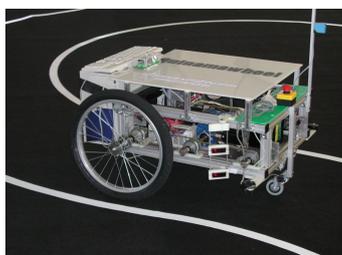
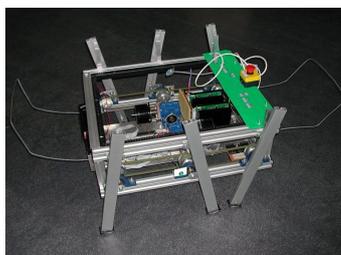


“Extensão e Optimização do Sistema Robótico MecHex“

PEDRO COSTA MAIA †
RUI FREITAS FERREIRA ‡

Relatório Final



Orientadores:

Prof. Dr. Vítor Santos
Prof. Dr. Filipe Silva



*Projecto de Automação
Licenciatura em Engenharia Mecânica
Departamento de Engenharia Mecânica 2001/2002
Universidade de Aveiro*

† pedrocostamaia@clix.pt
‡ rmff@clix.pt

Agradecimentos

Prof.Dr. Vítor Santos
Prof.Dr. Filipe Silva
Eng. António Festas
José Gonçalo
Alberto Leal
Marco Godinho
A todos os colegas do curso

Infinitamente mais atendida e mais amargamente sentida foi, porém, uma apologia incumensoravelmente enérgica e valorosa, como um acontecimento de um momento grave, extraordinária afirmação de personalidade, como excelente perlúdio, da finalização do princípio...

Índice Geral

1. Introdução	6
2. Pontos possíveis de intervenção	6
3. Extensão de objectivos	6
4. Exploração dos recursos PLC/PGU's	7
5. Participação na Exposição “Ciência e Tecnologia” na Exponor	9
6. Estudo de uma geometria alternativa de locomoção	9
6.1. Introdução	9
6.2. Objectivos	10
6.3. Concepção do Mecanismo	10
6.3.1. <i>Mecanismo e geometria</i>	10
6.3.2. <i>Estudo cinemático</i>	12
6.3.3. <i>Estudo dinâmico</i>	13
6.4 Projecto do Mecanismo	14
6.4.1 <i>Seleção das dimensões e geometria</i>	14
6.4.2. <i>Cálculo do binário e potência</i>	16
6.4.3 <i>Dimensionamento estrutural</i>	18
6.5 Comentários	19
6.6. Variantes e perspectivas	20
7. Participação no Festival Nacional de Robótica “Robótica2002”	21
7.1. Introdução	21
7.2. Objectivos/Regras da competição	21
7.3. Descrição/Características do Robô Hexápode	22
7.4. Descrição/Características do Robô <i>QuinamaWheel</i>	22
7.5. Concepção e fabrico de componentes mecânicos e acessórios de suporte	23
7.5.1. <i>Bases de apoio de veios</i>	23
7.5.2. <i>Suportes de sensores de contacto</i>	24
7.5.3. <i>Suporte de sensores infravermelho detectores de semáforo</i>	26
7.5.4. <i>Suporte da webcam USB</i>	27
7.5.5. <i>Componente de ligação da jante ao veio</i>	28
7.5.6. <i>Uniões de veios com adaptação a alinhamentos incorrectos de veios</i>	29
7.6. Ligações eléctricas	30
7.7. Descrição do hardware de controlo	33
7.8. Descrição geral do <i>software</i> de controlo	35
7.8.1 <i>Descrição pormenorizada do software de controlo</i>	36
7.8.1.1. Primeira Manga	36
7.8.1.2. Segunda Manga	38
7.8.1.3. Terceira Manga	41
7.9. Alternativas de Interpretação da imagem	44
7.10. Modelo geométrico relacionando a imagem com a ω do CM do robô	44
7.11. Implementação por software do uso de um motor passo-a-passo como motor DC ..	47
7.12. Comentários finais	48
8. Participação no Fórum Ciência Viva	49

8.1. Objectivos da participação	49
8.2. Participação	49
8.3. Comentários	50
9. Sensorização do sistema robótico MecHex	50
9.1 Sistema de visão e sinais de interpretação	51
9.1.1. Algoritmo usado para determinação da orientação	51
9.1.2. Algoritmo para diferenciação do painel de controlo face ao ambiente	53
9.1.3. Algoritmo geral de funcionamento - MatLab	55
9.2. Programa PLC com sincronização automática	57
9.3 Comunicação PC-PLC	60
10. Conclusões	60
11. Bibliografia	62

Índice Figuras

Figura 1 - módulo PLC/PGU's	7
Figura 2 - rampa de velocidade gerada pelas PGU's	8
Figura 3 - imagens participação na Feira Ciência, Tecnologia e Inovação	9
Figura 4 - imagem geral do Hexápode.....	9
Figura 5 - representação da geometria.....	10
Figura 6 - as duas configurações de oscilação	12
Figura 7 - ilustração do referencial para a perna no ar e no solo	13
Figura 8 - resumo de algumas geometrias simuladas	15
Figura 9 - configuração seleccionada	15
Figura 10 - ilustração do movimento das três pernas	16
Figura 11 - gráfico do binário num andamento suave	17
Figura 12 - gráfico da potência num andamento suave	17
Figura 13 - representação das solicitações aplicadas numa perna	18
Figura 14 - campo de tensões e deslocamentos numa perna	19
Figura 15 -ilustração da variante proposta	20
Figura 16 - pormenor da partida/chegada, semáforos e túnel.....	21
Figura 17 - ilustração das dimensões da pista.....	21
Figura 18 - suporte dos sensores(aspecto final).....	25
Figura 19 - esquema do semáforo	26
Figura 20 - suporte sensores infravermelho(semáforos).....	26
Figura 21 - suporte de <i>WebCam</i> e foco auxiliar	27
Figura 22 - <i>webCam</i> e foco.....	27
Figura 23 - aspecto final ligação jante veio-motor	28
Figura 24 - alteração da união de veios - cardan	29
Figura 25 - ilustração das ligações no <i>socket</i> selector do modo funcionamento.....	30
Figura 26 - componentes encorporados nas <i>drives</i> de potência	30
Figura 27 - esquema das ligações da placa de aquisição LabPC+	31
Figura 28 - esquema das ligações das saídas da LabPC+	31
Figura 29 - esquema das ligações das entradas da LabPC+	32
Figura 30 - descrição do hardware de controlo.....	34
Figura 31 - diagrama de blocos	35
Figura 32 - arquitectura de controlo	36
Figura 33 - pormenor da escolha da linha na zona da passadeira	37
Figura 34 - fluxograma do controlo da primeira manga	38
Figura 35 - pormenor da perca de linha forçada	39
Figura 36 - situação de ambiguidade na escolha da direcção	39
Figura 37 - fluxograma de controlo da 2ª manga	40
Figura 38 - imagem da transição da linha na entrada do túnel.....	41
Figura 39 - imagem capturada dentro do túnel	42
Figura 40 - fluxograma de controlo da 3ª manga.....	43
Figura 41 - situações variadas do posicionamento do robô	44
Figura 42 - ilustração dos pontos de interesse do robô no calculo da sua orientação.....	45
Figura 43 - pormenor do motor e <i>drives</i> de potência.....	47

Figura 44 – diagrama de blocos da implementação passo-a-passo motor dc	48
Figura 45 - imagens obtidas no Fórum Ciencia Viva	49
Figura 46 - diagrama de funcionamento da sensorização	50
Figura 47 - indicações gráficas possíveis.....	51
Figura 48 – ilustração cálculo da orientação.....	51
Figura 49 - sequência de determinação da orientação da seta	52
Figura 50 - sequência de determinação da orientação	53
Figura 51 - sequência de interpretação da imagem.....	54
Figura 52 - diagrama de interpretação da imagem.....	55
Figura 53 - diagrama de controlo <i>MatLab</i>	56
Figura 54 – diagrama de funcionamento geral do PLC/PGU's	58
Figura 55 - diagrama do algoritmo do PLC	59
Figura 56 - comunicação PC – <i>MelDDE</i> - PLC.....	60

1. Introdução

Os objectivos principais do trabalho proposto consiste na introdução de modificações e adaptações no sistema hexápode de locomoção desenvolvido em trabalhos anteriores, no sentido de o tornar mais versátil e autónomo. As alterações poderão ser quer estruturais, quer na unidade de controlo e sistemas de percepção. Pretende-se dotar o sistema das seguintes propriedades adicionais:

- Capacidade de movimentação em terrenos mais irregulares que o simples plano horizontal.
- Percepção mais completa do ambiente para detecção de propriedades ou características específicas.
- Controlo de movimento mais complexo (velocidades variáveis, controlo de sincronismo nos elementos de locomoção).

2. Pontos possíveis de intervenção

Os principais pontos de intervenção previstos foram os seguintes:

- Estudo da viabilidade de sistemas alternativos de movimentação das pernas.
- Substituição/Interligação da unidade de controlo (PLC-PGU's) por um sistema mais versátil baseado na placa-mãe de um PC e adequadas unidades de I/O.
- Introdução de sensorização para detectar e localizar uma linha branca num fundo preto ou outras características simples (visão com WebCam, sensores infravermelhos,...)
- Sistema de controlo mais robusto que permita uma sincronização automática de eventuais disparidades entre o desempenho dos dois motores, bem como a introdução de velocidades variáveis no sistema de locomoção, incluindo planeamento de trajectória para minimizar o efeito dos impactos das pernas no chão.
- Ajuste dos parâmetros de locomoção para permitir um melhor controlo da mudança de direcção através da rotação sobre si próprio e da definição mais adequada do passo de locomoção.

3. Extensão de objectivos

A organização do Festival Nacional de Robótica teve lugar, este ano, na Universidade de Aveiro, dada a semelhança do âmbito do nosso projecto no contexto do Festival, decidimos participar na prova de robótica, na classe UIP [http#6] e no Encontro Científico. Esta extensão ocorreu ainda devido a convites para demonstrações e outros motivos subjacentes á nossa iniciativa.

- Programação dos recursos PLC/PGU's, tendo em vista melhorar o software existente.
- Participação na Exposição "Ciência, Tecnologia e Tecnologia" na Exponor a convite da organização.

- Concepção e Análise de um Sistema Articulado alternativo, para Locomoção Hexápode a dois Graus de Liberdade e sua comparação com o sistema actual .
 - O estudo efectuado proposto como artigo no encontro científico, no âmbito do Festival Nacional de Robótica, tendo sido aceite para publicação e apresentação.
- Participação no Festival Nacional de Robótica “Robótica2002”.
 - Sistema alternativo de locomoção por rodas, projecto e construção de órgãos mecânicos de transmissão e de acoplamento aos motores, bem como de suportes dos novos sensores.
 - Utilização de Visão Artificial (*WebCam*) e sensores infravermelho para controlo autónomo da locomoção do robô
 - Elaboração de software de controlo para participação nas provas do “*Robótica2002*”.
 - Controlo em Velocidade dos motores Passo-a-Passo.
- Participação no Fórum “Ciência Viva” a convite da organização.
 - Demonstração do sistema robótico com as duas variantes de locomoção.
- Sensorização e optimização do controlo do robô hexápode.
 - Elaboração de um novo código PLC permitindo paragem de emergência e sincronização automática das pernas.
 - Utilização de um sistema de visão com uma *webcam* e um PC para interpretação de ordens gráficas .
 - Desenvolvimento de um algoritmo de interpretação da imagem, cor forma e orientação.
 - Comunicação entre o PC e o PLC em tempo real.

4. Exploração dos recursos PLC/PGU’s

Após a análise do trabalho efectuado em anos anteriores, decidiu-se não optimizar ou melhorar o software existente, mas sim iniciar um novo programa, [http#4]. O motivo desta decisão foi devido ao facto do programa anterior estar demasiado complexo e sem qualquer comentário, o que dificultaria o seu melhoramento. O programa desenvolvido este ano assemelha-se ao do ano anterior. Porém tem algumas inovações que permitiu a obtenção de algumas vantagens. Como, por exemplo, a ausência de imobilização dos motores passo-a-passo aquando da inexistência de ordens de comando, o que contribui significativamente para a maior autonomia das baterias e um menor sobreaquecimento dos motores e respectivas unidades de potência.



Figura 1 - módulo PLC/PGU's

Também apresenta vantagens no que diz respeito à mudança de direcção dado que os movimentos de sincronização/dessincronização foram corrigidos de modo a obter-se uma maior amplitude de viragem, permitindo ao robô desviar-se cerca de 90° após a detecção de um objecto com a direcção de desvio escolhida de um modo aleatório.

Outra diferença consistiu em separar os sensores de obstáculos de modo a actuarem separadamente consoante o sentido do movimento.

Para a sincronização das pernas foram utilizadas funções de comunicação PLC-PGU indicando a posição angular dos motores, embora esta posição fosse não confirmada após o comando, visto a ausência de *Encoders*. Foi também revista a parametrização das cartas de pulsos tendo em vista a sua optimização em termos de velocidade e acelerações.

Nomeadamente, utilizou-se o parâmetro correspondente ao tempo de aceleração-desaceleração por forma a ser minimizado o efeito do impacto das pernas no solo através de velocidades variáveis, sendo efectuada a inicialização e a finalização do passo com velocidade zero, Figura 2.

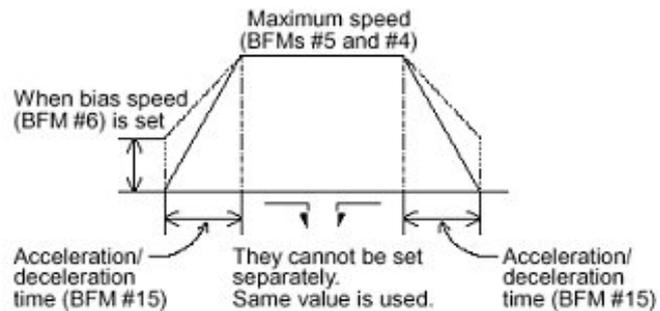


Figura 2 - rampa de velocidade gerada pelas PGU's

5. Participação na Exposição “Ciência e Tecnologia” na Exponor

A convite da Exponor, o robô Hexápode esteve em demonstração na Feira Ciência, Tecnologia e Inovação, na Exponor em Matosinhos, durante os dias 7 a 10 Novembro 2001. Houve uma grande receptividade do conceito hexápode por parte dos visitantes. Nesta altura, o controlo do PLC era efectuado por uma das primeiras versões do código de controlo, por nós elaboradas, no entanto, para além de se movimentar em várias direcções, já estava dotado da capacidade de detectar obstáculos e desviar-se deles.



Figura 3 - imagens participação na Feira Ciência, Tecnologia e Inovação

6. Estudo de uma geometria alternativa de locomoção

6.1. Introdução

O crescente interesse pelos sistemas de locomoção com pernas tem justificação pela sua superior mobilidade em terrenos irregulares, permitindo a transposição de obstáculos, o que representa a diferença principal face ao sistema de locomoção convencional. Uma configuração hexápode é uma solução de locomoção com pernas, pois permite a completa estabilidade durante o movimento. Uma locomoção com pernas e apenas dois graus de liberdade, aliado a mecanismos de locomoção articulados afigura-se como uma opção de custo e complexidade de controlo reduzidos, face às possibilidades de locomoção proporcionadas.



Figura 4 - imagem geral do Hexápode

6.2. Objectivos

Comparativamente ao sistema actual, este estudo visa, definir uma geometria do passo de forma a resultar numa trajectória da extremidade da perna. Que aumente a altura de transposição de obstáculos, que diminua o comprimento do passo de forma a melhorar a manobrabilidade, a diminuição do peso e melhorar a eficiência mecânica, essencialmente através da redução de atritos. Por fim deve-se avaliar esta solução quanto aos valores máximos de binário através da análise da amplitude da oscilação vertical, que deverá ser mínima para diminuir o consumo energético durante a locomoção, em virtude da variação da energia potencial.

6.3. Concepção do Mecanismo

6.3.1. Mecanismo e geometria

O mecanismo em estudo propõe variar a geometria do elemento de locomoção (perna).

A nova geometria, proposta como alternativa à existente, consiste numa ligação articulada de quatro elos [5], [6] e [7] como se pode ver na , Figura 5. Uma geometria desta natureza, através da variação do comprimento dos diversos elos e do lugar dos pontos de fixação, permite uma grande diversidade de configurações de movimentação e, conseqüentemente, de tipos de passos gerados. Caracteriza-se também pela não existência de juntas lineares.

Nesta geometria o elemento rotativo é o elo r_2 , onde é aplicado o binário, e o elemento r_4 oscila angularmente com uma amplitude específica, o ponto de contacto com o solo é T, e os pontos O e P estão fixos na estrutura do robô.

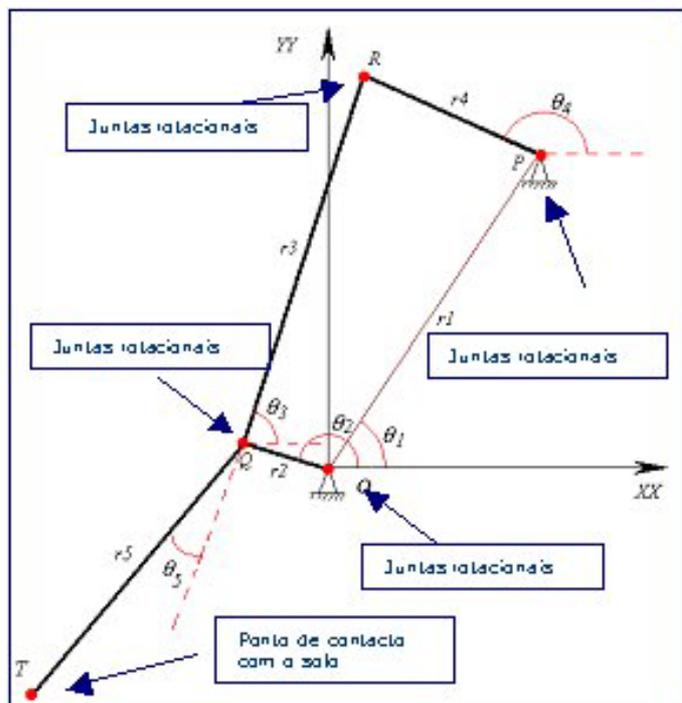


Figura 5 - representação da geometria

Os ângulos θ_1 e θ_5 são constantes para definir a geometria da perna e posicionamento do fulcro dos elos respectivamente.

Para o polígono de vectores circular da Figura 5 pode-se chegar facilmente à seguinte equação, considerando o vector definido pelos pontos P e Q vem:

$$\overrightarrow{QP} = \vec{r}_2 + \vec{r}_3 = \vec{r}_1 + \vec{r}_4 \quad (6.1)$$

Rescrevendo-se a equação vectorial em termos dos seus componentes obtém-se o sistema:

$$\begin{cases} r_2 \cdot \cos \theta_2 + r_3 \cdot \cos \theta_3 = r_1 \cdot \cos \theta_1 + r_4 \cdot \cos \theta_4 \\ r_2 \cdot \sin \theta_2 + r_3 \cdot \sin \theta_3 = r_1 \cdot \sin \theta_1 + r_4 \cdot \sin \theta_4 \end{cases} \quad (6.2)$$

Passando o termo em r_2 para a direita, elevando-se ambos os membros de cada equação ao quadrado e somando as equações resultantes vem sucessivamente:

$$\begin{cases} (r_3 \cdot \cos \theta_3)^2 = (r_1 \cdot \cos \theta_1 + r_4 \cdot \cos \theta_4 - r_2 \cdot \cos \theta_2)^2 \\ (r_3 \cdot \sin \theta_3)^2 = (r_1 \cdot \sin \theta_1 + r_4 \cdot \sin \theta_4 - r_2 \cdot \sin \theta_2)^2 \end{cases} \quad (6.3)$$

$$\begin{aligned} r_3^2 &= r_1^2 + r_2^2 + r_4^2 + 2 \cdot r_1 \cdot r_4 \cdot (\cos \theta_1 \cdot \cos \theta_4 + \sin \theta_1 \cdot \sin \theta_4) - \\ &\quad - 2 \cdot r_1 \cdot r_2 \cdot (\cos \theta_1 \cdot \cos \theta_2 + \sin \theta_1 \cdot \sin \theta_2) - 2 \cdot r_2 \cdot r_4 \cdot (\cos \theta_2 \cdot \cos \theta_4 + \sin \theta_2 \cdot \sin \theta_4) \Leftrightarrow \\ &\Leftrightarrow \underbrace{(2 \cdot r_1 \cdot r_4 \cdot \cos \theta_1 - 2 \cdot r_2 \cdot r_4 \cdot \cos \theta_2)}_A \cdot \cos \theta_4 + \underbrace{(2 \cdot r_1 \cdot r_4 \cdot \sin \theta_1 - 2 \cdot r_2 \cdot r_4 \cdot \sin \theta_2)}_B \cdot \sin \theta_4 + \\ &\quad + \underbrace{r_1^2 + r_2^2 + r_4^2 - r_3^2 - 2 \cdot r_1 \cdot r_2 \cdot (\cos \theta_1 \cdot \cos \theta_2 + \sin \theta_1 \cdot \sin \theta_2)}_C = 0 \end{aligned} \quad (6.4)$$

A equação (6.4) resultante é da forma :

$$A \cdot \cos \theta_4 + B \cdot \sin \theta_4 + c = 0 \quad (6.5)$$

A resolução da equação (6.5) permite obter-se θ_4 em função de θ_2 . Para a resolução da equação utilizam-se as equações trigonométrica seguintes para meios ângulos :

$$\begin{aligned} \sin \theta_4 &= \frac{2 \tan(\theta_4/2)}{1 + \tan^2(\theta_4/2)} \quad , \quad \cos \theta_4 = \frac{1 - \tan^2(\theta_4/2)}{1 + \tan^2(\theta_4/2)} \\ \text{fazendo : } t &= \tan\left(\frac{\theta_4}{2}\right) \end{aligned} \quad (6.6)$$

Depois de substituir as equações (6.6) em (6.5) e simplificando obtém-se :

$$(C - A) \cdot t^2 + 2 \cdot B \cdot t + (A + C) = 0 \quad (6.7)$$

E finalmente utilizando a formula resolvente para equações de 2º grau obtém-se:

$$\theta_4 = 2 \cdot \tan^{-1} \left(\frac{-B \pm \sqrt{B^2 + A^2 - C^2}}{C - A} \right) \quad (6.8)$$

Como se pode constatar existem duas soluções possíveis para um determinado valor de θ_2 Figura 6, estas duas soluções correspondem aos dois modos de oscilação possíveis dependendo da configuração resultante após a montagem dos elos, esta ambiguidade é resolvida após a escolha da configuração inicial dos elos cuja solução pode ser obtida

através do sinal da raiz quadrada na equação (6.8), uma vez escolhida o sinal mantém-se para qualquer valor de θ_2 .

Após a obtenção da solução para θ_4 o valor de θ_3 pode ser obtido facilmente, para tal, basta dividir a 1ª pela 2ª equação do sistema (6.2) passando previamente os termos em r_3 para a esquerda em cada equação. O resultado será o seguinte:

$$\theta_3 = \tan^{-1} \left[\frac{r_1 \cdot \sin \theta_1 + r \cdot \sin \theta_4 - r_2 \cdot \sin \theta_2}{r_1 \cdot \cos \theta_1 + r \cdot \cos \theta_4 - r_2 \cdot \cos \theta_2} \right] \quad (6.9)$$

De notar que nas equações anteriores (6.9) e (6.8) é essencial manter o sinal do numerador e do denominador, para que se possa identificar o quadrante no qual está a solução de θ_3 e θ_4 , no presente trabalho utilizou-se o *software* MatLab, o qual permite directamente obter-se a solução utilizando a função ATAN2(N,D).

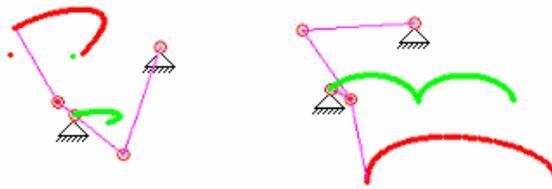


Figura 6 - as duas configurações de oscilação

6.3.2. Estudo cinemático

Para estudar a composição de movimentos e a interacção das pernas com o solo, obtiveram-se as expressões de todos os pontos que definem a geometria em relação ao ponto de contacto com o solo (expressões de (6.10) a (6.14)). Posteriormente representou-se a trajectória real, através de simulação, por forma a validar a geometria escolhida (comprimento dos elos, pontos de fixação).

Após a obtenção das equações de θ_3 e de θ_4 em função de θ_2 , podemos representar no plano os vários pontos da ligação, como se indica de seguida:

$$R \rightarrow \begin{cases} x_R = r_1 \cos \theta_1 + r_4 \cos \theta_4 - r_2 \cos(\theta_2 + \pi) + r_5 \cos(\theta_3 + \theta_5 + \pi) \\ y_R = r_1 \sin \theta_1 + r_4 \sin \theta_4 - r_2 \sin(\theta_2 + \pi) + r_5 \sin(\theta_3 + \theta_5) \end{cases} \quad (6.10)$$

$$T \rightarrow \begin{cases} x_T = r_2 \cos \theta_2 - r_5 \cos \theta_3 - r_2 \cos(\theta_2 + \pi) + r_5 \cos(\theta_3 + \theta_5 + \pi) \\ y_T = r_2 \sin \theta_2 - r_5 \sin \theta_3 - r_2 \sin(\theta_2 + \pi) + r_5 \sin(\theta_3 + \theta_5) \end{cases} \quad (6.11)$$

$$P \rightarrow \begin{cases} x_P = r_1 \cos \theta_1 - r_2 \cos(\theta_2 + \pi) + r_5 \cos(\theta_3 + \theta_5 + \pi) \\ y_P = r_1 \sin \theta_1 - r_2 \sin(\theta_2 + \pi) + r_5 \sin(\theta_3 + \theta_5) \end{cases} \quad (6.12)$$

$$Q \rightarrow \begin{cases} x_Q = r_2 \cos \theta_2 - r_2 \cos(\theta_2 + \pi) + r_5 \cos(\theta_3 + \theta_5 + \pi) \\ y_Q = r_2 \sin \theta_2 - r_2 \sin(\theta_2 + \pi) + r_5 \sin(\theta_3 + \theta_5) \end{cases} \quad (6.13)$$

$$O \rightarrow \begin{cases} x_O = -r_2 \cos(\theta_2 + \pi) + r_5 \cos(\theta_3 + \theta_5 + \pi) \\ y_O = -r_2 \sin(\theta_2 + \pi) + r_5 \sin(\theta_3 + \theta_5) \end{cases} \quad (6.14)$$

Os pontos obtidos estão definidos relativamente ao referencial O que se localiza na estrutura do *robô*. Assim, o resultado da visualização gráfica do ponto T é uma trajectória para a situação da perna do *robô* se encontrar em movimento livre. A trajectória real resulta da interacção da estrutura com o solo e obtém-se através da adição de movimentos tendo em conta duas situações diferentes: a etapa de recuperação aérea e a fase de tracção no solo. Na primeira é necessário adicionar aos pontos o movimento do CM, na segunda o ponto de contacto com o solo, T, fica imobilizado sendo transferido o seu movimento para o CM do *robô* que, por consequência, influencia os restantes pontos, dado que estes estão definidos relativamente a O e, portanto, ao CM, como se pode visualizar na Figura 7.

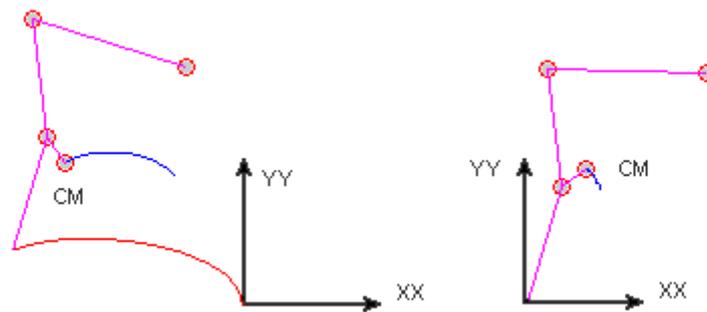


Figura 7 - ilustração do referencial para a perna no ar e no solo

Assim, as expressões dos pontos são diferentes para o caso da perna no ar ($0 > \theta_2 > \pi$) e no solo ($\pi > \theta_2 > 2\pi$), sendo as expressões seguintes correspondentes à situação da perna no solo; para a situação perna no ar basta retirar a fase π :

$$Q \rightarrow \begin{cases} x_Q = r_2 \cos \theta_2 - r_2 \cos(\theta_2 + \pi) + r_5 \cos(\theta_3 + \theta_5 + \pi) \\ y_Q = r_2 \sin \theta_2 - r_2 \sin(\theta_2 + \pi) + r_5 \sin(\theta_3 + \theta_5) \end{cases} \quad (6.15)$$

6.3.3. Estudo dinâmico

Para dimensionar os actuadores (binários), foi necessário efectuar uma análise dinâmica do movimento. Para tal, admitiram-se algumas simplificações: o movimento da estrutura é um movimento paralelo ao solo, e toda a massa do sistema está localizada num ponto. Assim, é possível efectuar a análise apenas para uma perna e depois estender os resultados ao sistema; recorreu-se à função *Lagrangeano*, (6.16), [http#2] e [http#3], e à equação de *Euler-Lagrange* (6.20), [http#1]. Todos os cálculos e diferenciações da expressão (6.19) foram efectuados utilizando a *ToolBox Symbolic* do *MatLab* sendo a expressão final analítica do binário composta por cerca de 20.000 caracteres em formato *MatLab*.

$$L(q_i, \dot{q}_i) = K_e(\dot{q}_i) - P(q_i) \quad (6.16)$$

Em $K_e = K_e(\dot{q}_i)$ é a energia cinética do sistema e $P = P(q_i)$ é a energia potencial do sistema, com q_i e \dot{q}_i o deslocamento angular e a velocidade angular respectivamente. Desta forma virá:

$$K_e = \frac{1}{2}mv^2 \quad (7) \quad P = mgh \quad h = y_0$$

e onde

desenvolvendo as expressões anteriores virá:

$$K_e = \frac{1}{2}mv^2 = \frac{1}{2}m[v_x^2 + v_y^2 + v_z^2] =$$

$$= \frac{1}{2}m\left[\left(\frac{dx}{dt}\right)^2 + \left(\frac{dy}{dt}\right)^2 + \left(\frac{dz}{dt}\right)^2\right] \quad (6.17)$$

$$P = mgy_0 \quad (6.18)$$

De (6.15), retiram-se as expressões de x_0 e de y_0 para o CM do sistema relativamente ao ponto de contacto no solo. Uma vez que não existe movimento em z , ter-se-á $v_z = 0$.

$$v_x = \frac{dx}{dt} = \frac{\partial x}{\partial \theta_2} \cdot \frac{\partial \theta_2}{\partial t}; \quad v_y = \frac{dy}{dt} = \frac{\partial y}{\partial \theta_2} \frac{\partial \theta_2}{\partial t}; \quad \frac{\partial \theta_2}{\partial t} = \dot{\theta}_2$$

A equação de *Euler-Lagrange* [http#3] permite obter directamente o binário do motor utilizando o *Lagrangeano*:

$$\tau_i = \frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L(q_i, \dot{q}_i)}{\partial \dot{q}_i} \right) - \frac{\partial L(q_i, \dot{q}_i)}{\partial q_i} \quad (6.19)$$

onde τ_i é o binário. A partir das expressões anteriores obtemos finalmente,

$$\tau = \frac{d}{dt} \left(\frac{\partial K_e}{\partial \dot{\theta}_2} \right) - \frac{\partial K_e}{\partial \theta_2} + \frac{\partial P}{\partial \theta_2} \quad (6.20)$$

6.4 Projecto do Mecanismo

6.4.1 Selecção das dimensões e geometria

Admitiram-se intuitivamente algumas geometrias e através da análise sucessiva de modificações na geometria tentou-se obter geometrias da perna que proporcionassem um equilíbrio entre o valor do comprimento do passo, o valor da altura do passo e a amplitude de variação do CM. As simulações realizadas demonstraram a incompatibilidade na obtenção simultânea de valores óptimos de passo e altura de transposição. A solução escolhida proporciona um equilíbrio entre as variáveis em causa, sendo esta ilustrada na

Figura 8 (direita), onde é possível visualizar a trajectória do CM (verde) e da extremidade da perna (vermelho) para uma rotação completa de θ_2 .

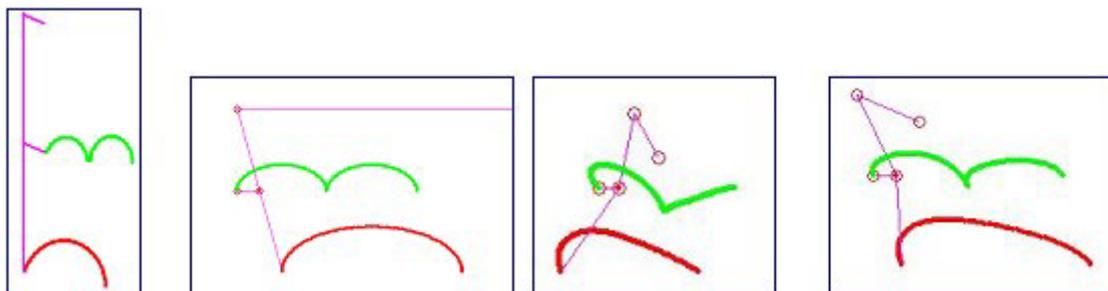


Figura 8 - resumo de algumas geometrias simuladas

Movimento vertical puro	Representação da configuração anterior	Exemplo de uma geometria testada	Exemplo de uma geometria testada
Boa manobrabilidade	Situação actual	Elevada capacidade de transposição de obstáculos	Boa capacidade de transposição de obstáculos
Consumo energético elevado	Situação actual	Carácter oscilatório demasiado elevado	Carácter oscilatório acentuada

Tabela 1 – resumo das características de cada geometria

A existência de um valor de θ_5 diferente de zero, corrige a horizontalidade da trajectória da perna para o resultado desejado. Por fim, a solução adoptada foi a correspondente à Figura 9, onde é possível visualizar a trajectória do CM e da extremidade da perna para uma rotação completa de θ_2 .

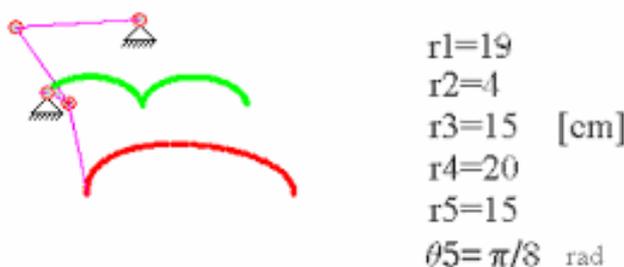


Figura 9 - configuração seleccionada

Com a configuração escolhida, o passo é cerca de 33.5 cm, a variação do CM é de 4.8 cm, e a altura máxima da perna ao solo é 8.0 cm. Estes valores são muito similares aos do sistema já existente (que não tem articulação), mas a nova solução permite um mecanismo com menos atrito e uma trajectória da extremidade da perna mais favorável à transposição de obstáculos, Figura 10.

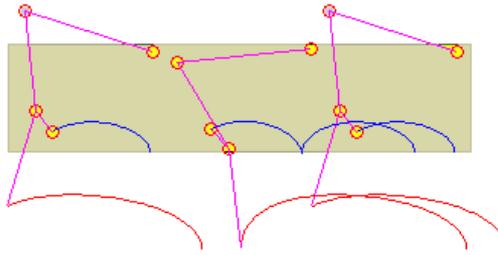


Figura 10 - ilustração do movimento das três pernas

6.4.2. Cálculo do binário e potência

Para o cálculo do binário necessário à movimentação admitiu-se um deslocamento angular em função do tempo $\theta_2(t)$, expressão (6.21) e (6.22) (veio do motor) na forma de um polinómio de terceiro grau, para satisfazer as exigências das velocidades de impacto e saída ao solo serem nulas.

$$\theta_2(t) = a + bt + ct^2 + dt^3$$

$$\omega(t) = \dot{\theta}_2(t) = b + 2ct + 3dt^2$$

Tendo como condições limites:

$$\theta_2(t=0) = 0; \quad \theta_2(t=t_f) = \pi$$

$$\dot{\theta}_2(t=0) = 0; \quad \dot{\theta}_2(t=t_f) = 0$$

resolvendo as equações anteriores obtemos

$$\theta_2(t) = 3 \frac{\pi}{t_f^2} t^2 - 2 \frac{\pi}{t_f^3} t^3$$

$$\dot{\theta}_2(t) = 6 \frac{\pi}{t_f^2} t - 6 \frac{\pi}{t_f^3} t^2$$

Substituindo as expressões anteriores na expressão resultante do binário, considerando $g=9,81\text{ms}^{-2}$ e a massa do hexápode de 50 kg (sendo massa suportada por uma perna $m=25$ kg) e com os parâmetros da configuração descrita anteriormente, obtiveram-se os gráficos de binário (Figura 11) e de potência (Figura 12) com o tempo de ciclo $t_f=1\text{s}$; a assimetria nos gráficos está ligada essencialmente ao ângulo θ_5 . Observe-se que a potência é obtida por:

$$\theta_2(t) = 3 \frac{\pi}{t_f^2} t^2 - 2 \frac{\pi}{t_f^3} t^3 \quad (6.21)$$

$$\dot{\theta}_2(t) = 6 \frac{\pi}{t_f^2} t - 6 \frac{\pi}{t_f^3} t^2 \quad (6.22)$$

Usando as expressões resultantes do estudo dinâmico calculadas em *MatLab*, obtidas anteriormente, obteve-se um binário máximo de 9.5 Nm, ver Figura 11, e uma potência

máxima de 34 W, ver Figura 14, considerando a massa do robô de 50kg e um tempo de passo de 1s.

$$\tau = \frac{d}{dt} \left(\frac{\partial K_e}{\partial \dot{\theta}_2} \right) - \frac{\partial K_e}{\partial \theta_2} + \frac{\partial P}{\partial \theta_2}$$

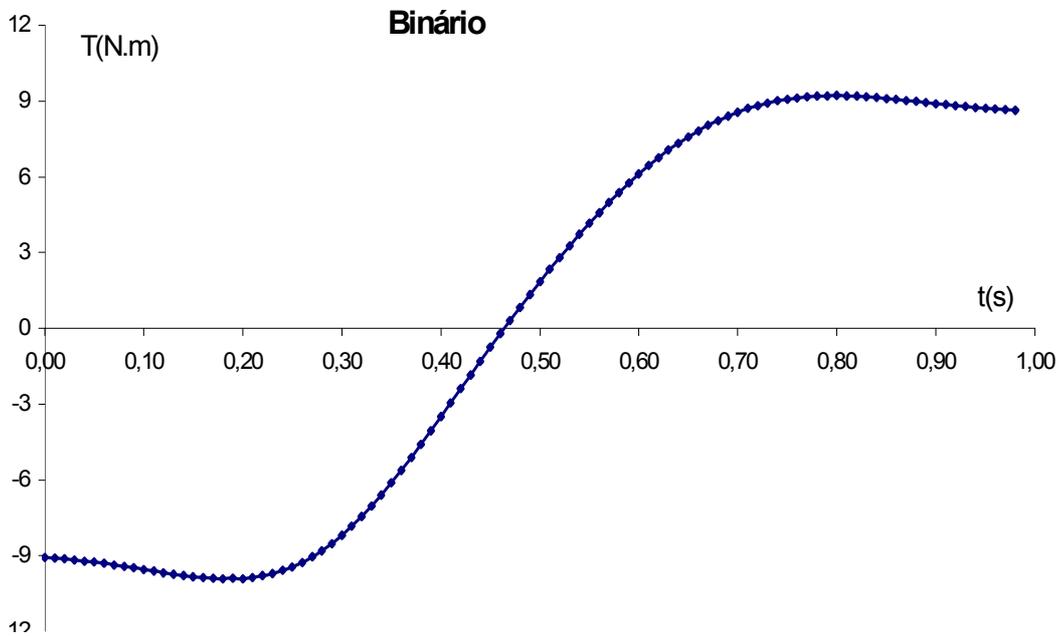


Figura 11 - gráfico do binário num andamento suave

Conhecendo a curva de binário é fácil obter a curva de potência, uma vez que, $\varpi(t) = |\tau(t)| \cdot \dot{\theta}(t)$, desta forma obtemos para a potência o gráfico

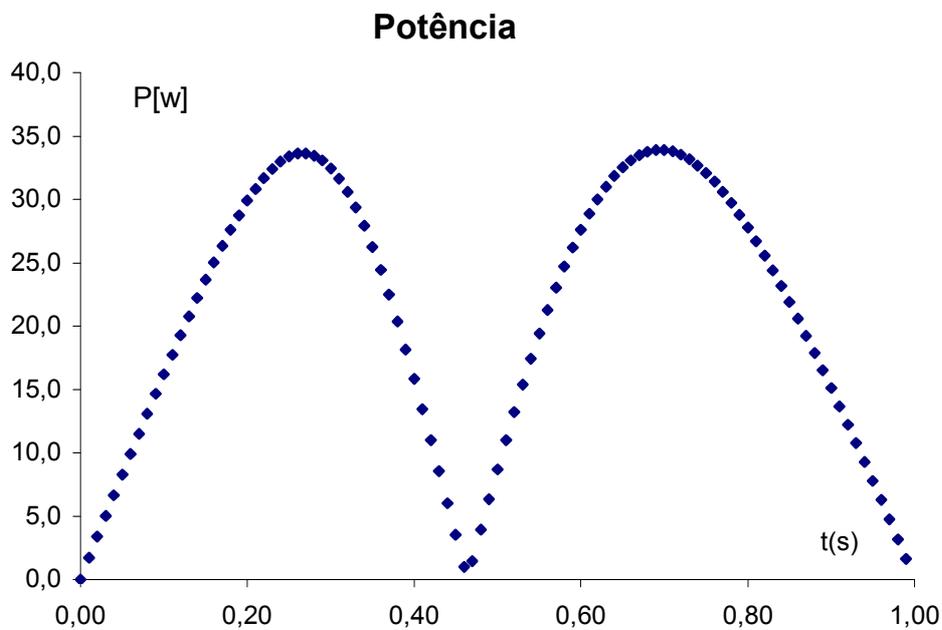


Figura 12 - gráfico da potência num andamento suave

6.4.3 Dimensionamento estrutural

Para se efectuar o dimensionamento estrutural foi necessário seleccionar previamente o material, tiveram-se em conta vários critérios, baixa densidade, boa maquinabilidade, baixo custo, resistência mecânica adequada e propriedades mecânicas (tenacidade e resiliência) compatíveis com os impactos no solo. Assim, entre alguns possíveis tais como o Alumínio, o *Teflon*[®] e o *Nylon*[®], escolheu-se o *Nylon*[®] por proporcionar um equilíbrio entre os critérios supracitados face aos outros.

No dimensionamento estrutural foi utilizado o *software* de CAD *SolidWorks2000* para a modelação da perna, e o *CosmosWorks* para a análise estrutural. O tipo de material, *Nylon 6,6* [http#5]. tem como principais características as seguintes:

- Densidade: 1.15
- Tensão de cedência: 90 MPa
- Resistência à flexão: 2830 MPa
- Resistência ao corte: 66 MPa
- Dureza (Shore D): 85



Efectuou-se o estudo para a pior situação de exigência mecânica, (com toda a massa do robô suportada numa perna), sendo sujeitos a esforços variados (compressão, torção), através da simulação estática segundo o critério de *Von-Mises*. Considerando um coeficiente de segurança de 10, pois não foram tidos em conta na simulação, efeitos dinâmicos, obtendo-se como valor de tensão máxima, 8 MPa e um deslocamento máximo de 0.28 mm, ver Figura 13 e Figura 14.

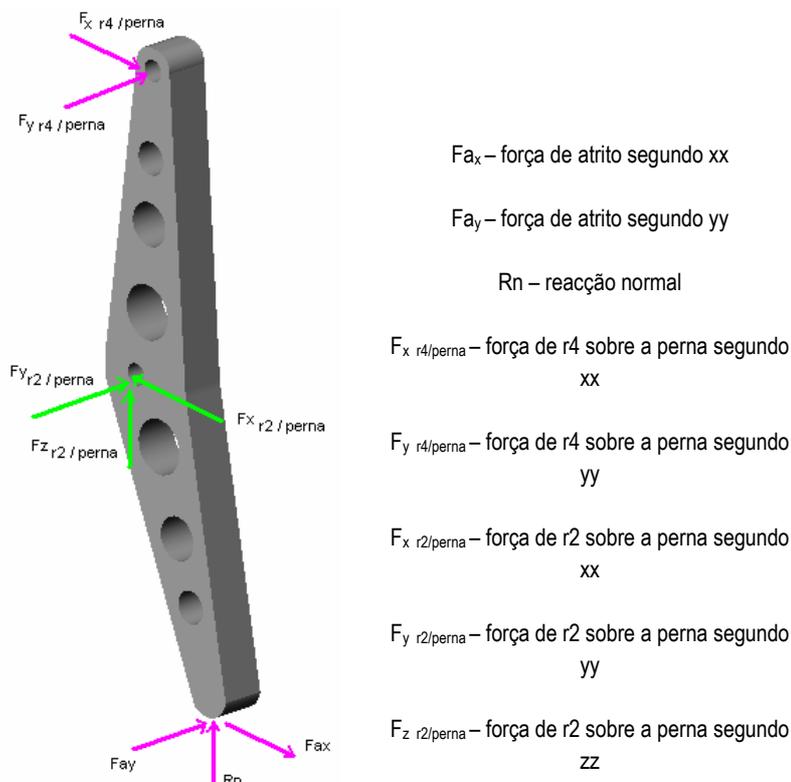


Figura 13 - representação das solicitações aplicadas numa perna

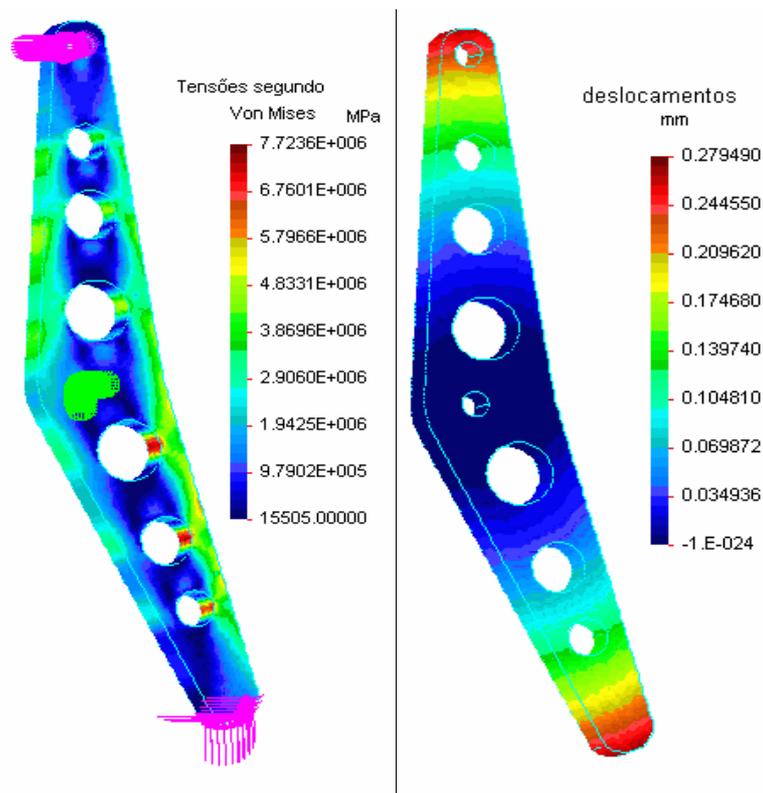


Figura 14 - campo de tensões e deslocamentos numa perna

6.5 Comentários

Neste estudo formularam-se os modelos cinemático e dinâmico de um robô hexápode com 2 gdl, bem como a optimização de um mecanismo articulado para as pernas, na tentativa de melhorar globalmente o comportamento do robô. Este mecanismo articulado de locomoção elíptica permite, uma maior verticalidade na trajectória de aproximação ao solo, o que poderia proporcionar uma maior facilidade na transposição de obstáculos e explorar as vantagens mecânicas das juntas rotacionais (redução de atritos).

Este estudo permitiu concluir que a optimização, do tipo e parâmetros de locomoção, do robô dificilmente poderá evoluir de forma considerável, uma vez que apresenta um elevado número de variáveis dependentes, cuja optimização mutua é incompatível.

No entanto, em relação à solução existente, as vantagens encontradas não se revelaram suficientemente fortes, por forma a justificarem o fabrico e implementação dessa nova geometria de locomoção. Outros motivos, tais como constrangimentos geométricos da estrutura, necessitando de alterar profundamente outros componentes mecânicos e não haver disponibilidade suficiente face a um projecto de natureza.

Este estudo foi apresentado no âmbito do Encontro Científico do Festival Nacional de Robótica e publicado nas revistas [1] e [2].

6.6. Variantes e perspectivas

Com a configuração/geometria estudada surgiu a possibilidade de introduzir geometria variável, para contornar o facto da altura ao solo ser relativamente pequena, ditada pelo elo r_2 , e não ser conveniente aumentar esse elo uma vez que o binário aumentaria também, surge então a hipótese de se utilizar um mecanismo auxiliar. Reportando-nos à Figura 15, seria um sistema de actuação com duas ou mais posições, e teria a função de variar a localização do ponto P (ponto superior de fixação à estrutura) segundo xx e assim aumentar a altura ao solo do ponto T na fase de perna no ar.

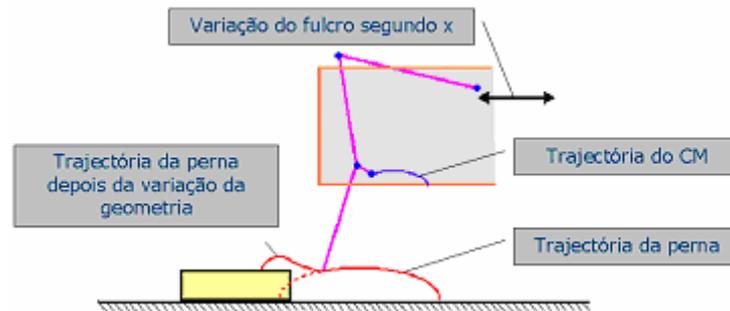


Figura 15 –ilustração da variante proposta

Este sistema de geometria variável, eventualmente associado a sistemas de detecção de contacto inferior da perna, permitiria lidar com obstáculos mais complexos. Esta variante permitiria diferentes trajetórias durante a fase aérea. No entanto, é uma mera hipótese teórica dado que na prática exigiria uma grande intervenção e necessidade de integrar mais actuadores que permitisse o efeito desejado.

7. Participação no Festival Nacional de Robótica “Robótica2002”

7.1. Introdução

Por forma a experimentalmente utilizar a visão no controlo de sistemas autónomos e aplicar os conhecimentos adquiridos nas disciplinas de robótica industrial, servomecanismos e robótica autónoma e móvel, resolvemos participar no festival de robótica nacional na prova de robôs autónomos. Para tal efectuámos a metamorfose reversível do robô hexápode num robô com locomoção por rodas.

Para permitir a aplicação de rodas e a introdução de sensores projectámos e construimos alguns componentes. Adicionamos ainda hardware de sensorização e controlo (*webcam*, sensores infravermelhos e um *desktop PC*).

7.2. Objectivos/Regras da competição

A prova divide-se em três mangas, na primeira apenas é necessário percorrer a pista duas vezes imobilizando-se de seguida na passadeira. Na segunda manga, é necessário obedecer à sinalética dos semáforos sendo efectuadas também duas voltas seguido da imobilização na passadeira. Na terceira manga, a prova é semelhante à manga anterior porém existe um túnel a ser percorrido.



Figura 16 - pormenor da partida/chegada, semáforos e túnel

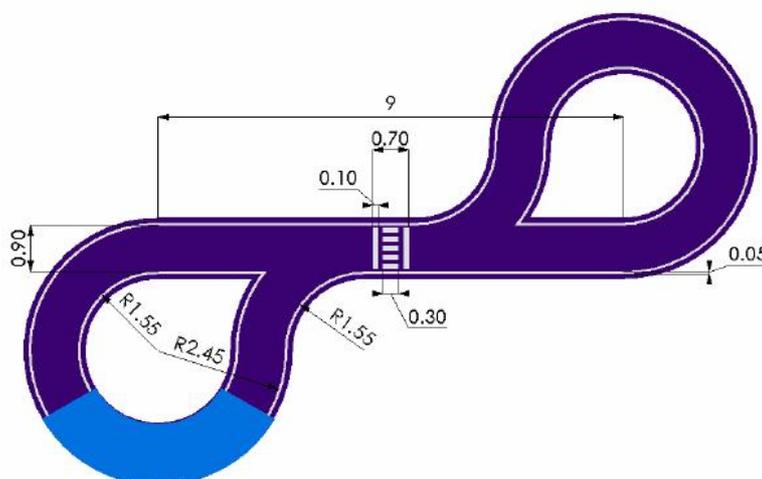


Figura 17 - ilustração das dimensões da pista

7.3. Descrição/Características do Robô Hexápode

Peso

Aproximadamente 40 kg.

Tipo / Binário dos actuadores

Dois motores passo-a-passo híbridos RS[®], com 1.2 Nm de binário, alimentados por duas baterias de Pb de 7,3 Ah.

Transmissão

Redutor do tipo parafuso sem-fim roda de coroa e transmissão por correia.

Tipo de locomoção

Seis pernas de perfil de alumínio, actuadas em grupos de três acopladas mecanicamente por correia.

Dimensões

Largura/ Comprimento / altura : 72 x 70 x 50 cm .

Tipo de estrutura

Perfil de alumínio.

Tipo de controlo

PLC *fx2n Mitsubishi*[®] mais dois módulo PGU, controlo em posição.

Sensorização

Dois sensores de contacto.

7.4. Descrição/Características do Robô *QuinamaWheel*

Peso

Aproximadamente 50 kg.

Tipo / Binário dos actuadores

Dois motores passo-a-passo híbridos RS[®], com 2.0 Nm de binário, alimentados por duas baterias de Pb de 7,3 Ah.

Transmissão

Redutor do tipo parafuso sem-fim roda de coroa e transmissão por correia.

Tipo de locomoção

Por rodas, pneus de 20” de bicicleta com rasto liso mais uma roda “gira louca”.

Dimensões

Largura/ Comprimento / altura : 70 x 90 x 50 cm .

Tipo de estrutura

Perfil de alumínio.

Tipo de controlo

Um desktop PC com placa de aquisição e saídas analógicas, controlo diferencial em velocidade.

Sensorização

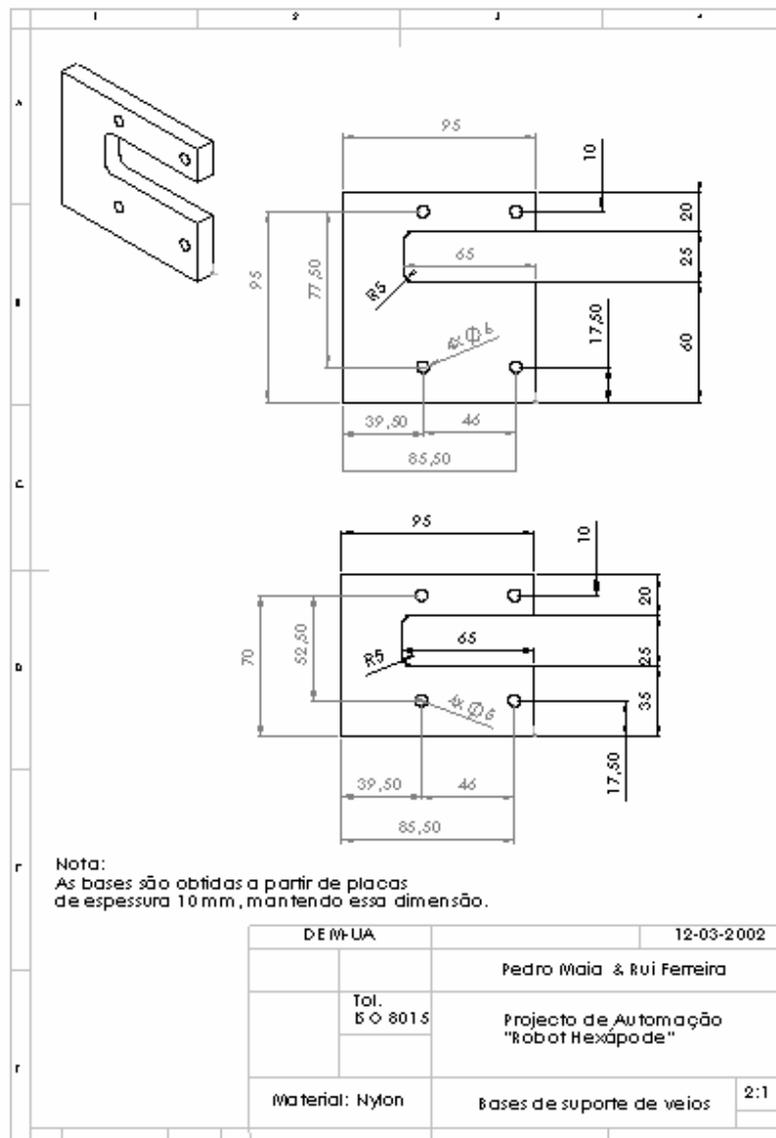
Uma webcam Phillips, [http#7], Dois sensores de contacto, quatro sensores infravermelho.

7.5. Concepção e fabrico de componentes mecânicos e acessórios de suporte

Todas as peças que se relatam nesta secção foram executadas em *Nylon 6.6*, [http#5], devido ao seu reduzido peso, fácil maquinabilidade e comportamento mecânico aceitável para as aplicações em causa.

7.5.1. Bases de apoio de veios

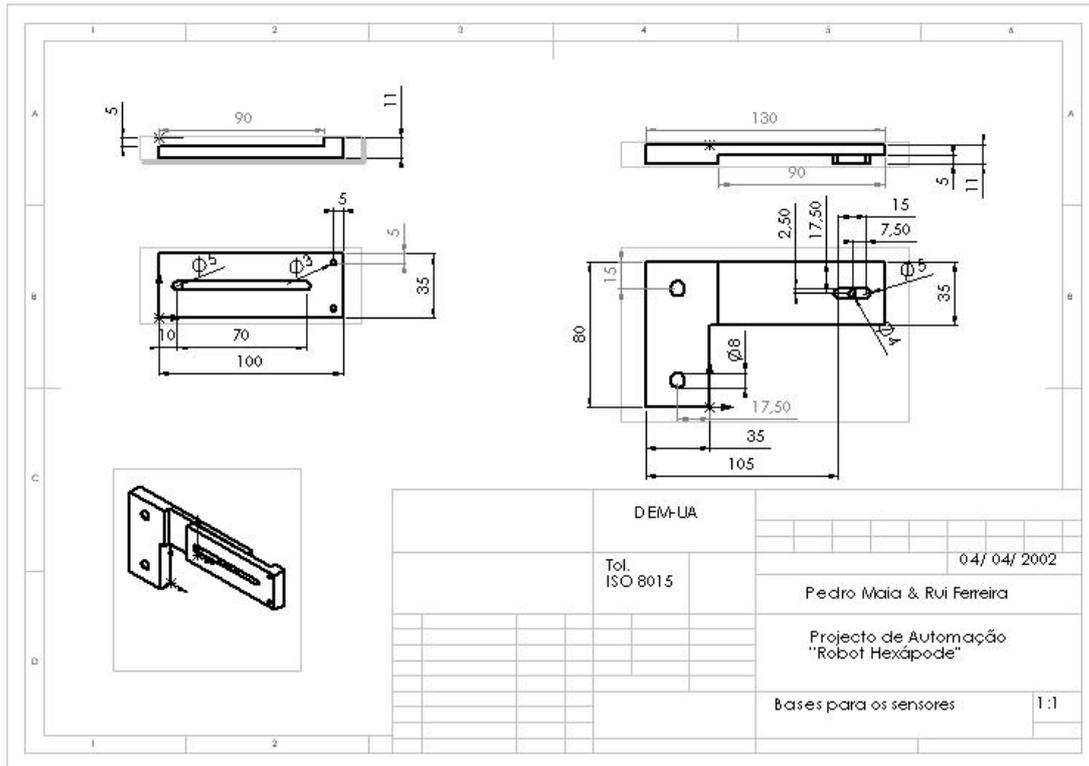
Um dos pontos com maior necessidade de intervenção a nível mecânico, tratava-se dos apoios dos veios, uma vez que só apresentavam um ponto de apoio, apenas uma chumaceira por veio, o que originava deslindamentos nos veios aquando de situações de maior solicitação mecânica. A alteração escolhida prevê uma base de *Nylon 6.6*, com duas chumaceiras por cada veio, uma em cada lado da polia de transmissão. A sua execução foi bastante fácil uma vez tratar-se de maquinar apenas contornos 2D, Desenho 1.



Desenho 1 - bases de apoio dos veios

7.5.2. Suportes de sensores de contacto

No que refere aos suporte dos sensores de contactos laterais, a este teria de cumprir um requisito, teria de permitir ajustar o comprimento deste, de forma a variar a distancia entre o sensor e o robô. Por forma a cumprir este requisito optou-se pela solução apresentada, Desenho 2.



Desenho 2 - suporte sensores de contacto (laterais)

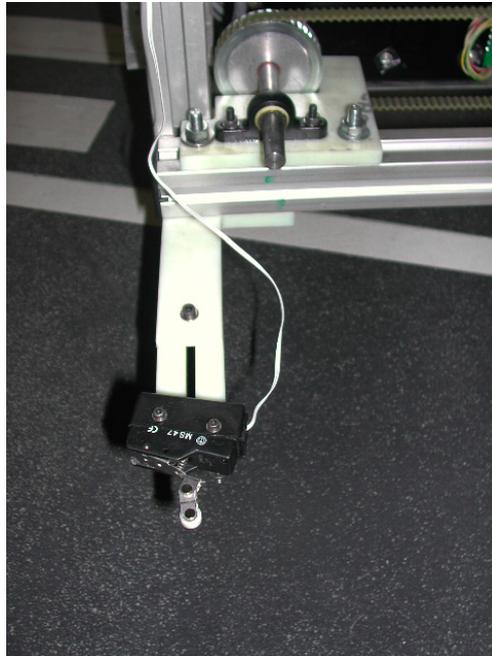


Figura 18 - suporte dos sensores(aspecto final)

Na Figura 18 pode-se ver o resultado final da solução adoptada para suportar os sensores de contacto laterais.

7.5.3. Suporte de sensores infravermelho detectores de semáforo

Tendo em vista o cumprimento das regras e o menor número de penalizações no festival, a leitura da sinalética dos semáforos tornava-se impreterível, deste modo recorreu-se a sensores infravermelhos. Devidamente alinhados com os emissores infravermelhos dos semáforo (vermelho e amarelo). Optou-se por ler apenas dois dos três sinais emitidos pelo semáforo, aqueles que encontravam mais afastados, com a justificação de não existir interferência nos sinais de cada emissor nos receptores instalados no robô e sabendo da não coexistência em simultâneo do sinal verde e amarelo.

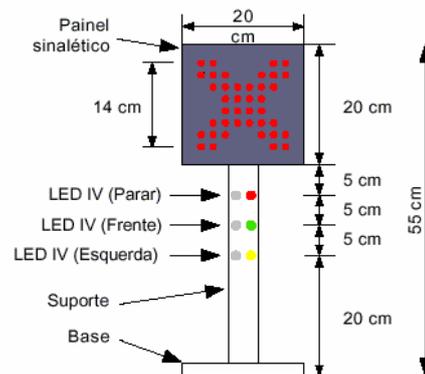


Figura 19 - esquema do semáforo

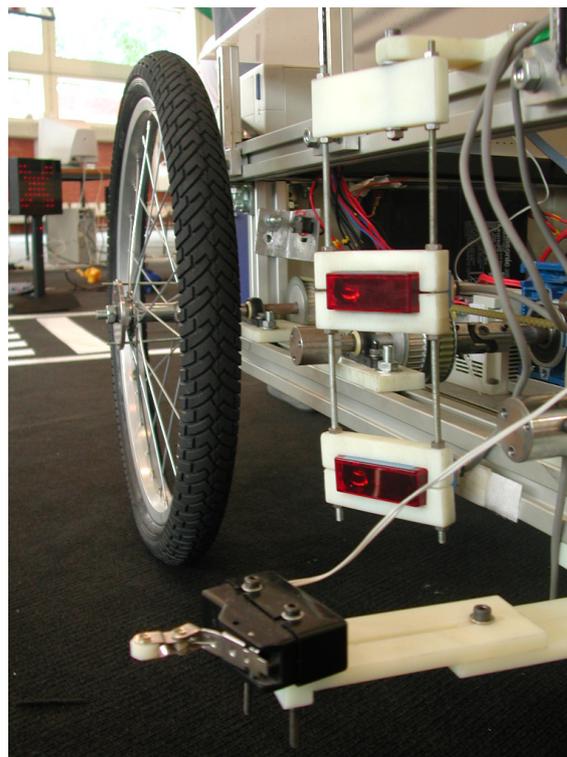


Figura 20 - suporte sensores infravermelho(semáforos)

7.5.4. Suporte da *webcam* USB

A *WebCam* é o componente/acessório mais importante, pois sem este não seria possível realizar as voltas ao traçado da pista, seguindo a linha. A solução encontrada apresenta a vantagem de permitir o ajuste da câmara, através de uma junta esférica. Tornou-se necessário a colocação de um foco, conforme Figura 21 e Figura 22, para permitir níveis de luminosidade aceitáveis aquando a passagem no interior do túnel.

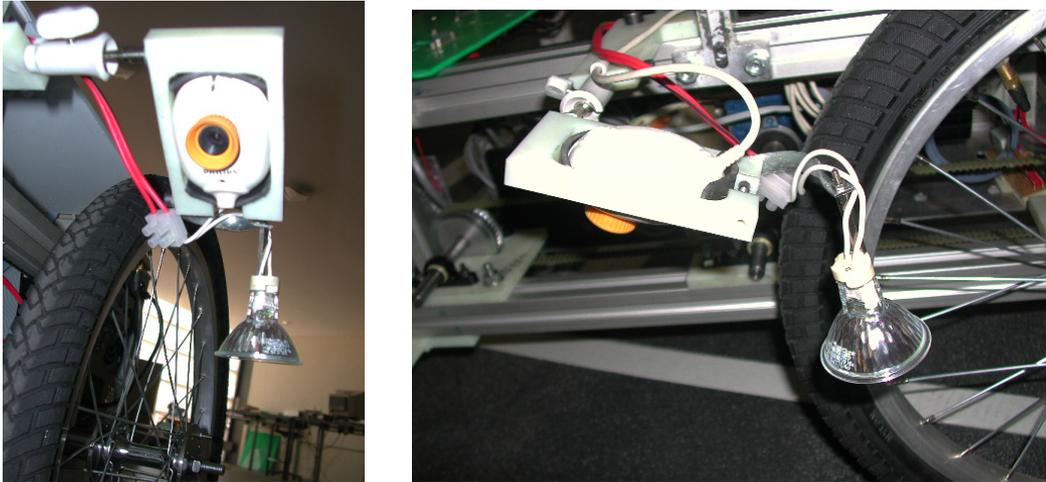


Figura 21 - suporte de *WebCam* e foco auxiliar

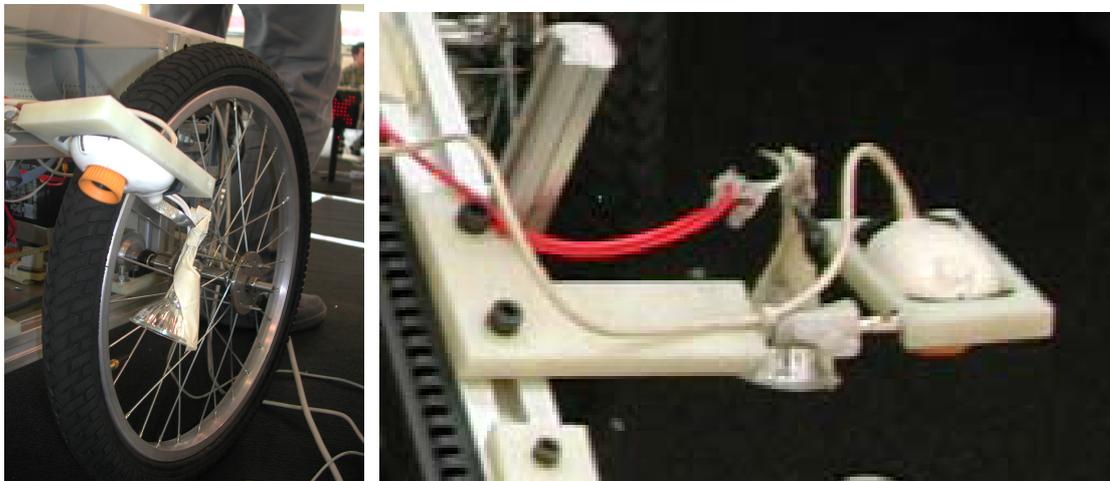
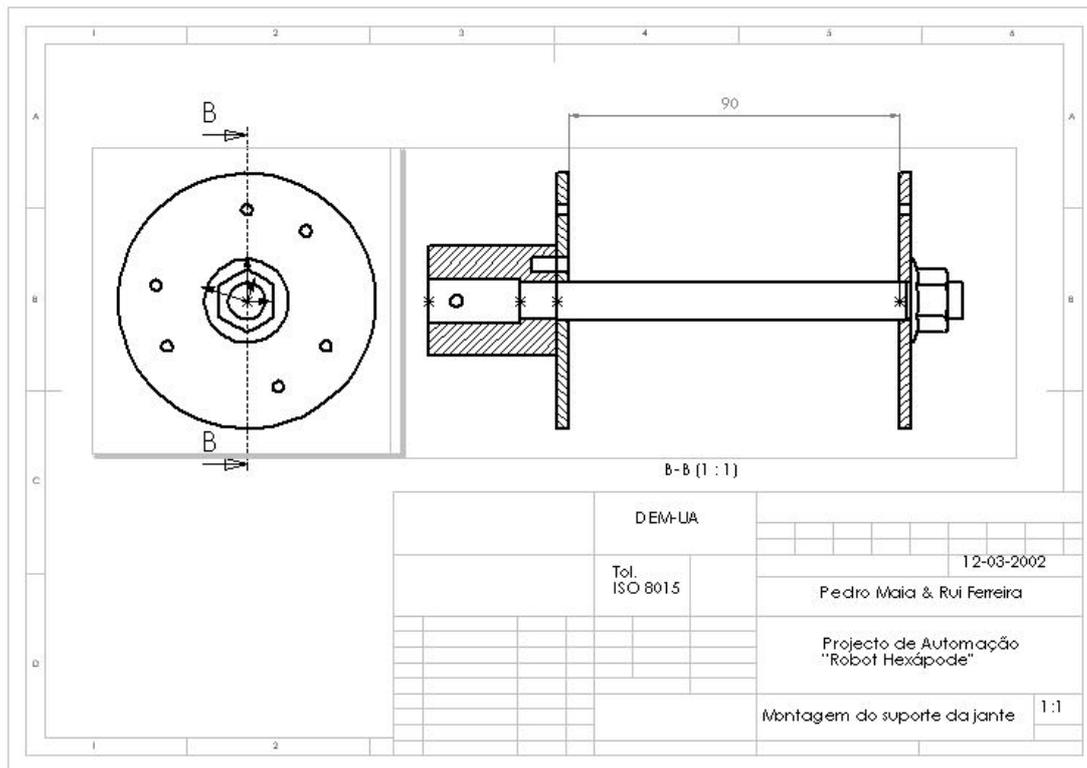


Figura 22 - *webCam* e foco

7.5.5. Componente de ligação da jante ao veio

Com a finalidade de incorporar rodas como meio de locomoção para o festival, mas podendo a qualquer momento mover-se recorrendo ao modo hexápode, foi necessário idealizar um sistema de fácil mudança ($\sim 15-20\text{min}$), para tal foi usado um casquilho para a ligação entre o veio motor e a jante ou o elo da perna. Para cada tipo de locomoção assim cada veio terá de ter um casquilho, de forma a facilitar e tornar mais rápido todo o processo de mudança de locomoção, Desenho 3 e Figura 23.



Desenho 3 - ligação da jante ao veio motor

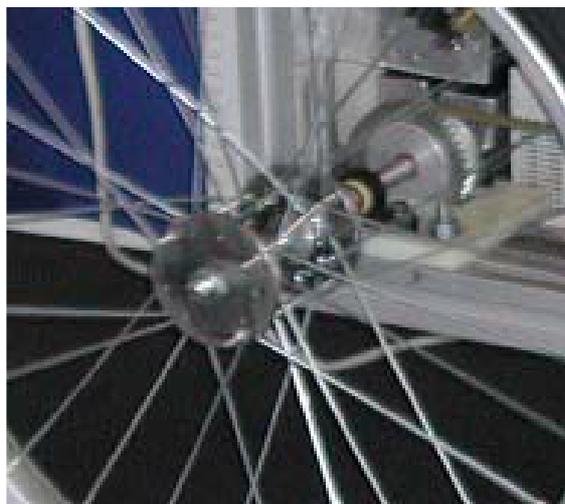


Figura 23 - aspecto final ligação jante veio-motor

7.5.6. Uniões de veios com adaptação a alinhamentos incorrectos de veios

Este tipo de transmissão foi implementado devido a rotura do sistema anterior, que na nossa opinião não estava devidamente projectado, pois tratava-se de um acoplamento de transmissão flexível em alumínio, um acoplamento típico para codificadores, com um binário máximo (5 - 6 Nm), [http#5], bastante reduzido quando comparado com o disponível pelo motor/redutor (~ 30 Nm). Foi necessário proceder á substituição deste por um sistema mais eficaz, acoplamento de transmissão através de cardan, permitindo desta forma binário maiores e desalinhamentos no veio Figura 24.

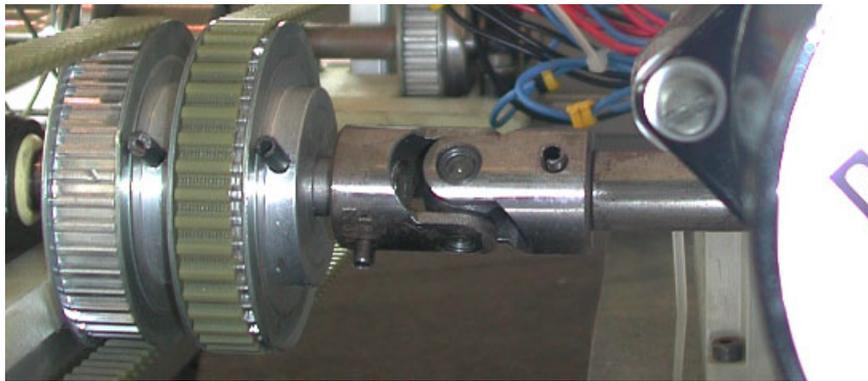


Figura 24 - alteração da união de veios - cardan

7.6. Ligações eléctricas

A selecção do modo de locomoção por rodas é realizada através da troca do flatcable e a colocação de uns jumpers na placa de ligação ás *drives* de potência, conforme indicado na Figura 25. De notar que a identificação do *socket* foi efectuada através da colocação de uma seta auxiliar, devendo esta servir de indicação de qual a orientação dos jumpers, Figura 25.

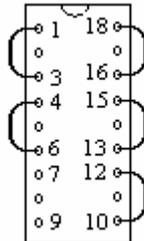


Figura 25 – ilustração das ligações no *socket* selector do modo funcionamento

A implementação do controlo em velocidade foi conseguida através do *upgrade* dos *drives* de potência, uma vez que estes estão preparados para, através da adição de alguns componentes electrónicos, gerarem os pulsos recebendo um sinal de controlo analógico. Pode-se visualizar os componentes adicionados na Figura 26.

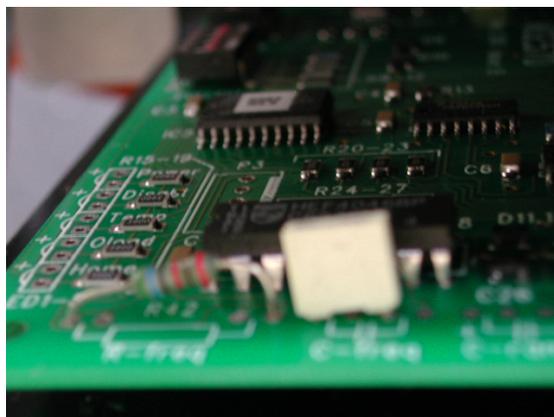


Figura 26 – componentes incorporados nas *drives* de potência

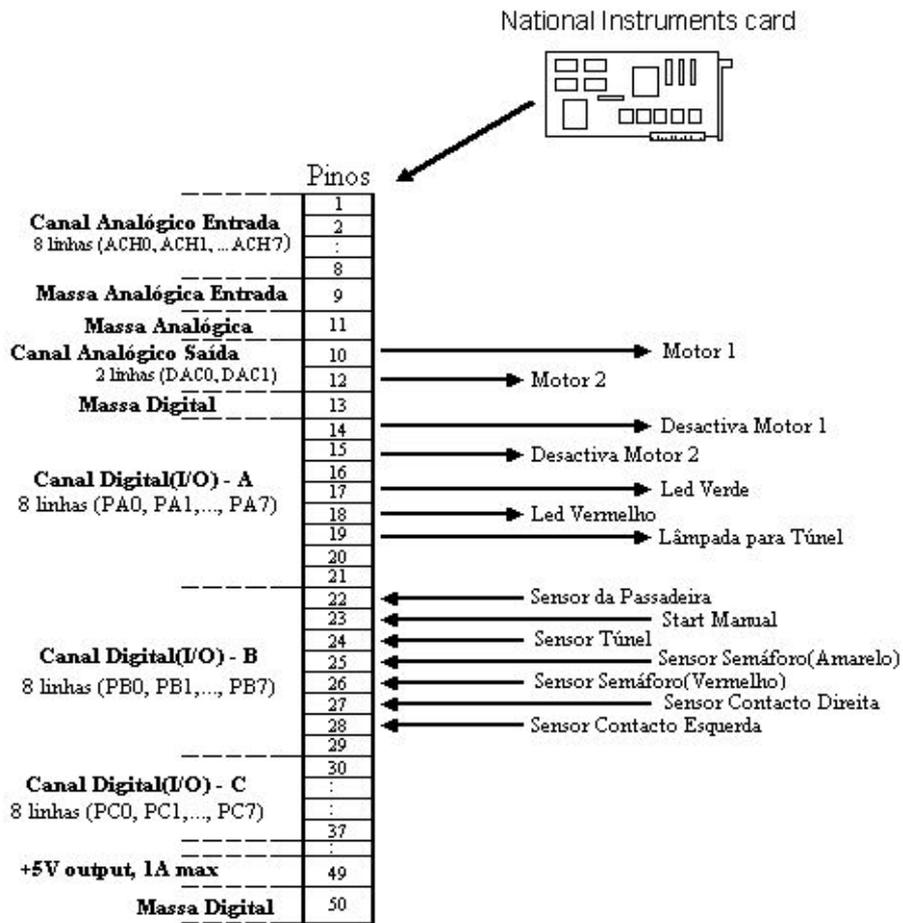


Figura 27 – esquema das ligações da placa de aquisição LabPC+

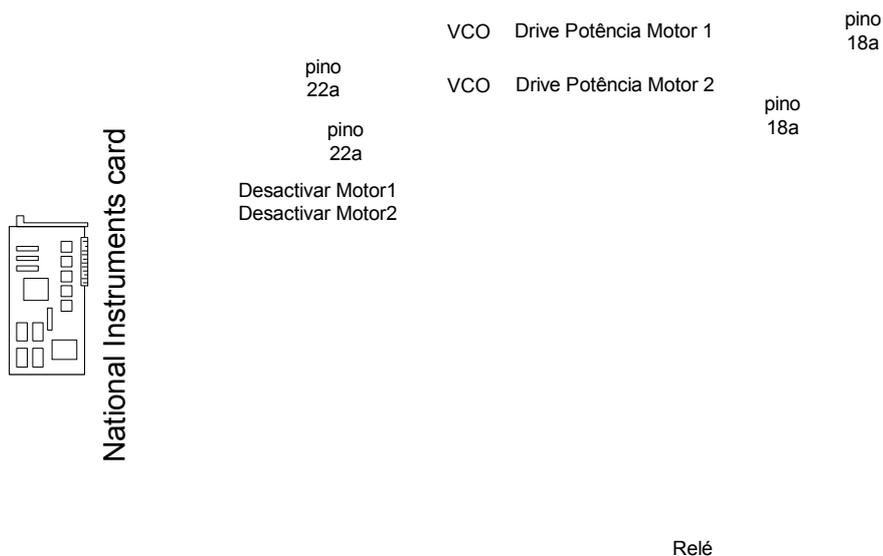


Figura 28 - esquema das ligações das saídas da LabPC+

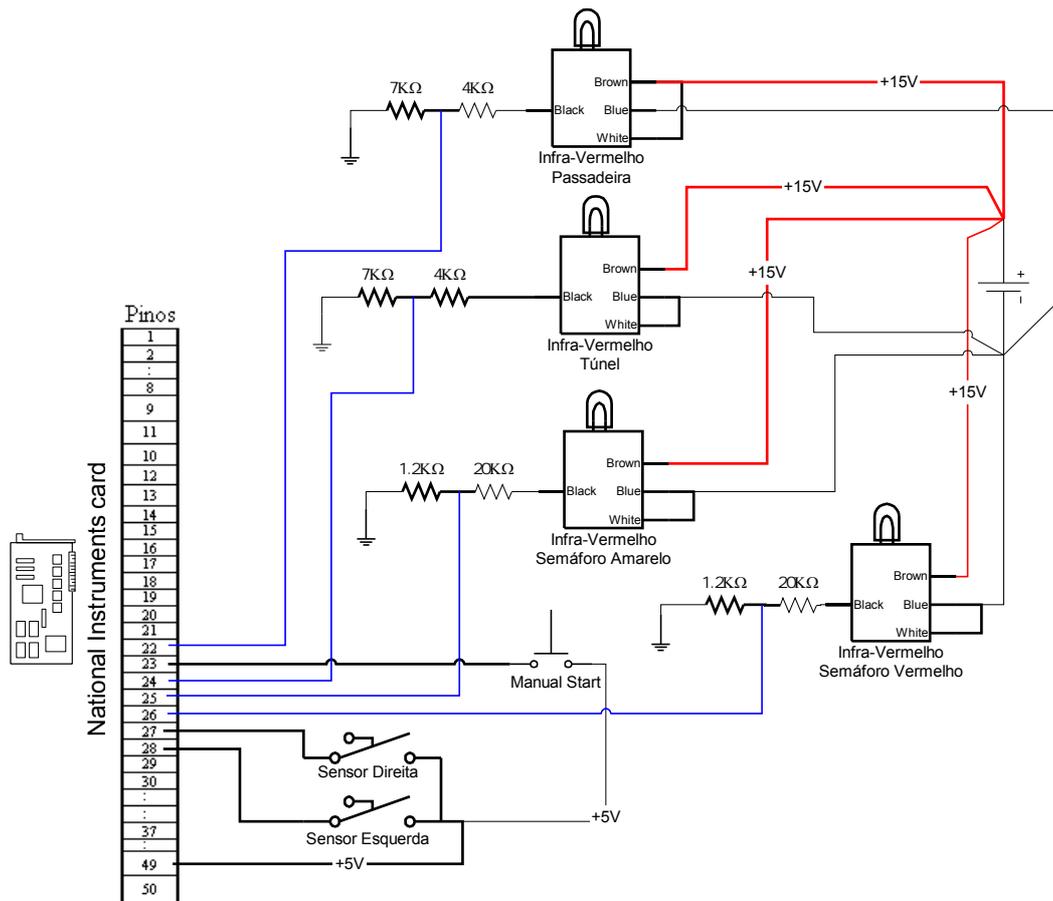


Figura 29 - esquema das ligações das entradas da LabPC+

No esquema da Figura 29, as saídas dos sensores de infravermelho estão ligadas a divisores de tensão, decorrentes da necessidade dos sinais lógicos a entrar na placa LabPC+ terem de ser 0 a 5V. Após experimentação, registamos que os níveis de tensão nas saídas dos sensores (nenhum dos sensores apresentava o mesmo nível) eram superiores aos admissíveis e obtivemos as necessárias resistências para o divisor respectivo.

7.7. Descrição do hardware de controlo

O controlo autónomo do robô é efectuado utilizando-se um pc com uma placa de aquisição da *National*, com entradas e saídas digitais e analógicas, sendo utilizadas duas saídas analógicas para o controlo das velocidades dos motores. Este sinal é adquirido por um VCO, transformando o sinal analógico numa frequência de valor proporcional. De seguida a frequência de controlo é amplificada nas *drives* de potência onde são geradas as quatro fases de cada motor, sendo efectuado controlo em velocidade em cada roda onde a diferença de velocidades dita a direcção instantânea do veículo.

A sensorização é efectuada utilizando-se uma webcam e cinco sensores de infravermelho industriais de funcionamento digital, o esquema geral de controlo está representada na Figura 30.

Quanto aos sensores usados estes dividem-se em dois tipos, os de contacto e os de infravermelho

Sensores infravermelho, são da marca *Sick* [[http#8](#)], sensores com vasta aplicação industrial, com as referencias:

- detecção dos sinais do semáforo
 - o WE250 – P132
 - o WE250 – N132
 - através da recepção do sinal emitido pelo led infravermelho do semáforo, a diferença das referencias refere-se apenas ao tipo de ligação PNP ou NPN.
- detecção da passadeira
 - o WT170 – P1112
 - através da reflexão, do sinal por ele emitido, na linha da passadeira.
- detecção do túnel
 - o WT12 – P1421
 - sensível a objectos/obstáculos numa gama de distancias.

Sensores de contacto, não são mais que interruptores accionados por acção mecânica decorrente do contacto físico.

A câmara usada foi do tipo *WebCam USB*, da *Phillips 740 K* [[http#7](#)], com capacidade de 30 *frames* por segundo com uma resolução de 640x320, o que neste caso é bastante satisfatório, uma vez, que apenas conseguimos 5 *frames* por segundo devido á função do algoritmo de controlo “*vfm*” e do *OS Windows* terem tempos de acesso ao dispositivos periféricos de 200ms. Nesta aplicação especifica necessitamos da resolução mínima possível da câmara, para “poupar” tempo de processamento da própria imagem (binarização, tratamento e análise da imagem), como a mínima resolução da câmara é de 160x120, sendo muito superior ao necessário, foi esta a utilizada.

A unidade central de controlo é um *PC Desktop* normal, tendo as seguintes características:

- disco *Western Digital*[®]
 - o 5400 rpm
 - o 2.1 Giga byte

- Processador Intel Celerom[®] 500 Mhz
- 196 MB de RAM
- placa de aquisição da *National*[®] - LabPc+
 - o 8 canais analógicos de entrada
 - o 3 canais, cada um com 8 entradas/saídas digitais (configuráveis)
 - o 2 canais analógicos de saída

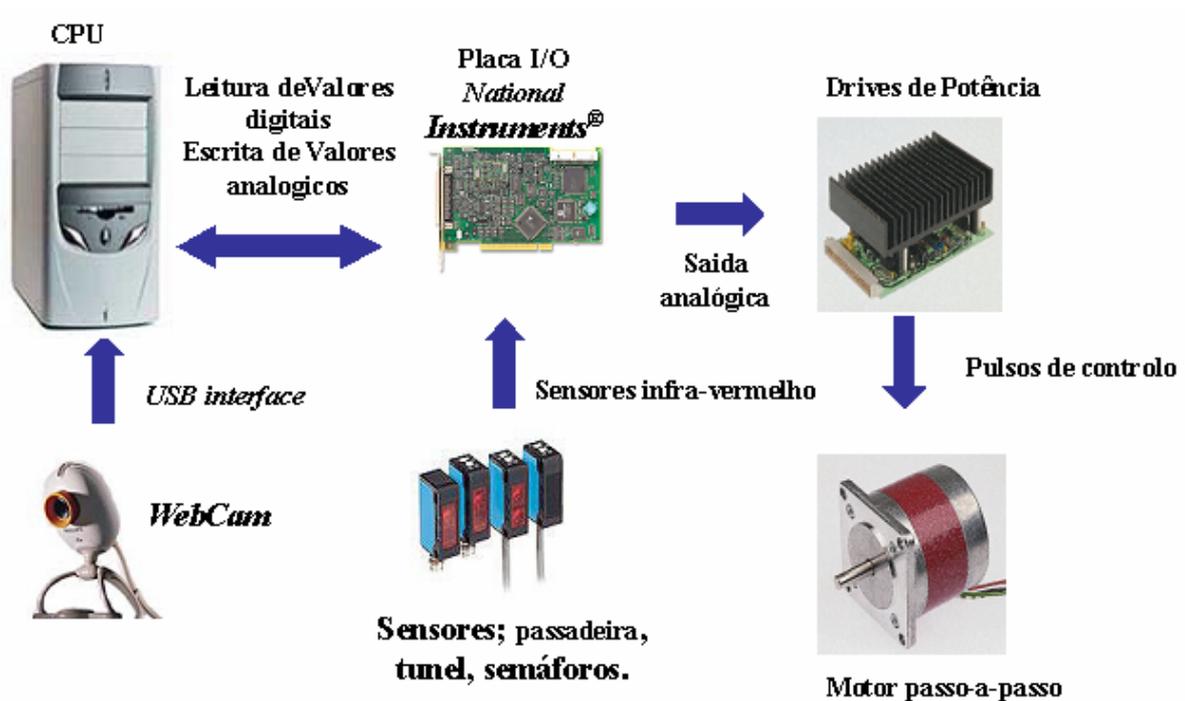


Figura 30 - descrição do hardware de controlo

7.8. Descrição geral do *software* de controlo

O controlo é efectuado a partir de duas aplicações executadas simultaneamente em paralelo, a primeira é uma aplicação de *Simulink* executada em tempo real(ver Figura 31, a segunda é uma aplicação de *MatLab*. Na aplicação *Simulink* existe um controlador PD de médio nível efectuando o controlo do erro , este é obtido através da interpretação da imagem adquirida na aplicação *MatLab*. Após a saída do controlador é efectuada a atribuição de velocidades, através das saídas analógicas, utilizando a diminuição da velocidade da roda interior ao arco de curvatura sendo mantida a velocidade da outra roda. Este tipo de atribuição foi utilizado como recurso, pois inicialmente eram atribuídas de forma a manter-se constante a velocidade do CM, porém esta situação implicava o aumento de velocidade da roda exterior e o motor respectivo comportava-se de forma desadequada, já que não possuía suficiente capacidade de correcção.

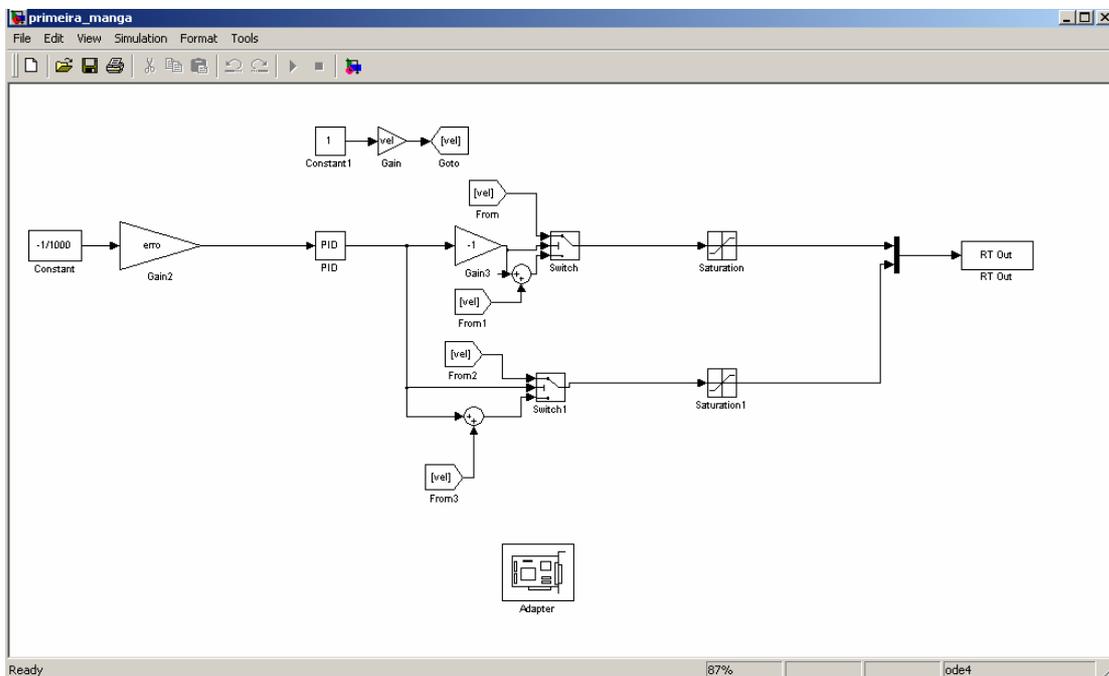


Figura 31 – diagrama de blocos

A aplicação de *MatLab* efectuava a leitura dos sensores, captura, tratamento e binarização de imagens, interpretação das mesmas calculando o desvio face ao desejado, comunicação com a aplicação *Simulink* e actuação de saídas digitais responsáveis pela imobilização do robô. Em baixo na Figura 32 pode-se ver um diagrama da arquitectura de controlo.

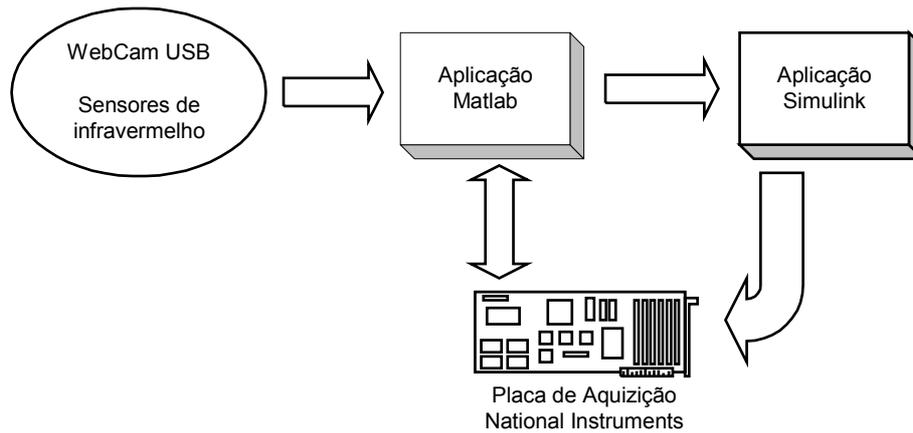


Figura 32 – arquitectura de controlo

7.8.1 Descrição pormenorizada do software de controlo

7.8.1.1. Primeira Manga

O algoritmo da primeira manga é o mais simples, consiste apenas num ciclo repetitivo onde é efectuada a captura de uma imagem e a leitura do sensor infravermelho da passadeira. A leitura deste valor está condicionada por um *time out* por forma a ser efectuada a contagem do número de passagens na passadeira. A imagem é capturada seguida de um tratamento e binarização de apenas uma linha da imagem, depois é calculada a diferença entre o primeiro pixel branco, varrendo a imagem da esquerda para a direita, e o pixel central da imagem. A utilização de apenas o primeiro pixel permite a passagem pela passadeira sem esta interferir no cálculo da trajectória (ver Figura 33). A diferença calculada é enviada para a aplicação *Simulink*, a qual calcula as velocidades dos motores e actualiza as saídas analógicas da carta. Quando o número de passagens pela passadeira é cinco, imobiliza o robô através das saídas digitais que desligam as cartas de potência, terminando de seguida o ciclo do programa, sendo efectuada, deste modo, duas voltas à pista.

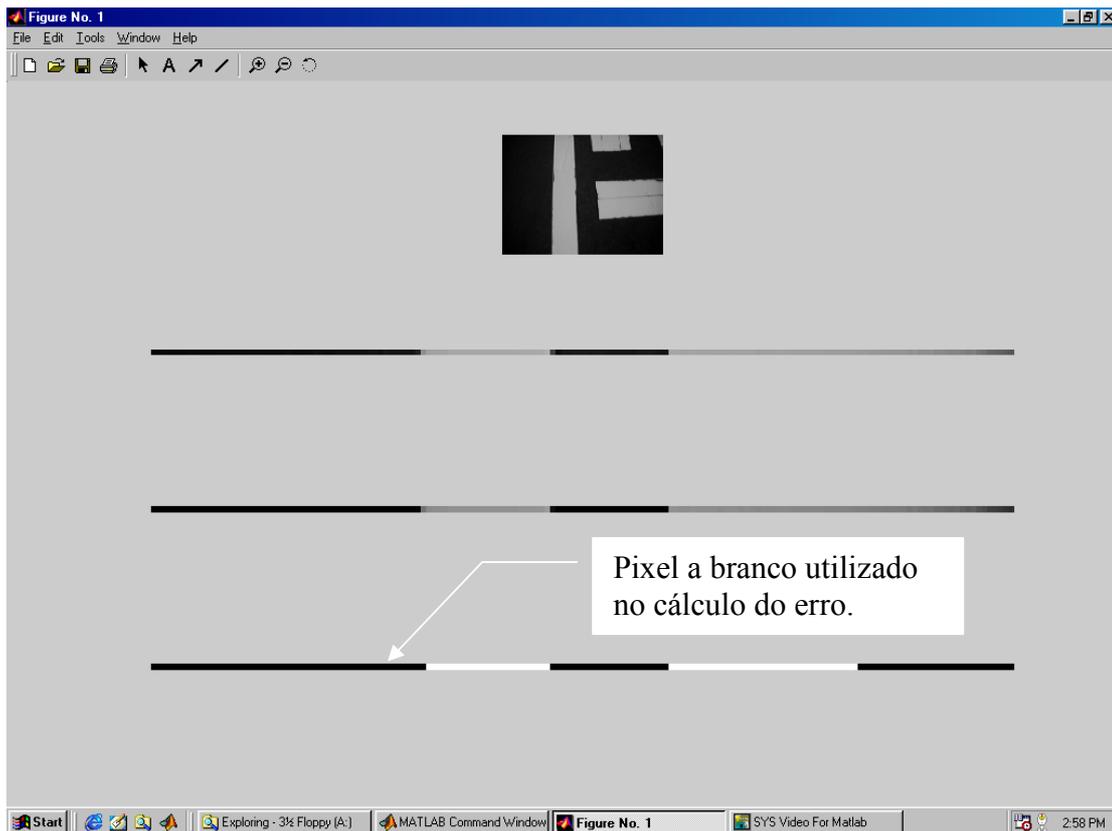


Figura 33 – pormenor da escolha da linha na zona da passadeira

Uma descrição do funcionamento do algoritmo pode ver-se na Figura 34.

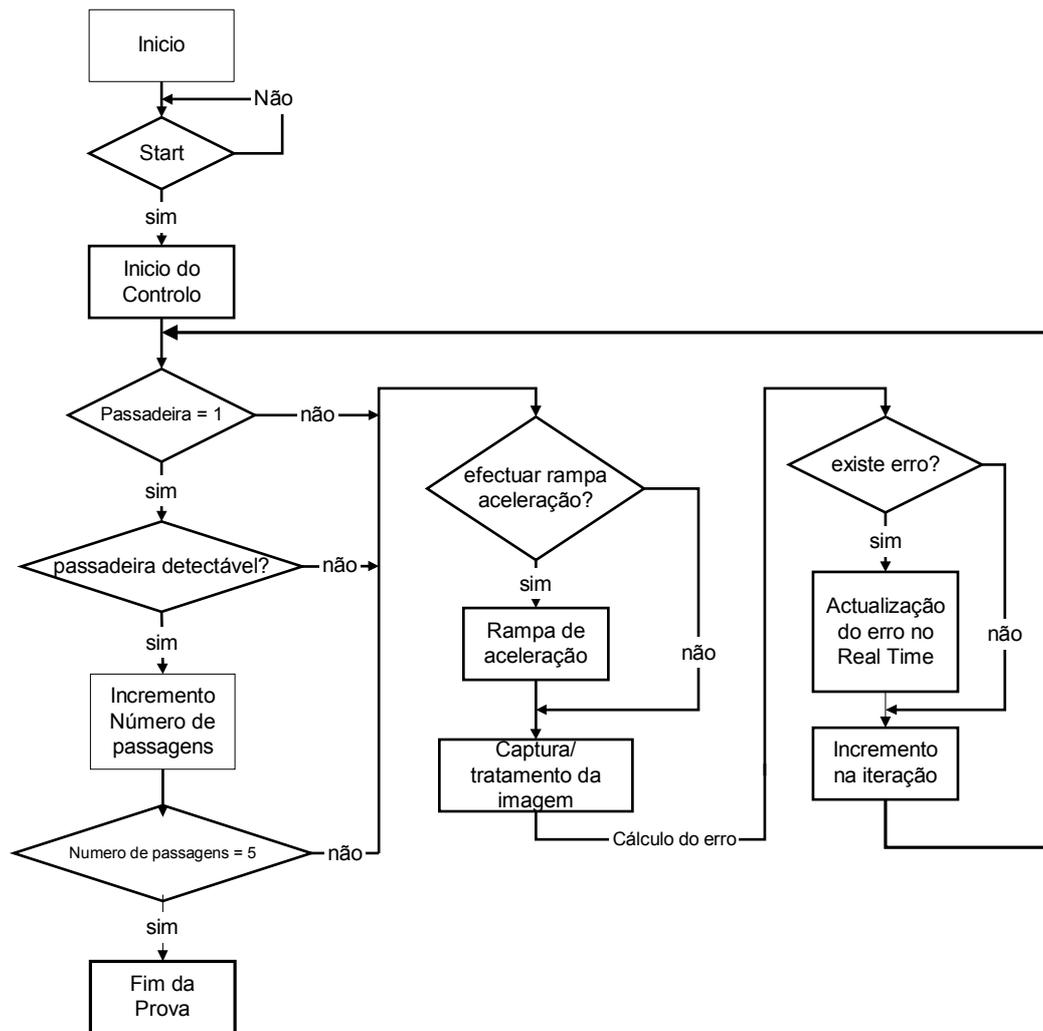


Figura 34 – fluxograma do controlo da primeira manga

7.8.1.2. Segunda Manga

Baseia-se na primeira manga, porém tem adicionalmente implementada a leitura das entradas digitais correspondente aos emissores infravermelho dos semáforos. Esta leitura só é efectuada quando o robô está imobilizado antes da passadeira. Em função dos sensores dos semáforos é decidido a direcção a tomar. No caso da direcção decidida ser “virar à esquerda” pode ser utilizado o algoritmo anterior pois a câmara encontra-se sobre a linha. No caso contrário, “seguir em frente”, é efectuada uma sucessão de tarefas sucessivas: um alinhamento inicial do robô, seguido da perca forçada da linha (ver Figura 35), depois recuperação e seguimento da linha (ver Figura 36) até que perde a linha sendo calculado um valor médio por forma a manter a trajectória e por ultimo segue a linha novamente até detectar a passadeira e imobilizar-se.

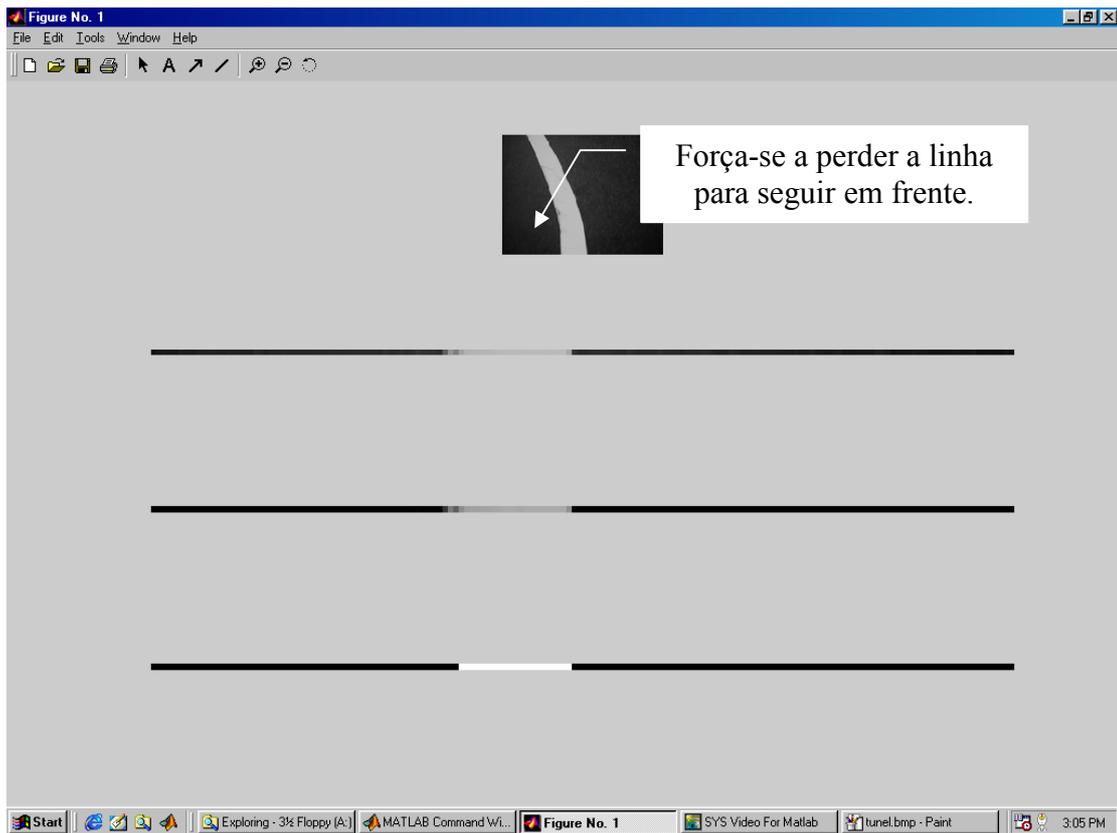


Figura 35 – pormenor da perca de linha forçada

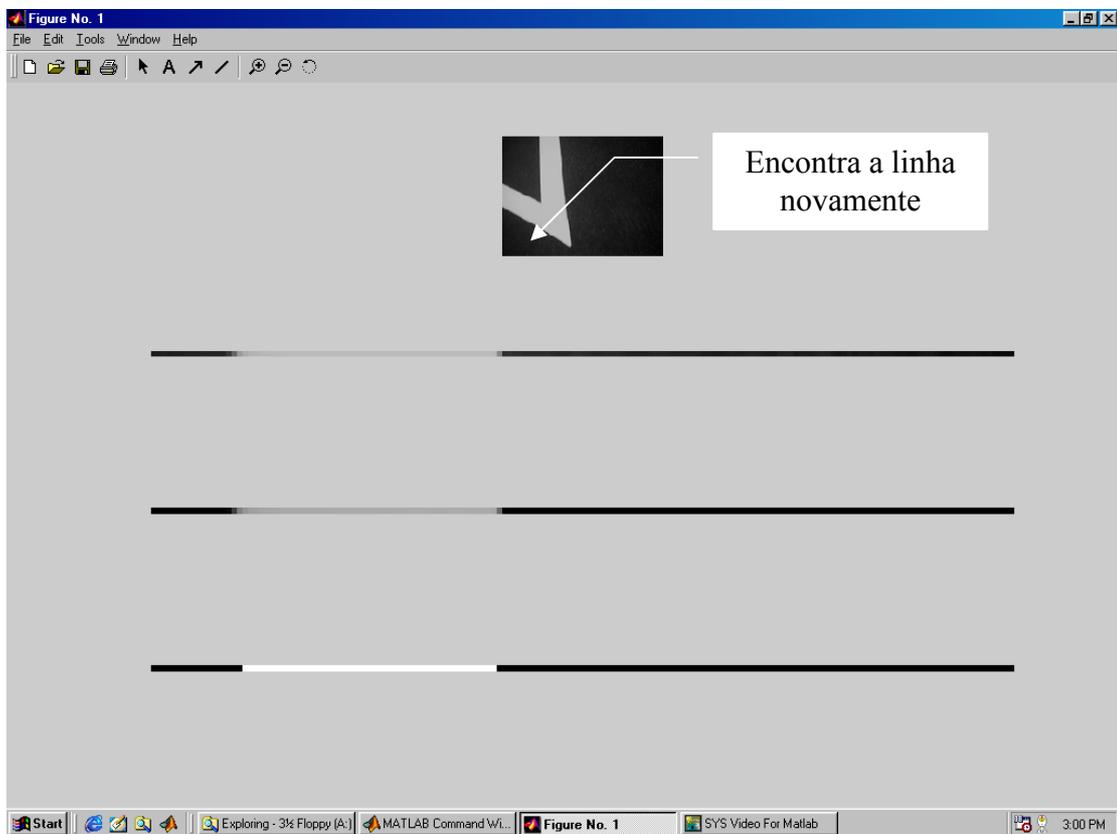


Figura 36 – situação de ambiguidade na escolha da direcção

Uma descrição do algoritmo de controlo da segunda manga, com a necessária interpretação da indicação dos semáforos, pode ver-se na Figura 37.

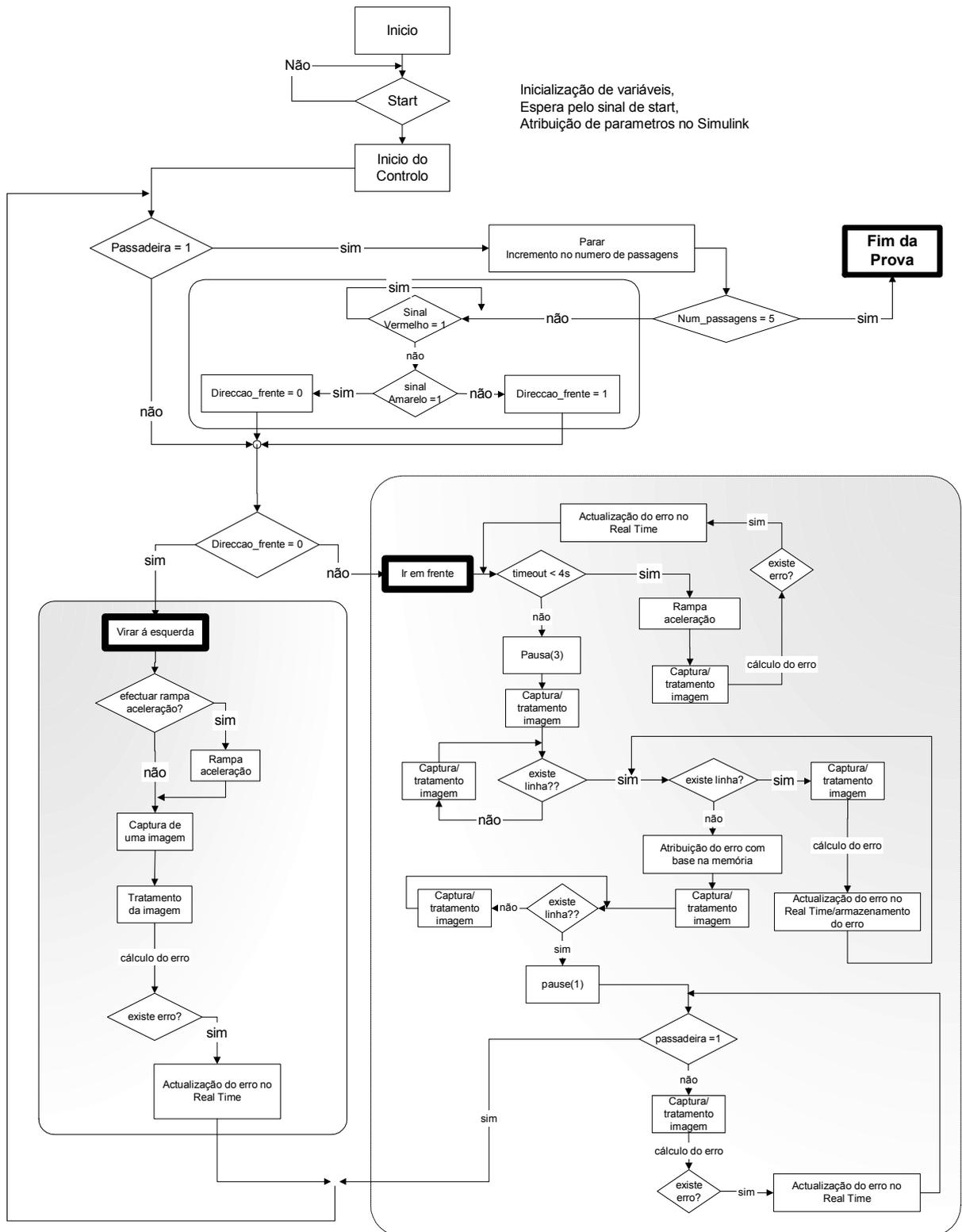


Figura 37 – fluxograma de controlo da 2ª manga

7.8.1.3. Terceira Manga

A introdução do túnel no percurso aumentou a diversidade de situações possíveis a serem tidas em conta no algoritmo, por esta razão resolveu-se utilizar um algoritmo de tarefas sucessivas pré-programadas, baseado na previsão de acontecimentos. Este algoritmo é constituído por sucessões de ciclos intermédios, os quais, são activados e desactivados através da informação externa adquirida pelos sensores (webcam, sensor da passadeira, sensor do túnel, sensores dos semáforos e sensores de contacto), cuja interpretação indica a fase ou posição ao longo do percurso. Em cada um destes ciclos são tidos em conta vários aspectos: interpretação adequada da imagem obtida face à respectiva situação ou posição na pista, ver Figura 38, prioridade de tarefas, acções reactivas, utilização de *timeout's* nas fases de transição de tarefas, ver Figura 40, na perca forçada da linha e na detecção da passadeira, armazenamento de valores relativos à trajectória para o cálculo de trajectórias na fase de movimento sem realimentação de médio nível, detecção de fim de prova, comunicação com a aplicação *Simulink* e escrita e leitura das saídas digitais. Um organigrama mais detalhado do algoritmo de controlo da terceira manga, encontra-se no diagrama da Figura 40.

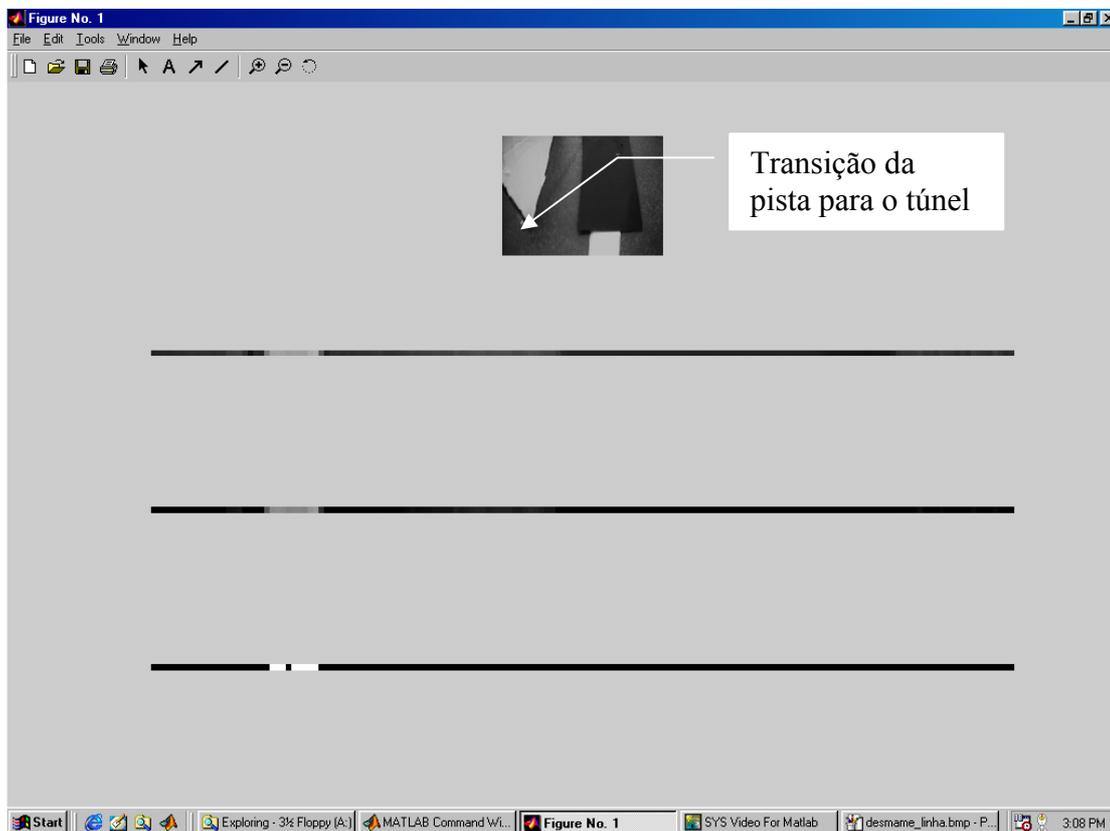


Figura 38 – imagem da transição da linha na entrada do túnel

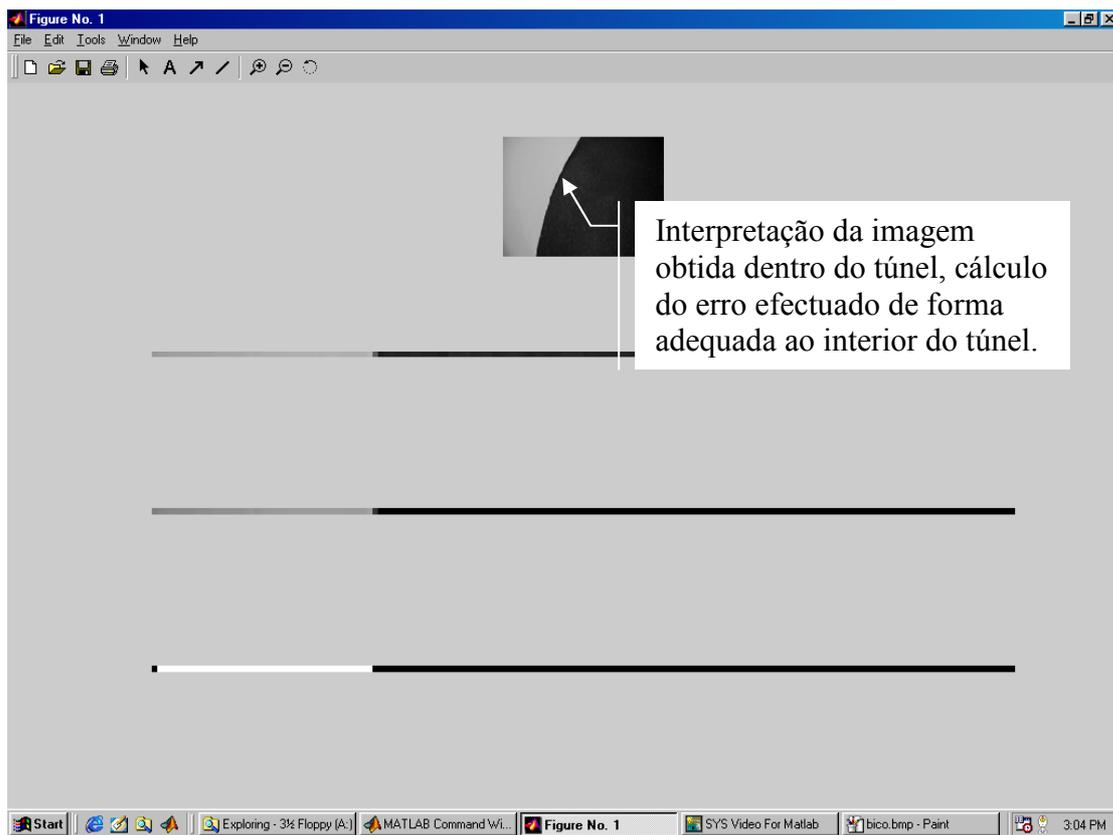


Figura 39 – imagem capturada dentro do túnel

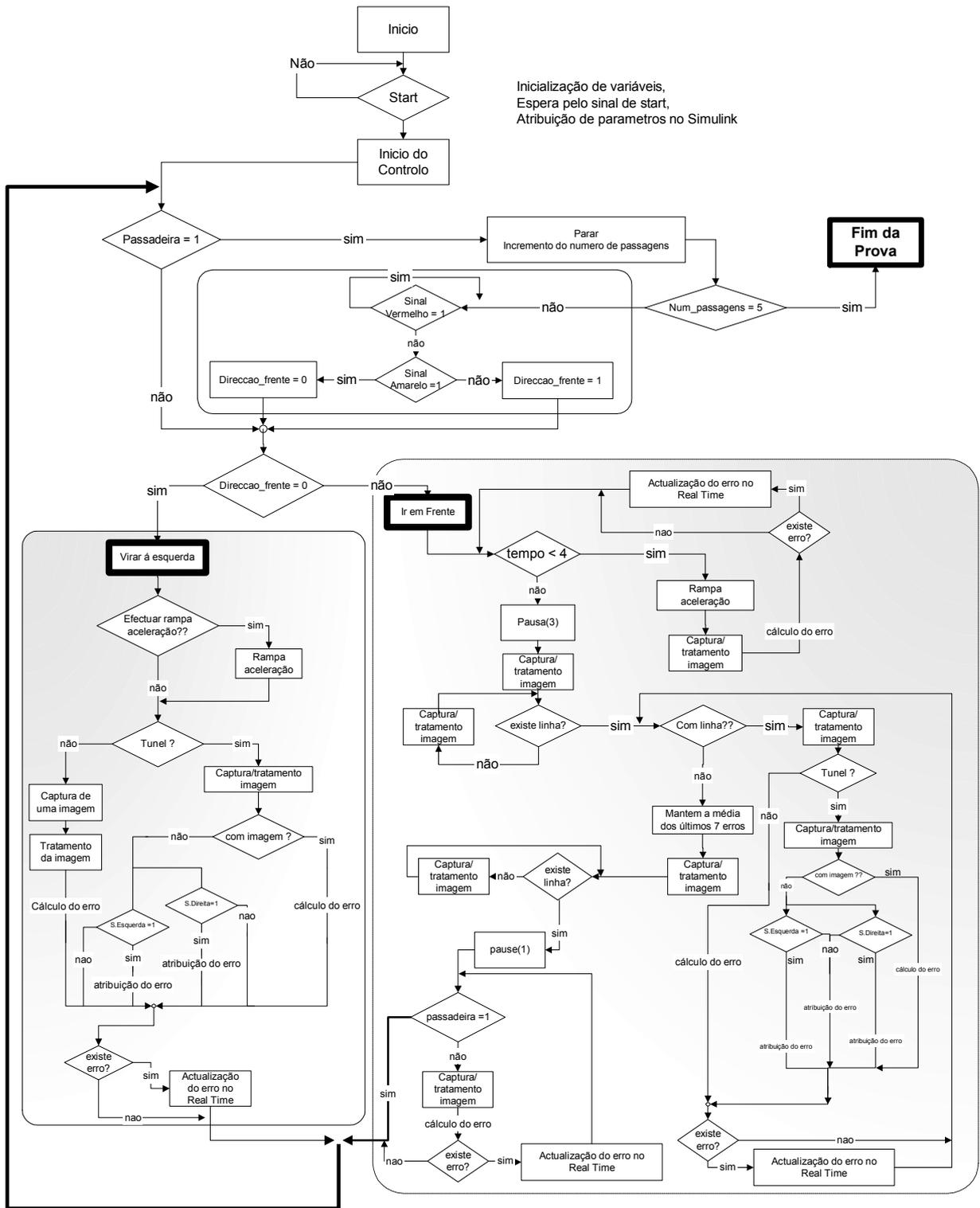


Figura 40 - fluxograma de controlo da 3ª manga

7.9. Alternativas de Interpretação da imagem

A interpretação da imagem foi efectuada utilizando apenas uma linha da imagem para o cálculo do desvio do roto face à trajectória desejada. Esta análise não é muito eficiente quando ocorrem desvios angulares da linha na imagem. Uma análise mais eficiente teria em conta tanto o *offset* da linha ao centro da imagem como também a inclinação desta (ver Figura 41), porém a implementação prática de uma interpretação deste tipo não obteve resultados positivos. A justificação deste facto deve-se, julgamos nós, ao valor de importância relativo, a atribuir a cada um dos modos de análise, serem difícil de avaliar e serem também, valores dinâmicos que dependem da própria imagem. Outra justificação baseia-se na insuficiência de reacção por parte dos motores aquando do teste do algoritmo aliado ao curto prazo de preparação da prova que tínhamos que cumprir.

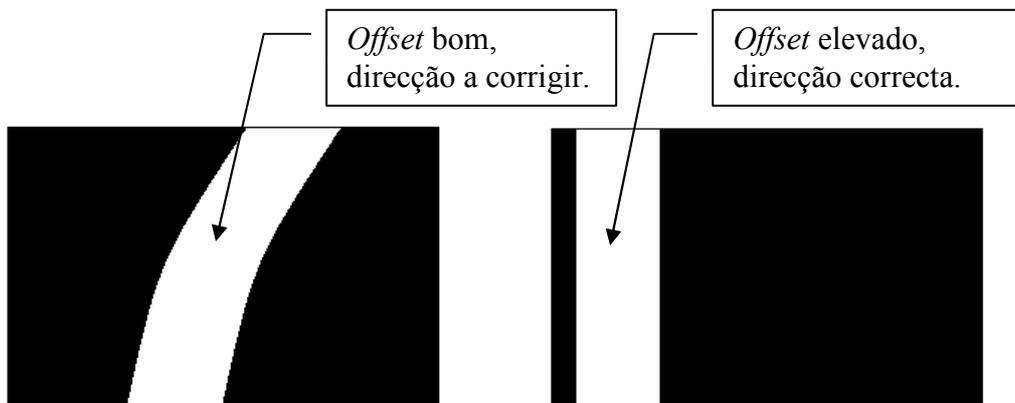


Figura 41 – situações variadas do posicionamento do robô

Outra alternativa idealizada era a de interpretar a imagem em duas zonas, em que a zona correspondente ao maior alcance da imagem serviria para planeamento da trajectória do robô tendo em conta a direcção futura a tomar. Limitando assim ou acentuando a mudança de direcção do veículo consoante a situação. Isto é, ainda que, por exemplo, a imagem central indicasse uma correcção elevada na trajectória, a imagem relativa à pista adiante, poderia atenuar essa correcção caso se revelasse uma direcção contrária imediatamente a seguir.

7.10. Modelo geométrico relacionando a imagem com a ω do CM do robô

A utilização de um controlador de médio nível, permite corrigir-se a trajectória por forma a percorrer a pista sem, no entanto, ser necessário calcular-se uma relação matemática entre a interpretação da imagem e a direcção a tomar. A utilização de um modelo deste género implicaria efectuar-se o controlo com base nas grandezas reais envolvidas e respectivas funções de transferência. No presente caso a ausência de realimentação de baixo nível aliado ao desconhecimento exacto da relação entre a saída analógica da placa e a velocidade real correspondente, contribuiu para se efectuar o controlo sem qualquer modelo físico - matemático do veículo. Porém e a título de curiosidade,

efectuámos o calculo do modelo imagem - direcção a tomar, embora não tivesse sido tentado implementa-lo na prática.

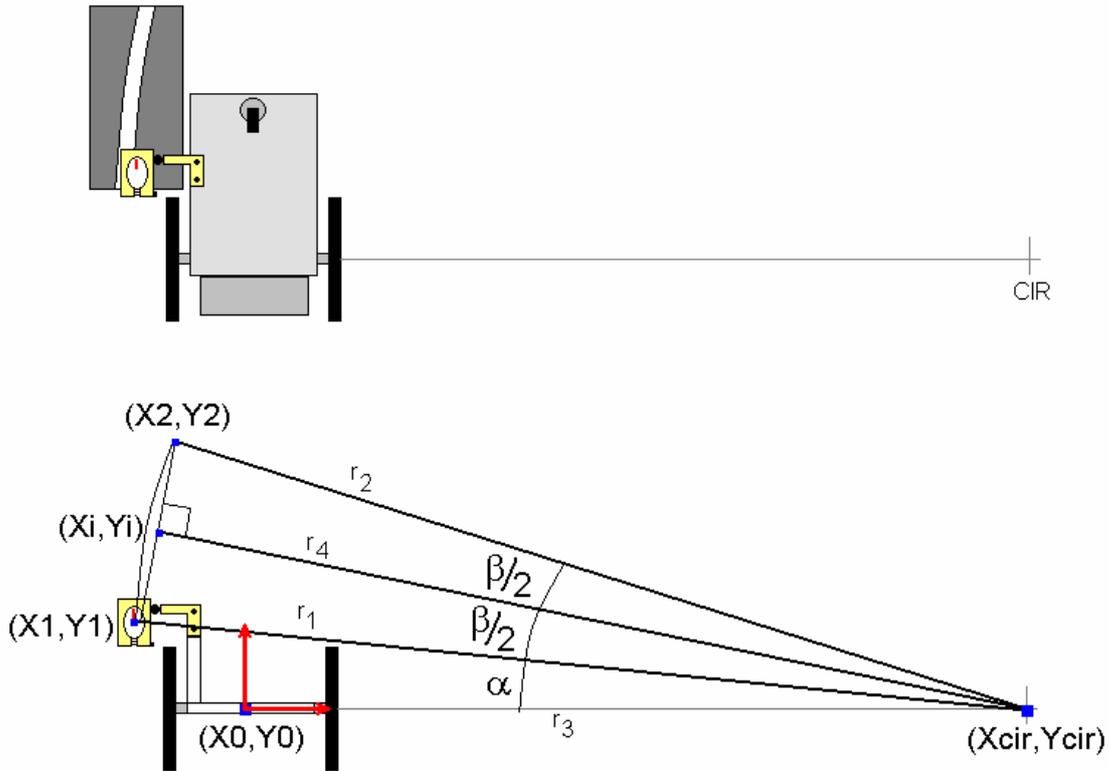


Figura 42 – ilustração dos pontos de interesse do robô no calculo da sua orientação

Facilmente se obtêm expressões para os ângulos representados na Figura 42, os pontos assinalados representam o movimento do robô para um ciclo do algoritmo.

$$\arctg\left(\frac{y_1}{x_1 + x_{cir}}\right) = \alpha \quad ; \quad \arctg\left(\frac{y_2}{x_2 + x_{cir}}\right) = \alpha + 2 \cdot \beta \quad ; \quad \arctg\left(\frac{y_i}{x_i + x_{cir}}\right) = \alpha + \beta \quad (7.1)$$

Tendo em conta as expressões trigonométricas gerais para a tangente do produto e para a tangente de uma soma respectivamente:

$$\operatorname{tg}(2 \cdot a) = \frac{2 \cdot \operatorname{tg}(a)}{1 - \operatorname{tg}(a)^2} \quad ; \quad \operatorname{tg}(a + b) = \frac{\operatorname{tg}(a) + \operatorname{tg}(b)}{1 - \operatorname{tg}(a) \cdot \operatorname{tg}(b)}$$

Assim vem sucessivamente:

$$\left\{ \begin{array}{l} \operatorname{tg}(\alpha) = \frac{y_1}{x_1 + x_{cir}} \\ \operatorname{tg}(\alpha + 2 \cdot \beta) = \frac{y_2}{x_2 + x_{cir}} \\ \operatorname{tg}(\alpha + \beta) = \frac{y_i}{x_i + x_{cir}} \end{array} \right. \quad (7.2)$$

$$\Leftrightarrow \begin{cases} \operatorname{tg}(\alpha) = \frac{y_1}{x_1 + x_{cir}} \\ \frac{\operatorname{tg}(\alpha) + \operatorname{tg}(2\beta)}{1 - \operatorname{tg}(\alpha) \cdot \operatorname{tg}(2\beta)} = \frac{y_2}{x_2 + x_{cir}} \\ \frac{\operatorname{tg}(\alpha) + \operatorname{tg}(\beta)}{1 - \operatorname{tg}(\alpha) \cdot \operatorname{tg}(\beta)} = \frac{(y_1 + y_2)/2}{(x_1 + x_2)/2 + x_{cir}} \end{cases} \quad (7.3)$$

$$\Leftrightarrow \begin{cases} \frac{\left(\frac{y_1}{x_1 + x_{cir}}\right) + \operatorname{tg}(2\beta)}{1 - \left(\frac{y_1}{x_1 + x_{cir}}\right) \cdot \operatorname{tg}(2\beta)} = \frac{y_2}{x_2 + x_{cir}} \\ \frac{\left(\frac{y_1}{x_1 + x_{cir}}\right) + \operatorname{tg}(\beta)}{1 - \left(\frac{y_1}{x_1 + x_{cir}}\right) \cdot \operatorname{tg}(\beta)} = \frac{(y_1 + y_2)/2}{(x_1 + x_2)/2 + x_{cir}} \end{cases} \quad (7.4)$$

$$\Leftrightarrow \begin{cases} \frac{\left(\frac{y_1}{x_1 + x_{cir}}\right) + \left(\frac{2 \cdot \operatorname{tg}(\beta)}{1 - \operatorname{tg}^2(\beta)}\right)}{1 - \left(\frac{y_1}{x_1 + x_{cir}}\right) \cdot \left(\frac{2 \cdot \operatorname{tg}(\beta)}{1 - \operatorname{tg}^2(\beta)}\right)} = \frac{y_2}{x_2 + x_{cir}} \\ \frac{\left(\frac{y_1}{x_1 + x_{cir}}\right) + \operatorname{tg}(\beta)}{1 - \left(\frac{y_1}{x_1 + x_{cir}}\right) \cdot \operatorname{tg}(\beta)} = \frac{(y_1 + y_2)/2}{(x_1 + x_2)/2 + x_{cir}} \end{cases} \quad (7.5)$$

No sistema de equações não lineares (7.5) existem duas incógnitas : β e x_{cir} . Em que a primeira representa metade da variação angular na trajectória do veículo durante um ciclo no algoritmo, portanto para se obter a velocidade angular a fornecer aos motores bastava admitir uma velocidade do CM e calcular a velocidade angular usando esse valor. A segunda incógnita representa a coordenada do centro de rotação instantâneo do veículo nessa iteração do algoritmo. A resolução do sistema de E.N.L.(7.5) foi obtida (7.6) utilizando-se a *toolbox Symbolic* do *MatLab* . De notar que a expressão do ângulo de viragem dá o resultado zero no caso do ponto de chegada estar alinhado longitudinalmente com o de partida (coordenadas segundo XX iguais), e que, a expressão da posição do centro

de rotação instantâneo dá o resultado infinito no mesmo caso. Sendo deste modo verificado a coerência do modelo.

$$\beta = \operatorname{arctg} \left(\frac{x_1 - x_2}{y_1 + y_2} \right) \quad (7.6)$$

$$x_{cir} = -\frac{1}{2} \cdot \frac{Y_1^2 - Y_2^2 + x_1^2 - x_2^2}{x_1 + x_2}$$

7.11. Implementação por software do uso de um motor passo-a-passo como motor DC

O tipo de motor do veículo é um motor passo-a-passo híbrido, isto significa que o funcionamento resulta de uma variante que engloba os motores de íman permanente com a tecnologia de relutância variável. As características destes motores são binário aproximadamente constante, velocidades de rotação baixas e boa precisão de posicionamento sem necessidade de realimentação. A unidade de controlo deste tipo de motor possui três sinais principais: *clock*, *direcção*, *energise*. A velocidade deste motores é definida através do *clock*, ou seja, do numero de pulsos por segundo e o deslocamento angular pelo número total de pulsos.

A utilização deste tipo de motores através de controlo em velocidade é limitada pelo facto de não ser possível variar a taxa de pulsos de modo aleatório, ou seja é necessário passar por taxas de pulsos intermédias com um intervalo de discretização relativamente reduzido, caso contrário os campos magnéticos do rotor e do estator dessincronizam-se bloqueando o motor.

Conceptualmente existiriam duas soluções para evitar o bloqueamento do motor, uma das soluções era aumentar a taxa de imagens por segundo de modo ao erro associado a cada imagem ser menor e conseqüentemente a correcção exigida ao motor por iteração também ser menor, todavia a utilização do S.O. *Windows 98* juntamente com o *MatLab* e o *VFM*, limitou a taxa de imagens por segundo a cerca de cinco, sendo esta solução posta de parte.

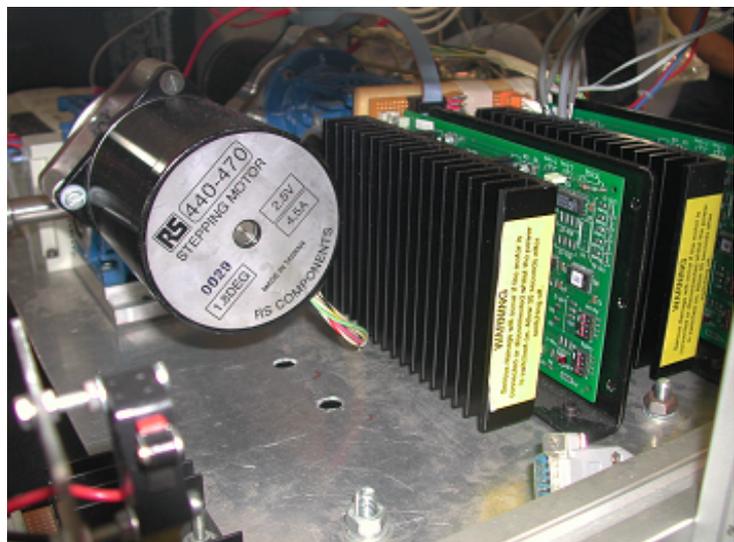


Figura 43 - pormenor do motor e drives de potência

Outra forma de ultrapassar esta limitação seria a utilização de um módulo (*por software ou hardware*), para gerar taxas de pulsos intermédias de discretização adequada, neste caso implementou-se directamente no *MatLab*. Utilizou-se um módulo integrador em que era indicado o valor superior, o valor inferior e a aceleração, Figura 44. Os valores indicados dependiam da variação da taxa de pulsos ser crescente ou decrescente. Porém aplicamos esta variação ao erro introduzido na aplicação *Simulink* através do *MatLab*, ao invés de implementar essa função directamente nas saídas analógicas correspondentes às velocidades

dos motores. A consequência desse módulo foi a influência no controlo dos motores já que o efeito do controlador PD foi alterado por este módulo. Assim, apesar do sistema de variação de frequências se mostrar eficaz, o controlo foi alterado, tendo o comportamento do veículo piorado, então optou-se por não implementar este sistema no algoritmo da prova.

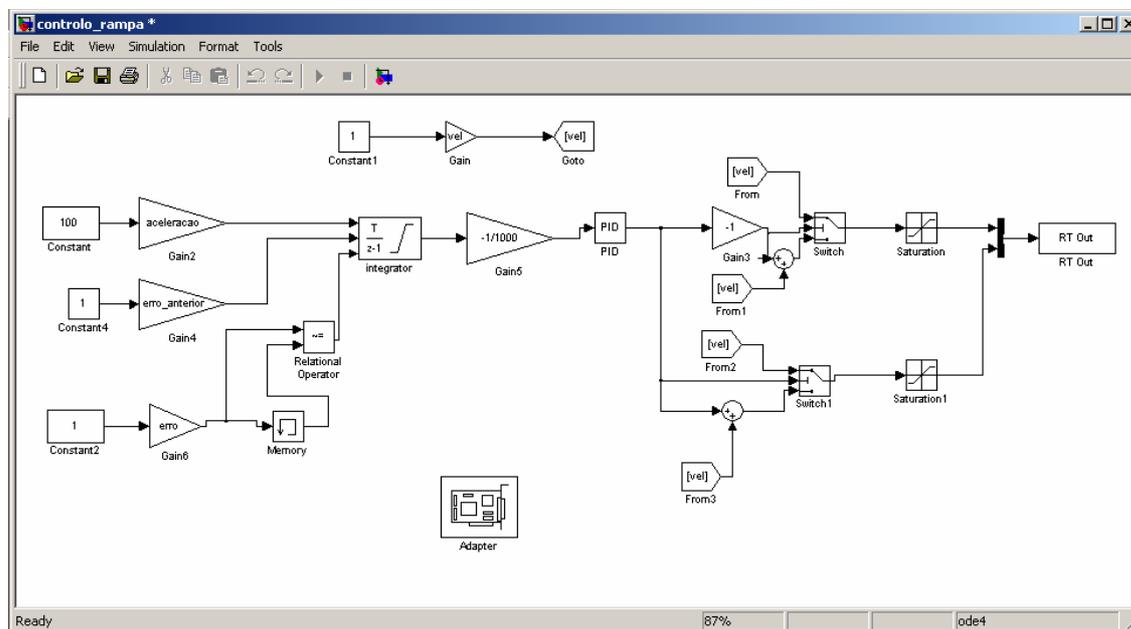


Figura 44 – diagrama de blocos da implementação passo-a-passo motor dc

7.12. Comentários finais

A iniciativa de participar na prova do festival nacional de robótica implicou uma transformação considerável na estrutura, controlo e sensorização do sistema robótico existente. Todo um conjunto de adaptações e modificações efectuadas à estrutura e transmissão por forma a possibilitar o uso de rodas e mesmo a melhorar a resistência mecânica do conjunto, possibilitaram a transformação reversível do tipo de locomoção e controlo. Contudo as intervenções ao nível mecânico ou no hardware não ficaram por aqui, foi ainda necessário projectar e construir alguns suportes para fixação dos novos elementos sensoriais assim como os novos elementos de controlo, nomeadamente o computador de secretária. Todo este processo ainda que de carácter relativamente simples, teve como consequência uma limitação na calendarização e planeamento dedicado ao controlo (implementação de algoritmos) e sensorização do veículo, sendo deste modo justificado, o uso de uma linguagem de programação bem como de algumas aplicações informáticas longe de serem as ideais para controlo em velocidade de um veículo autónomo utilizando visão e sensores infravermelhos.

No conto geral o desempenho do robô revelou-se bastante aceitável face às restrições quer de velocidade, quer de potência. Saldando-se pelo terceiro lugar na classificação final da classe UIP, sendo o único concorrente que apresentava dois modos de locomoção, mas com pernas apenas para demonstração.

8. Participação no Fórum Ciência Viva

A Associação Ciência Viva é uma Agência Nacional para a Cultura Científica e Tecnológica foi criada como uma unidade do Ministério da Ciência e da Tecnologia, com o intuito de apoiar acções dirigidas para a promoção da educação científica e tecnológica na sociedade portuguesa, com especial ênfase nas camadas mais jovens e na população escolar dos ensinos básico e secundário.



Os intervenientes nos projectos *Ciência Viva* participam anualmente num encontro orientado para a divulgação, debate e reflexão sobre as actividades desenvolvidas no âmbito dos projectos.

8.1. Objectivos da participação

Em consequência de uma classificação honrosa no “Robótica2002” foi endereçado o convite para no contexto do Fórum, participar na área da “Robótica ao Vivo”, cujo ponto de interesse era a troca de experiência e de conhecimentos na área da robótica, juntando investigadores, professores e alunos.

Foram também, convidadas outras equipas participantes no Festival Nacional “Robótica 2002”, das classes UIP, ESP e Micro-Rato.

8.2. Participação

O robô, em modo hexápode (MecHex), revelou-se um grande sucesso por parte do publico, na sua maioria jovens estudantes, mostrando especial interesse na forma da locomoção. O mesmo sucedeu com o robô no modo rodas (QuinamaWheel), devido á sua mutação, onde o publico reconhecia a base como pertencente ao MecHex.

A troca do tipo de locomoção, pernas por rodas, tornou a acontecer no dia seguinte para finalizar a nossa presença no Fórum.



Figura 45 - imagens obtidas no Fórum Ciência Viva

8.3. Comentários

Nota-se o crescente interesse, por parte do público em geral e do mais jovem em particular, na evolução da robótica em Portugal, incentivando o seu desenvolvimento.

Serve este tipo de actividades/demonstrações para publicitar a Universidade de Aveiro e em particular o Departamento de Engenharia Mecânica, junto da população estudantil.

9. Sensorização do sistema robótico MecHex

Na última etapa do Projecto de Automação, fez-se a sensorização do robô hexápode de forma a cumprir todos os objectivos propostos inicialmente. A sensorização do robô fôra abordada aquando do festival “Robotica2002”, mas apenas na versão “*QuinamaWheel*” e não na de Hexápode. Assim, todo o conhecimento adquirido durante a preparação da prova foi aplicado na sensorização do hexápode, mas com a diferença de se utilizar simultaneamente o PC e o PLC comunicando entre ambos via DDE. Deste modo adaptou-se um PC para a montagem no robô e, utilizando uma *webcam*, pretendeu-se possibilitar ao robô a interpretação de ordens de locomoção através da orientação de uma seta preta num fundo branco, e também a sua paragem de emergência e activação dependendo da cor do respectivo placar gráfico, vermelho ou verde, ver Figura 47. Por último a cor azul implica a paragem definitiva. Uma representação do hardware e respectivo fluxo de informação visualiza-se na Figura 46.

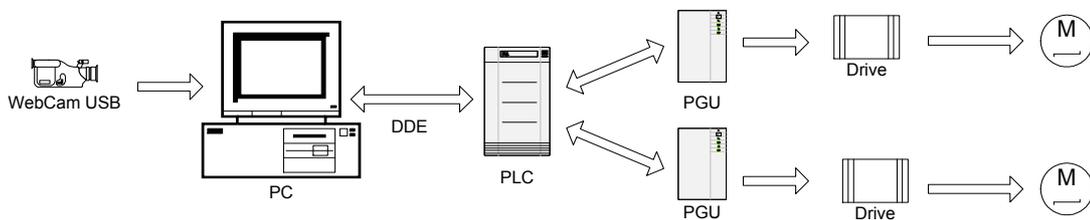


Figura 46 - diagrama de funcionamento da sensorização

9.1 Sistema de visão e sinais de interpretação

Uma aplicação em *MatLab* utiliza uma função de aquisição de imagens, as quais são interpretadas através de operações de análise de cor e posteriormente, binarizadas e transformadas por forma a obter a orientação de uma seta. A análise da cor baseia-se na comparação numérica das três matrizes RGB da imagem, verificando a intensidade de cor dominante, de forma a identificar “Stop”(vermelho), “Go”(verde) e “End”(azul), representando uma situação de emergência, fim de emergência e fim de funcionamento de ciclo automático, respectivamente.

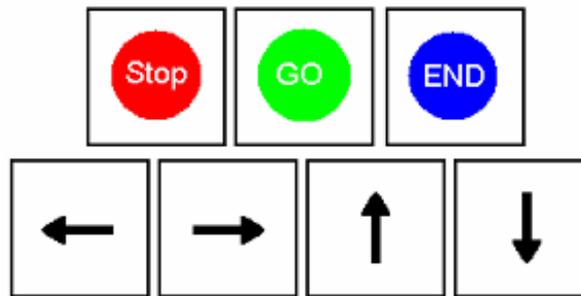


Figura 47 - indicações gráficas possíveis

A interpretação da orientação, é efectuada através do cálculo de dois pontos da seta, sendo um associado à “ponta” da seta e outro associado ao corpo permitindo calcular-se facilmente o ângulo de orientação da seta. Esta informação é depois traduzida em acções, cuja execução é efectuada pelo PLC e respectivas Cartas de Pulsos (PGU’s), através da transmissão de informação entre o PLC e o PC via DDE.

9.1.1. Algoritmo usado para determinação da orientação

A obtenção da orientação baseia-se no cálculo do ângulo, λ , Figura 48, formado entre um segmento, resultante entre dois pontos da seta, e a horizontal, os pontos do segmento são obtidos pelo algoritmo de interpretação, elaborado em *MatLab* e recorrendo à *toolbox* de tratamento de imagem e da função “*bwmorph*”.

Após a captura de uma imagem, esta é interpretada através de um processo de comparação dos valores das três matrizes RGB, esta comparação serve para identificar a existência ou não dos estados, início/fim de emergência e fim de controlo automático por visão através da cor dominante, numa segunda fase é efectuada a identificação da orientação da seta.

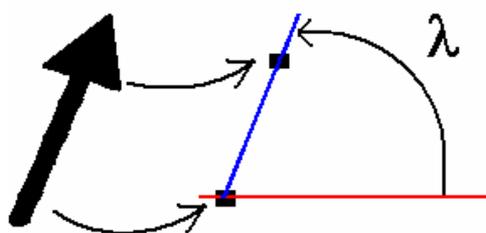


Figura 48 – ilustração cálculo da orientação

Da imagem binarizada, resulta uma nova imagem através da operação “*Shrink*”, com o objectivo se obter apenas um ponto, este será o ponto de referência para a obtenção do segmento fundamental para o cálculo da orientação. Uma nova imagem é obtida, partindo da inicial, por um processo de “*erode*”, de forma a eliminar parte do corpo da seta, resultando, devido á geometria da seta, numa área mais ou menos triangular, sofrendo de seguida um “*shrink*” de forma a originar outro ponto, estes dois pontos são utilizados para a determinação da orientação da seta, Figura 48, através da função arco tangente de modo a obter a informação de direcção. Caso sejam detectados mais de dois pontos, não será calculada a orientação. Uma sequência das imagens sucessivas pode ver-se na Figura 49 e o respectivo diagrama associado à sequência das figuras pode ver-se na Figura 50.

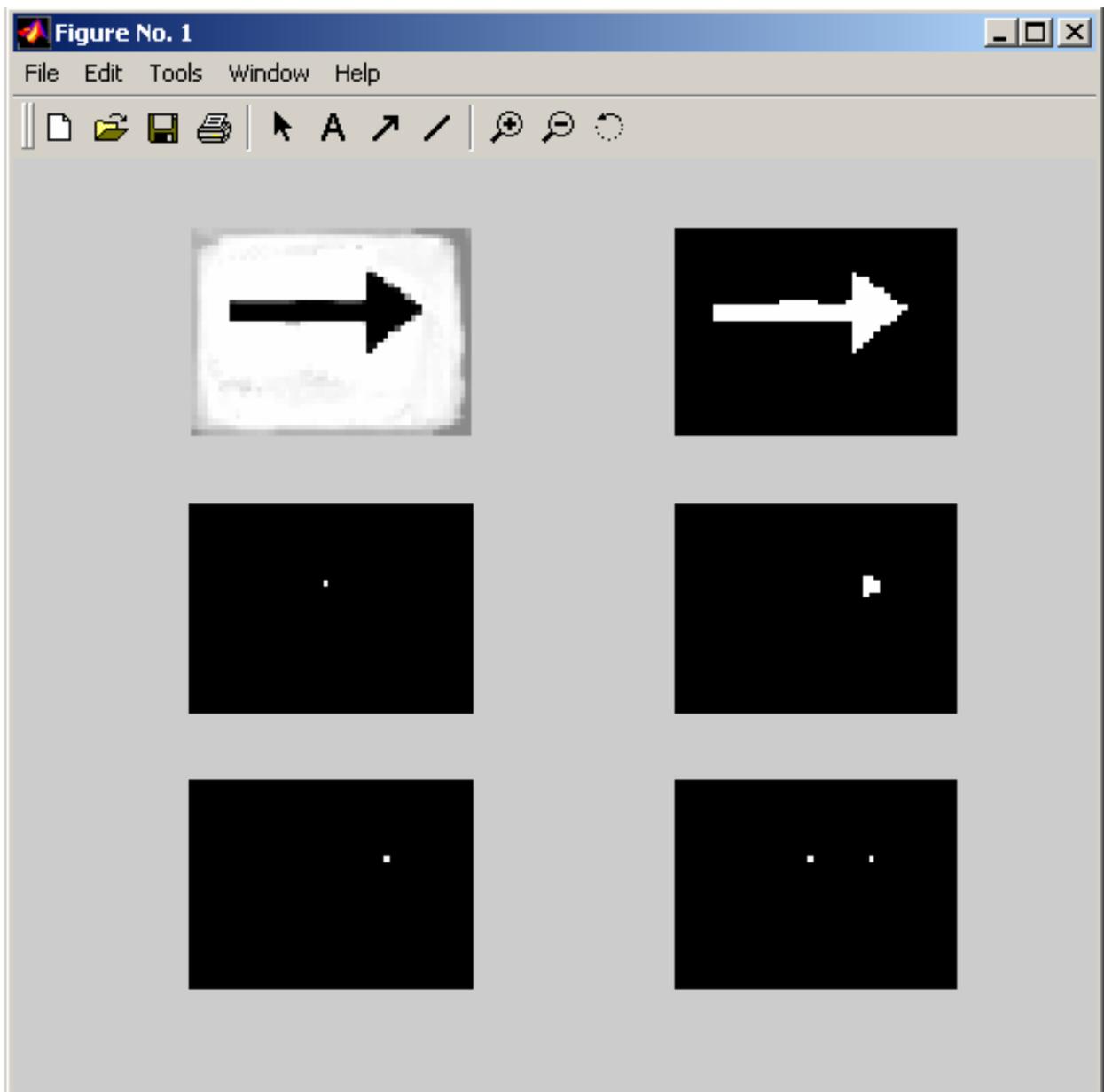


Figura 49 - sequência de determinação da orientação da seta

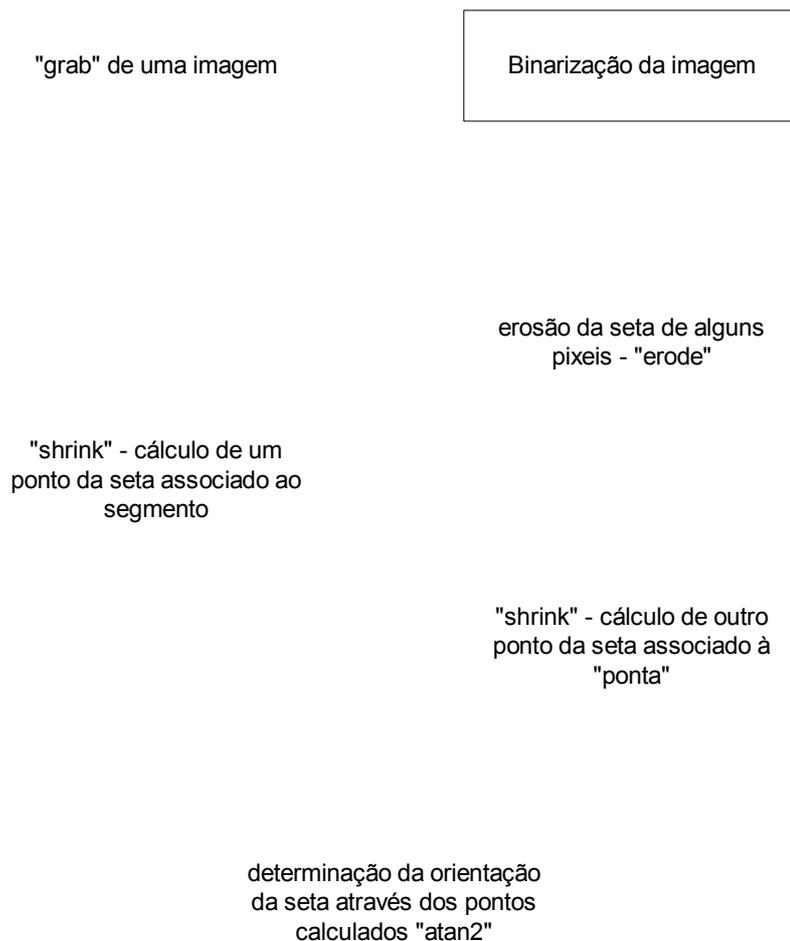


Figura 50 - sequência de determinação da orientação

9.1.2. Algoritmo para diferenciação do painel de controlo face ao ambiente

Esta solução alternativa revelou alguns pontos fortes exceptuando o tempo de execução do algoritmo. Esta abordagem difere da anterior no que respeita ao isolamento da seta porque ignora o ambiente exterior ao fundo onde é representada a indicação gráfica, isolando a indicação da imagem, Figura 51, no entanto o cálculo da orientação é realizado de forma semelhante.

A primeira imagem foi obtida pela *WebCam* sendo uma imagem real, a esta imagem tentou-se identificar e separar o fundo onde se encontra a seta do resto da imagem, isto foi efectuado através da identificação da cor do fundo da seta (neste caso uma folha branca), para tal utilizou-se a informação das três matrizes RGB da imagem real. A matriz resultante possui a branco a folha identificada, de seguida através da função “erode” é eliminado o ruído, posteriormente através da função “thicken”, é realizada uma expansão do branco sem eliminar objectos isolados, e obtemos apenas uma linha, ao realizar um “shrink” sobre essa linha obtemos apenas um ponto. As coordenadas desse ponto irão servir para, através do “bwselect”, identificar a seta na imagem correspondente ao isolamento da folha. A esta imagem é aplicado o procedimento anterior por forma ser identificado a orientação da seta.

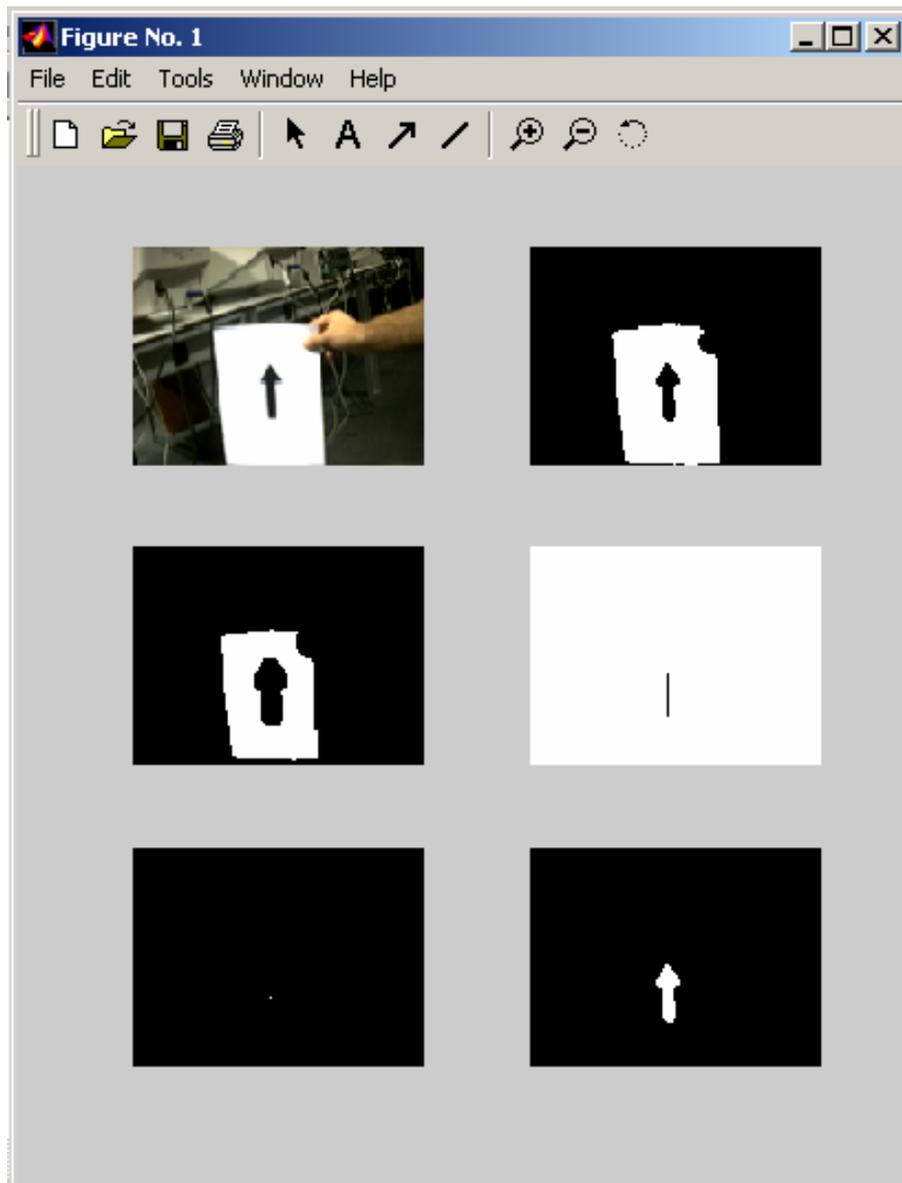


Figura 51 - sequência de interpretação da imagem

Para esta abordagem ter fundamento, o exterior ao fundo da seta, não deve assemelhar-se ao fundo onde está a seta, pois desse modo, torna-se muito difícil diferenciar a seta.

No diagrama da Figura 52, é possível visualizar-se a sequência de operações correspondentes à sequência de imagens da Figura 51, pela respectiva ordem.

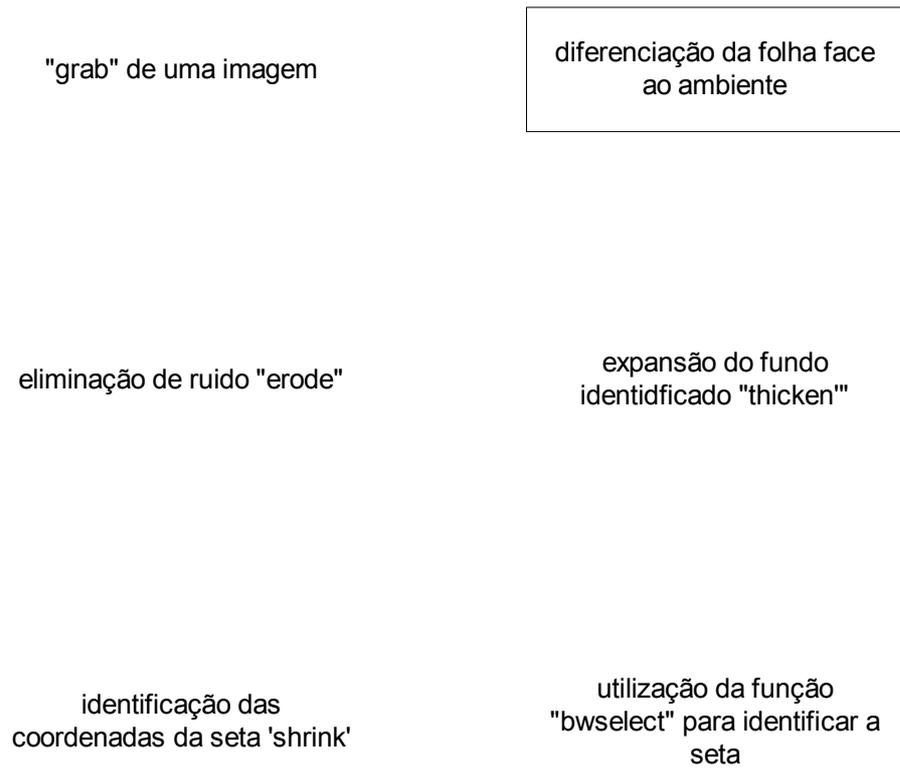


Figura 52 - diagrama de interpretação da imagem

9.1.3. Algoritmo geral de funcionamento - *MatLab*

Um algoritmo principal que comunica com o autómato, em função da interpretação da imagem, usando os métodos de interpretação descritos anteriormente, é o responsável pelo controlo automático do robô. Uma descrição geral pode ver-se na Figura 53.

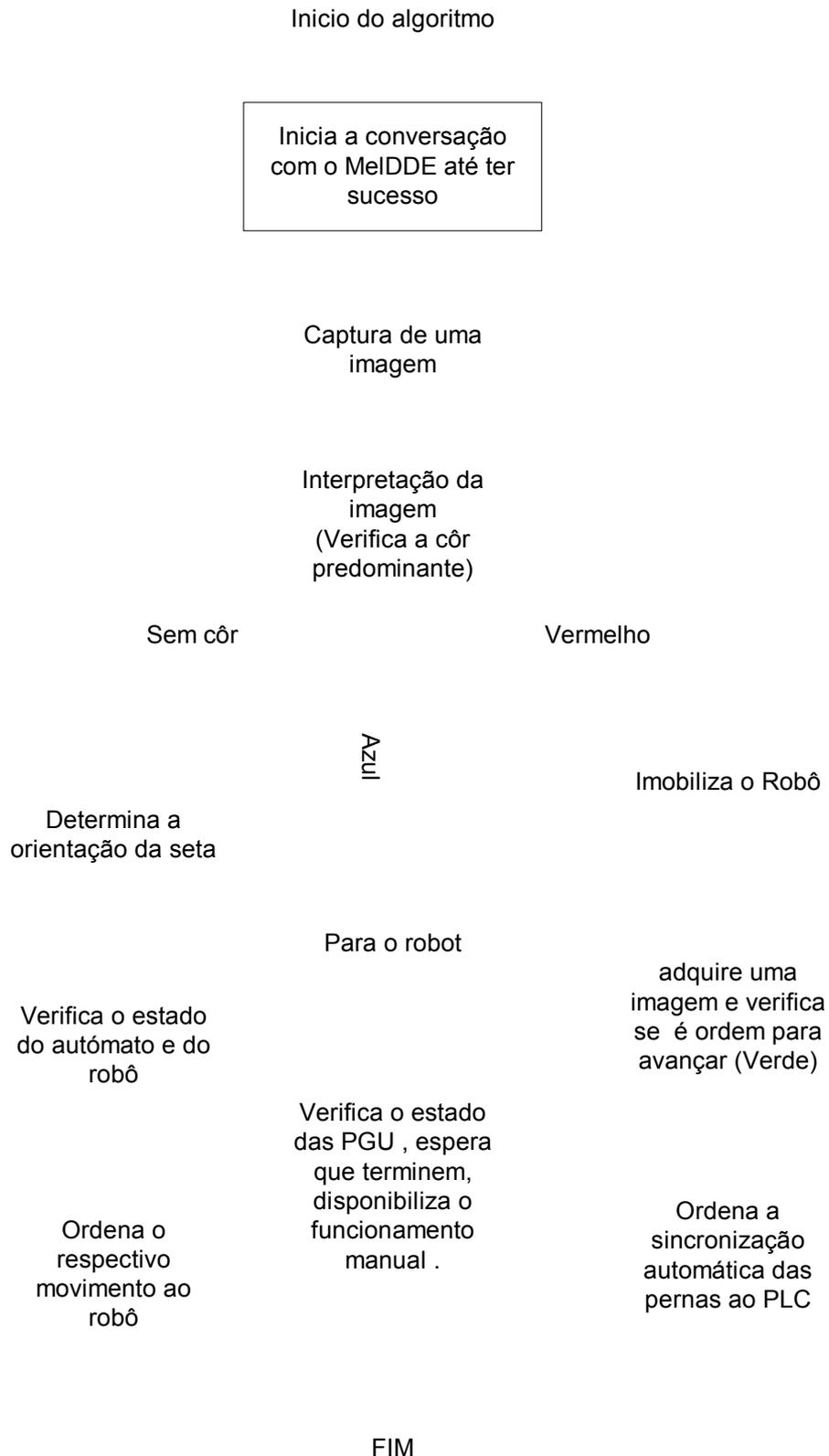


Figura 53 - diagrama de controlo *MatLab*

9.2. Programa PLC com sincronização automática

Tendo em vista a implementação do controlo do Hexápode através de informação obtida por visão, foi necessário alterar o programa PLC já existente, de forma a permitir o funcionamento manual, através da consola e o automático, através do PC.

Quando uma indicação/ordem gráfica é validada, é verificado/comparado, no PLC, o estado da memória correspondente a essa ordem, caso o seu estado seja diferente do desejado, então é enviada a ordem e alterado o estado dessa memória.



O programa PLC anterior foi elaborado com o seguinte princípio, para activar as ordens possíveis, avanço, recuo, virar esquerda e virar direita era necessário, através da consola, activar o botão de pressão adequado, o cancelamento ou alteração da direcção desejada bastava activar o botão da direcção respectivo, a execução do algoritmo do autómato aguardava a execução da ultima ordem antes de iniciar a nova ordem, sem existir qualquer perturbação no sistema. Este pormenor deve-se ao facto de não ser facilmente possível alterar/interromper uma geração de pulsos, por parte das *PGU's*, quando iniciada, sendo necessário permitir a geração completa dos pulsos.

As alterações ao programa anterior basearam-se na introdução de bits de memória em série com as restantes para activar/desactivar o fluxo de instruções.

No modo de comando automático, sendo o PC responsável pelo controlo do autómato e consequentemente da cadeia de accionamento do robô, para além da ordem de direcção existem ainda as possibilidades de “Stop”, “Go” e “End”, representando uma situação de emergência, fim de emergência e fim de funcionamento de ciclo automático, respectivamente.

Quando a indicação gráfica é a de emergência, é necessário realizar o *Output Disable Input*, impedir as *drives* de alimentar os motores, pois apenas deste modo se garante a imobilização do robô, sendo necessário anular a ordem anterior para evitar que as *PGU's* continuem a gerar os pulsos necessários correspondentes á direcção atribuída anteriormente.

Caso a ordem seja “frente” ou “trás”, basta pulsar as respectivas entradas, caso seja “esquerda” ou “direita”, é necessário interromper a geração de pulsos, nas ordens intermédias enviadas às *PGU's*, aquando destes movimentos, pois estes são compostos por várias etapas de “sub-movimentos”.

O programa PLC existente foi modificado por forma a poder executar novas ordens do PC, nomeadamente a paragem de emergência imediata, e a sincronização automática das pernas. Esta sincronização das pernas é justificada pelo facto de poder acontecer a paragem de emergência durante a fase de rotação do robô em que as pernas se dessincronizam durante uma fase desse ciclo, sendo necessário a sua sincronização antes de recomeçar o movimento.

Foram assim criados novos POU's (program organization unit) activados através de memórias internas do PLC directamente pelo algoritmo em *MatLab* via DDE, Figura 54. A sincronização das pernas é efectuada de forma independente e separadamente, para tal são utilizados os sensores indutivos sendo ordenado um movimento de carácter pulsante e de velocidade reduzida, por forma a facilitar a sincronização, até à detecção da perna por parte do sensor, a outra perna é depois sincronizada da mesma forma. Esta opção de sincronização alternada e não simultânea justifica-se para reduzir a possibilidade de perda de estabilidade do robô.

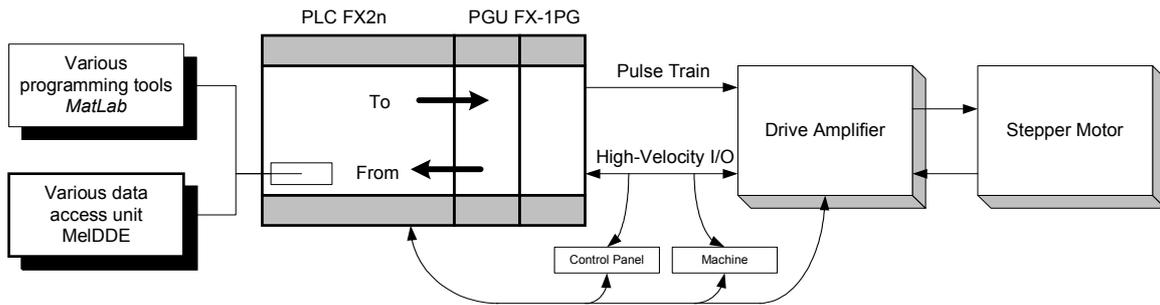


Figura 54 – diagrama de funcionamento geral do PLC/PGU's

Uma descrição do algoritmo do plc pode ser visualizado no diagrama da Figura 55.

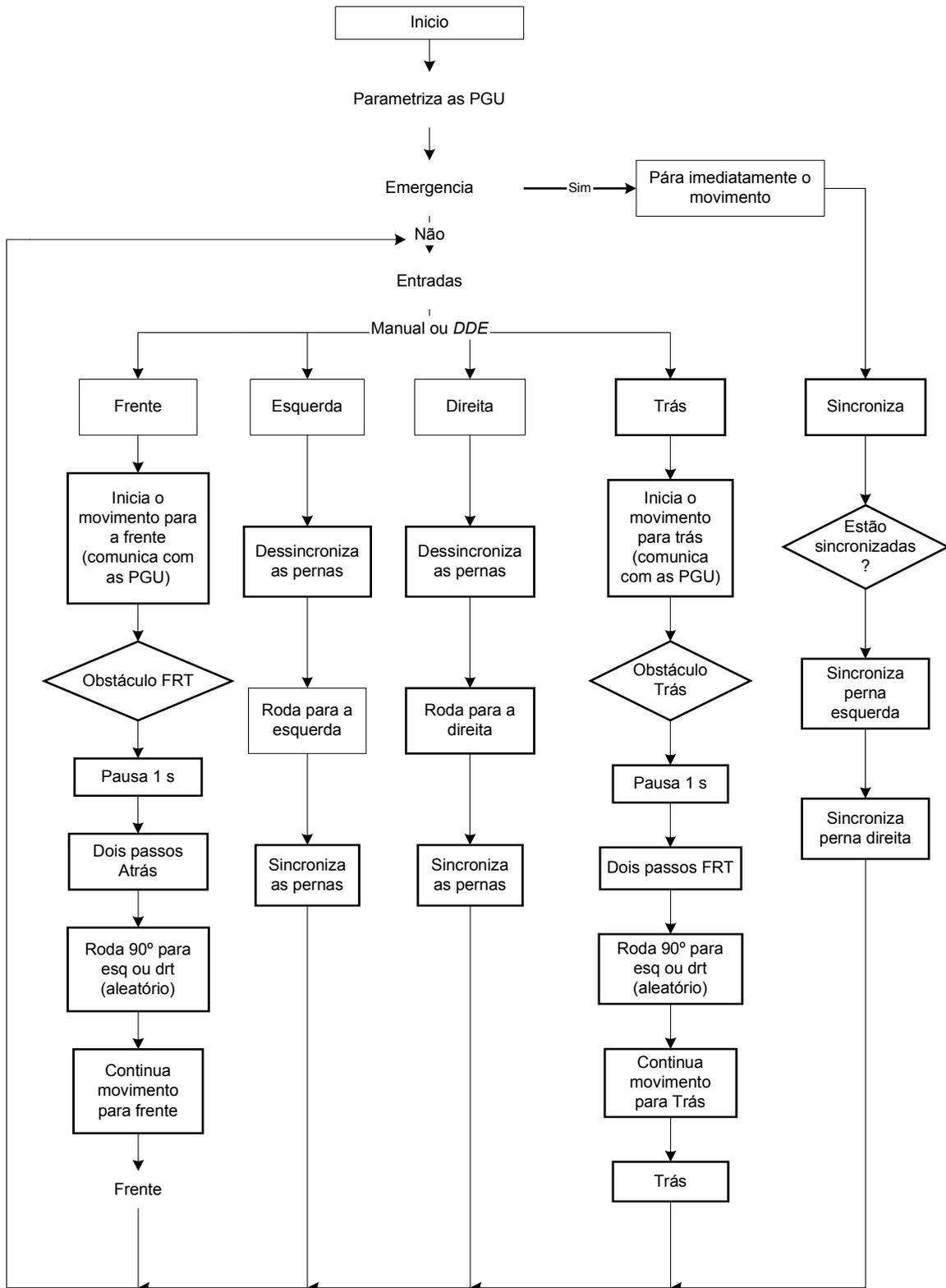


Figura 55 - diagrama do algoritmo do PLC

9.3 Comunicação PC-PLC

Utilizando-se o *software MelDDE* é possível comunicar de forma transparente com o autómato, ou seja não é necessário ter em conta o meio físico de comunicação. Para tal no algoritmo em *MatLab* inicia-se uma conversa com o *MelDDE* na qual o Servidor é o *MelDDE* e o *MatLab* o Cliente, Figura 56. Assim, cada variável do autómato passa a ser reconhecida como um *Item* e, desta forma, o seu valor pode ser lido e modificado. Utilizando-se as funções do *MatLab* “*ddepoke*” e “*ddereq*” consegue-se escrever e ler nas variáveis do autómato, respectivamente.

No algoritmo de controlo é iniciada uma conversa com o *MelDDE*, sendo depois adquirida e interpretada uma imagem, após a interpretação da mesma, é enviada a respectiva ordem para o autómato, porem antes de ser enviada é efectuada uma análise ao autómato por forma a verificar o estado do robô. Isto é se, por exemplo, o movimento do robô naquele instante ser igual à respectiva ordem o algoritmo não repete a ordem, se o estado de movimento for diferente da ordem então o algoritmo continua a monitorar o estado por forma a identificar a finalização desse movimento, e posteriormente ordenar a ordem respectiva.

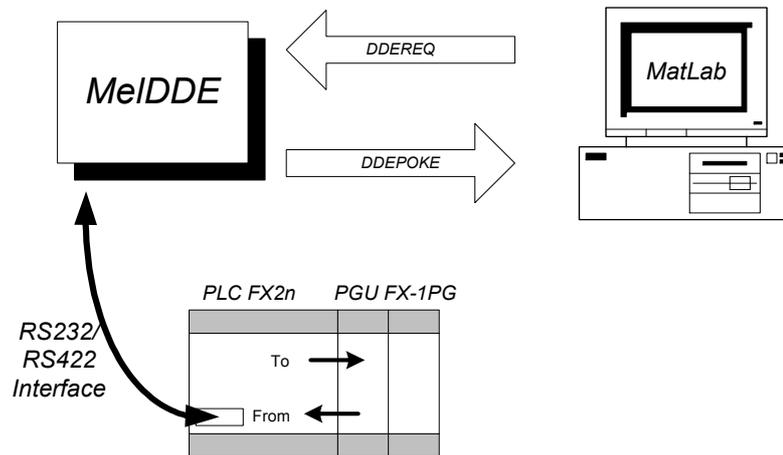


Figura 56 - comunicação PC – *MelDDE* - PLC

10. Conclusões

Neste período final da Licenciatura, foram aplicados os conhecimentos adquiridos ao longo da mesma, abrangendo de uma forma geral as principais áreas da Engenharia Mecânica, por forma à realização do projecto final de automação. Este trabalho de carácter notoriamente didáctico, pois uma utilização real do robô implicaria necessariamente uma re-engenharia, quer a nível estrutural quer ao nível de controlo, nomeadamente no número de actuadores independentes, revelou-se um desafio interessante e multifacetado. Referindo de forma sucinta os vários assuntos abordados durante este projecto, podem-se destacar;

- Programação e parametrização de recursos industriais de controlo (PLC e PGU's)
- Estudo de um mecanismo através da análise cinemática e dinâmica, do qual se pretendia obter uma representação gráfica do seu movimento cinemático e quantificar-

se a exigência energética teórica para o seu funcionamento. Para tal foram abordadas e utilizadas metodologias de cálculo que se revelaram como ferramentas muito importantes na área da concepção em engenharia.

- Escrita, apresentação e publicação de um artigo na área da robótica, resultado do estudo anterior.
- Utilização de ferramentas de CAD, CAE e CAM, sendo o *SolidWorks* como software de modelação sólida de componentes mecânicos (CAD), o *CosmosWorks* na área de dimensionamento e teste da resistência mecânica (CAE) e por ultimo a utilização de um centro de maquinagem para fabrico de alguns componentes (CAM), onde os programas foram programados manualmente dada a simplicidade das peças.
- Utilização de visão artificial e de outros sensores como os infra-vermelho, no controlo de sistemas, cujo algoritmo de controlo possuiu um nível de complexidade relativamente elevada, permitindo mesmo a competição directa com outros robôs concebidos por áreas da engenharia mais vocacionadas para a programação.
- Uma pequena abordagem a circuitos eléctricos simples, nomeadamente VCO (*Voltage Control Oscillator*), ligações eléctricas de sensores e também ao modo de funcionamento de motores passo-a-passo.
- Integração de sistemas ou comunicação entre recursos, ligação de um PLC/PGU's e um PC através de uma comunicação transparente, via *DDE (Dynamic Data Exchange)* e interface *RS232/RS422*.

Estes métodos, ferramentas ou soluções supracitados foram abordados com o intuito modificar as potencialidades do robô cumprindo os objectivos inicialmente propostos, especificamente e de forma conclusiva podemos referir;

- o estudo da viabilidade de sistemas alternativos de locomoção foi abordado de forma exaustiva. Utilizando-se um modelo genérico para a simulação de variadas geometrias e respectivos cálculos energéticos. O *MatLab* foi utilizado como ferramenta matemática e gráfica, facilitando os cálculos efectuados. Este estudo permitiu concluir que a optimização, do tipo e parâmetros de locomoção, do robô dificilmente poderá evoluir de forma considerável, uma vez que apresenta um elevado número de variáveis dependentes, cuja optimização mutua é incompatível.
- As unidades de controlo e sensorização do robô foram melhoradas através da introdução de uma *motherboard* e outro tipo de sensores, cujo principal objectivo foi tornar possível o uso de visão e permitir um controlo mais versátil, ao nível da programação. Deste modo, o robô adquiriu uma capacidade de interpretação de ordens gráficas, tornando-se mais autónomo, no entanto, a sua reduzida manobrabilidade revela-se como um obstáculo ao pleno uso das capacidades sensoriais.
- Através da modificação e adição de novas funções ao algoritmo de controlo do PLC, conseguiu-se dotar o robô da capacidade de se sincronizar automaticamente e também de efectuar um planeamento da trajectória minimizando o impacto no solo.

Alguma ambição da nossa parte aliada a uma orientação brilhante, sistemática e enriquecedora da parte dos orientadores, permitiu-nos estender de forma considerável os objectivos, porém, na nossa opinião, estes foram na sua globalidade cumpridos.

Por ultimo, tentámos documentar de uma forma clara e detalhada todo o trabalho efectuado, visando dois principais objectivos, permitir uma continuidade e evolução do projecto e simultaneamente servir como base e facilitar a tarefa dos eventuais grupos futuros.

11. Bibliografia

- [1] – Revista “Electrónica e Telecomunicações”, de Abril de 2002 do DET da UA.
- [2] – Revista nacional “Robótica”.
- [3] – D.J. Todd, Walking Machines: An Introduction to Legged Robots, Chapman & Hall, 1985.
- [4] – S-M. Song, K.J. Waldron, Machines that Walk: The Adaptive Suspension Vehicle, The MIT Press, 1989.
- [5] – K.J. Waldron, G.L. Kinzel, Kinematics, Dynamics, and Design of Machinery, John Wiley & Sons, New York, 1999.
- [6] – “Feedback Control of Dynamic Systems”, Gene F. Franklin, J. David Powell, 3rd edition 1994, Addison-Wesley Publishing Company.
- [7] – “Continuous System Modeling”, François E. Cellier, 1991, Springer-Verlag New York Inc, New York.
- [8] – “Motores passo a passo:controlo e modos de funcionamento”, J.A. Tenreiro Machado, 1ª edição, 1994 Publindustria, Edições Técnicas.
- [9] – “Modern Control Systems”, Richard C. Dorf, Robert H. Bishop, eighth edition, 1998 Addison Wesley Longman.

- [http#1] www.uwm.edu/~norbury/gr/node36
- [http#2] <http://www.physics.ubc.ca/~birger/n206110/n206110>
- [http#3] www.enme.umd.edu/ice_lab/teach/ME403/lagrange/tutlagrange
- [http#4] www.mitsubishi-automation.de/produkt_englisch.html
- [http#5] www.amidata.es
- [http#6] <http://robotica.ua.pt>
- [http#7] www.philips.com
- [http#8] <http://www.sick.com>
- [http#9] <http://pagina.netc.pt/~nf16332a/umist/smotor.html>

Anexo

Programa PLC