



UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS

FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA

---

## ES664 - Laboratório de Eletrônica para Automação Industrial

### Projeto Final Servo-acionamento de motor DC

---

*Nome:*

Daniel Dello Russo Oliveira  
Marcelli Tiemi Kian

*RA*

101918  
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.

$$T_{nom} = \frac{P_{nom}}{\omega_{nom}} \quad (1)$$

$$V_{nom} = R_a * I_{nom} + k_t * \omega_{nom} \quad (2)$$

$$T_{nom} = k_t * I_{nom} \quad (3)$$

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 ( $J$ )	$2,22 \times 10^{-2} \text{ kg m}^2$
Atrito viscoso ( $B$ )	$2,95 \times 10^{-3} \text{ N m s}$
Constante de Torque ( $k_t$ )	1.0321 Nm/A

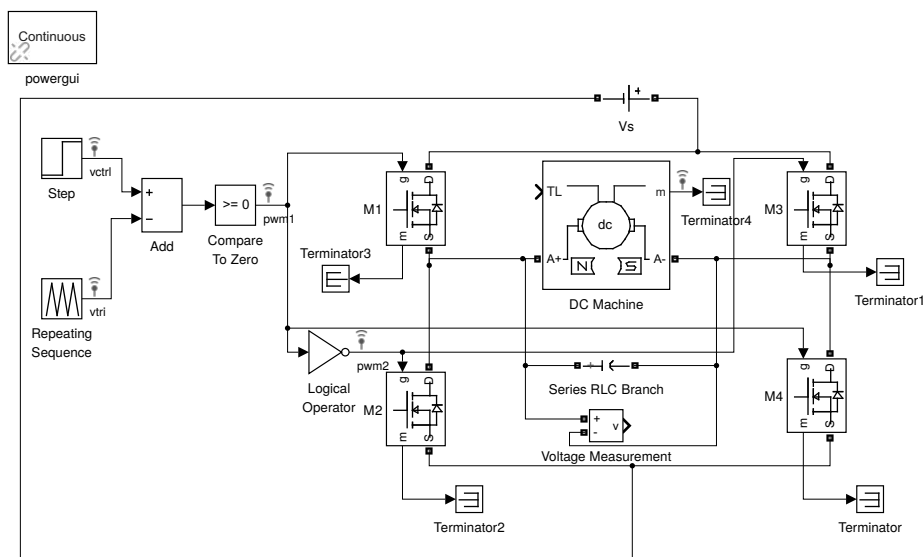
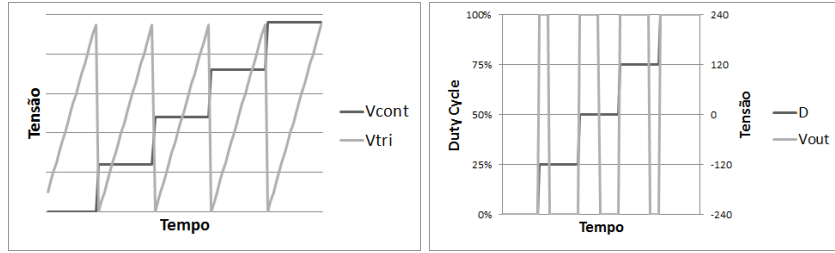


Figura 1: Esquemático da simulação para dimensionamento do motor DC e conversor

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:

$$C_f = 1000 \mu F \quad (4)$$

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.

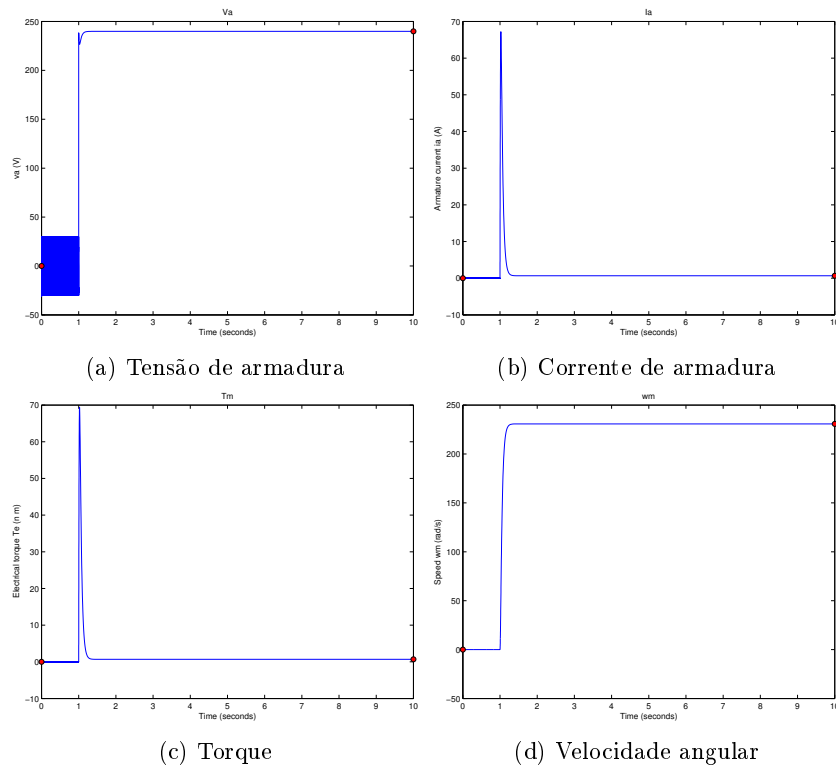


Figura 3: Resposta ao degrau de 240 V no motor DC

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.

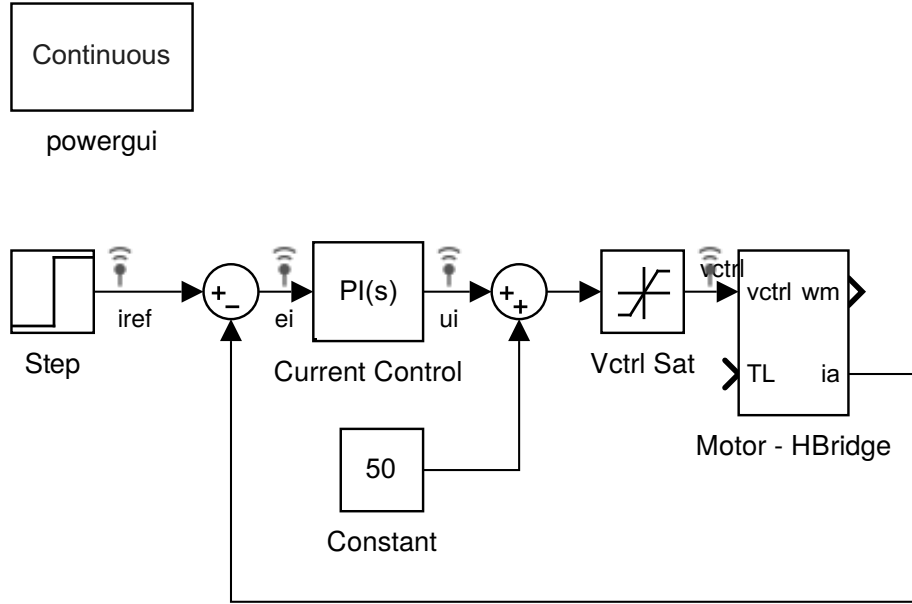


Figura 4: Esquemático da simulação do controlador de corrente

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  $0,2\text{ A}$  e com tempo de resposta menor do que  $100\text{ ms}$ . Para isso escolhemos as constantes proporcional e integral de maneira iterativa, ajustando-as de para atingir nosso objetivo. As constantes escolhidas foram:

$$k_p = 3 \quad (5)$$

$$k_i = 100 \quad (6)$$

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.

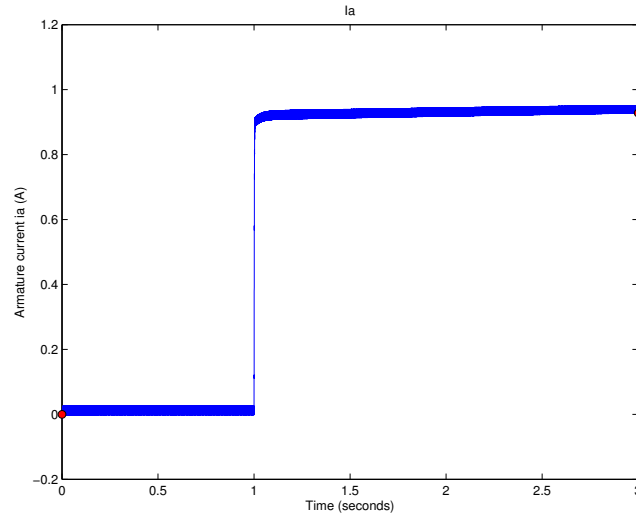


Figura 5: Resposta do controlador de corrente ao degrau unitário

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.

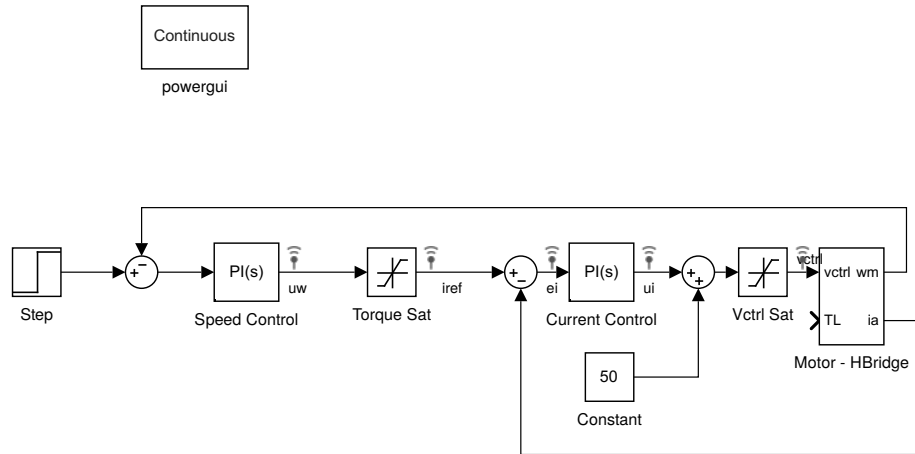


Figura 6: Esquemático da simulação do controlador de velocidade

Projetamos esse controlador para que ele possua um erro estacionário de menos do que  $0.2 \text{ rad/s}$  com tempo de resposta menor do que  $400 \text{ ms}$ . Para

isso encontramos as constantes:

$$k_p = 10 \quad (7)$$

$$k_i = 1 \quad (8)$$

Simulamos a resposta do controlador a um degrau de velocidade de  $100 \text{ rad/s}$  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.

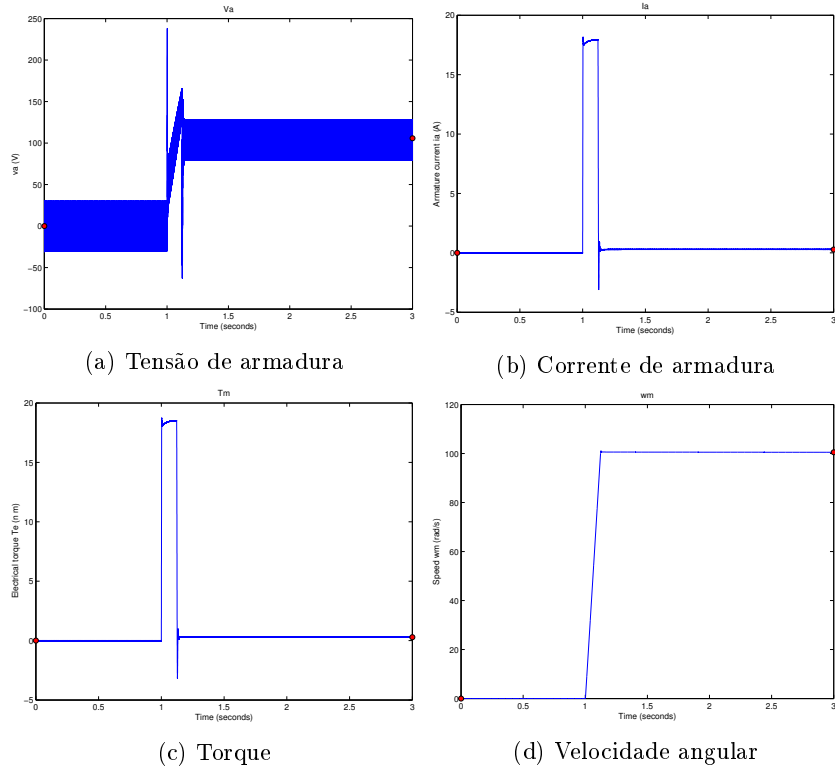


Figura 7: Resposta ao degrau de  $100 \text{ rad/s}$  para controlador de velocidade

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  $4\text{ kg}$ , comprimento  $60\text{ cm}$  e que atua em um range de  $0$  à  $90^\circ$ , conforme apresentado na figura 8.

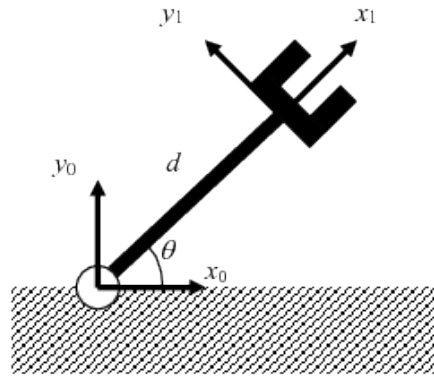


Figura 8: Manipulador robótico de 1 grau de liberdade

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

$$X(\theta) = d \cdot \cos(\theta) \quad (9)$$

$$Y(\theta) = d \cdot \sin(\theta) \quad (10)$$

Podemos calcular o modelo cinemático inverso notando que:

$$\theta(x, y) = \text{atan}\left(\frac{y}{x}\right) \quad (11)$$

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:

$$J_{link} = \frac{m \cdot d^2}{3} \quad (12)$$

Calculamos então o torque gerado pela força peso, obtendo:

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

O modelo dinâmico pode então ser representado como:

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

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  $\theta = 0^\circ$  para  $\theta = 90^\circ$  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.

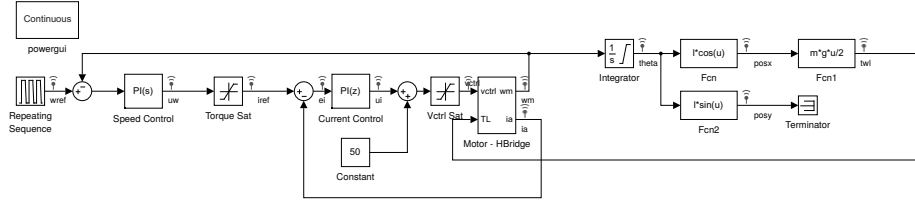


Figura 9: Esquemático da simulação do modelo dinâmico

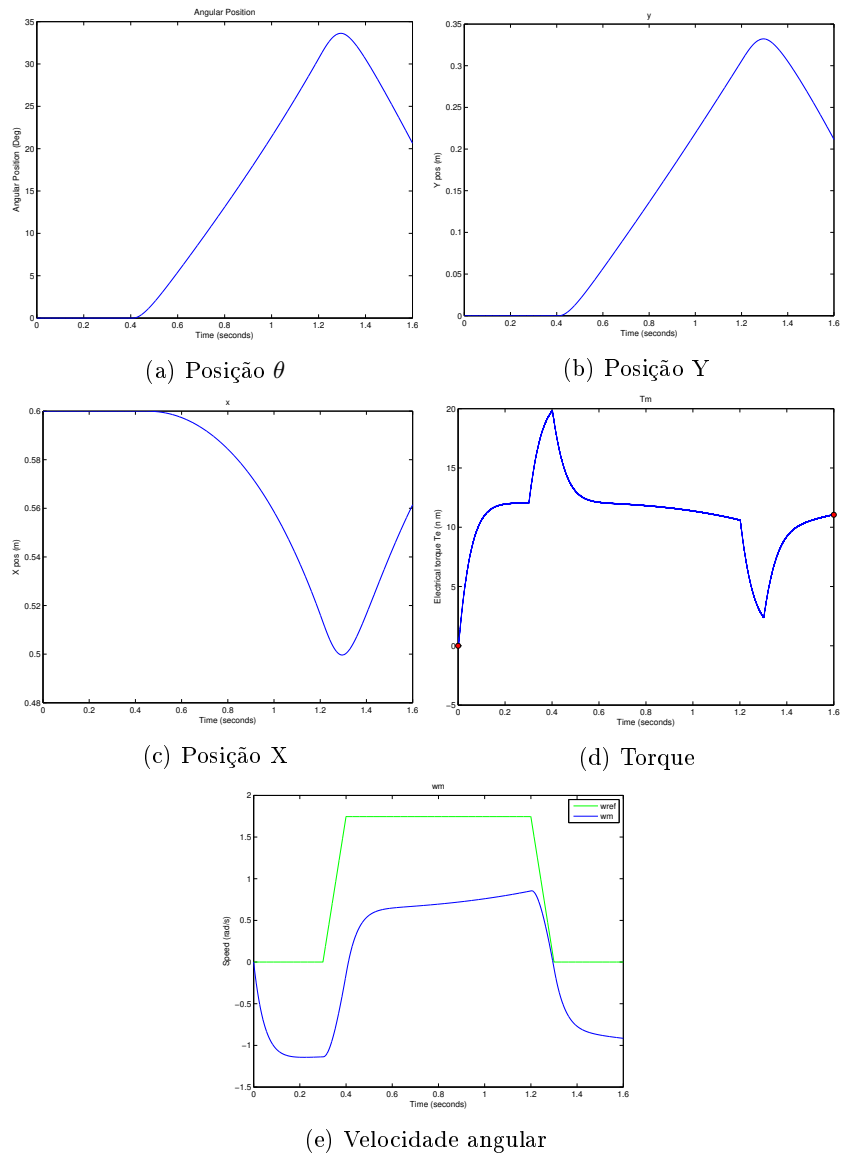


Figura 10: Resposta à perfil de velocidade trapezoidal de 1 segundo

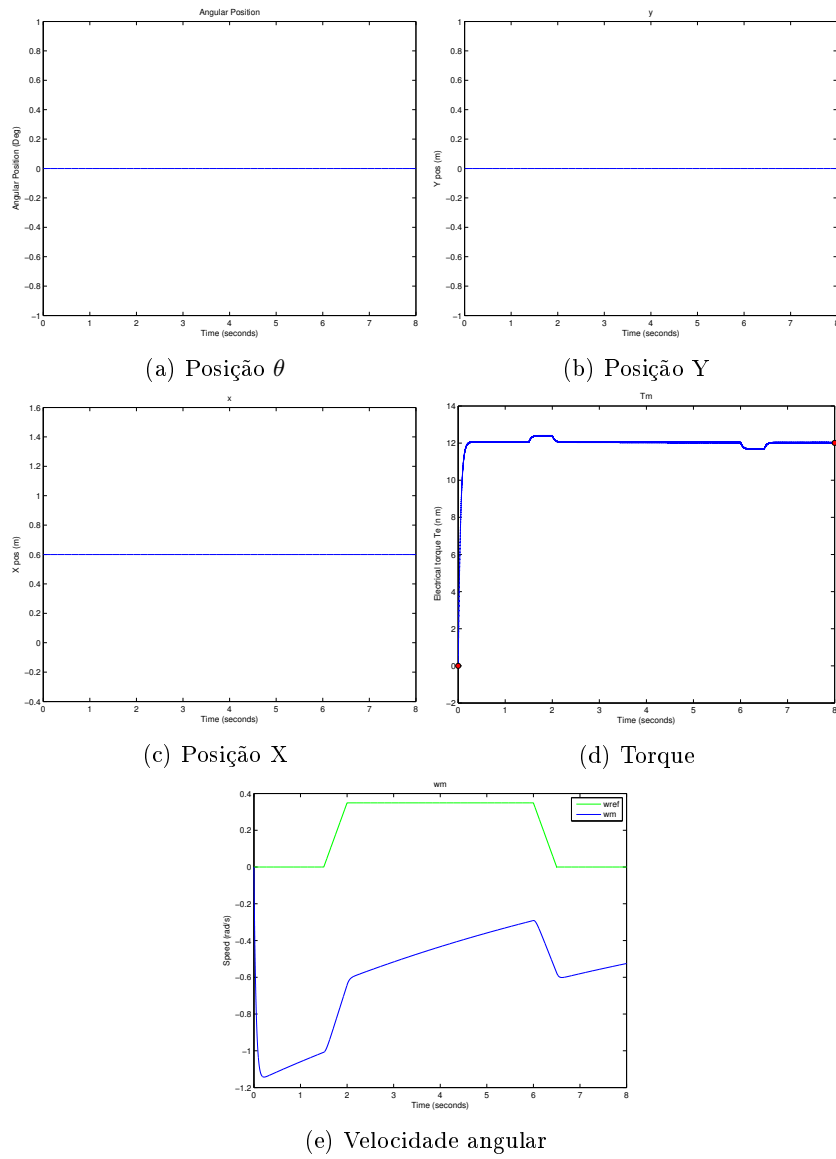


Figura 11: Resposta à perfil de velocidade trapezoidal de 5 segundos

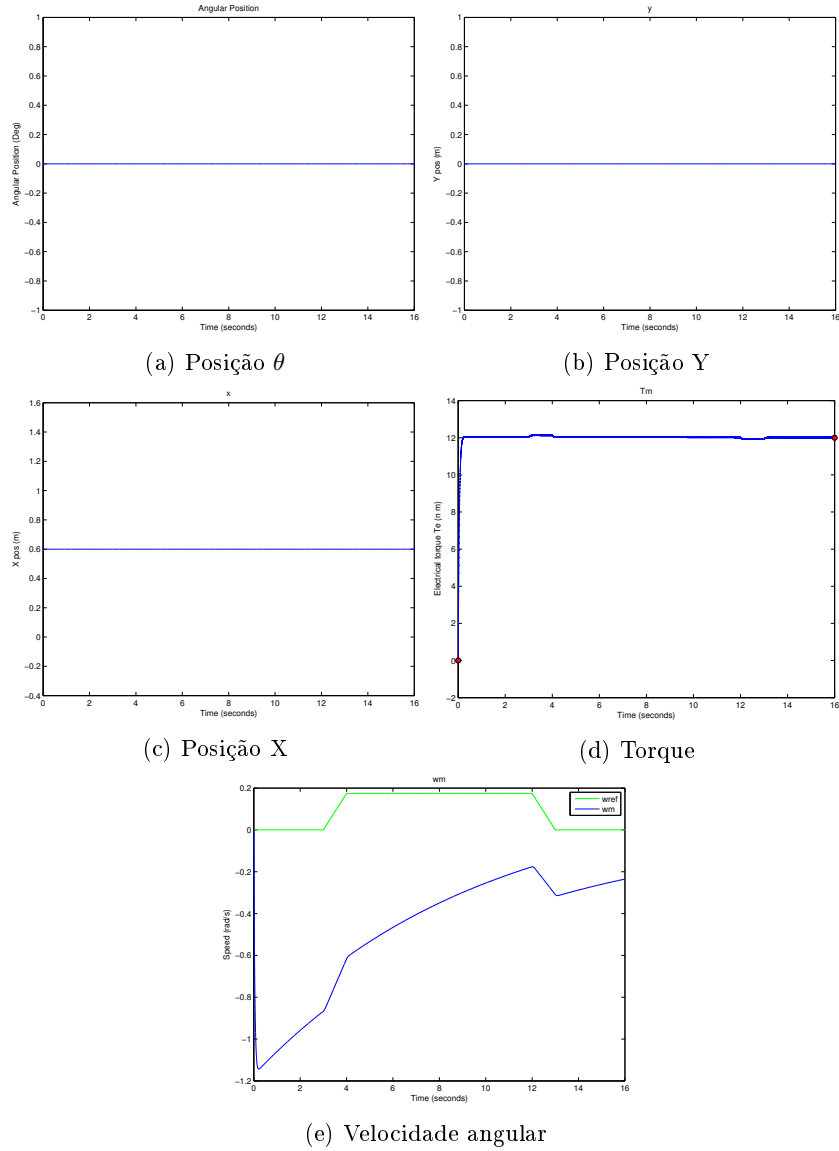


Figura 12: Resposta à perfil de velocidade trapezoidal de 10 segundos

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.

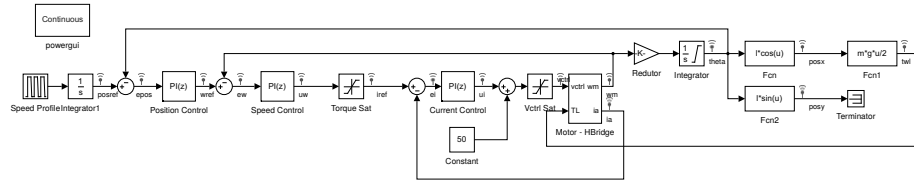


Figura 13: Esquemático da simulação do sistema completo

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

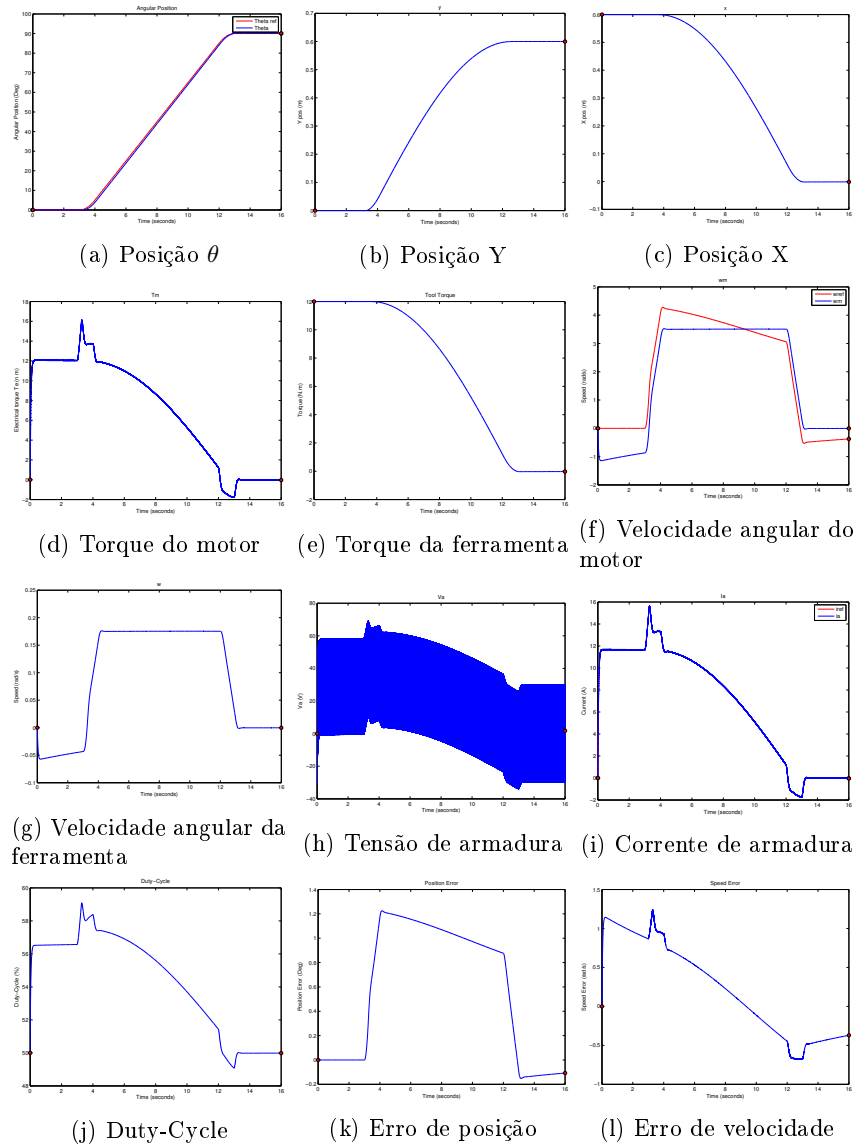


Figura 14: Resposta à perfil de velocidade trapezoidal de 10 segundos

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 trape-

zoidal 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.

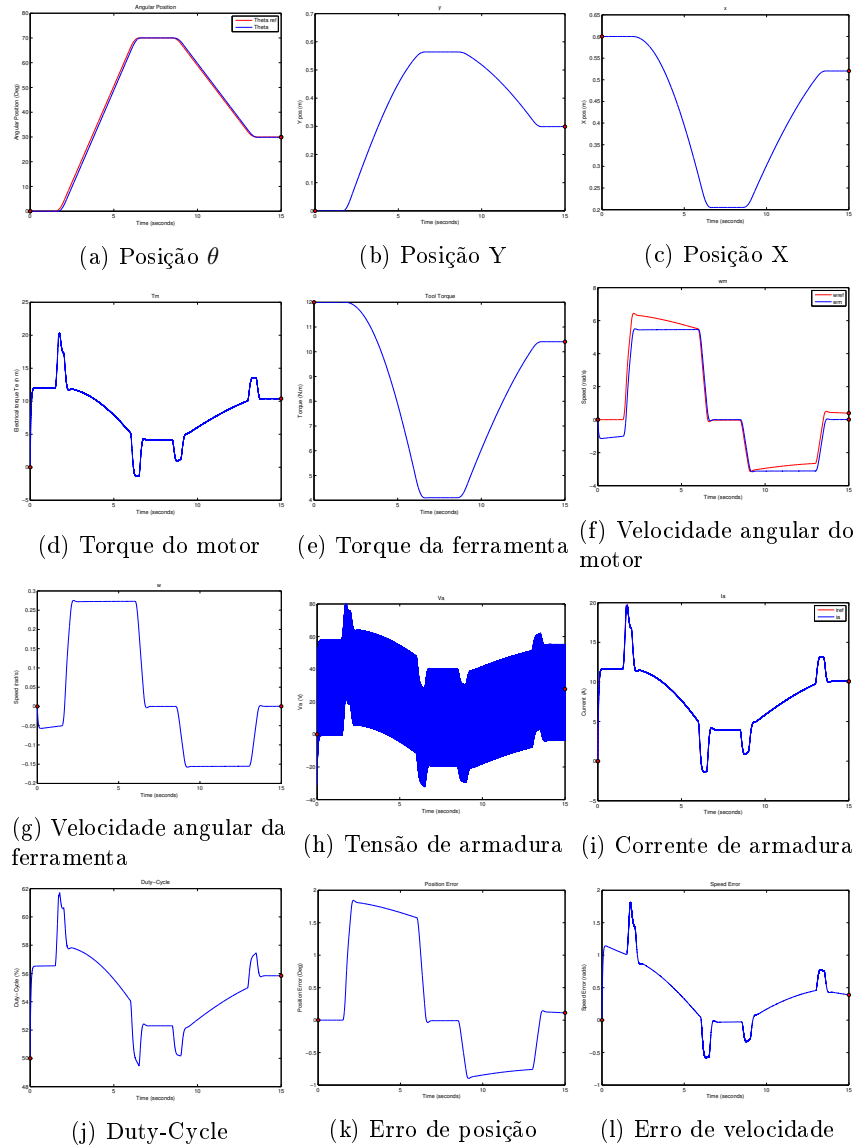


Figura 15: Resposta à perfil de velocidade trapezoidal com ida e volta em 5 segundos cada



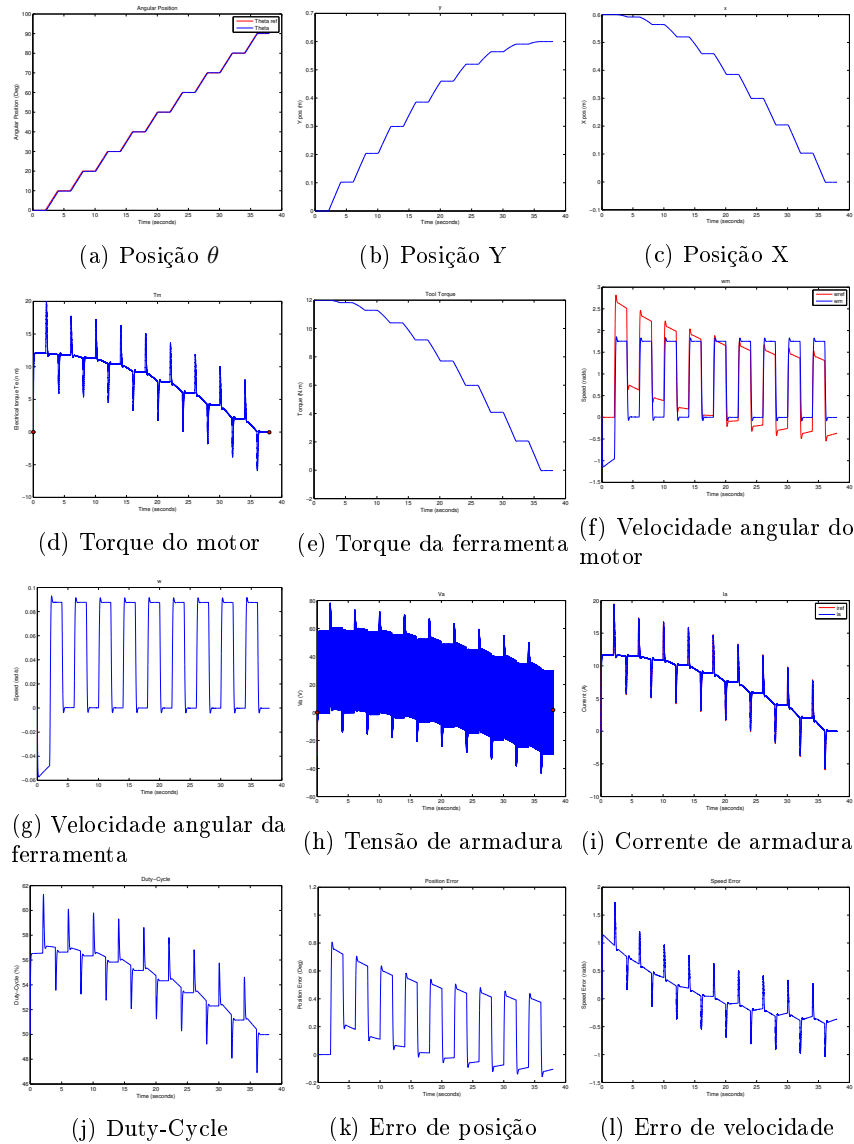


Figura 16: Resposta à degraus de posição