

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS

ES827A - ROBÓTICA INDUSTRIAL

TURMA A

# Projeto Final - Dinâmica e cinemática do robô Puma560

*Alunos:*

Augusto Miranda Garcia      104627

Guilherme de Oliveira Souza   117093

*Professor responsável:*

Dr. Ely Carneiro Paiva

29 de junho de 2015

# Sumário

# 1 Objetivo

O objetivo desse relatório é apresentar o desenvolvimento dos conceitos apresentados em aula de robótica industrial nas atividades propostas para o projeto, sendo então concluído com questões sobre o assunto desenvolvido. É utilizado para tal o Robotics Toolbox, sendo usado o robô Puma560, já incluído na toolbox.

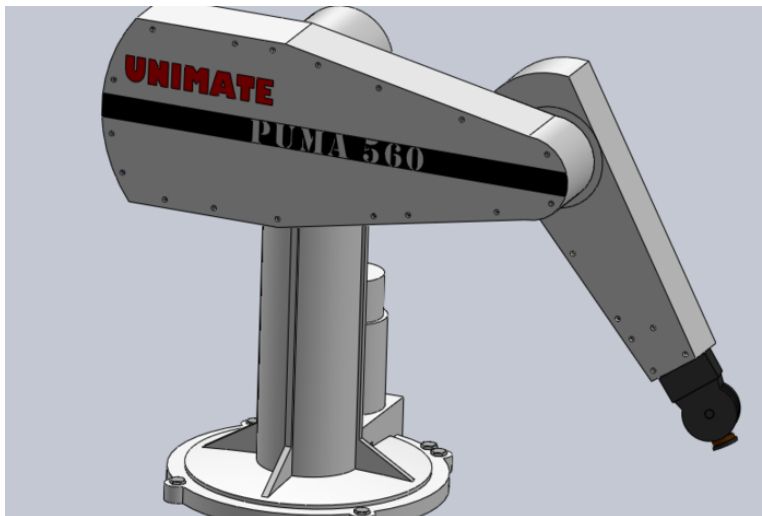


Figura 1: Robô Puma560.

## 2 Dinâmica

Para a modelagem dinâmica do robô seguiu-se o capítulo 6 da tese fornecida no roteiro do projeto, com a ressalva de ter-se evitado o uso do simulink, sendo ao invés feita a chamada do robô e montagem do sistema diretamente em código, que pode ser encontrado nos anexos. Além disso, foi evitado o uso de atrito seco, que deixa as simulações muito lentas para o propósito desse relatório. Após a montagem, foram feitos testes em malha aberta e análise do equilíbrio de energia cinética do robô.

### 2.1 Simulações em malha aberta

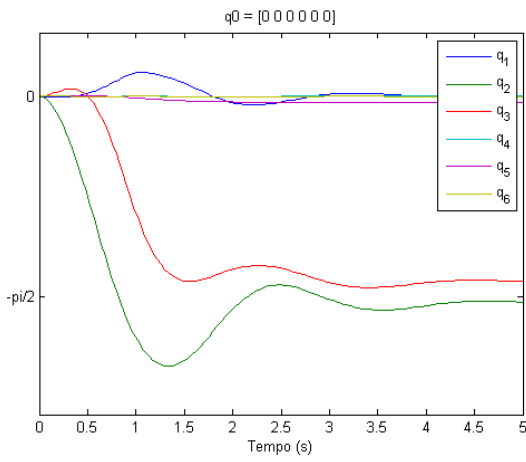
As simulações em malha aberta foram feitas baseadas nos ângulos fornecidos pela tese. Para tal, foi primeiramente encontrado o torque necessário para manter o robô parado na posição final  $q_f$ , resistindo a força da gravidade. Então, o mesmo torque foi aplicado diretamente sobre o robô para assim observar se o robô se direciona até a posição final a partir de uma posição inicial. A posição final escolhida foi:

$$q_f = [0, \pi/2, -\pi/2, 0, 0, 0]$$

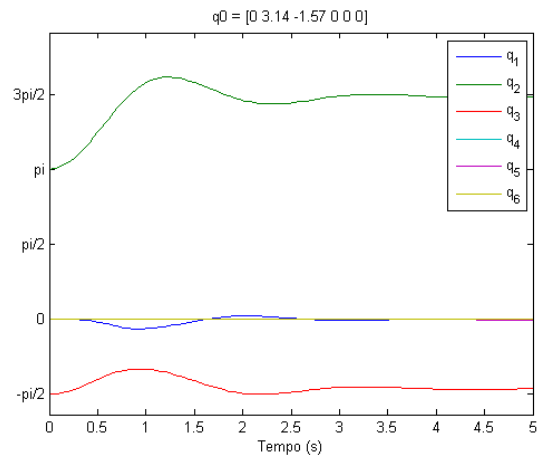
E as posições iniciais simuladas foram, respectivamente:

$$\begin{aligned}
q_{0a} &= [0, 0, 0, 0, 0, 0] \\
q_{0b} &= [0, \pi, -\pi/2, 0, 0, 0] \\
q_{0c} &= [0, \pi/2, -\pi/2, 0, 0, 0] \\
q_{0d} &= [0, \pi/2 + 0.05, -\pi/2, 0, 0, 0]
\end{aligned}$$

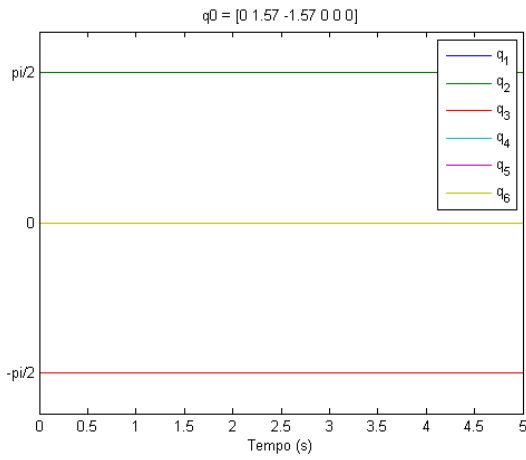
Os respectivos movimentos estão demonstrados na figura 2 abaixo. Observe que, nas figuras 2a 2b e 2d, a posição  $q_2$  (ou  $q_f[2]$ ) não vai até a posição final  $\pi/2$ , indo ao invés para a posição  $3\pi/2$ . Ao verificar a posição do robô, notou-se que ela é equivalente a posição final do robô em  $\pi/2$ , podendo-se concluir de que não houve erros no fim para essa estabilização.



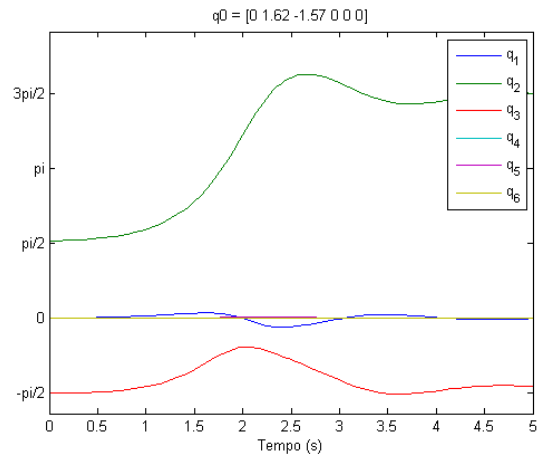
(a) Simulação para  $q_{0a}$



(b) Simulação para  $q_{0b}$



(c) Simulação para  $q_{0c}$



(d) Simulação para  $q_{0d}$

Figura 2: Simulação em malha aberta para as respectivas condições iniciais com o torque para a condição final  $q_f$  aplicado.

Observou-se também que houveram oscilações indesejáveis com a simulação em malha aberta, natural já que o sistema não possui uma realimentação. Mas no fim, o robô aparenta ser estável em malha aberta.

## 2.2 Simulações em malha aberta para análise da energia cinética

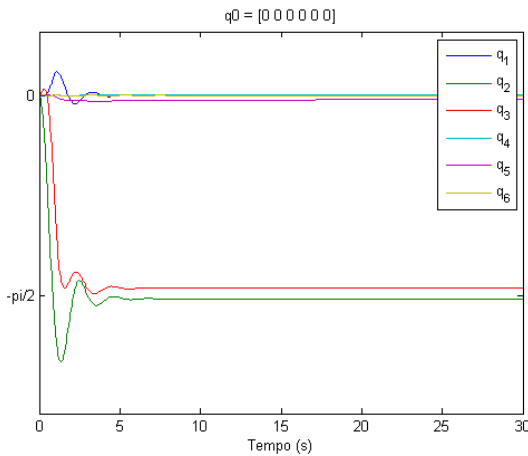
Para efetuar-se a análise da variação de energia cinética do sistema, foi seguido o procedimento apresentado na tese. Inicialmente, o robô é colocado em suas condição inicial, sendo então solto e deixado balançando livremente. No caso, é esperado que ele tenha um comportamento parecido com o de um pêndulo duplo, devido a suas características físicas. para este ensaio, foram estudadas duas variâncias no experimento, são elas uma variação da posição inicial e o experimento foi executado com e sem atrito viscoso.

Para gerar a curva da energia cinética é utilizada a equação a seguir:

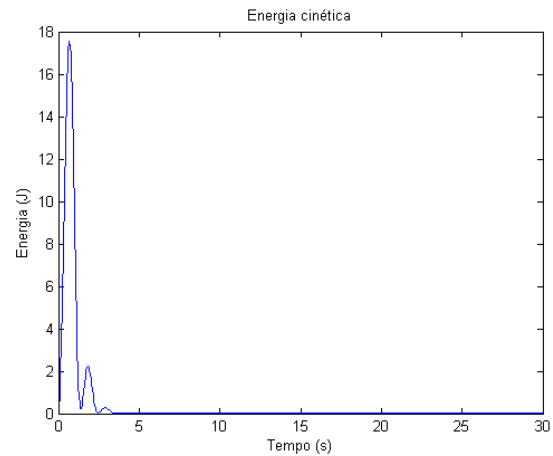
$$K = \frac{1}{2} \dot{q}^T M(q) \dot{q}$$

Note que a matriz de inércia varia, como esperado, de acordo com a posição espacial atual do robô. As curvas de posição e variação da energia cinética para cada um dos casos definidos podem ser observadas nas figuras 3, 4, 5 e 6.

Ao se analisar as figuras 3 e 4, pode-se notar que o robô cai ao repouso e rapidamente se estabiliza na posição com menos energia cinética possível (braços do robô para baixo). A estabilização ocorre rapidamente devido ao atrito viscoso, em menos de dez segundos, e nao notou-se diferenças visíveis para a pequena variação da posição inicial. Isso ocorre pois o sistema é simples, com poucos graus de liberdades para esse caso, e conseqüentemente não muito caótico.

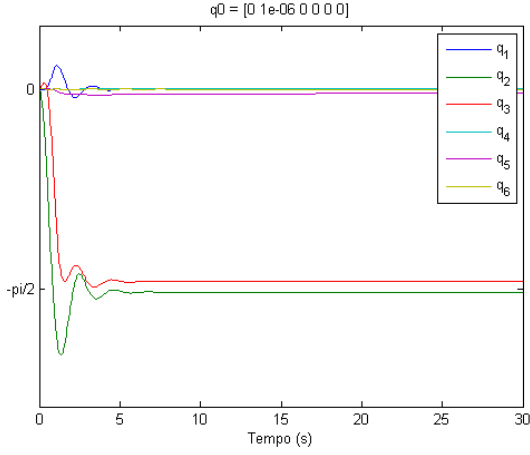


(a) Variação da posição

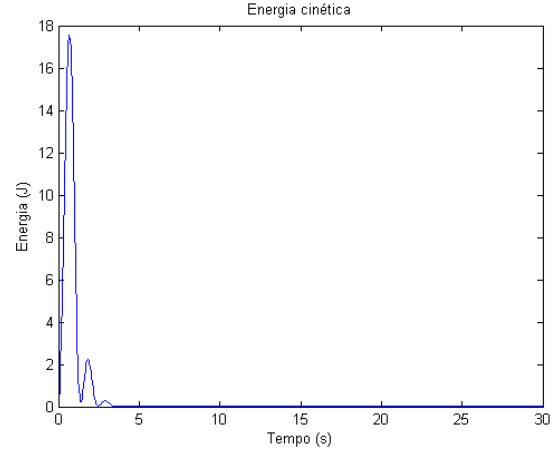


(b) Variação da energia cinética

Figura 3: Simulação com atrito viscoso para posição inicial  $q_0 = [0, 0, 0, 0, 0, 0]$ .



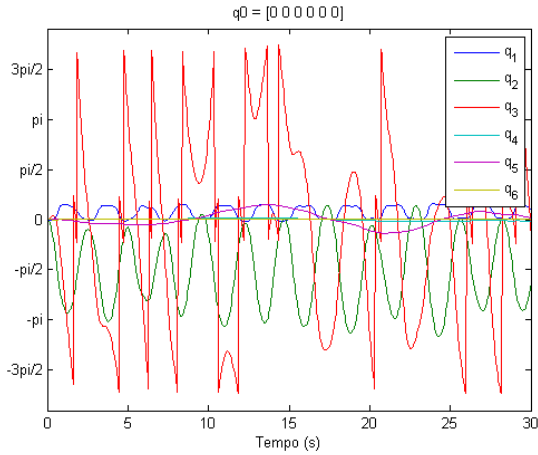
(a) Variação da posição



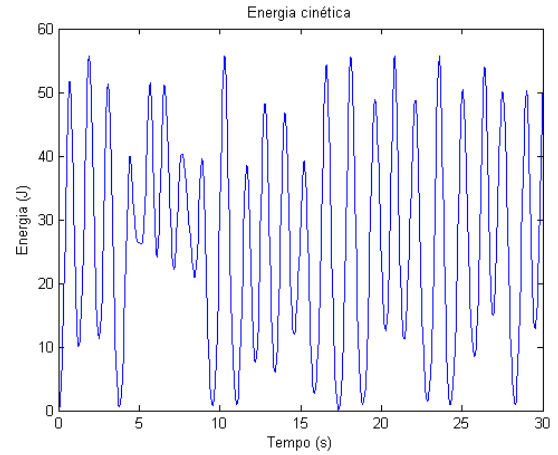
(b) Variação da energia cinética

Figura 4: Simulação com atrito viscoso para posição inicial  $q_0 = [0, 1e - 6, 0, 0, 0, 0]$ .

Ao ser retirado o atrito do sistema, ele passa a se mover livremente, já que não há dissipação de energia, e fica oscilando entre seus graus de liberdade, como pode ser observado nas figuras 5 e 6. A energia cinética, como esperado para esse caso, varia bastante. Também não se observou grandes mudanças com a pequena variação das condições iniciais neste caso.

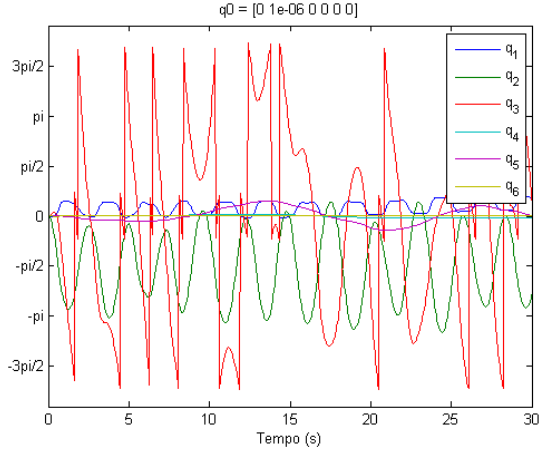


(a) Variação da posição

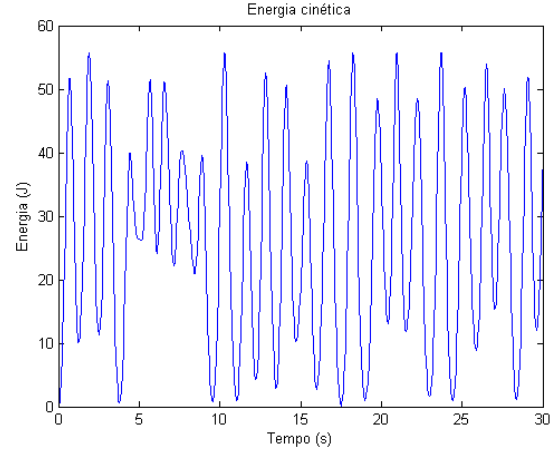


(b) Variação da energia cinética

Figura 5: Simulação sem atrito viscoso para posição inicial  $q_0 = [0, 0, 0, 0, 0, 0]$ .



(a) Variação da posição



(b) Variação da energia cinética

Figura 6: Simulação com atrito viscoso para posição inicial  $q_0 = [0, 1e-6, 0, 0, 0, 0]$ .

## 2.3 Controle em malha fechada

Para o controle em malha fechada, foi aplicado um controle PD com compensação a gravidade, como sugerido pela tese. Pode ser provado que, com a compensação da gravidade, pode-se tratar cada uma das juntas como um sistema SISO, e como tal cada uma das juntas recebe um controlador PD separadamente. Isso pode ser expresso como uma matriz diagonal das constantes de controle do sistema.

Para desenvolver o controle do robô, segue-se então o seguinte modelo, que já inclui a compensação da gravidade:

$$M(q)\ddot{q} + C(q, \dot{q})\dot{q} = -K_p\tilde{q} - K_d\dot{\tilde{q}}$$

Foi então desenvolvido o código em Matlab respectivo a equação acima, e executada simulações de controle posicional para três posições diferentes, com diferentes configurações iniciais, apresentadas nas seções a seguir. O controlador PD utilizado foi o mesmo utilizado na tese, já que assim como apresentado não há a necessidade de ajustar seus valores, pois não são decisivos para manter o sistema assintoticamente estável. Os respectivos valores para as constantes estão apresentados a seguir.

$$K_p = \begin{pmatrix} 50 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 50 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 50 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 50 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 50 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 50 \end{pmatrix}$$



$$K_d = \begin{pmatrix} 20 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 20 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 20 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 20 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 20 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 20 \end{pmatrix}$$

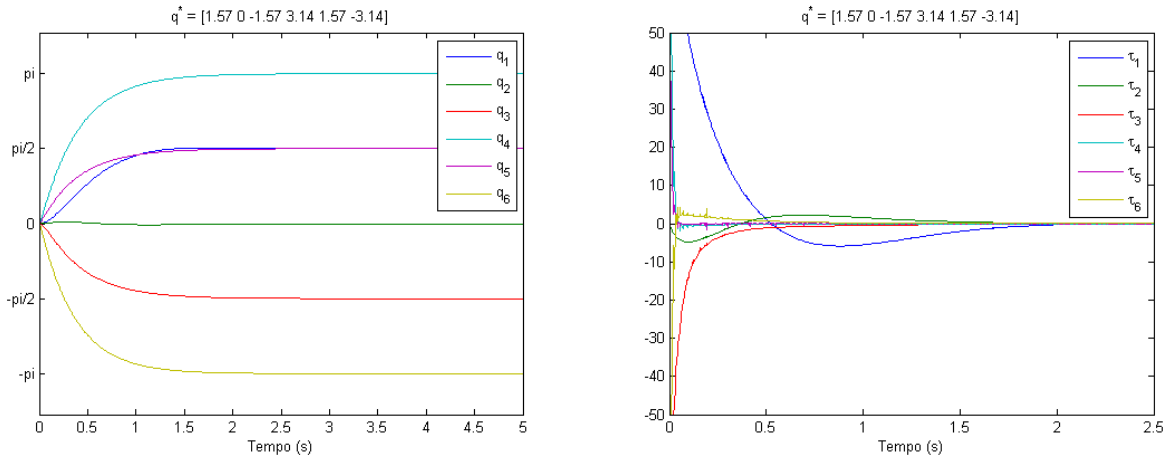
### 2.3.1 Simulação 1

$$q_{init} = [0, 0, 0, 0, 0, 0]^T$$

$$\dot{q}_{init} = [0, 0, 0, 0, 0, 0]^T$$

$$q_{ref} = [\pi/2, 0, -\pi/2, \pi, \pi/2, -\pi]^T$$

Os resultados da simulação podem ser vistos na figura ??



(a) Resposta em malha fechada da posição, simulação 1 (b) Sinal de controle (torque) em malha fechada, simulação 1

Figura 7: Respostas da simulação 1 em malha fechada.

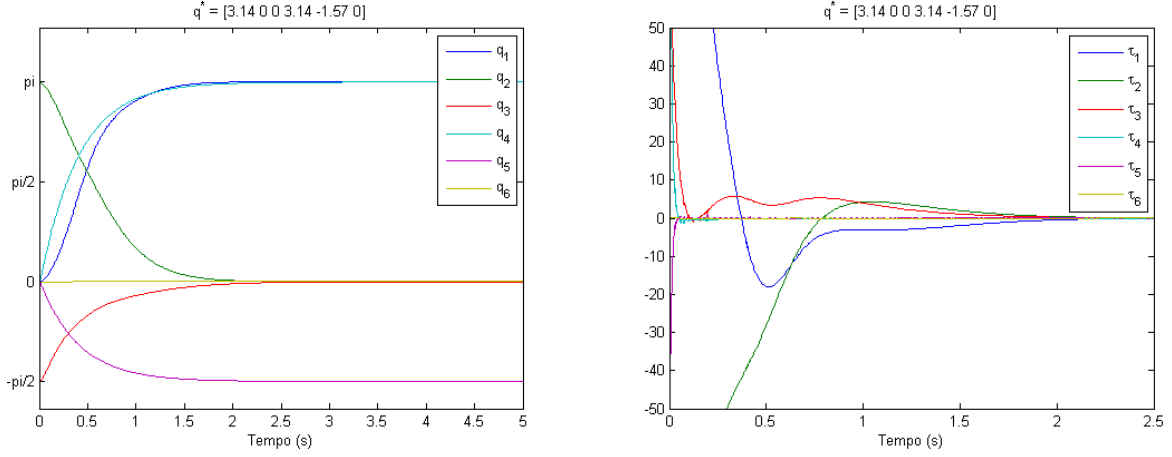
### 2.3.2 Simulação 2

$$q_{init} = [0, \pi, \pi/2, 0, 0, 0]^T$$

$$\dot{q}_{init} = [0, 0, 0, 0, 0, 0]^T$$

$$q_{ref} = [\pi, 0, 0, \pi, -\pi/2, 0]^T$$

Os resultados da simulação podem ser vistos na figura 8.



(a) Resposta em malha fechada da posição, simulação 2 (b) Sinal de controle (torque) em malha fechada, simulação 2

Figura 8: Respostas da simulação 2 em malha fechada.

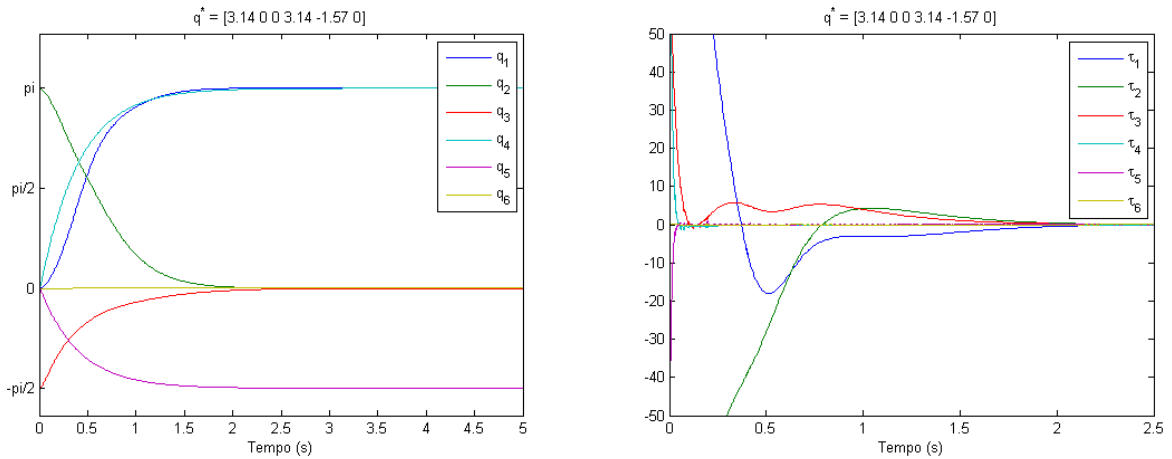
### 2.3.3 Simulação 3

$$q_{init} = [0, \pi/2, -\pi/2, 0, 0, 0]^T$$

$$\dot{q}_{init} = [0, 0, 0, 0, 0, 0]^T$$

$$q_{ref} = [-\pi, \pi, -\pi, -\pi, -\pi/2, \pi]^T$$

Os resultados da simulação podem ser vistos na figura 9.



(a) Resposta em malha fechada da posição, simulação 3 (b) Sinal de controle (torque) em malha fechada, simulação 3

Figura 9: Respostas da simulação 3 em malha fechada.

### 2.3.4 Comentários

Todas as referências passadas foram seguidas em menos de 2.5 segundos. A estabilidade assintótica também é visível, e pode-se observar que não há oscilações, que são normalmente indesejadas ao se trabalhar com robôs em geral. Como a compensação à gravidade já está incluída na equação correspondente, o torque tende a zero após chegar a posição correta.

## 3 Cinemática

Foi feita uma simulação em Matlab em que o robô desenha duas elipses, uma no plano XY e outra no plano ZY. As coordenadas desenhadas estão apresentadas a seguir. O movimento resultante do robô pode ser visto na simulação mandada em anexo a esse relatório. A trajetória final seguida pode ser vista na figura ??

$$r_x = 0.5$$

$$r_y = 0.7$$

$$z = -0.5$$

$$Ellipse_1 = [r_x * \cos(\theta), r_y * \sin(\theta), z]$$

$$x = 0.5$$

$$r_y = 0.5$$

$$r_z = 0.25$$

$$Ellipse_2 = [x, r_y * \sin(\theta), r_z * \cos(\theta)]$$

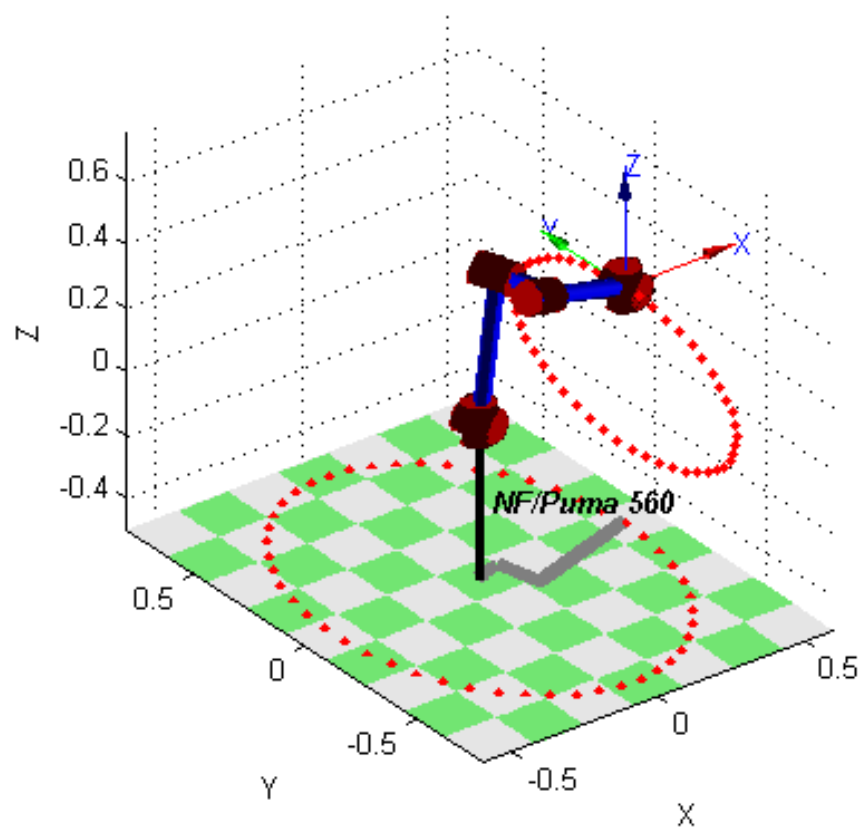


Figura 10: Trajetória das elipses seguidas pelo robô.