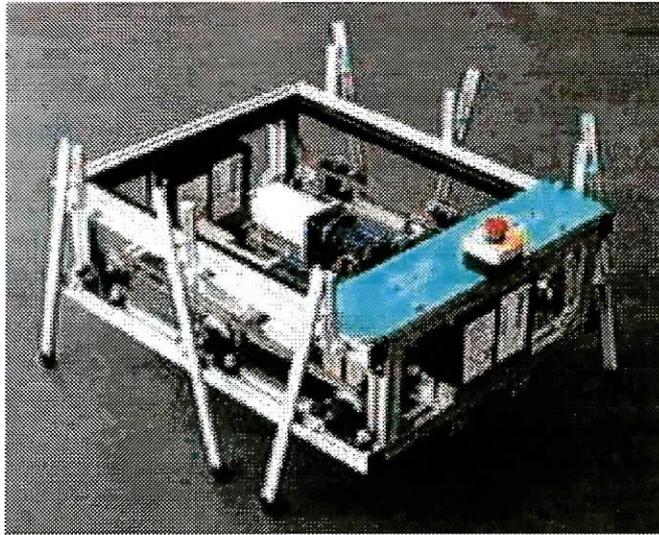


SECÇÃO AUTONOMA DE ENGENHARIA MECÂNICA

Projecto de Automação

Robot com Locomoção Hexápode



Relatório Síntese

Realizado por: Maria João Abranches
Pedro Viana

Orientadores: Prof. Doutor Vitor Santos
Mestre Filipe Silva



UNIVERSIDADE DE AVEIRO
19 de Setembro de 2000

Agradecimentos

Finalizado este projecto, queremos expressar os nossos agradecimentos a algumas pessoas e instituições que nos apoiaram directa ou indirectamente e que sem elas teria sido mais complicado atingir os objectivos propostos.

- Aos nossos orientadores, Professor Doutor Vítor Santos, e Engenheiro Filipe Silva, pelo apoio e sugestões fornecidas ao longo do projecto;
- Ao Engenheiro Abílio Borges por todo o apoio que nos deu, e que mesmo durante o mês de Agosto se mostrou cooperante na conclusão do trabalho;
- A todos os nossos colegas, amigos e professores que nos incentivaram com críticas e sugestões construtivas ao longo deste ano, e em especial ao Rui Santos pela ajuda que sempre nos disponibilizou;
- Aos Srs. Carlos Cordeiro e Alexandre Martins que foram essenciais na compra dos redutores;
- À secção Autónoma de Engenharia Mecânica, que nos acolheu ao longo destes últimos anos;
- A todos os não mencionados neste texto, mas que colaboraram para a concretização deste projecto.

A todos, o nosso muito obrigado.



Índice

1	INTRODUÇÃO	3
2	OBJECTIVOS	3
3	ESPECIFICAÇÕES DO ROBOT HEXÁPODE	3
4	MODELAÇÃO CINEMÁTICA	4
4.1	Definição dos pontos críticos relativos a uma perna	4
4.2	Definição das equações de movimento para os pontos críticos	4
4.2.1	Perna no chão	4
4.2.2	Perna no ar	5
4.3	Planeamento de trajectória	8
5	ESTUDO DINÂMICO DO ROBOT	10
5.1	Cálculo da energia do sistema utilizando o Teorema de Lagrange	10
5.1.1	Cálculo da energia cinética:	10
5.1.2	Cálculo da Energia potencial	10
6	ESTUDO DOS ELEMENTOS NECESSÁRIOS PARA A CONSTRUÇÃO DO ROBOT	13
7	ANÁLISE DINÂMICA	15
8	PROGRAMA AUTÓMATO	16
9	ANÁLISE DO TRABALHO E CONCLUSÕES	17



1 Introdução

Este trabalho consiste na concepção, implementação e controlo de um robot com locomoção hexápode, fazendo lembrar um insecto.

Um dos requisitos para a elaboração deste projecto é a utilização de pernas não articuladas, usando um número mínimo de graus de liberdade.

A sincronização adequada das seis pernas vai originar um conjunto de movimentos que resultam numa translação do robot, e possivelmente na rotação em torno de si próprio.

2 Objectivos

Como objectivos iniciais deste trabalho temos:

- Modelização cinemática e dinâmica;
- Concepção da estrutura mecânica rígida e dos elementos móveis para a movimentação hexapódica, incluindo a transmissão de movimento entre as diversas partes;
- Concepção da componente eléctrica, percepção e selecção de sensores;
- Definição dos motores e unidades de controlo e potência;
- Programa base de controlo de locomoção, para execução dos movimentos básicos com possibilidade de comandos externos;
- Programa de locomoção com alguma autonomia como o desvio de obstáculos.

3 Especificações do robot hexápode

- Sistema com alimentação autónoma (baterias) e controlo autónomo e semi-autónomo (PLC);
- Capacidade de avançar e recuar, e capacidade de rodar sobre si próprio;
- Detectar obstáculos com determinada precisão mínima;
- O sistema deverá poder aceitar teleoperação via linha série RS232 ou sistema similar ou executar um programa pré-definido;
- Para o sistema proposto é suficiente um número finito e reduzido de velocidades de movimentação.



4 Modelação cinemática

4.1 Definição dos pontos críticos relativos a uma perna

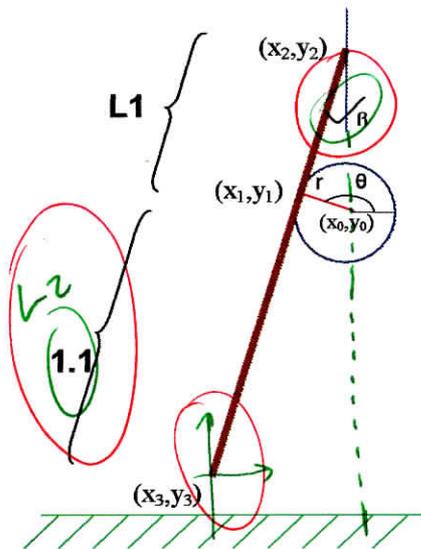


Figura N.º1 – Pontos relevantes de uma perna do robot hexápode

O movimento do robot é efectuado por intermédio do acoplamento mecânico (rígido) do veio do motor a um elo que vai transmitir movimento à haste da perna. Como na parte superior da perna só há movimento vertical, quando a outra extremidade da haste estiver apoiada numa superfície vai haver uma impulsão de todo o robot na horizontal e também na vertical. Na figura 1 estão representados os quatro pontos relevantes. Esses pontos são: o ponto de união da perna ao elo transmissor, $P_1 - (x_1, y_1)$, o ponto de guiamento superior da haste da perna, $P_2 - (x_2, y_2)$, a extremidade da mesma que está em contacto com o chão, $P_3 - (x_3, y_3)$, e a zona de acoplamento ao veio transmissor, $P_0 - (x_0, y_0)$.

De referir que a haste é um único elemento de comprimento L , estando representado na figura como dois segmentos L_1 e L_2 .

4.2 Definição das equações de movimento para os pontos críticos

4.2.1 Perna no chão

As equações do movimento para os pontos anteriormente referidos são calculadas em função do ângulo θ_0 . Partindo do princípio que a perna do robot está fixa no chão, as equações são calculadas tomando como ponto de referencia o ponto P_3 , que é o ponto fixo.

$$\theta = f(t)$$

$$\theta \in [0, \pi]$$

*para avançar da
esq para a direita...*

O ponto P_3 está fixo e convencionam-se a origem das coordenadas durante este meio ciclo.

$$\begin{cases} x_3 = 0 \\ y_3 = 0 \end{cases}$$

Sendo x_0 e y_0 as coordenadas do ponto P_0 , temos

$$\begin{cases} x_0 = \frac{L_1 + L_2}{L_1} r \cos(\theta_0) \\ y_0 = r \sin(\theta_0) + L_2 \sqrt{1 - \frac{r^2}{L_1^2} \cos^2(\theta_0)} \end{cases}$$



Para o ponto P_1 , as coordenadas são

$$\begin{cases} x_1 = r \cos(\theta_0) + \frac{L_1 + L_2}{L_1} r \cos(\theta_0) \\ y_1 = L_2 \sqrt{1 - \frac{r^2}{L_1^2} \cos(\theta_0)^2} \end{cases}$$

As coordenadas de P_2 são

$$\begin{cases} x_2 = \frac{L_1 + L_2}{L_1} r \cos(\theta_0) \\ y_2 = (L_1 + L_2) \sqrt{1 - \frac{r^2}{L_1^2} \cos(\theta_0)^2} \end{cases}$$

4.2.2 Perna no ar

Durante o movimento do robot estão constantemente três pernas em contacto com o solo e três a rodar livremente.

Na situação, em que a perna está no ar, as equações que traduzem o seu movimento são expressas em relação ao ponto P_0 .

$$\theta \in [0, \pi] \quad \pi \rightarrow 2\pi \quad ?$$

As coordenadas para o ponto P_0 , sendo K_x e K_y parâmetros constantes, que dependem do afastamento entre duas pernas consecutivas, são

$$\begin{cases} x_0 = K_x \\ y_0 = K_y \end{cases}$$

No que diz respeito às coordenadas do ponto P_1 ,

$$\begin{cases} x_1 = r \cos(\theta_0) + x_0 \\ y_1 = r \sin(\theta_0) + y_0 \end{cases}$$

Sendo as coordenadas x_2 e y_2 do ponto P_2 vem

$$\begin{cases} x_2 = x_0 \\ y_2 = r \sin(\theta_0) + L_1 \sqrt{1 - \frac{r^2}{L_1^2} \cos(\theta_0)^2} + y_0 \end{cases}$$

Finalmente, para o ponto P_3 temos

$$\begin{cases} x_3 = \frac{L_1 + L_2}{L_1} r \cos(\theta_0) + x_0 \\ y_3 = r \sin(\theta_0) + L_1 \sqrt{1 - \frac{r^2}{L_1^2} \cos(\theta_0)^2} - (L_1 + L_2) \sqrt{1 - \frac{r^2}{L_1^2} \cos(\theta_0)^2} + y_0 \end{cases}$$

Uma figura para perna...



4.3 - Simulação da locomoção do robot

Depois de definidos todos os pontos relevantes e encontradas as equações matemáticas que traduzem o seu movimento, efectuou-se a simulação de uma perna e posteriormente do conjunto das três pernas laterais.

A simulação permitiu ajustar alguns parâmetros tais como, o comprimento do elo de transmissão de movimento, a dimensão da haste e respectivo ponto de fixação e a distância entre pernas (offset).

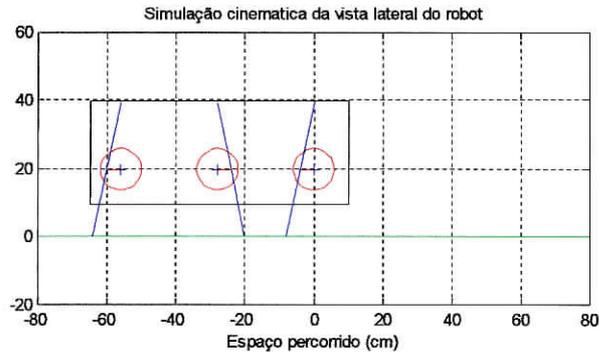


Figura N.º2 – Simulação cinemática da vista lateral do robot

Na simulação vista de topo, representa-se a extremidade das pernas, a estrutura do robot e o seu centro de massa, assumindo que é coincidente com o centro geométrico do robot.

A verde está representado um triângulo imaginário, que serve como fronteira de estabilidade, isto é, o centro de massa (a cor de rosa) não deve passar estas linhas, com o risco do robot sofrer um desequilíbrio e risco de queda.



Figura N.º3 – Simulação cinemática da ... ?

Com as simulações confirmou-se a validade das equações do movimento, e pode-se também verificar e aferir parâmetros dimensionais na estrutura do robot.



4.4 - Estudo dimensional do robot

Na tabela seguinte, estão evidenciadas as situações que respeitam algumas restrições impostas no início do dimensionamento. Apesar de não estar presente em todas as colunas da tabela as unidades utilizadas, todos os valores apresentados na mesma estão expressos em centímetros.

Dimensões da estrutura	L1 (cm)	L2 (cm)	R= L2/L1	L (cm)	r (cm)	beta (rad)	Passo (cm)	Distancia Máxima	Distancia mínima
50*100	10	50	5	60	4	0.412	96	88	-8
50*100	10	50	5	60	5	0.524	120	100	-20
50*100	15	45	3	60	3	0.201	48	64	16
50*100	15	45	3	60	4	0.270	64	72	8
50*100	15	45	3	60	5	0.340	80	80	0
50*100	20	40	2	60	3	0.151	36	58	22
50*100	20	40	2	60	4	0.201	48	64	16
50*100	20	40	2	60	5	0.253	60	70	10
50*100	25	35	1.4	60	5	0.201	48	64	16
50*100	30	30	1	60	5	0.167	40	60	20
25*50	7.5	22.5	3	30	1.5	0.201	24	32	8
50*70	12.5	30	2.4	42.5	4	0.326	54.4	57.2	2.8
50*70	20	20	1	40	4	0.201	32	44	12
50*80	17	28	1.6	45	6	0.361	63.5	66.8	3.2

Tabela N.º1 – Apresentação dos parâmetros

Os parâmetros contidos na tabela têm o seguinte significado:

r - é o comprimento entre os pontos P_0 e P_1 do elo de transmissão;

β - é o angulo máximo de abertura que a perna faz com a vertical;

Passo – é o espaço percorrido por um a perna, no fim de uma rotação completa;

Distância Máxima – afastamento máximo entre duas pernas consecutivas;

Distância mínima – afastamento mínimo entre duas pernas consecutivas ou afastamento mínimo de segurança.

Offset – distância entre os veios de transmissão de movimento às pernas do robot.

Após algum estudo no dimensionamento, foi estabelecido a dimensão de setenta centímetros de comprimento por meio metro de largura, contra um metro de comprimento por meio metro da largura inicialmente.

O comprimento total (L) da haste ficou com quarenta centímetros, onde $L_1=L_2=20$ cm para se conseguir uma distância mínima de doze centímetros. Deste modo o passo ficou com trinta e dois centímetros.



4.3 Planeamento de trajectória

Para evitar que surjam embates violentos no solo, tem que se garantir que as pernas tenham uma velocidade muito baixa ou mesmo nula *ao chegar ao solo*. Partindo do princípio que a perna tem velocidade inicial e final zero nesta fase pode-se utilizar um polinómio de 3ª ordem para calcular a equação que define a evolução do ângulo em função do tempo e suas derivadas.

$$\theta(t) = a_0 + a_1 t + a_2 t^2 + a_3 t^3$$

$$\dot{\theta}(t) = a_1 + 2a_2 t + 3a_3 t^2$$

$$\ddot{\theta}(t) = 2a_2 + 6a_3 t$$

Na primeira fase do movimento, θ varia entre 0 e π . Então, para uma rotação por segundo,

$$\theta_{t_0} = 0, \quad \dot{\theta}_{t_0} = a_0 \Rightarrow a_0 = 0$$

Utilizando a expressão da velocidade, pode-se calcular a_1 , uma vez que no instante final (t_f) deverá ter velocidade nula.

$$\theta_{t_f} = \pi, \quad \dot{\theta}_{t_f} = 0 \Rightarrow a_1 = 0$$

Deduzindo as expressões para a_2 e a_3 , tendo em atenção os valores de a_0 e a_1 , fazendo a substituição nas equações em cima, resulta a expressão final para a variação de teta.

$$\theta(t) = \theta_0 + \frac{3(\theta_f - \theta_0)}{t_f^2} t^2 + \frac{-2(\theta_f - \theta_0)}{t_f^3} t^3$$

Então, as equações do movimento, são

$$\theta(t) = 12\pi t^2 - 16\pi t^3 \quad \dot{\theta}(t) = 24\pi t - 48\pi t^2 \quad \ddot{\theta}(t) = 24\pi - 96\pi t$$

Para a segunda fase do movimento, o ângulo, θ , varia de π a 2π . Substituindo novamente estes valores na expressão geral, obtêm-se as seguintes equações:

$$\theta(t) = \pi + 12\pi t^2 - 16\pi t^3 \quad \dot{\theta}(t) = 24\pi t - 48\pi t^2 \quad \ddot{\theta}(t) = 24\pi - 96\pi t$$

Quando não há planeamento da trajectória, a velocidade varia linearmente durante a locomoção, e as equações do movimento são muito mais simples.

$$\theta(t) = kt \quad \dot{\theta}(t) = k \quad \ddot{\theta}(t) = 0$$

Depois de determinadas as expressões do movimento com e sem planeamento de trajectória, foram elaborados em Matlab os gráficos 1, 2, 3 e 4.



Fazendo uma breve análise aos primeiros dois, verifica-se que o ângulo varia linearmente, resultando numa velocidade angular constante.

Nos gráficos 3 e 4, destaca-se o facto da variação do ângulo ser mas suave quando as pernas do robot se estão a aproximar e a afastar do solo, coincidindo com os valores de π e 2π (periodicamente). Esta atenuação do ângulo reflecte-se na redução da velocidade para valores cada vez mais baixos, quando se encontra em π e 2π , tal como era pretendido. Assim, a velocidade será máxima quando a perna estiver na posição vertical ($\pi/2$ e $3/2\pi$) e mínima nas posições atrás referidas.

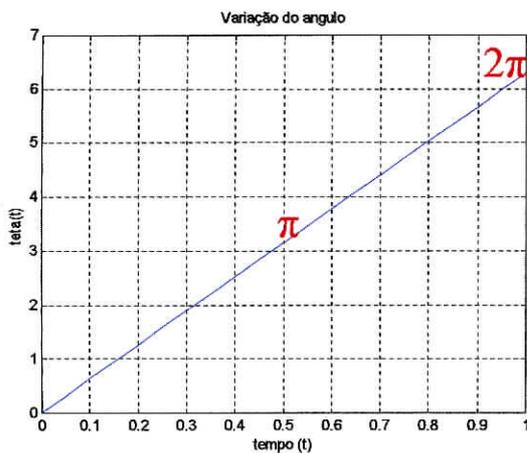


Gráfico N.º1 - Variação do ângulo sem planeamento de trajectória

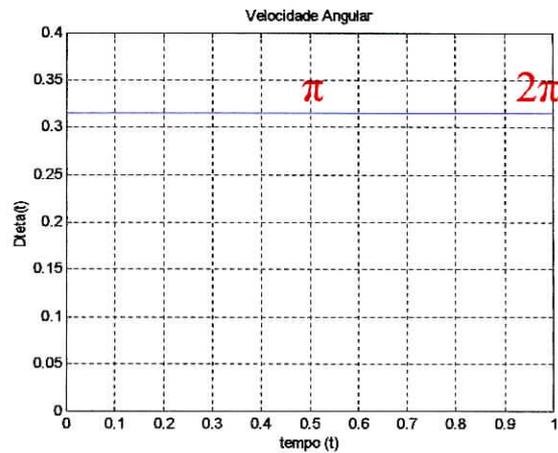


Gráfico N.º2 - Variação da velocidade angular sem planeamento de trajectória

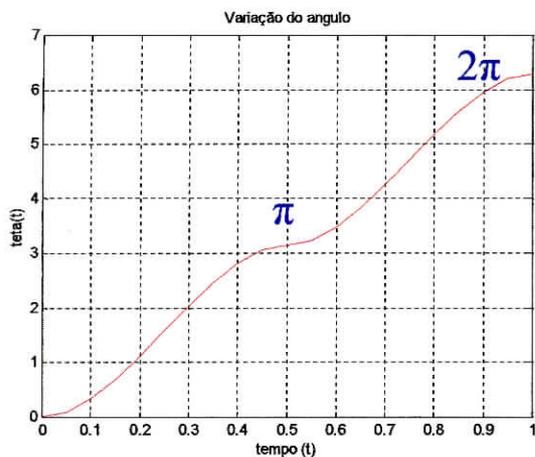


Gráfico N.º3 - Variação do ângulo com planeamento de trajectória

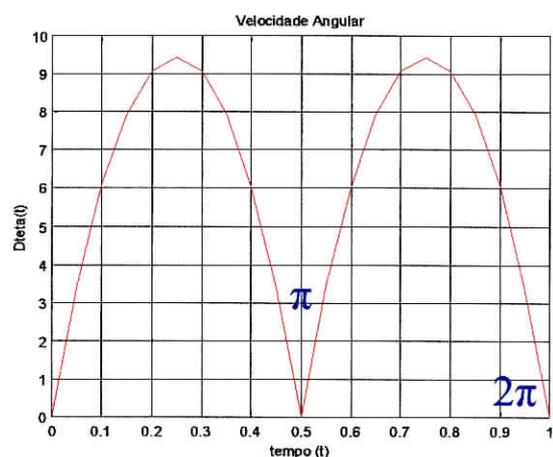


Gráfico N.º4 - Variação da velocidade angular com planeamento de trajectória



5 Estudo dinâmico do robot

Forças e binários envolvidos durante a locomoção

Para calcular o binário e a potência do sistema, recorreu-se ao teorema de Lagrange; as equações utilizadas são as do movimento com planeamento de trajectória do ponto P_0 .

O ângulo de rotação do veio transmissor, a velocidade e aceleração angular expressam-se segundo as equações já referidas.

5.1 Cálculo da energia do sistema utilizando o Teorema de Lagrange

O Teorema de Lagrange, define a energia total de um sistema (L) como a diferença entre a energia cinética (E_c) e a energia potencial (P).

$$L = E_c - P$$

5.1.1 Cálculo da energia cinética:

Para calcular a energia cinética, $E_c = 0.5mv^2$, é fundamental conhecer a expressão da velocidade.

$$v^2 = (\dot{x}_0^2 + \dot{y}_0^2)$$

Substituindo na fórmula geral da energia cinética, resulta a seguinte expressão para o sistema:

$$E_c = \frac{1}{2} m \left[k_1^2 \sin^2(\theta_0) \ddot{\theta}_0^2 + \left(r \cos(\theta_0) \dot{\theta}_0 + \frac{L_2 k_2 \cos(\theta_0) \sin(\theta_0)}{\sqrt{1 - k_2 \cos^2(\theta_0)}} \dot{\theta}_0 \right)^2 \right]$$

5.1.2 Cálculo da Energia potencial

A fórmula da energia potencial, é do conhecimento geral e é expressa da seguinte forma:

$$P = mgy$$

Por substituição da expressão de y_0 , obtêm-se a fórmula da energia potencial específica do sistema.

$$P = mg \left(r \sin(\theta_0) + L_2 \sqrt{1 - k_2 \cos^2(\theta_0)} \right)$$

Pelo Teorema de Lagrange é possível calcular o binário, τ_i , do sistema.

$$\tau_i = \frac{d}{dt} \frac{\partial L}{\partial \dot{\theta}_i} - \frac{\partial L}{\partial \theta_i} \quad \Rightarrow \quad \tau_i = \frac{d}{dt} \frac{\partial E_c}{\partial \dot{\theta}_0} - \left[\frac{\partial E_c}{\partial \theta_0} - \frac{\partial P}{\partial \theta_0} \right]$$



Por substituição directa das fórmulas já mencionadas obtém-se a seguinte expressão para o binário envolvido durante a locomoção do robot.

$$\begin{aligned}
 \tau_i = & m \ddot{\theta}_0 \left[k_1^2 \sin(\theta_0)^2 + r^2 \cos(\theta_0)^2 + \frac{k_3^2 \cos(\theta_0)^2 \sin(\theta_0)^2}{1 - k_2 \cos(\theta_0)^2} + \frac{k_4 \cos(\theta_0)^2 \sin(\theta_0)}{\sqrt{1 - k_2 \cos(\theta_0)^2}} \right] + \\
 & + m \dot{\theta}_0 \left[2k_1^2 \sin(\theta_0) \cos(\theta_0) \dot{\theta} - 2r^2 \sin(\theta_0) \cos(\theta_0) \dot{\theta} + \right. \\
 & + k_3^2 \dot{\theta}_0 \left[\frac{(-2 \cos(\theta_0) \sin(\theta_0)^3 + 2 \cos(\theta_0)^3 \sin(\theta_0))(1 - k_2 \cos(\theta_0)^2) - 2k_2 \cos(\theta_0)^3 \sin(\theta_0)^3}{(1 - k_2 \cos(\theta_0)^2)^2} \right] + \\
 & + k_4 \left[\frac{(\cos(\theta_0)^3 \dot{\theta}_0 - 2 \cos(\theta_0) \sin(\theta_0)^2 \dot{\theta}_0)(1 - k_2 \cos(\theta_0)^2) - k_2 \cos(\theta_0)^3 \sin(\theta_0)^2 \dot{\theta}_0}{(1 - k_2 \cos(\theta_0)^2) \sqrt{1 - k_2 \cos(\theta_0)^2}} \right] \times \\
 & \times \left[\frac{1}{2} m \left[2k_1^2 \sin(\theta_0) \dot{\theta}_0^2 \cos(\theta_0) + 2 \left(r \cos(\theta_0) \dot{\theta}_0 + \frac{L_2 k_2 \cos(\theta_0) \sin(\theta_0)}{\sqrt{1 - k_2 \cos(\theta_0)^2}} \dot{\theta}_0 \right) \times \right. \right. \\
 & \times \left. \left. \left(-r \sin(\theta_0) \dot{\theta} - \frac{L_2 k_2 \sin(\theta_0)^2 \dot{\theta} + L_2 k_2 \cos(\theta_0)^2 \dot{\theta}}{\sqrt{1 - k_2 \cos(\theta_0)^2}} - \frac{L_2 k_2^2 \cos(\theta_0)^2 \sin(\theta_0)^2 \dot{\theta}}{(1 - k_2 \cos(\theta_0)^2)^{3/2}} \right) \right] - \right. \\
 & \left. \left. - \cdot mg \left[r \cos(\theta_0) + L_2 \frac{k_2 \cos(\theta_0) \sin(\theta_0)}{\sqrt{1 - k_2 \cos(\theta_0)^2}} \right] \right] \right]
 \end{aligned}$$

Nesta fase, uma vez calculado o binário, rapidamente se calcula a potência envolvida, uma vez que pode ser expressa pelo produto do binário (τ_i) com a velocidade angular (ω).

$$Pot. = \tau_i \omega$$

As equações para o estudo sem planeamento não são aqui apresentadas, pois são exactamente as mesmas, tendo em atenção que a componente da aceleração é nula.

Para finalizar este estudo, recorrendo mais uma vez ao Matlab, representam-se os gráficos da evolução do binário e da potência despendida durante a locomoção.



Parâmetros: $L1 = 0.20\text{mm}$; $L2 = 0.20\text{mm}$; $r = 4\text{mm}$; $M = 25\text{ kg}$;

- Sem planeamento da trajectória

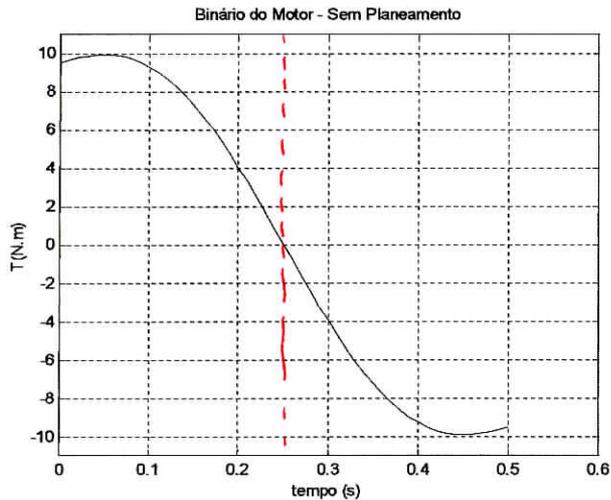


Gráfico N.º5 - Binário do motor para o movimento sem planeamento de trajectória

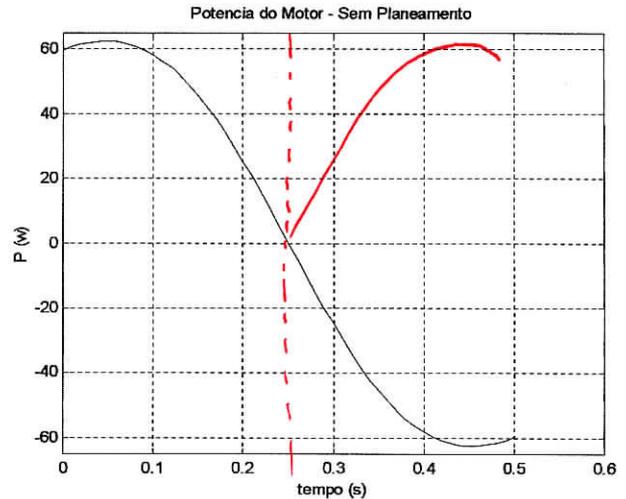


Gráfico N.º6 - Potência do motor para o movimento sem planeamento de trajectória

- Com planeamento da trajectória

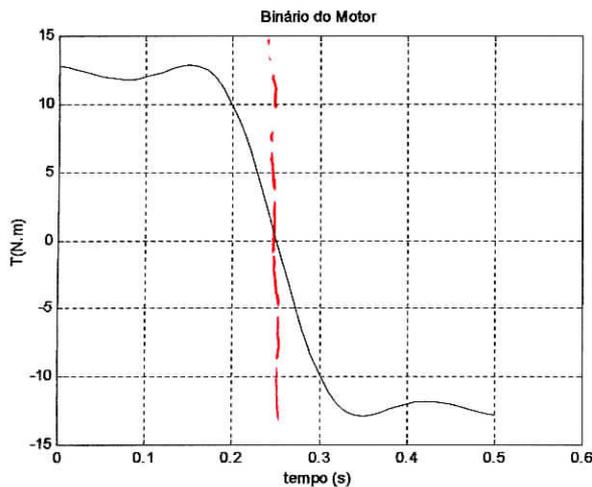


Gráfico N.º7 - Binário do motor para o movimento com planeamento de trajectória

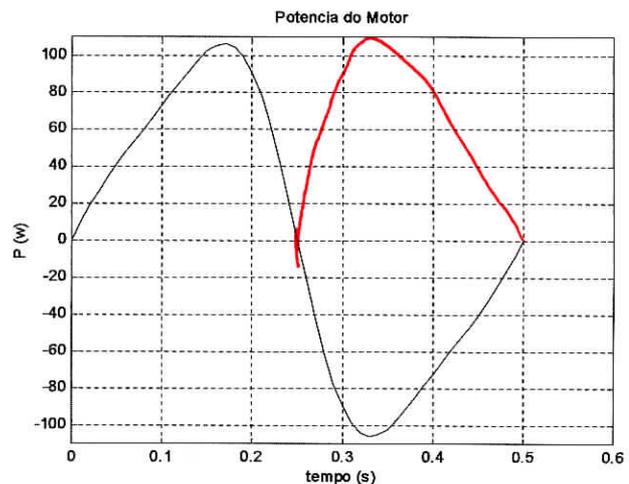


Gráfico N.º8 - Potência do motor para o movimento com planeamento de trajectória

Analisando os gráficos, verifica-se que o comportamento das curvas de binário e de potência são muito diferentes nas situações em que o movimento se realiza com e sem planeamento de trajectória. O esforço necessário para elevar o robot, é bem evidenciado no gráfico 8; enquanto que a potência máxima necessária neste caso é de 105W, para a situação em que não há planeamento, é necessária somente uma potência de 63W aproximadamente.



6 Estudo dos elementos necessários para a construção do robot

A primeira coisa que se fez, foi dimensionar estruturalmente o robot, para o qual se utilizou perfil de alumínio. Deste modo, foi ganho algum tempo na montagem da estrutura, assim como alguma flexibilidade na sua estruturação.

Assim, optou-se por um perfil quadrado 35x35mm e para as pernas do robot utilizou-se um perfil 20x10mm.

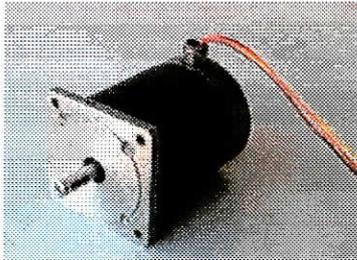


Figura N.º4 – Motor II.

Por questões de potência e para permitir que o robot rode sobre si próprio, neste projecto foram utilizados dois motores. Tendo em conta o tipo de movimento pretendido para o robot, os motores escolhidos deveriam permitir o controlo de velocidade.

Devido ao elevado preço dos servomotores, que foi um factor preponderante, e à existência de motores passo a passo no departamento, optou-se pela utilização destes, apesar de terem valores um pouco diferentes de potência.

Quanto ao PLC (Programmable Logical controller) e às duas respectivas cartas de eixo, seleccionou-se o modelo Misubishi FX_{2n} 16MR – DS, e as cartas FX_{2n} - 1PG, alimentados a 24V visto que eram necessárias poucas entradas e saídas.

Na alimentação das cartas utilizou-se um regulador de tensão de 12V para garantir este valor nos impulsos por elas geradas para a unidade de potência.

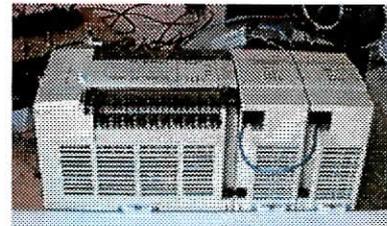


Figura N.º5 – Controlador programável, Misubishi FX_{2n} 16MR – DS.

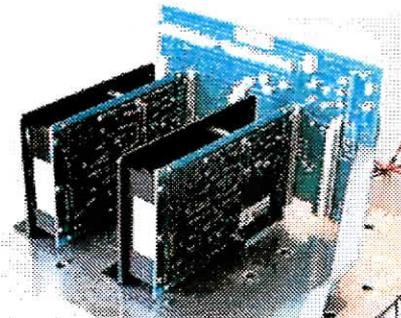


Figura N.º6 – Unidade de potência.

No que diz respeito à unidade de potência, não há qualquer informação sobre esta unidade, o que levou à perda de algumas horas de volta de mesma, para tentar perceber o seu funcionamento. De referir ainda que esta unidade também foi “reciclada”, se assim se pode dizer, de uma máquina que foi desmantelada na SAEM.

Uma vez que o robot é autónomo, é necessário alimentá-lo a baterias. Para isso foram adquiridas quatro baterias de chumbo Steco, de 12V com 6,5A e um recarregador Bradex BX60.

As baterias estão ligadas duas a duas em série, para se conseguir os 24V, dispostas em duas caixas independentes. Deste modo, um bloco tem a função de alimentar os motores, e o outro, a unidade de potência e o PLC.



Uma vez que os motores não têm potência suficiente para elevar o peso total do robot, foi necessário recorrer a redutores para aumentar o binário.

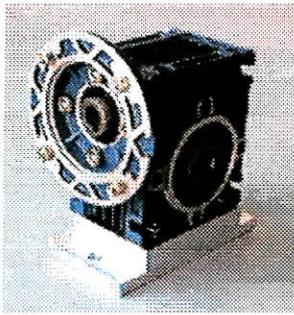


Figura N.º7 – Redutor 1:15.

Decidiu-se comprar dois redutores com uma redução de 1:15. valor este que foi baseado no estudo dinâmico feito na simulação, apresentado nos gráficos 7 e 8. Tendo em conta que o peso do robot era um valor provável, optou-se por uma redução maior para garantir que à saída do redutor há força suficiente para a sua locomoção. É importante referir que a aquisição dos redutores foi um dos principais motivos, senão o principal, do atraso da junção de todos os componentes e, deste modo, da montagem final deste projecto, devido à dificuldade em encontrar este acessório. Mesmo assim, pode-se dizer que não foi a solução ideal, mas sim uma solução de recurso, já que foi necessário fazer um veio para unir estes dois elementos e deste modo ser possível a transmissão de movimento.



Figura N.º8 – Veio de união entre o redutor e o motor.

O movimento é transmitido às pernas do meio, que por sua vez, por intermédio de rodas dentadas e correias, fazem mover os outros membros do robot.

Observando a figura 9 e comparando com a figura 1, verifica-se que esta simulação em nada fugiu da realidade.

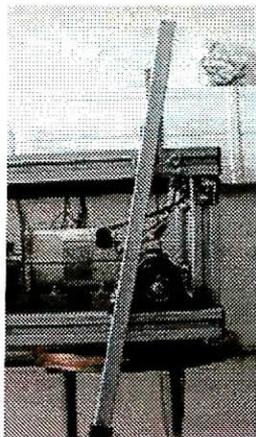


Figura N.º9 Perna do robot

É possível igualmente observar que o movimento transmitido à perna do robot passa, entre outros elementos, por um veio, que é acoplado a um outro veio que sai do redutor, por intermédio de um acoplamento flexível, figura 10, um elo de ligação do veio à haste, uma chumaceira para apoiar o veio, e uma calha onde vai ser efectuada a restrição a todo o tipo de movimentos horizontais. Este sistema garante ainda o alinhamento da haste, mas em contrapartida verifica-se a existência de alguns atritos, que são atenuados com uma lubrificação eficiente.



Figura N.º10 Acoplamento flexível

Em relação ao elo de ligação, numa extremidade é fixo ao veio de maneira a que ele rode solidariamente com este, e na outra

extremidade, é colocado um rolamento para permitir a rotação da haste.

Os dois pontos de fixação da haste a toda estrutura, são feitos por dois parafusos que dão alguma flexibilidade em termos de projectos futuros.

Foi necessário fazer vários apoios, nomeadamente para os redutores e para os motores, tal como se pode constatar na figura 11, para que desta forma se alcance com êxito o alinhamento de todos os veios.

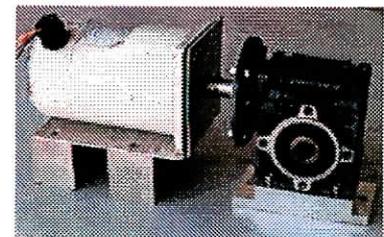


Figura N.º11 – Conjunto motor e redutor

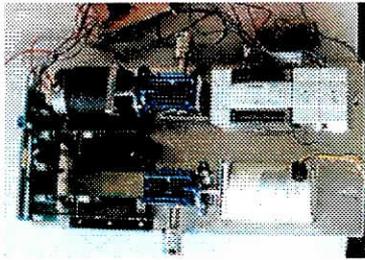


Figura N.º12 – Elementos funcionais do robot.

Numa chapa única, foram distribuídos os vários componentes do robot, tendo sempre em atenção o centro de massa, para que o peso fosse distribuído de uma forma equilibrada. Assim sendo, os motores foram colocados em lados opostos, não só para equilibrar o já referido peso, mas também para terem o mesmo sentido de rotação. No espaço restante foram colocados o PLC e a unidade de potência.

No que diz respeito ao controlo, foi montado um painel onde se colocaram alguns botões que ligam e desligam motores, PLC, unidade de potência, ou seja, todo o sistema eléctrico. Neste painel está também colocado um botão de emergência.

Apresenta-se na figura 13 uma vista explodida de todo o sistema de locomoção do robot. Consegue-se visualizar a disposição e sequência lógica de montagem de uma perna, sendo todas as outras iguais.

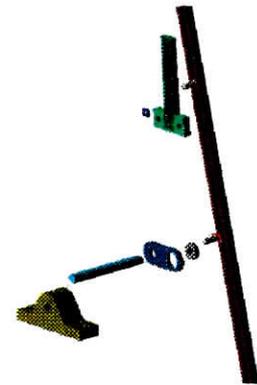


Figura N.º13 - Vista explodida de uma perna

7 Análise dinâmica

Após esta breve descrição dos vários componentes utilizados, é importante ser aqui apresentado novamente o resultado da simulação feita para o estudo dinâmico, mas desta vez com o peso real do robot, 40 Kg.

Parâmetros: $L_1 = 0.20\text{m}$; $L_2 = 0.20\text{m}$; $r = 4\text{mm}$; $M = 40\text{ kg}$;

- Sem planeamento de trajectória

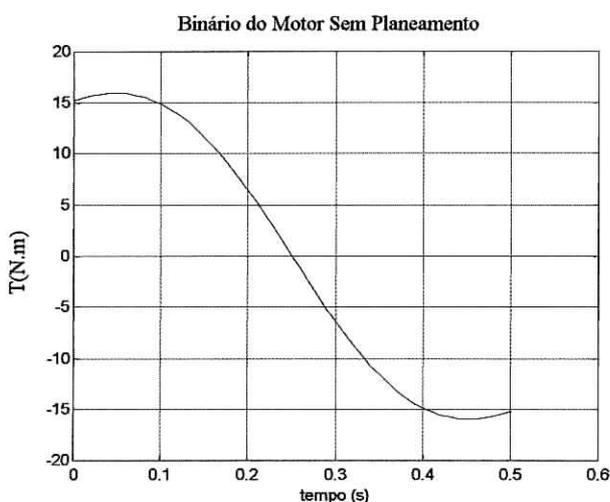


Gráfico N.º9 - Binário do motor para o movimento com planeamento de trajectória

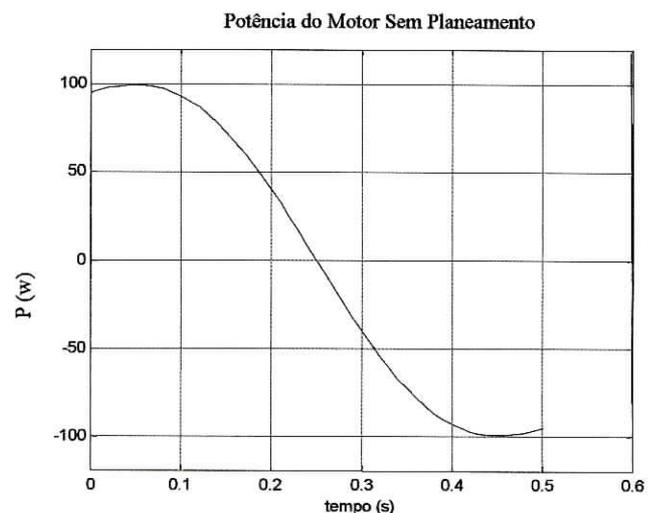


Gráfico N.º10 - Potência do motor para o movimento sem planeamento de trajectória



- Com planeamento de trajectória

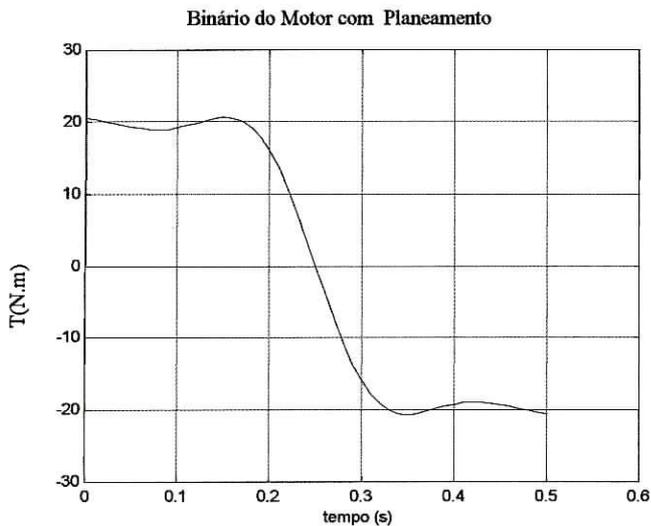


Gráfico N.º11 - Binário do motor para o movimento com planeamento de trajectória

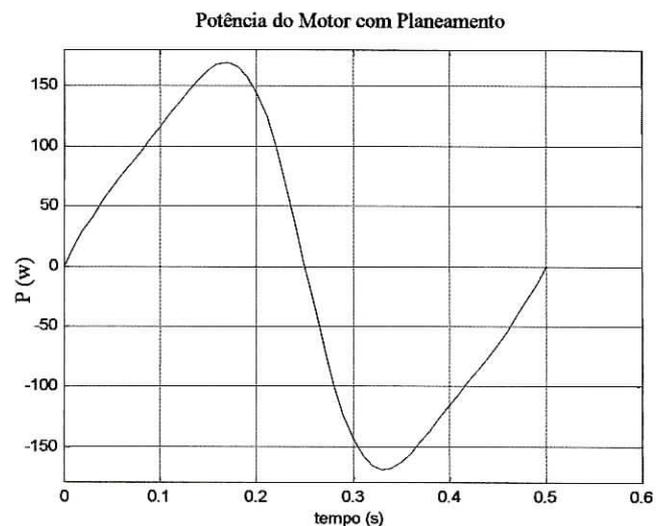


Gráfico N.º12 - Potência do motor para o movimento sem planeamento de trajectória

Analisando estes gráficos, quando comparados com os obtidos para o mesmo conjunto de parâmetros dimensionais, representados anteriormente na fase de estudo, verifica-se que ocorreu um aumento bastante significativo nos valores máximos de binário e potência devido ao aumento do peso do robot.

Segundo o estudo efectuado, seria necessário um binário médio da ordem dos 10Nm para a locomoção do robot, mas verificou-se insuficiente, exigindo-se um binário médio de 15Nm.

8 Programa Autómato

A programação foi elaborada em Melsec Medoc plus, e é responsável pela locomoção do robot.

É através deste programa que se efectua todo o controlo do robot, nomeadamente o seu sentido de movimento, a rotação em torno de si próprio, conseguida com a troca do sentido de rotação de um dos motores, e a sua paragem. Também é possível cortar a alimentação ao PLC, à unidade de controlo e aos motores.

Este tipo de controlo é feito recorrendo a interruptores on/off e a um botão de emergência.

Para não se perder o sincronismo entre os dois motores, e conseqüentemente o deslocamento do robot, um só funciona se o outro também o fizer, não sendo possível que um motor esteja em rotação individualmente.



9 Análise do trabalho e conclusões

Analisando os objectivos iniciais deste projecto e comparando com o resultado final, todos foram cumpridos, a modelização cinemática e dinâmica ainda no decorrer do primeiro semestre, a concepção da estrutura e dos elementos envolvidos na transmissão do movimento, toda a parte eléctrica, o uso de motores e unidades de controlo e potência e o desenvolvimento do programa automático para a sua locomoção, onde foram implementados todos os comandos externos que orientam o seu movimento. O que ficou por cumprir foi somente o uso dos sensores, o que impede desde já o desvio de obstáculos no caminho do robot.

Ao longo deste projecto foram surgindo várias dificuldades, onde umas se foram resolvendo, algumas contornando e outras sem solução financeira e/ou temporariamente viável.

O trabalho começou pela definição das várias equações matemáticas que traduzem a locomoção do robot. Não foi muito complicado chegar às equações de movimento, mas sim às derivadas das mesmas, devido à extensão com que ficava a equação da velocidade, e conseqüentemente a equação da aceleração. Esta tarefa foi bastante simplificada com o recurso ao Matlab.

Esta fase inicial, serve de suporte a todo o projecto; daí a importância da dedução destas equações.

Seguiu-se então um levantamento de todos os componentes do robot com a finalidade de avaliar o peso total, para assim ver que potências e binários estariam envolvidos.

Uma vez que os motores não têm binário suficiente para que haja movimento, usaram-se redutores. Pode-se mesmo afirmar que estes são imprescindíveis para o êxito deste projecto.

Surgiu então a maior dificuldade deste projecto. Depois de muito tempo perdido a estudar a unidade de potência, e a tentar perceber o seu funcionamento, pode-se dizer que há alguma frustração nestes resultados finais, pois se o robot não anda, a esta unidade se deve.

Muitos testes foram feitos para tentar pôr em marcha o robot; foi montado e desmontado várias vezes para tentar perceber o porquê de tal anomalia, mas todas sem sucesso. Está afastada a hipótese ser um erro do programa automático ou do próprio funcionamento do PLC, pois este gera os impulsos correctamente até à unidade, não chegando qualquer impulso aos motores.

Na parte de programação, quando se desligavam os motores, era necessário garantir que os pulsos deixavam de ser enviados e incrementados. Se tal não acontecesse, quando se voltassem a ligar, devido à variação de velocidade, deixava de haver sincronismo entre a velocidade e a posição da perna do robot, já que, quando a perna deveria estar em movimento mais lento, poderia estar com uma velocidade rápida.

O botão de emergência, geralmente serve para cortar a corrente do sistema. Mas, neste caso poderia ser crítico que tal acontecesse, pois uma vez tirada a tensão aos motores, devido ao peso total do robot, perder-se-ia a posição das pernas, já que estas tinham tendência a assentarem todas no solo.

Deste modo, este botão apenas corta o envio de impulsos do automático para as unidades de potência.

Em relação ao peso, o robot atingiu um valor superior ao foi previsto inicialmente. As diversas causas para que tal tenha sucedido são, entre outras, o peso dos redutores que são



mais pesados do que aqueles pensados inicialmente; as chumaceiras foram outro factor que levou ao seu aumento, uma vez que também são um pouco mais pesadas do que era esperado, e sendo logo em número de seis.

As outras causas que levaram ao aumento de peso são os suportes para fixar alguns elementos, o número elevado de porcas e parafusos utilizado, e mesmo a própria estrutura que saiu um pouco mais pesada daquilo que se esperava

Se se comparar estas duas situações, em que uma não passava ainda de um projecto, e a outra é o resultado final deste, é bem elucidativo a diferente distribuição dos vários componentes do robot. As causas para tal mudança, já foram de uma maneira geral todas referidas.

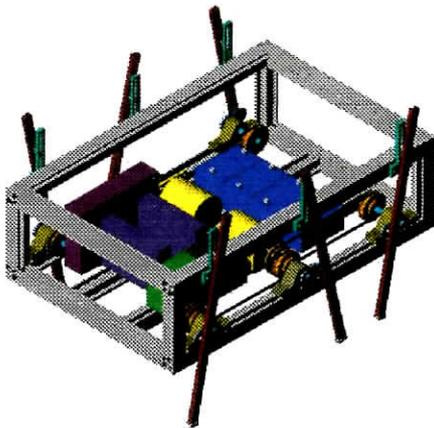


Figura N.º14 – Modelação inicial

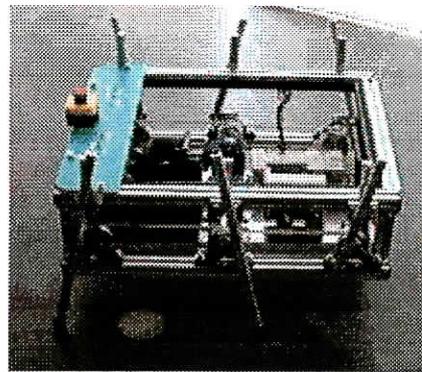


Figura N.º15 – projecto final

Com a componente prática deste projecto puramente académico, foi necessário relembrar alguns conceitos já abordados em disciplinas de anos anteriores, conciliar tudo e montar. Devido à inexperiência, muitos erros de projecto passariam sem sequer se dar conta que eles existiam, não fosse esta parte prática deste projecto. Só assim foi possível passar pelos mais diversificados problemas e encontrar as melhores soluções para os superar e continuar em frente.

Errata

- Nas equações presentes no relatório síntese, onde se lê θ_0 , deve se ler θ
- Na equação da energia cinética está uma derivada de segunda ordem. Essa equação deve ser corrigida pela seguinte:

$$E_c = \frac{1}{2} m \left[\left[-k_1 \sin(\theta) \dot{\theta} \right]^2 + \left(r \cos(\theta) \dot{\theta} + \frac{L_2 k_2 \cos(\theta) \sin(\theta) \dot{\theta}}{\sqrt{1 - k_2 \cos(\theta)^2}} \right)^2 \right]$$