Universidade Estadual de Campinas

Faculdade de Engenharia Mecânica

# ES664 - Laboratório de Eletrônica para Automação Industrial

# Projeto Final

## Servo-acionamento de motor DC


| *Nome:* | *RA* |
|---|---|
| Daniel Dello Russo Oliveira | 101918 |
| Marcelli Tiemi Kian | 117892 |


25 de novembro de 2016

## 1 Objetivos

Este projeto tem como objetivo realizar o acionamento de um motor DC utilizando conversor de potência, controlar a posição por meio de servo-acionamento, e integrar componentes elétricos e mecânicos por malha de controle.

## 2 Motor e Conversor de Potência

Implementamos no Simulink o circuito apresentado na figura 1. Configuramos o bloco do motor DC disponível para que atuasse como motor DC de ímãs permanentes. Definimos os parâmetros do motor conforme especificado na tabela 1. Determinamos o torque nominal do motor utilizando a equação 1 e a constante de torque/corrente de armadura nominal resolvendo as equações 2 e 3. Existem duas combinações possíveis de constante de torque e corrente nominal que atingem os pré requisitos, escolhemos a menor corrente.

$$T_{nom} = \frac{P_{nom}}{\omega_{nom}} \tag{1}$$

$$V_{nom} = R_a * I_{nom} + k_t * \omega_{nom} \tag{2}$$

$$T_{nom} = k_t * I_{nom} \tag{3}$$

Tabela 1: Parâmetros do motor DC

| **Parâmetro** | **Valor** |
|---|---|
| Potência nominal | $5\ HP$ |
| Velocidade nominal | $1750\ rpm$ |
| Tensão nominal | $240\ V$ |
| Torque nominal | $20.3455\ Nm$ |
| Corrente nominal | $19.7128\ A$ |
| Resistência de armadura ($R_a$) | $2,58\ \Omega$ |
| Indutância de armadura ($L_a$) | $28\ mH$ |
| Inércia ($J$) | $2,22 \times 10^{-2}\ kg\ m^2$ |
| Atrito viscoso ($B$) | $2,95 \times 10^{-3}\ N\ m\ s$ |
| Constante de Torque ($k_t$) | $1.0321\ Nm/A$ |

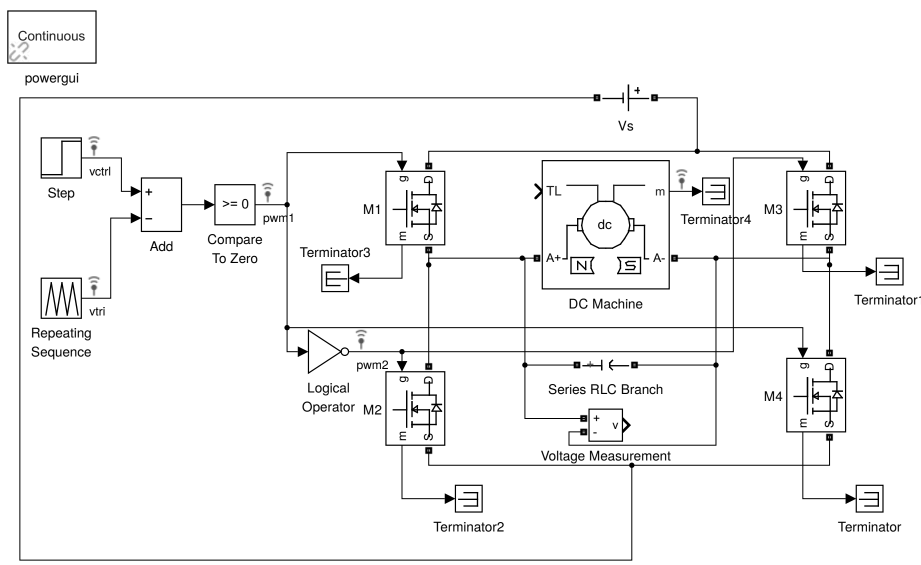
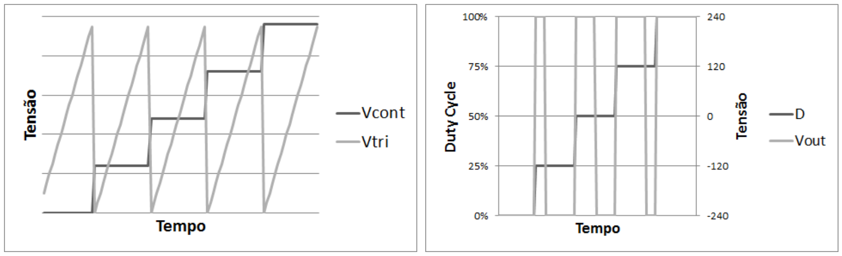



Figura 1: Esquemático da simulação para dimensionamento do motor DC e conversor

Para o acionamento do motor, utilizamos uma ponte H composta por MOSFETs, sendo que o circuito de acionamento funciona com a diferença de potencial entre sinal de controle ($v_{cont}$) e uma onda triangular ($v_{tri}$), com funcionamento explicado pela figura 2. Para fins de simulação utilizamos $v_{cont}$ e $v_{tri}$ variando entre $0\ V$ e $100\ V$, mas este valor pode variar desde que atenda aos requisitos de acionamento do MOSFET.



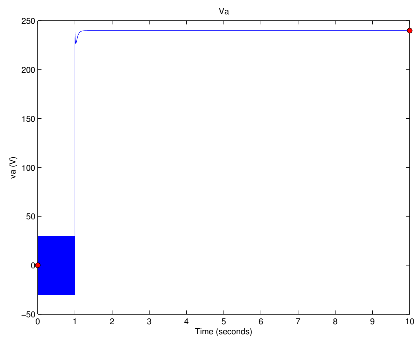

(a) Controle e onda triangular (b) Duty cycle e tensão de saída

Figura 2: Esquema de funcionamento do circuito de controle da ponte H

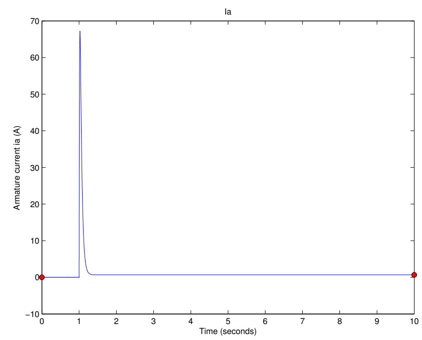
A fim de garantir um bom fator de forma na saída do conversor, colocamos um capacitor de filtro $C_f$ em paralelo com a carga. Para o motor em questão chegamos ao seguinte valor:

$$C_f = 1000\ \mu F \tag{4}$$

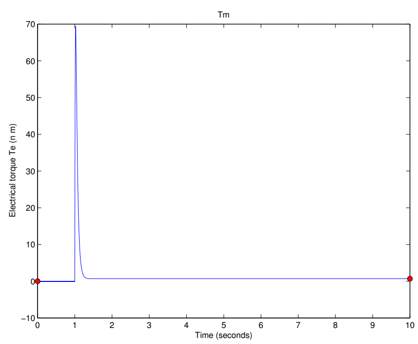
Fizemos a simulação da resposta do motor a um degrau com $V_{out} = 240\ V$, sem cargas, apenas com os parâmetros físicos definidos nele mesmo. Obtivemos os resultados de tensão e correntes de armadura ($v_a$ e $i_a$), e também curvas de torque e velocidade angular ($T_{em}$ e $\omega_m$) conforme figura 3.



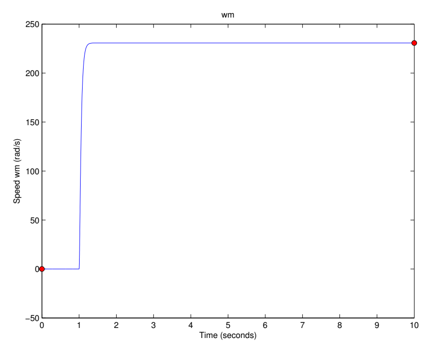

(a) Tensão de armadura




(b) Corrente de armadura




(c) Torque




(d) Velocidade angular

Figura 3: Resposta ao degrau de 240 $V$ no motor DC

Podemos ver que ainda existe uma oscilação significativa na tensão de armadura, porém julgamos inviável aumentar a capacitância de filtro. Notamos também que a velocidade atingida supera a velocidade nominal, fator esperado uma vez que estamos trabalhando sem carga. Existe um pico de corrente que ultrapassa significativamente o valor nominal e que pode vir a danificar o motor.

## 3 Servo-acionamento

Iniciamos o projeto do servo-acionamento pelo controle PI de corrente. Utilizando o Simulink, conforme figura 4.

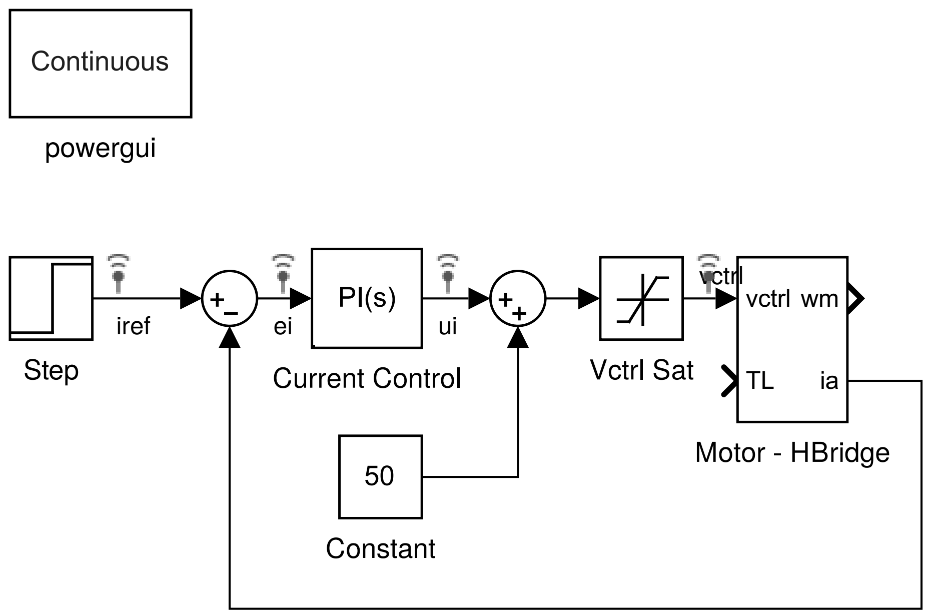



Figura 4: Esquemático da simulação do controlador de corrente

Para facilitar o controle somamos um offset de 50% no duty-cycle de saída, assim se o esforço de controle for negativo a tensão sobre o motor será negativa e se este for positivo a tensão será positiva. Dimensionamos o controlador PI para que ele responda a um degrau unitário com erro estacionário de menos de $0,2\ A$ e com tempo de resposta menor do que $100\ ms$. Para isso escolhemos as constantes proporcional e integral de maneira iterativa, ajustando-as de para atingir nosso objetivo. As constantes escolhidas foram:

$$k_p = 3 \tag{5}$$

$$k_i = 100 \tag{6}$$

A resposta do controlador ao degrau unitário está apresentada na figura 5, podemos ver que ele tem uma resposta satisfatória considerando os requisitos de projeto.

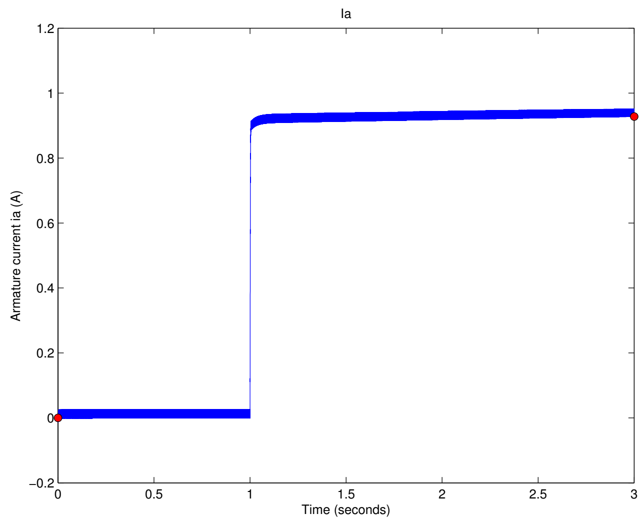



Figura 5: Resposta do controlador de corrente ao degrau unitário

Projetamos então um controlador PI para a velocidade angular do motor, cuja saída é saturada no valor de corrente nominal e serve de referência para nosso controlador de corrente. O esquema desse sistema pode ser visto na figura 6.

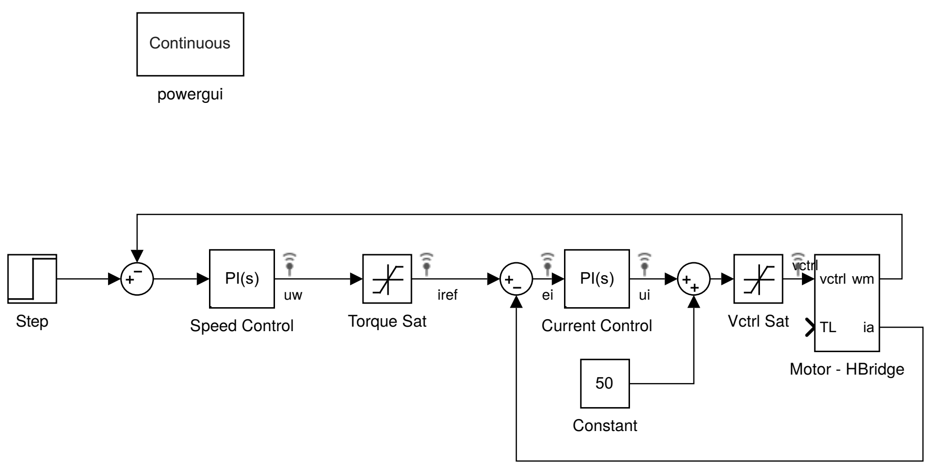


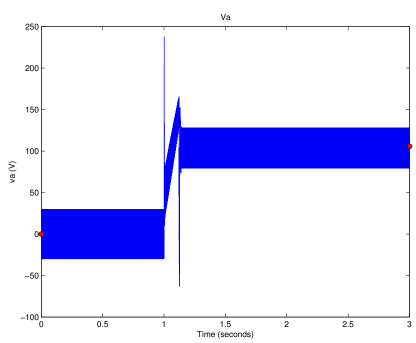

Figura 6: Esquemático da simulação do controlador de velocidade

Projetamos esse controlador para que ele possua um erro estacionário de menos do que 0.2 $rad/s$ com tempo de resposta menor do que 400 $ms$. Para isso encontramos as constantes:

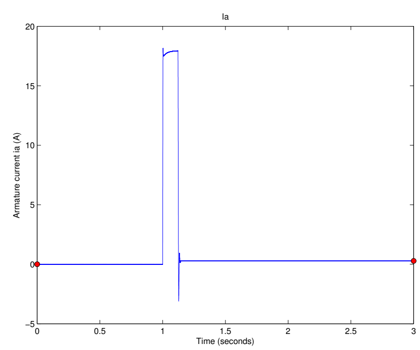
$$k_p = 10 \tag{7}$$

$$k_i = 1 \tag{8}$$

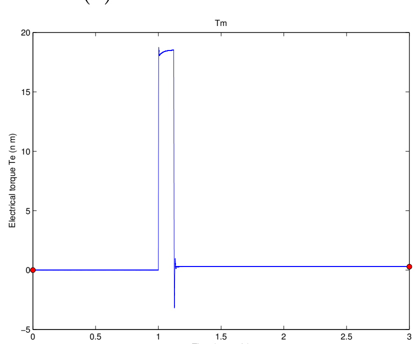
Simulamos a resposta do controlador a um degrau de velocidade de 100 $rad/s$ para um motor sem carga, encontrando os resultados apresentados na figura 7. Podemos ver que novamente o controlador cumpre os requisitos do projeto e que o problema do pico de corrente no motor foi resolvido.



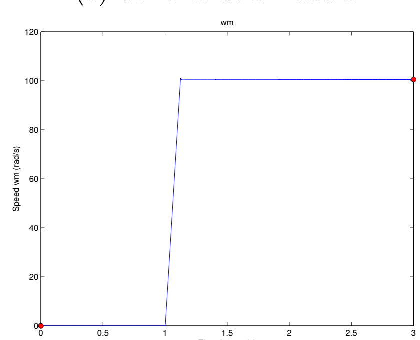

(a) Tensão de armadura




(b) Corrente de armadura




(c) Torque




(d) Velocidade angular

Figura 7: Resposta ao degrau de 100 $rad/s$ para controlador de velocidade

O dimensionamento dos ganhos de ambos controladores seguiram o mesmo procedimento, nós primeiro encontramos um valor para o ganho proporcional que atendia os pré requisitos de tempo de resposta e depois ajustamos a constante integral para controlar o erro estacionário.

# 4 Modelagem do Manipulador

Realizamos a modelagem mecânica do manipulador robótico simplificado, conforme especificado no roteiro. O sistema foi reduzido para uma junta rotacional cujo link tem massa 4 $kg$, comprimento 60 $cm$ e que atua em um range de 0 à 90°, conforme apresentado na figura 8.

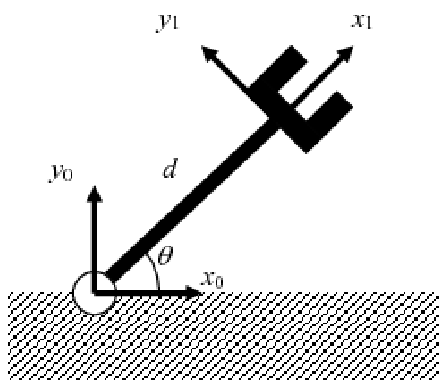



Figura 8: Manipulador robótico de 1 grau de liberdade

Encontramos o modelo cinemático direto notando que a posição (X,Y) da garra do robô é dada por:

$$X(\theta) = d \cdot cos(\theta) \tag{9}$$

$$Y(\theta) = d \cdot sin(\theta) \tag{10}$$

Podemos calcular o modelo cinemático inverso notando que:

$$\theta(x, y) = atan(\frac{y}{x}) \tag{11}$$

Encontramos então o modelo dinâmico da junta, encontrando o torque nela dada uma posição e aceleração, para isso calculamos primeiramente o momento de inércia do link, obtendo:

$$J_{link} = \frac{m \cdot d^2}{3} \tag{12}$$

Calculamos então o torque gerado pela força peso, obtendo:

$$\tau_P(\theta) = m \cdot g \cdot \frac{d \cdot cos(\theta)}{2} \tag{13}$$

O modelo dinâmico pode então ser representado como:

$$\tau(\theta, \ddot{\theta}) = m \cdot g \cdot \frac{d \cdot cos(\theta)}{2} + J_{link} \cdot \ddot{\theta} \tag{14}$$

Para simplificar a simulação, consideramos que o torque da ferramenta é só causado pela força peso e somamos seu momento de inércia ao momento de inércia do motor. Simulamos a resposta do sistema para um perfil de velocidade trapezoidal com tempo de aceleração e desaceleração de 10% do tempo do movimento que leva o robô da posição $\theta = 0°$ para $\theta = 90°$ em um, cinco e dez segundos. O esquema da simulação pode ser visto na figura 9 e os resultados na figuras 10, 11 e 12.

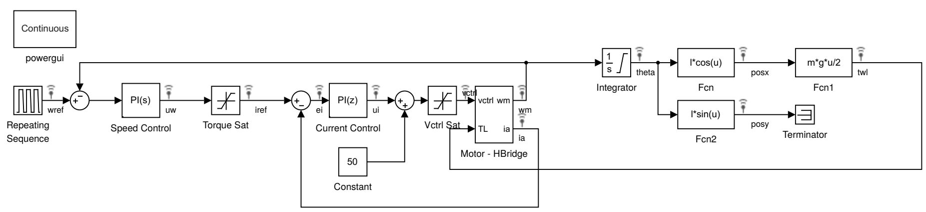
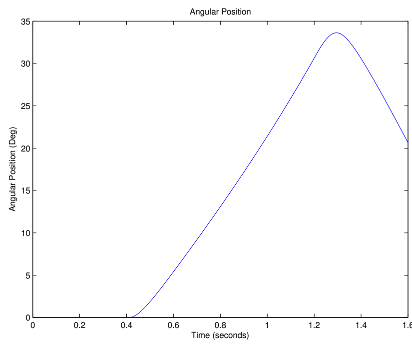
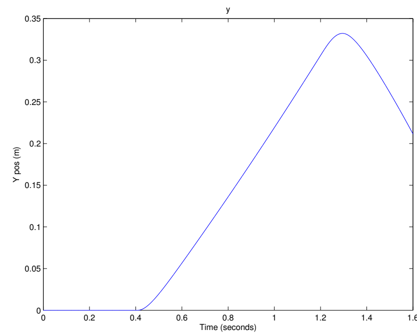


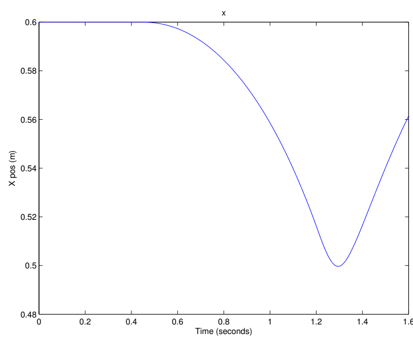

Figura 9: Esquemático da simulação do modelo dinâmico



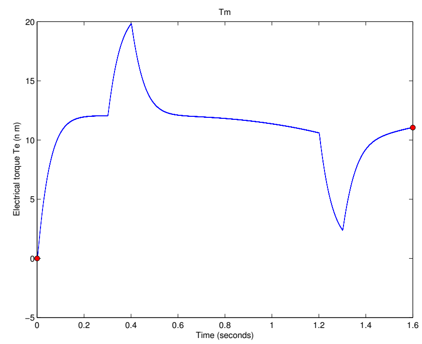

(a) Posição $\theta$



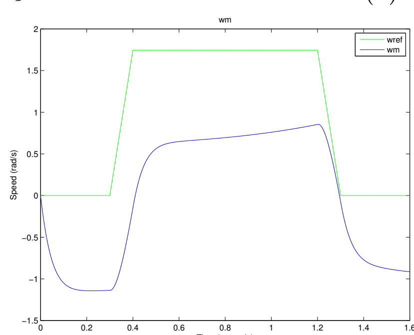

(b) Posição Y




(c) Posição X

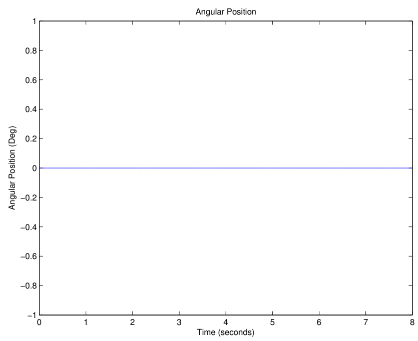



(d) Torque

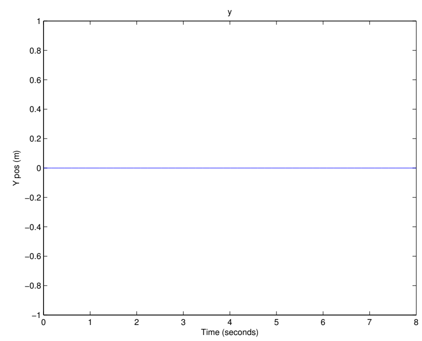



(e) Velocidade angular

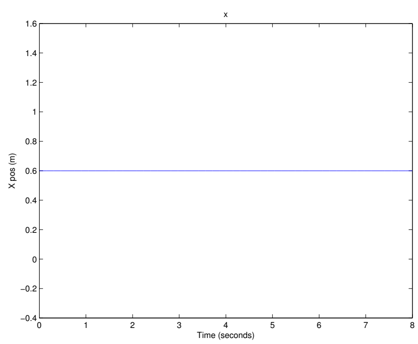
Figura 10: Resposta à perfil de velocidade trapezoidal de 1 segundo



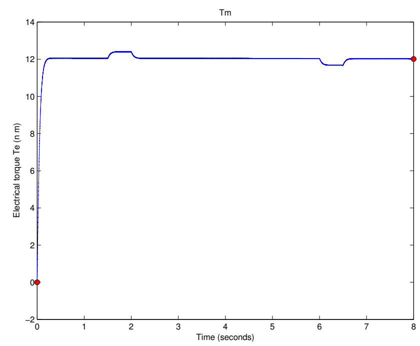

(a) Posição $\theta$



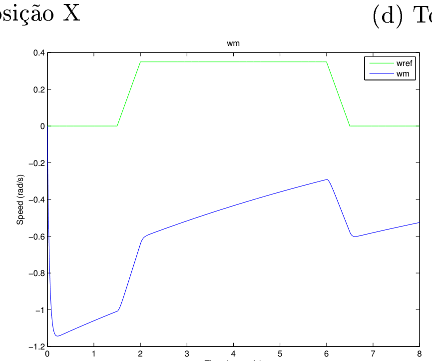

(b) Posição Y




(c) Posição X

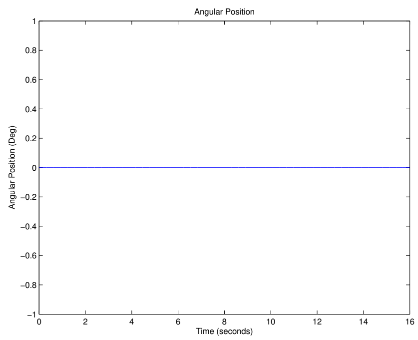



(d) Torque

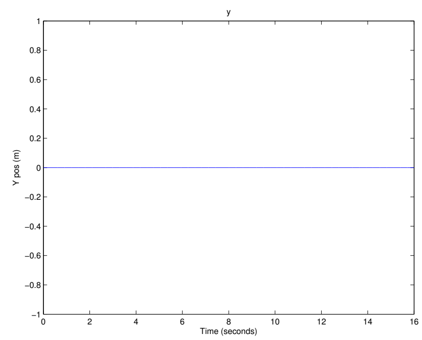



(e) Velocidade angular

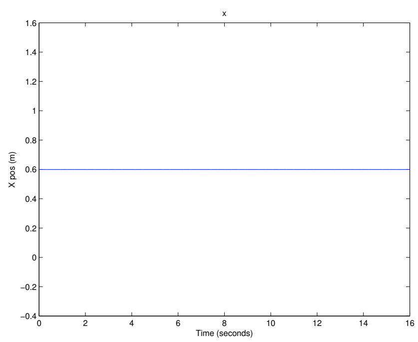
Figura 11: Resposta à perfil de velocidade trapezoidal de 5 segundos



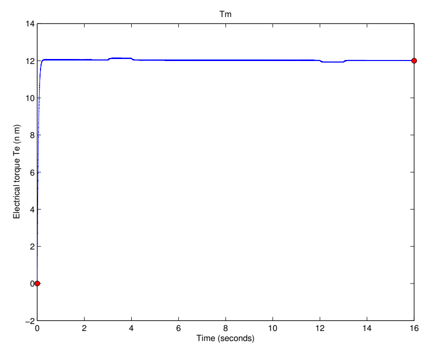

(a) Posição $\theta$



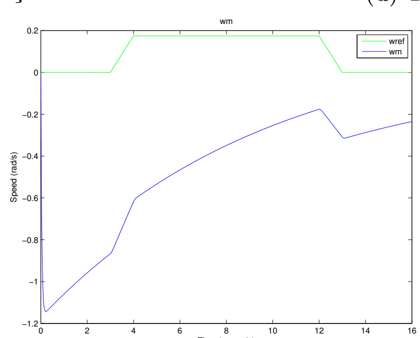

(b) Posição Y




(c) Posição X




(d) Torque




(e) Velocidade angular

Figura 12: Resposta à perfil de velocidade trapezoidal de 10 segundos

Como podemos ver o erro estacionário de nosso controlador aumentou drasticamente, isso pois ele foi projetado na situação em que está sem carga. Notamos que embora o perfil de velocidade seja negativo, a posição $\theta$ não fica menor que 0, isso acontece pois impomos um limite físico ao sistema. As curvas de velocidade requisitadas são muito menores do que a velocidade nominal do motor, explicando o desempenho pobre.

# 5 Acoplamento Motor-Robô e Integração do sistema

Para aumentar o perfil de velocidades requisitado do motor e trabalhar dentro da faixa ideal para nosso servo-controlador, acoplamos o motor e o robô com uma transmissão que reduz a velocidade angular por um fator de 20 vezes. Adicionamos também um controlador P para a posição do robô de ganho proporcional $k_p = 200$. O esquema final do sistema pode ser visto na figura 13. Ajustamos o momento de inércia do motor para ser $J + J_{link}/20$, novamente afim de simplificar as simulações.

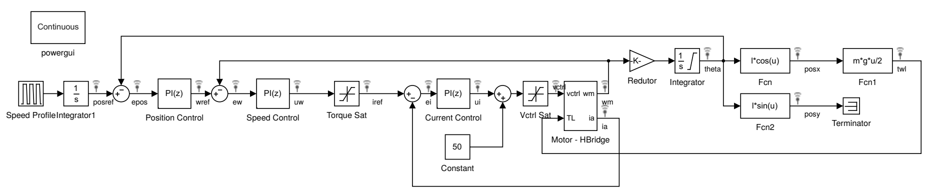
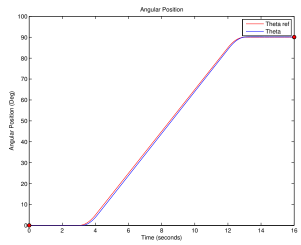
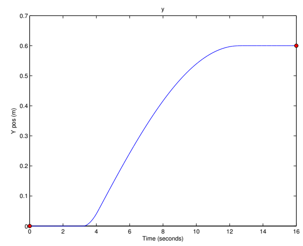
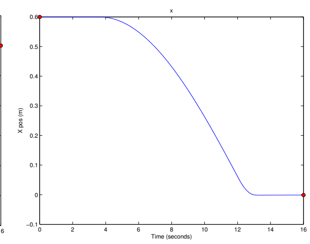



Figura 13: Esquemático da simulação do sistema completo

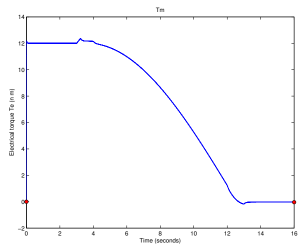
Requisitamos o mesmo perfil de velocidade trapezoidal para a ferramenta, indo de 0 à 90° em 10 segundos, os resultados da simulação são apresentados na figura 14.

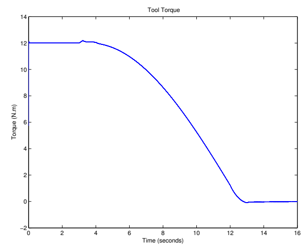


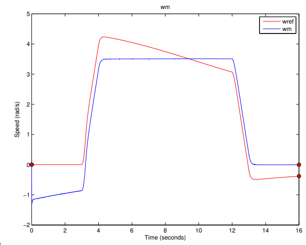



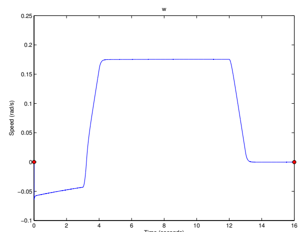

(a) Posição $\theta$ (b) Posição Y (c) Posição X

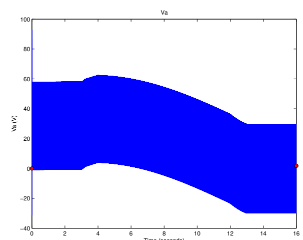


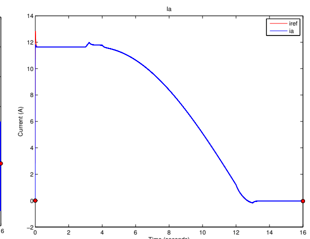



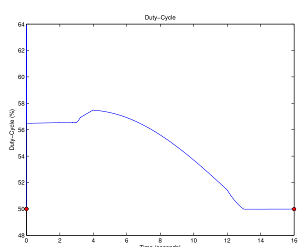

(d) Torque do motor (e) Torque da ferramenta (f) Velocidade angular do motor

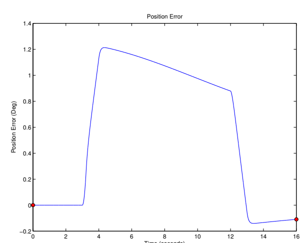


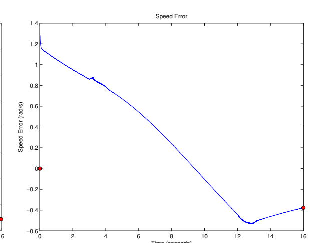




(g) Velocidade angular da ferramenta (h) Tensão de armadura (i) Corrente de armadura



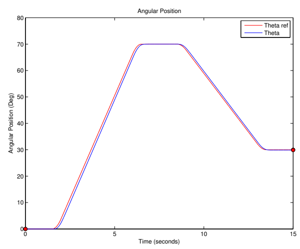




(j) Duty-Cycle (k) Erro de posição (l) Erro de velocidade

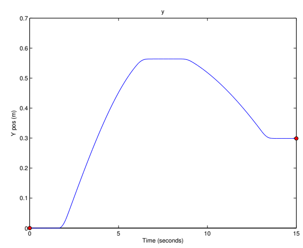
Figura 14: Resposta à perfil de velocidade trapezoidal de 10 segundos

Como podemos ver o sistema segue satisfatoriamente a curva desejada. O efeito da carga acoplada distorceu nossa curva de velocidade de referência, uma vez que o torque da posição inicial faz com que o motor adquira uma velocidade negativa, mas o controle em posição foi suficiente para corrigir esse erro.

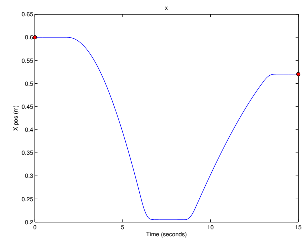
Simulamos também a resposta do sistema à um perfil de velocidades trapezoidal que leva o motor da posição 0 à 70° em 5 segundos e depois volta para posição 30° em mais 5 e a passos de 10° em 10° que levam o robô da posição 0 à 90°, pausando por dois segundos em cada posição intermediária. As respostas estão apresentadas nas figuras 15 e 16 respectivamente.



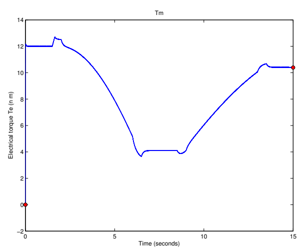

(a) Posição $\theta$



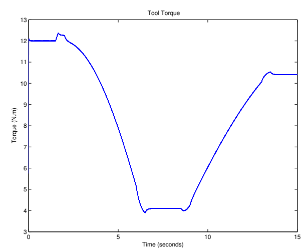

(b) Posição Y



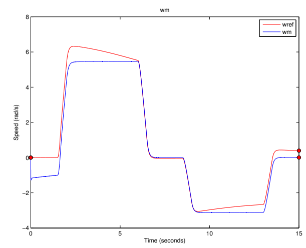

(c) Posição X



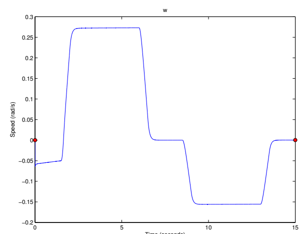

(d) Torque do motor



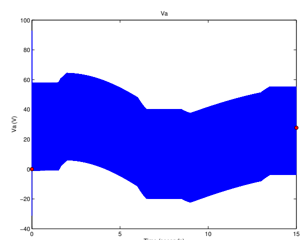

(e) Torque da ferramenta



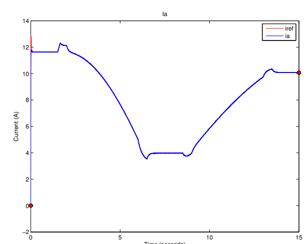

(f) Velocidade angular do motor



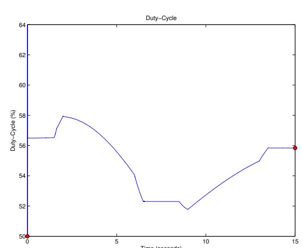

(g) Velocidade angular da ferramenta



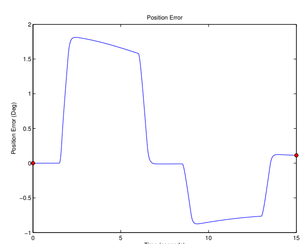

(h) Tensão de armadura



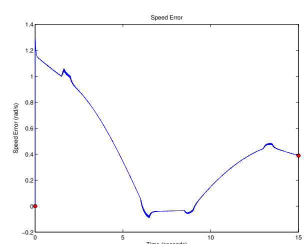

(i) Corrente de armadura




(j) Duty-Cycle

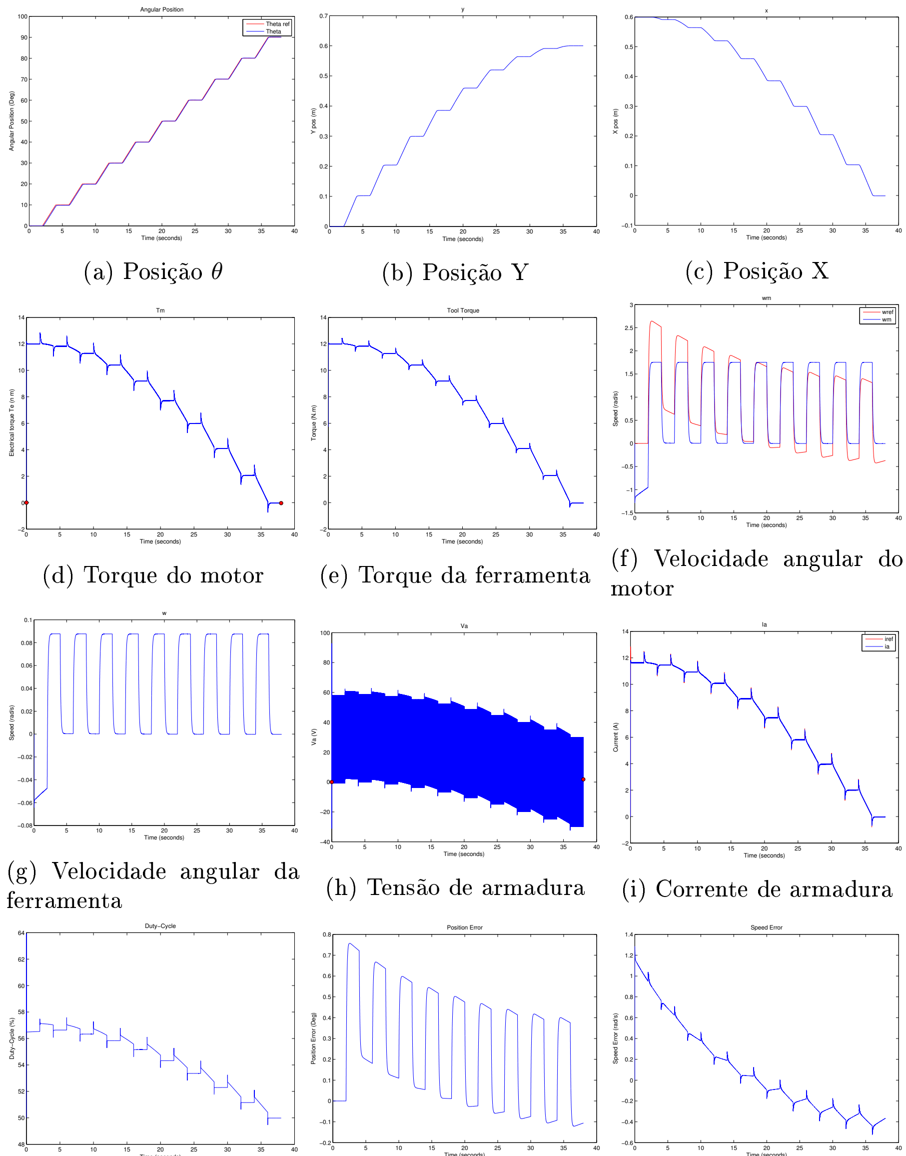



(k) Erro de posição




(l) Erro de velocidade

Figura 15: Resposta à perfil de velocidade trapezoidal com ida e volta em 5 segundos cada




(a) Posição $\theta$
(b) Posição Y
(c) Posição X
(d) Torque do motor
(e) Torque da ferramenta
(f) Velocidade angular do motor
(g) Velocidade angular da ferramenta
(h) Tensão de armadura
(i) Corrente de armadura
(j) Duty-Cycle
(k) Erro de posição
(l) Erro de velocidade

Figura 16: Resposta à degraus de posição