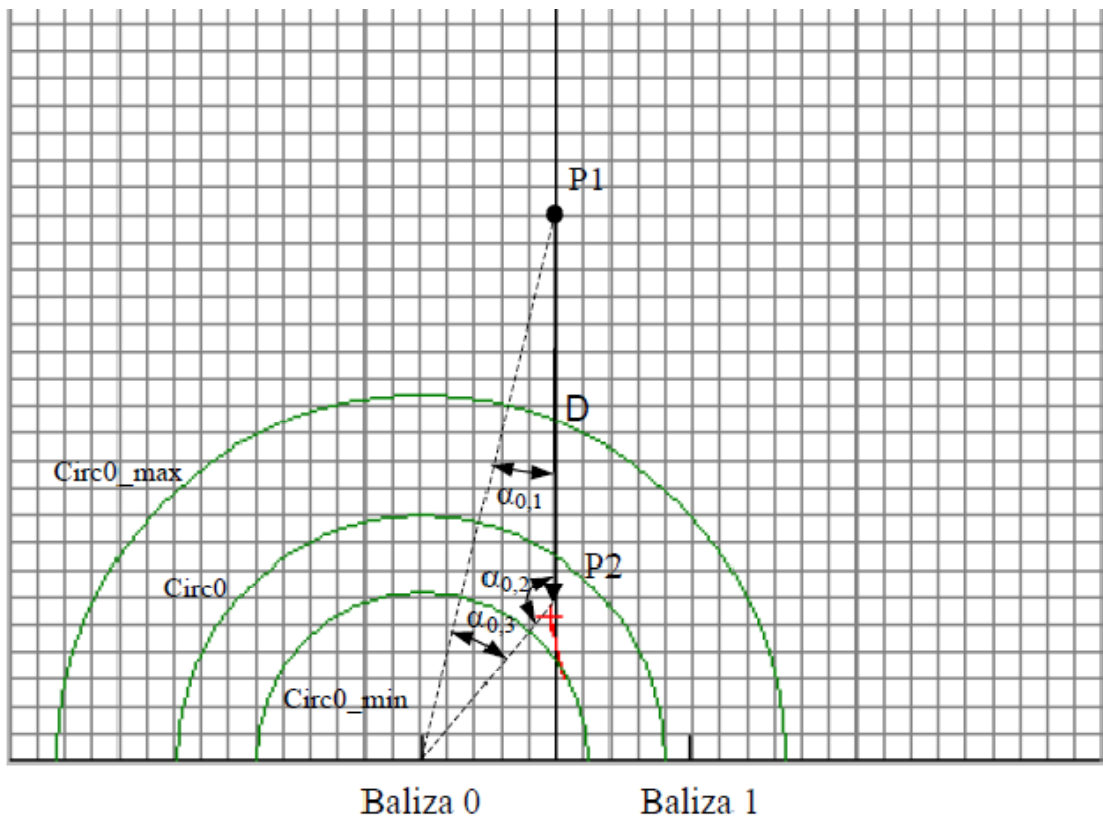


Figura 5.10.6 Circ0\_max e Circ0\_min obtidos para um deslocamento de P1 ( $x=0$  cm e  $y=200$  cm) a P2 ( $x=-0$  cm e  $y=50$  cm).

Observa-se então que o método descrito em 5.6.5 permite caracterizar correctamente o erro da medida da distância às balizas, sem se recorrer ao cálculo das derivadas parciais, tendo-se apenas um conhecimento prévio do seu sinal.

### 5.10.3 Superfícies de incerteza

A Figura 5.10.7 e a Figura 5.10.8 mostram Circ2\_max/min (vermelho), Circ0\_max/min (verde) e Circ1\_max/min (azul) calculados a partir da movimentação de P1 ( $x=0$  cm,  $y=100$  cm) para P2 ( $x=100$  cm,  $y=100$  cm) e de P1 ( $x=0$  cm,  $y=50$  cm) para P2 ( $x=100$  cm,  $y=50$  cm) respectivamente.

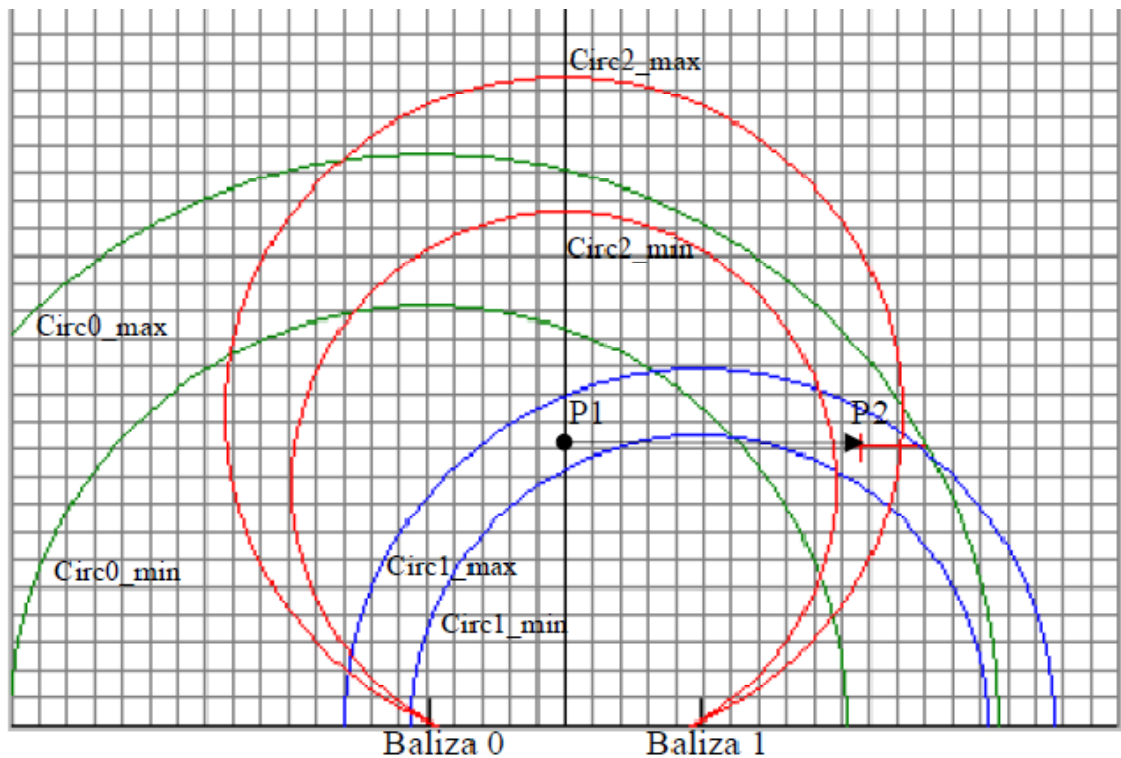


Figura 5.10.7 Circunferências máximas e mínimas geradas com o deslocamento de P1 ( $x=0$ ,  $y=100$ ) a P2 ( $x=100$ ,  $y=100$ ).

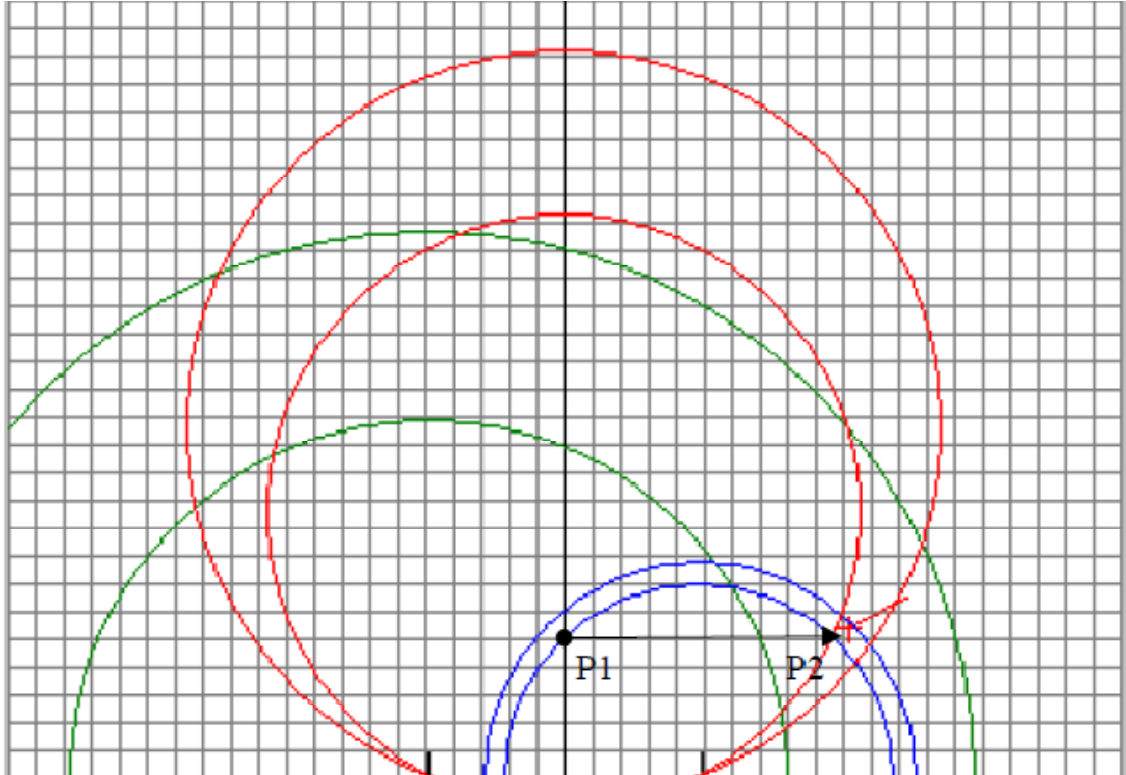


Figura 5.10.8 Circunferências máximas e mínimas geradas com o deslocamento de P1 ( $x=0, y=50$ ) a P2 ( $x=100, y=50$ ).

As imagens seguintes mostram para as situações duas anteriores o  $x_{\max}$  e  $x_{\min}$  obtidos para o Circ0 (verde) e Circ1 (azul).

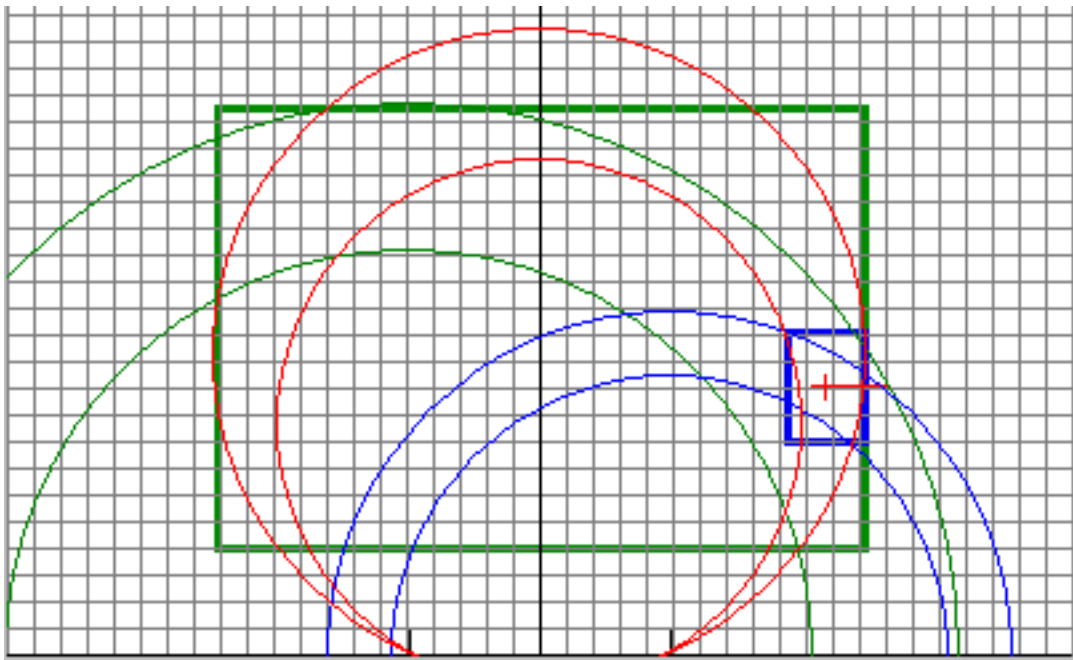


Figura 5.10.9  $X_{\min}$ ,  $X_{\max}$ ,  $Y_{\min}$  e  $Y_{\max}$  calculados com o deslocamento de P1 ( $x=0, y=100$ ) a P2 ( $x=100, y=100$ ).

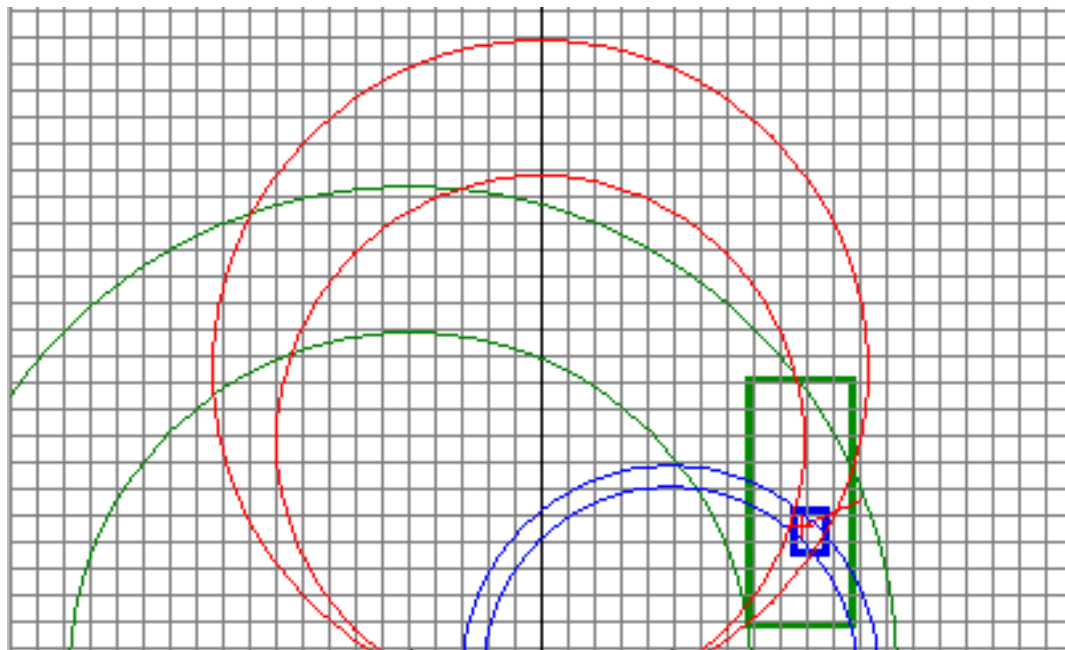


Figura 5.10.10  $X_{min}$ ,  $X_{max}$ ,  $Y_{min}$  e  $Y_{max}$  calculados com o deslocamento de P1 ( $x=0$ ,  $y=50$ ) a P2 ( $x=100$ ,  $y=50$ ).

O sistema de localização através da área dos rectângulos que envolvem as superfícies de incerteza geradas pela intersecção de Circ2 com Circ0 e Circ2 com Circ1 decide qual a distância ( $R_{circ0}$  ou  $R_{circ1}$ ) a considerar para o cálculo da posição e da orientação. Nos exemplos apresentados será então calculada a posição e a orientação através da intersecção das linhas de posição geradas pelo ângulo entre as balizas e a distância à baliza 1.

#### 5.10.4 Resultados obtidos durante o funcionamento do sistema de localização

Nesta secção será apresentado um conjunto de imagens para retratar o funcionamento geral do sistema de localização. Serão apresentadas duas situações, uma medida da pose na qual o robô conhece aproximadamente a sua posição, e outra na qual o robô vai medir pela primeira vez a sua pose, situação em que a incerteza da posição do robô é máxima.

A Figura 5.10.11 apresenta em detalhe a representação da pose e da sua incerteza, com a medida da pose pelo sistema de visão SmHal (representada a vermelho) na interface gráfica. A posição medida pelo robô é representada por uma cruz preta com uma prolongação que representa a orientação. A incerteza da posição,  $\Delta x$  e  $\Delta y$  é representada por um rectângulo azul e a incerteza da orientação,  $\Delta \theta$ , por duas linhas azuis.

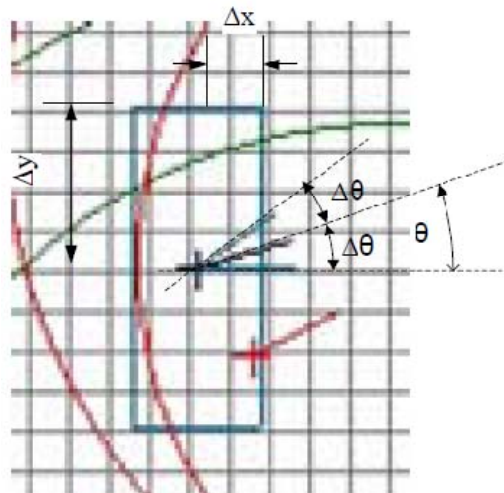


Figura 5.10.11 Representação da pose e da sua incerteza na interface gráfica.

Apresenta-se agora o seguinte exemplo: o robô está no estado missão (Figura 3.2.2) e a dada altura  $\Delta y$  ultrapassa o seu valor máximo (40 cm). Aqui o robô passa então para o estado localização e vai passar a executar as tarefas representadas pela máquina de estados da Figura 5.9.1. Este cenário está retratado na figura seguinte:

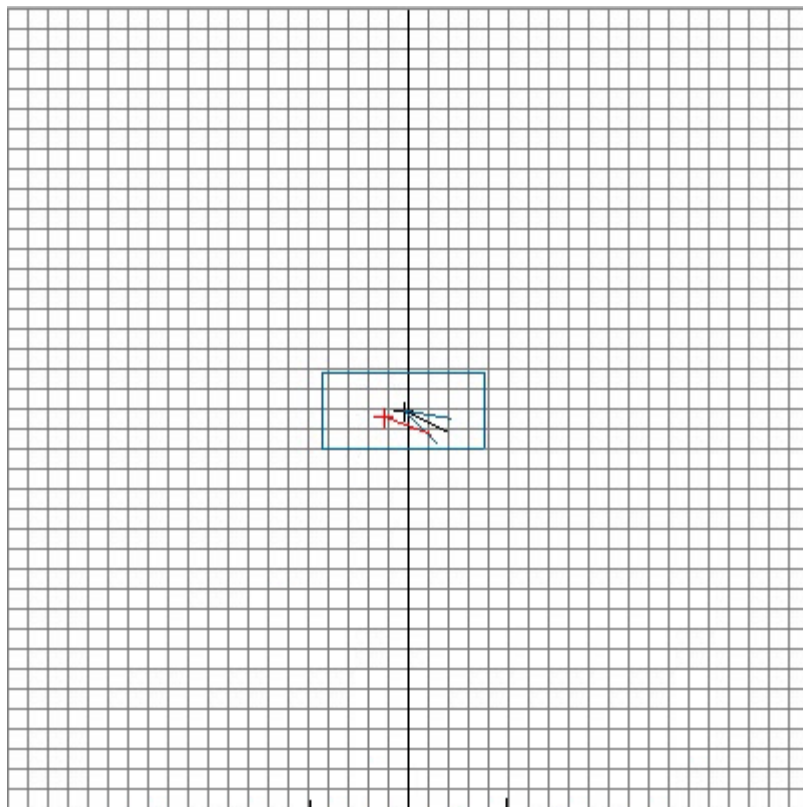


Figura 5.10.12 Início do processo de localização.

Neste caso a certeza do robô permite que este navegue até ao ponto P01, (Figura 5.9.6), correspondendo então ao modo 1 do “*process trajectory*”. As medidas obtidas após o deslocamento do robô estão apresentadas na Figura 5.10.13. O rectângulo violeta



representa a incerteza da medida da pose obtida pelo sistema de localização ( $\Delta x_{0/1}$ ,  $\Delta y_{0/1}$ ). Neste caso sendo a área definida por  $\Delta x_{0/1}$ ,  $\Delta y_{0/1}$  menor que a área definida por  $\Delta x$ ,  $\Delta y$  da pose actual do robô e a sua incerteza e pose são actualizadas com os valores obtidos pelo sistema de localização global.

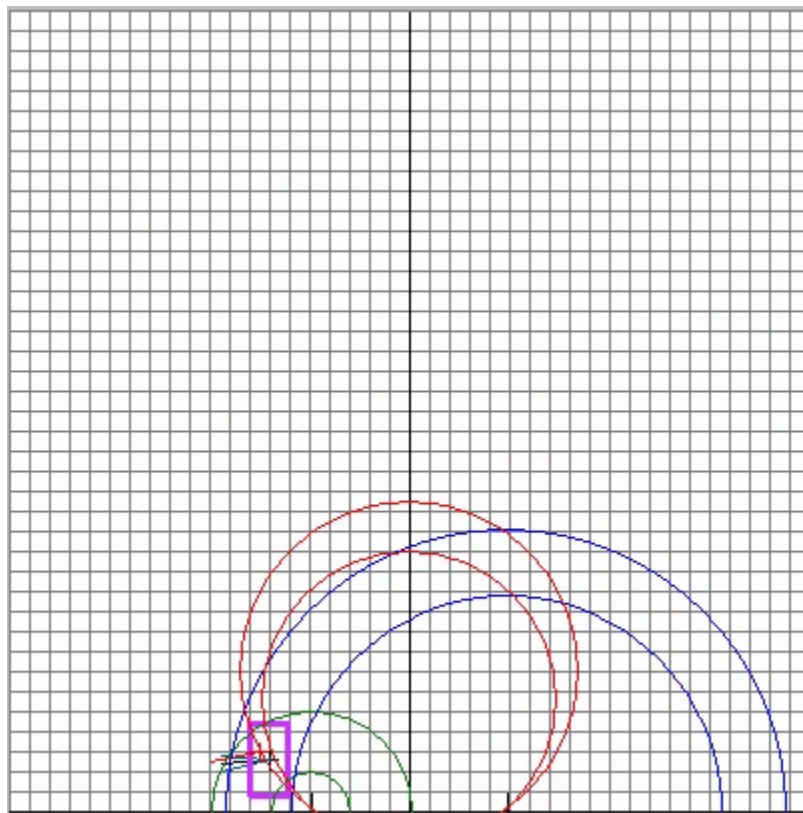


Figura 5.10.13 Após o deslocamento o robô obtêm uma medida da pose válida terminando assim o processo de localização.

Neste ponto, a incerteza da localização em  $x$  ( $\Delta x$ ) e em  $y$  ( $\Delta y$ ) passa a ser menor que 30 cm, então o processo de localização é dado por terminado e o robô volta ao estado missão.

Agora vai ser apresentada a situação em que a incerteza da pose do robô é máxima, que corresponde à primeira vez que a posição e a orientação do robô são medidas pela primeira vez. Nesta situação as trajectórias do robô são geridas pelo modo três do bloco “*trajectory control*” da máquina de estados do sistema de localização (Figura 5.9.1).

O robô começa por efectuar as tarefas do estado “*scan*” da máquina de estados do processo de localização (Figura 5.10.14). Como se pode observar a incerteza da medida da pose é grande, sendo arriscado então o robô navegar para pontos definidos na Figura 5.9.6. Nesta situação a gestão de trajectórias é feita pelo modo 3 do “*trajectory control*”. O robô então afasta-se do centro das balizas, por forma a obter uma medida da distância às balizas (corresponde ao “*Movimento 1*” da Figura 5.9.7), e volta a efectuar medidas, representadas na Figura 5.10.15. Nesta situação então o robô aproxima-se em direcção da baliza 0 (corresponde ao “*Movimento 2*” da Figura 5.9.7), e volta a efectuar o “*Scan*”, obtendo as medidas da Figura 5.10.16. De seguida efectua o “*Movimento 3*”

que corresponde a um movimento no sentido perpendicular à orientação relativa da baliza 0, obtendo as medidas apresentadas na Figura 5.10.17. Aqui a incerteza da pose permite o robô navegar até à posição P2 correspondente ao ponto P03 da Figura 5.9.6 (ou seja o bloco responsável pela gestão de trajectórias passa para o modo de funcionamento 1) e aqui este obtém uma boa medida da pose, dando o processo de localização por terminado.

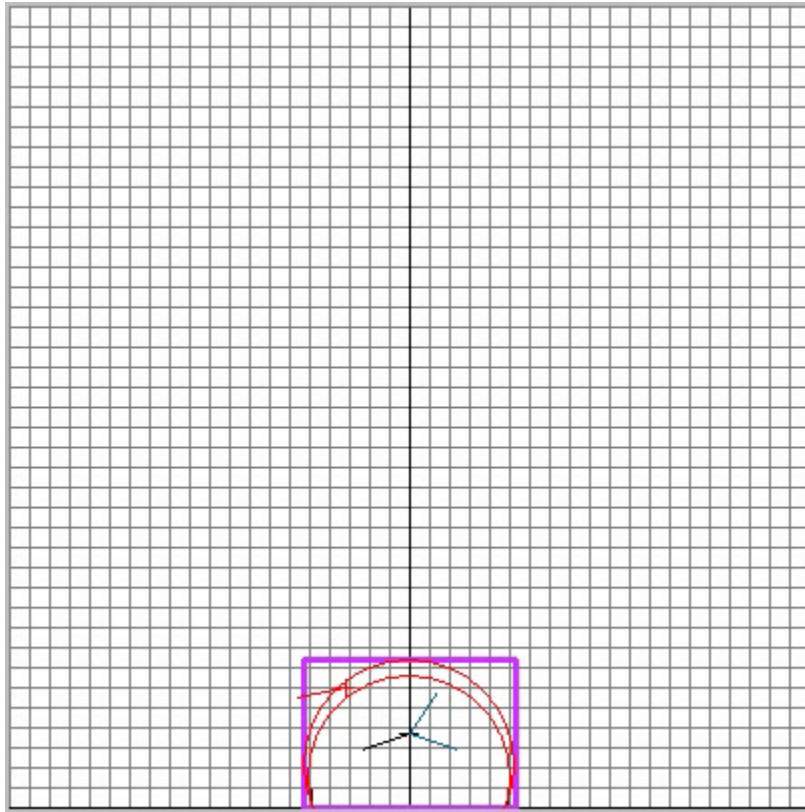


Figura 5.10.14 Superfície inicial da estimativa da localização.

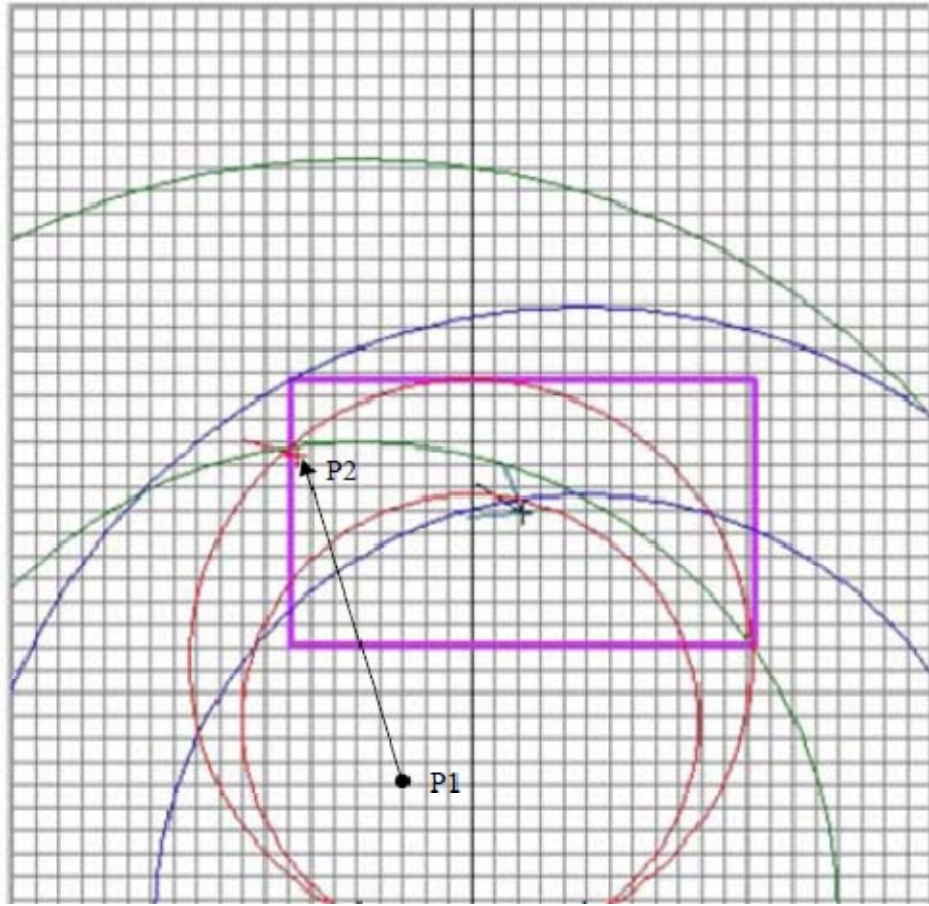


Figura 5.10.15 Medidas obtidas após o robô afastar-se das balizas.

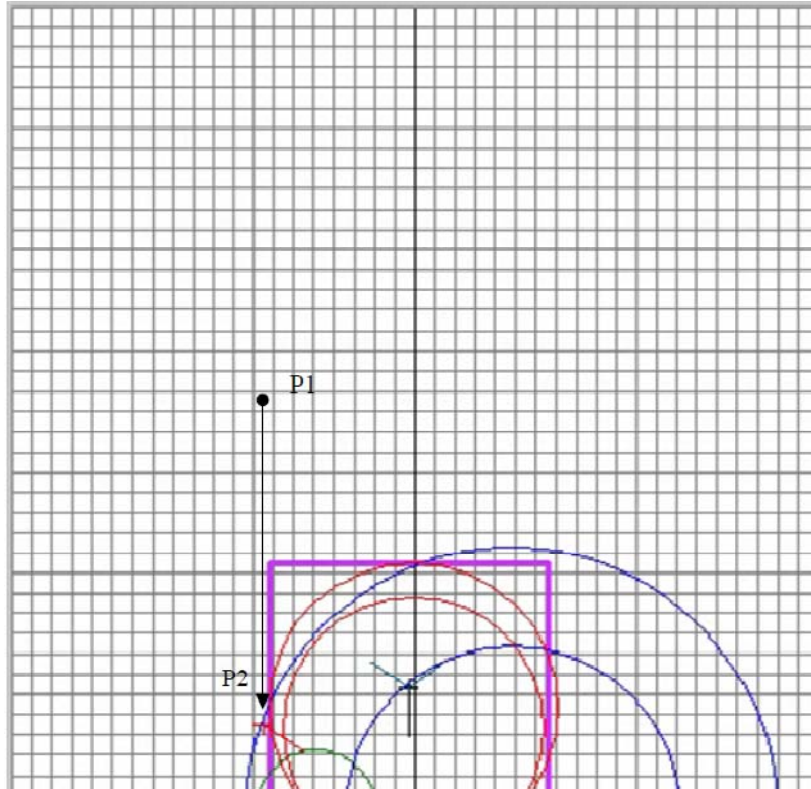


Figura 5.10.16 Medidas obtidas após o robô aproximar-se da baliza 0.

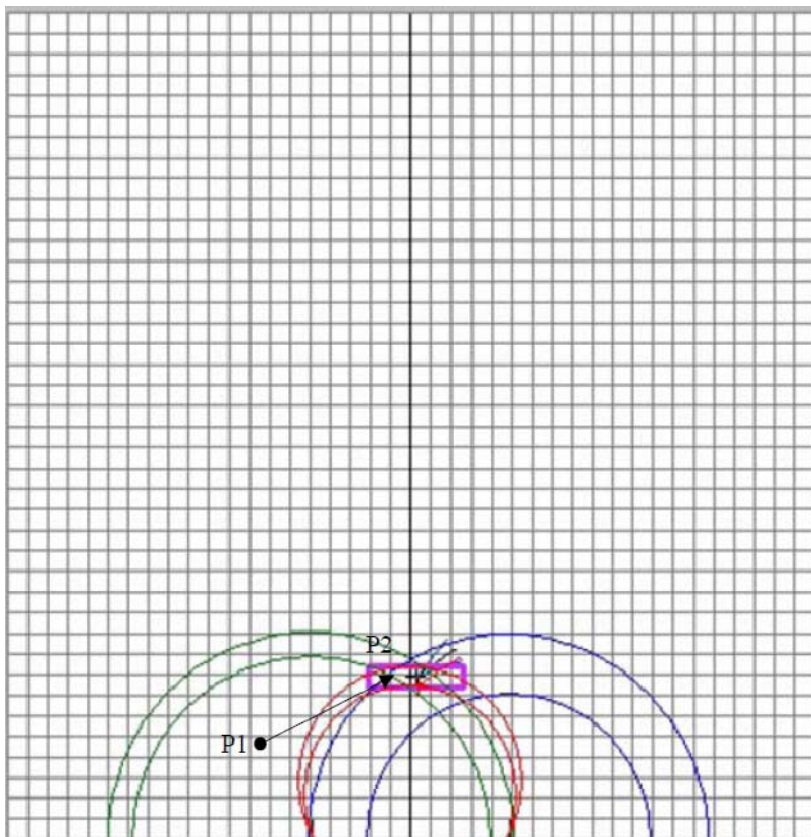


Figura 5.10.17 Medidas após o robô mover-se numa direcção perpendicular à sua orientação relativa com a baliza 0.

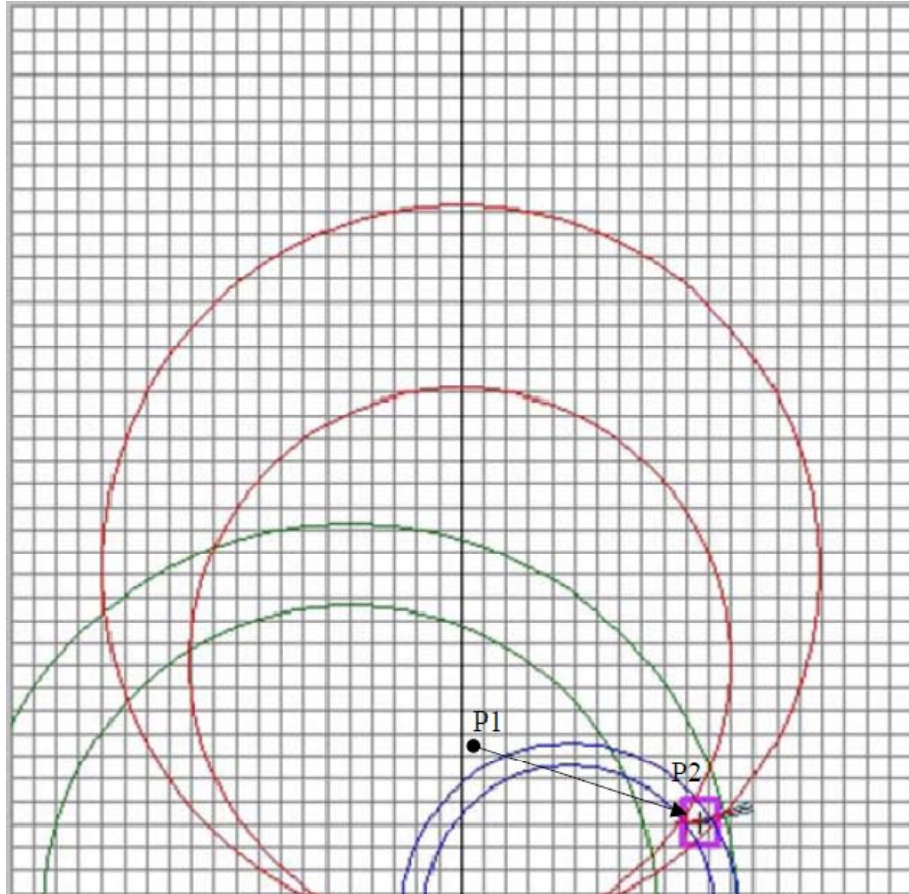


Figura 5.10.18 Medida obtida após o robô mover-se para a posição P2 correspondente à localização P03.

Os resultados experimentais comprovam que o sistema de localização classifica correctamente a qualidade das medidas da pose, impedindo que o robô tenha “falsa certeza” da sua localização. Têm-se uma estimativa mais pessimista mas que aumenta a robustez do sistema em relação à sua localização global.



## Capítulo 6

### Conclusões e trabalhos futuros

Nesta dissertação estudaram-se e implementaram-se diferentes métodos de sensorização e localização direccionados para aplicações em robótica móvel de baixo custo.

Conclui-se ser possível estimar com alguma precisão a velocidade de um motor DC, recorrendo à estimativa da corrente através da medida da queda de tensão de uma resistência, evitando, assim, o recurso a *encoders*. O método desenvolvido baseia-se na determinação dos parâmetros do motor DC e da aplicação das equações do modelo que relacionam a tensão e a corrente do rotor com a velocidade de rotação. Também se verificou um ligeiro desvio do modelo no início da resposta ao degrau, sendo que a origem desse desvio deve-se, provavelmente, ao facto de a indutância dos enrolamentos do motor DC não ser considerada. Por isso, futuramente pretende-se integrar essa grandeza no modelo, de forma a melhorar a sua resposta transitória. Este método adequa-se a aplicações robóticas em que o sistema de localização possui tempos de amostragem altos e em que a precisão do sistema de localização relativa não seja um factor crítico.

Estudou-se e aplicou-se uma técnica de calibração da odometria que permite uma correcção eficiente dos erros sistemáticos, além disso analisou-se a influência dos erros aleatórios na odometria e implementou-se um modelo para quantificar estatisticamente a certeza da medida da pose dada pela odometria. Conclui-se que o movimento de rotação é especialmente crítico nos robôs de tracção diferencial, principalmente para robôs que possuam rodas de elevada espessura (embora estas permitam uma melhor aderência ao chão evitando situações de derrapagem). Estando o sistema de localização, desenvolvido no presente trabalho, fortemente dependente da qualidade da odometria pretende-se como trabalho futuro estudar técnicas de detecção de situações de derrapagem e perda de aderência das rodas. Estas situações originam erros grosseiros e, se não forem detectadas, podem fazer com que o robô se perca.

Implementou-se um sistema de localização de baixo custo e de simples instalação, baseado apenas na odometria do robô, num simples receptor de infravermelhos e duas balizas, que não são mais que dois conjuntos de leds emissores de infravermelhos. A posição do robô é conseguida através da medida de duas grandezas, o ângulo entre as

balizas e a distância a cada uma delas, sendo esta última obtida de forma indirecta. Desenvolveu-se um algoritmo para calcular a pose e a sua incerteza, baseado nas propriedades geométricas das superfícies de incerteza geradas. Este método permite caracterizar as incertezas no cálculo da pose sem recorrer a cálculo de derivadas parciais ou a métodos computacionalmente pesados, dando boas perspectivas de implementação numa plataforma computacional de baixo custo, como por exemplo, um pequeno micro-controlador.

A estimativa do erro das medidas efectuadas pelo robô ( $\Delta\beta$ ,  $\Delta\alpha_{0/1,1}$ ,  $\Delta\alpha_{0/1,2}$ ,  $\Delta D$ ) de momento consideram-se valores constantes que foram obtidos a partir do maior desvio observado durante a fase experimental. Pretende-se como trabalho futuro otimizar a estimativa deste erro, recorrendo ao modelo do erro da odometria implementado, de forma a tornar a caracterização do erro menos pessimista. Pretende-se também implementar um sensor de balizas que dê acesso ao valor da intensidade do sinal. Com isto, temos acesso a outra fonte de informação relativamente às distâncias das balizas, e poderá também ser útil na detecção de reflexões. Além disto, pretende-se melhorar a gestão de trajectórias do robô quando este se está a localizar, de modo a tornar o processo de localização mais rápido e robusto.

Abordaram-se ainda diferentes tecnologias de baixo custo, no que diz respeito à motorização, aos sensores de obstáculos e degraus e às balizas de localização baseadas em infravermelhos. Porém, os sensores de obstáculos e degraus apesar de desenvolvidos e testados não foram montados no robô e integrados no software. Isto porque, o principal objectivo deste trabalho, era, de facto, o estudo dos sensores e localização; e devido à própria natureza deste trabalho que pressupunha um tempo limitado não foi possível nesta fase do projecto a montagem dos sensores de degraus e de obstáculos. Esta tarefa irá ser efectuada futuramente e além disso irá proceder-se à substituição do computador portátil por outra plataforma computacional de mais económica.



## Referências

- [1]. ESTEVES, João Sena - Metodologia de auto-localização absoluta em ambientes quase-estruturados. Universidade do Minho: Escola de Engenharia, 2005. Tese de doutoramento em Engenharia Electrónica Industrial.
- [2]. *Photodiodes, Phototransistors and Infrared Emitters*. In PerkinElmer *Optoelectronics'* [Em linha] (2001) [Consult. 24 Jul. 2009]. Disponível na Internet:<URL:[http://optoelectronics.perkinelmer.com/content/RelatedLinks/Brochures/BRO\\_PhotodiodesPhototransistorsAndIREDs.pdf](http://optoelectronics.perkinelmer.com/content/RelatedLinks/Brochures/BRO_PhotodiodesPhototransistorsAndIREDs.pdf)>.
- [3]. *Circuit Description of the IR Receiver Modules*. In Vishay\_ [Em linha] Rev. 1.4, 05-Sep-08 [Consult. 24 Jul. 2009]. Disponível na Internet:<<http://www.vishay.com/docs/80069/circuit.pdf>>.
- [4]. *Sensors – Sharp Ir Range Finder*. In Society of Robots [Em linha] [Consult. 20 Jun. 2009]. Disponível na Internet:<URL: [http://www.societyofrobots.com/sensors\\_sharpirrange.shtml](http://www.societyofrobots.com/sensors_sharpirrange.shtml)>.
- [5]. GOUVEIA, Manuel - Estudo e Implementação de um Algoritmo de Localização. Univerdade do Porto: Faculdade de Engenharia, 2008. Tese de mestrado em Engenharia Electrotécnica e de Computadores.
- [6]. *Robot Sonars*. In Society of Robots [Em linha] [Consult. 20 Jun 2009]. Disponível na Internet:<URL: [http://www.societyofrobots.com/sensors\\_sonar.shtml](http://www.societyofrobots.com/sensors_sonar.shtml)>.
- [7]. MURPHY, Robin R. - **Introduction to AI Robotics**. Cambridge (Mass): MIT Press, 2000. ISBN 0-262-13383-0.
- [8]. MOREIRA, António; SOUSA, Armando; COSTA, Paulo - **Vision based real-time localization of multiple mobile robots**. Na 3rd International Conference on Field and Service Robotics.FSR01, Junho 2001.
- [9]. MOREIRA, António – «Sistemas Robóticos Autónomos». 2009. 1 diaporama (84 diapositivos). Acessível na Faculdade de Engenharia, Porto, Portugal.

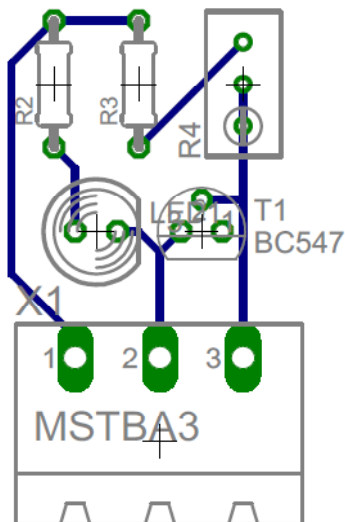
- [10]. BORENSTEIN, Johann; FENG, Liqiang - Measurement and Correction of Systematic Odometry Errors in Mobile Robots. IEEE Transactions on Robotics and Automation. [Em linha] vol.12, n. 6, p. 869-880, Dez, 1996. [Consult. 20 Jun. 2009] Disponível na Internet: <URL: [http://web.cecs.pdx.edu/~mperkows/CLASS\\_479/S2006/Paper-correction-odometry-error.pdf](http://web.cecs.pdx.edu/~mperkows/CLASS_479/S2006/Paper-correction-odometry-error.pdf)>.
- [11]. THRUN, Sebastian; BURGARD, Wolfram; FOX, Dieter - **Probabilistic Robotics**. Cambridge (Mass.): MIT Press, 2005. ISBN 0-262-20162-3.
- [12]. CHENAUVIER, F; CROWLEY, J.L. –“Position Estimation for Mobile Robot Using Vision and Odometry” *Proceedings of the IEEE International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation*. France: Nice, 1992 . Vol.3, pp. 2588 – 2593. ISBN: 0-8186-2720-4.
- [13]. SOUSA, A. [et. al.] - "Self localization of an Autonomous Robot: Using an EKF to merge Odometry and vision based landmarks." *Emerging Technologies and Factory Automation, 10th IEEE Conference on*. Catania, 2005. Vol.1, pp. 227-234. ISBN: 0-7803-9401-1.
- [14]. LAZARUS, S.B. [et.al.] - "Unstructured environmental mapping using low cost sensors," *Networking, Sensing and Control, 2008. ICNSC 2008. IEEE International Conference on*. Sanya, 2008. pp.1080-1085. ISBN: 978-1-4244-1685-1.
- [15]. SCHROETER, C.; BOEHME, H.-J.; GROSS, H.-M. -"Robust map building for an autonomous robot using low-cost sensors," *Systems, Man and Cybernetics, 2004 IEEE International Conference on*. vol.6, pp. 5398-5403 vol.6, Oct. 2004.
- [16]. HERNÁNDEZ, S. - A New Low Cost System for Autonomous Robot Heading and Position Localization in a Closed Area. Autonomous Robots [Em linha] Set. 2003 [Consult. 20 Jul. 2009] Disponível na Internet:<URL: <http://www.springerlink.com/content/h8v1m73211m88602/>>. ISSN: 1573-7527.
- [17]. WEHDEN, Daniel; SALOMON, Ralf; SCHNEIDER, Matthias – “Low-Cost Sonic-Based Indoor Localization for Mobile Robots” *In 3rd Workshop on Positioning, Navigation and Communication (WPNC'06)*, pp. 53-58. Mar, 2006.
- [18]. KRISHNAN, R - **Electric Motor Drives, Modeling, Analysis, and Control (Paperback)**. NJ: Prentice Hall, 2001. ISBN: 0130910147
- [19]. CAMPILHO, Aurélio - Instrumentação electrónica. Métodos e Técnicas de Medição. Porto: FEUP, 2000.
- [20]. *Intersection of Two Circles*. Geometry, Surfaces, Curves, Polyhedra [Em linha] [Consult. 20 Jun 2009]. Disponível na Internet:<URL: <http://local.wasp.uwa.edu.au/~pbourke/geometry/2circle/>>.

## Anexo A

### *Layouts e esquemas*

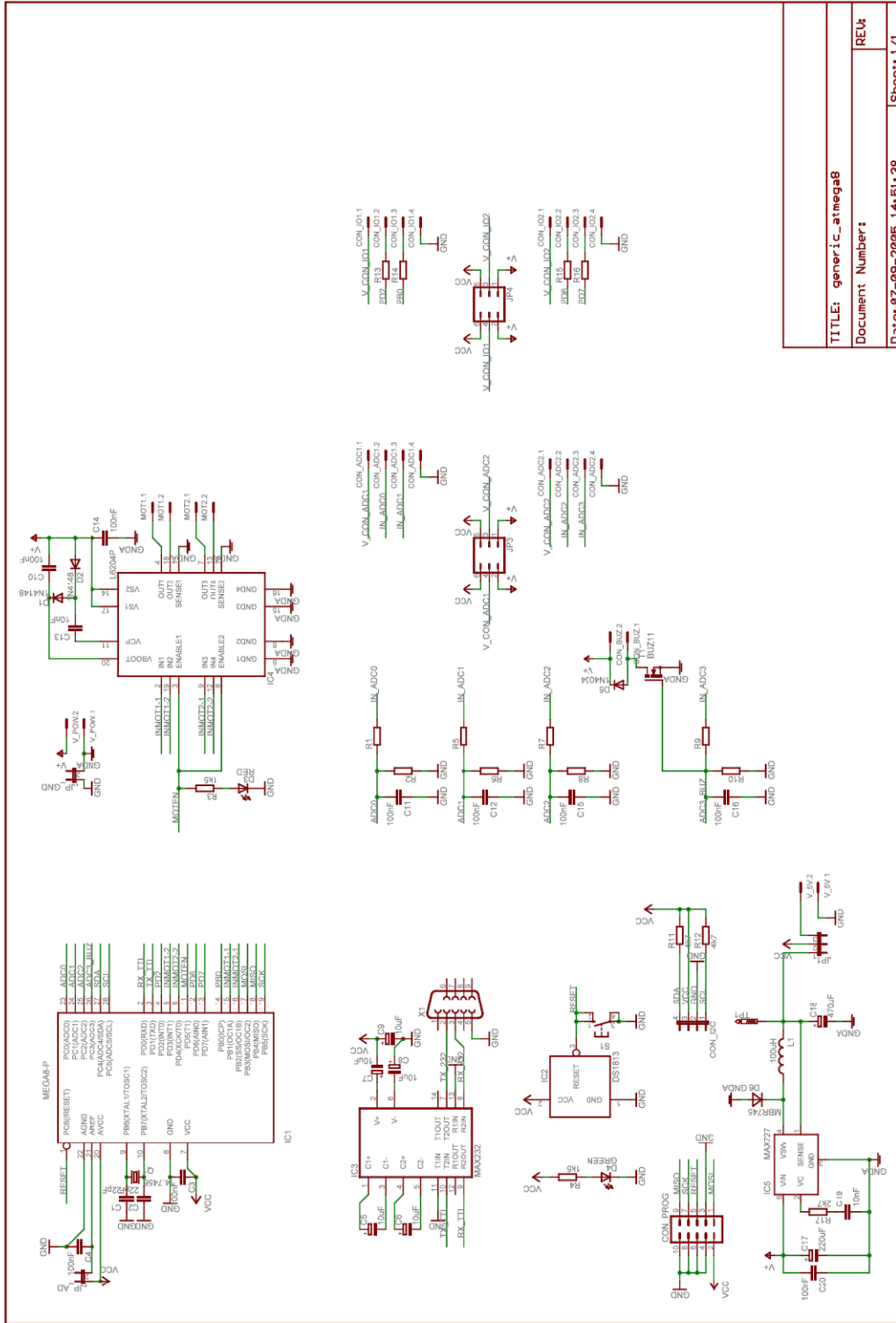
#### A.1 *Layout dos sensores de chão*

Apresenta-se nesta secção o *layout* dos sensores responsáveis pela detecção de degraus e buracos.



#### A.2 *Esquema Generic Atmega8*

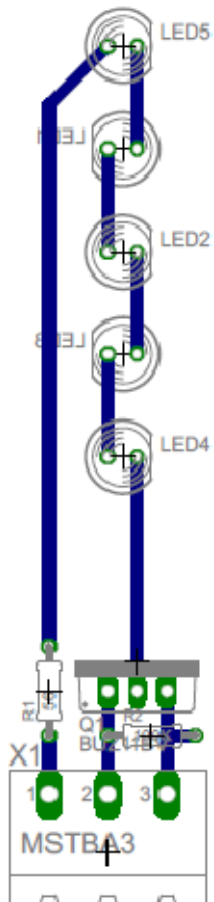
Nesta secção apresenta-se o *layout* da placa responsável pelo processamento dos sensores e controlo dos motores do robô.



|                           |            |
|---------------------------|------------|
| TITLE: generic_atmega8    |            |
| Document Number:          |            |
| Date: 07-09-2005 14:51:38 | Sheet: 1/1 |

### A.3 *Layout* baliza

Nesta secção apresenta-se o *layout* das balizas do robô. Estes dispositivos fazem parte do sistema de localização do robô.



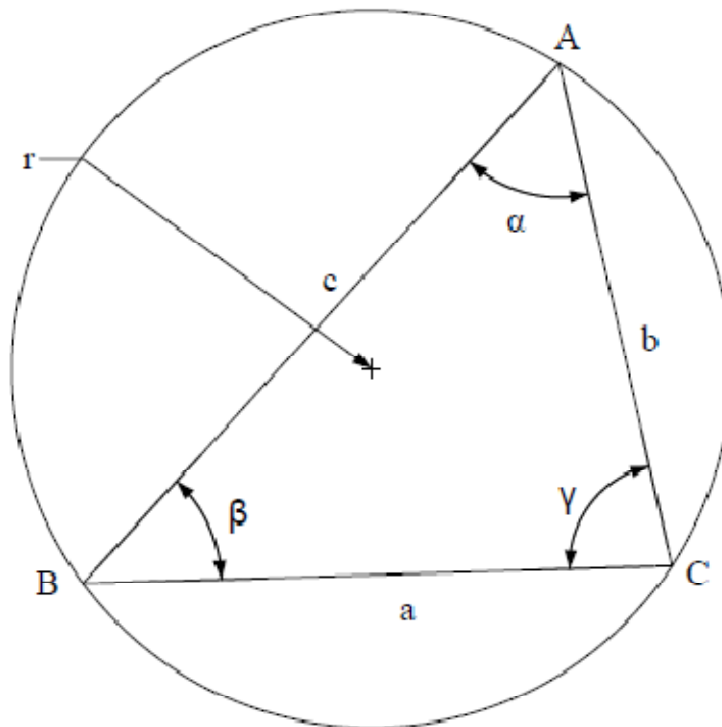
## Anexo B

# Trigonometria

### B.1 Lei dos senos

A lei dos senos é uma relação trigonométrica em que um triângulo ABC qualquer, inscrito em uma circunferência de raio  $r$ , de lados BC, AC e AB que medem respectivamente  $a$ ,  $b$  e  $c$  e com ângulos internos  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$  têm a relação:

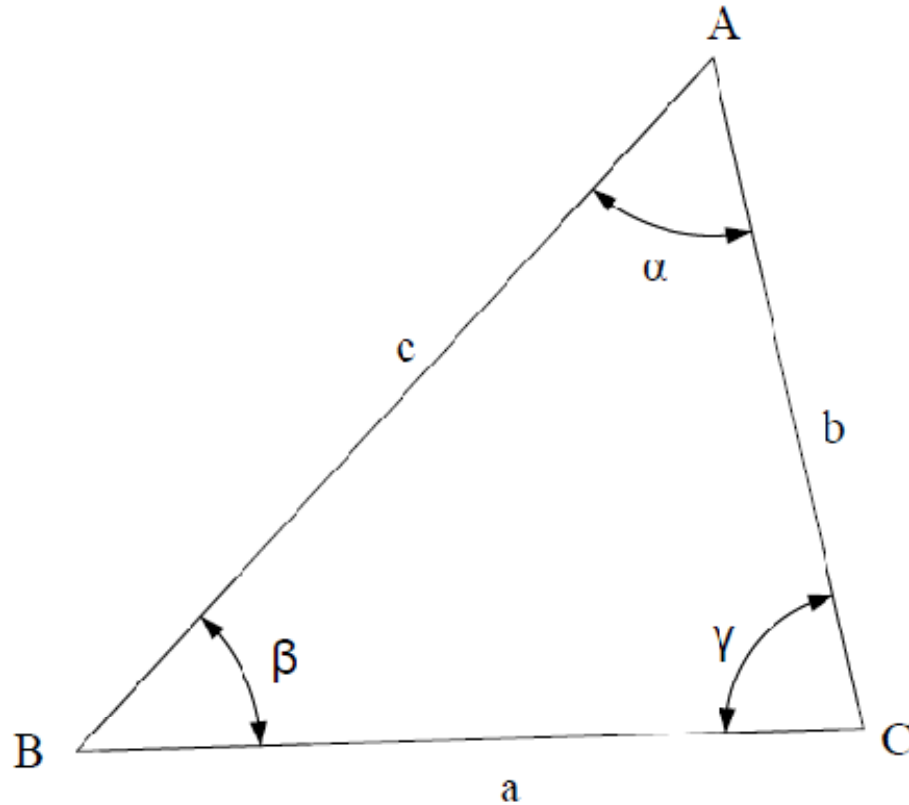
$$\frac{a}{\text{sen}(\alpha)} = \frac{b}{\text{sen}(\beta)} = \frac{c}{\text{sen}(\gamma)} = 2 * r$$



## B.2 Lei das tangentes

Lei das tangentes relaciona o comprimento dos três lados de um triângulo ABC qualquer (a, b e c) com os seus ângulos ( $\alpha$ ,  $\beta$  e  $\gamma$ ) através da seguinte expressão:

$$\frac{a - b}{a + b} = \frac{\tan \left[ \frac{1}{2} (\alpha - \beta) \right]}{\tan \left[ \frac{1}{2} (\alpha + \beta) \right]}$$



# Anexo C

## Matlab

### C.1 Resultados das derivadas parciais

Resultados obtidos a partir da ferramenta de cálculo simbólico do matlab. Dif\_alfa1 diz respeito à derivada parcial de 5.4 e 5.5 em relação a  $\alpha_{0/1,1}$ . Dif\_alfa2 diz respeito à derivada parcial de 5.4 e 5.5 em relação a  $\alpha_{0/1,2}$ . Dif\_delta\_d diz respeito à derivada parcial de 5.4 e 5.5 em relação a D.

$$Dif_{\alpha_{1,1}} = \frac{\text{delta}_d * ((\tan(\pi/2 - \alpha_{1,1} - \alpha_{2,2}/2) + 1)^2)}{\tan(\pi/2 - \alpha_{2,2}/2) * (\tan(\pi/2 - \alpha_{1,1} - \alpha_{2,2}/2) / \tan(\pi/2 - \alpha_{2,2}/2) + 1)}$$

$$\frac{\text{delta}_d * (\tan(\pi/2 - \alpha_{1,1} - \alpha_{2,2}/2) / \tan(\pi/2 - \alpha_{2,2}/2) - 1) * (\tan(\pi/2 - \alpha_{1,1} - \alpha_{2,2}/2)^2 + 1)}{(\tan(\pi/2 - \alpha_{2,2}/2) * (\tan(\pi/2 - \alpha_{1,1} - \alpha_{2,2}/2) / \tan(\pi/2 - \alpha_{2,2}/2) + 1)^2};$$

$$Dif_{\alpha_{2,2}} = \frac{\text{delta}_d * \left( \frac{\tan(\pi/2 - \alpha_{1,1} - \alpha_{2,2}/2)^2 + 1/2}{\tan(\pi/2 - \alpha_{2,2}/2)} \cdot \frac{\tan(\pi/2 - \alpha_{1,1} - \alpha_{2,2}/2) * (\tan(\pi/2 - \alpha_{2,2}/2)^2 + 1/2)}{\tan(\pi/2 - \alpha_{2,2}/2)^2} \right)}{\frac{\tan(\pi/2 - \alpha_{1,1} - \alpha_{2,2}/2)}{\tan(\pi/2 - \alpha_{2,2}/2) + 1}}$$

$$\frac{\text{delta}_d * \left( \frac{\tan(\pi/2 - \alpha_{1,1} - \alpha_{2,2}/2)}{\tan(\pi/2 - \alpha_{2,2}/2)} - 1 \right) * \left( \frac{\tan(\pi/2 - \alpha_{1,1} - \alpha_{2,2}/2)^2 + 1/2}{\tan(\pi/2 - \alpha_{2,2}/2)} \cdot \frac{\tan(\pi/2 - \alpha_{1,1} - \alpha_{2,2}/2) * (\tan(\pi/2 - \alpha_{2,2}/2)^2 + 1/2)}{\tan(\pi/2 - \alpha_{2,2}/2)^2} \right)}{\left( \frac{\tan(\pi/2 - \alpha_{1,1} - \alpha_{2,2}/2)}{\tan(\pi/2 - \alpha_{2,2}/2)} + 1 \right)^2};$$

$$Dif_{\text{delta}_d} = - \frac{\frac{\tan(\pi/2 - \alpha_{1,1} - \alpha_{2,2}/2)}{\tan(\pi/2 - \alpha_{2,2}/2)} - 1}{\frac{\tan(\pi/2 - \alpha_{1,1} - \alpha_{2,2}/2)}{\tan(\pi/2 - \alpha_{2,2}/2)} + 1};$$