# 7 Simulações

Neste capítulo, é apresentada primeiramente a simulação do controle de um motor de passo. Em seguida, o controle de seis motores aplicados ao manipulador proposto é estudado. As simulações são feitas usando o *software Simulink's SimPowerSystem*.

# 7.1. Modelo de motor de passo

O modelo de motor de passo, apresentado no capítulo 3, está disponível na biblioteca de blocos do Simulink. Este bloco permite que motores de relutância variável e motores de imã permanente (ou híbridos) sejam simulados. O modelo de motor consiste de uma parte elétrica e uma parte mecânica [21]. A parte elétrica é baseada no circuito equivalente composto com um resistor e um indutor em série. Este circuito representa bem o motor se o circuito magnético não possui saturação e se a indutância mutua entre as fases é desprezível. A parte mecânica do motor é baseada em um rotor com inércia e atrito viscoso. A Figura 46 mostra o ícone do modelo de motor de passo do Simulink.



Motor de Passo

Figura 46 – Ícone do motor de passo do Simulink

O terminal *TL* recebe o torque da carga. Os terminais A+, A-, B+ e B- se conectam ao *driver* para serem alimentados. A saída *m* é um vetor contendo cinco sinais: tensão das fases, corrente das fases, torque eletromagnético, velocidade do

rotor e posição do rotor. A Figura 47 apresenta a caixa de diálogo de configuração deste bloco.

Block Parameters: Motor de Passo	>
Stepper Motor (mask) (link)	_
Depending on the motor configuration specified by the Motor type parameter, this block models:	<b>E</b> .
<ul> <li>- a two or four phases permanent-magnet / hybrid stepper motor,</li> <li>- a three, four, or five phases variable reluctance stepper motor.</li> </ul>	
Parameters	
Motor type Permanent-magnet / Hybrid	-
Number of phases 2	-
Winding Inductance (H)	
	-
Winding resistance (Obm)	
	-
Step angle (degree)	
1.8	-
, Maximum Elux Linkage (Vs)	
0.04	-
' Maximum Detent Torque (N.m)	
0.02	
Total inertia (kg.m.m)	
0.25e-5+0.0001*0	1
Total friction (kg.m/s)	
1e-3+50e-3*1	
Initial speed (rad/s)	
0	
Initial position (degrees)	
0	
Sample time (-1 for inherited)	
-1	
OK Cancel Help Apply	

Figura 47 – Caixa de diálogo do motor de passo do Simulink

Segue abaixo a descrição de cada parâmetro solicitado:

*Motor type* – Tipo de motor simulado: imã permanente/híbrido ou relutância variável.

Number of phases – Número de fases: 2 ou 4 fases.

Winding inductance – Indutância em Henry (H) de cada fase.

*Winding resistance* – Resistência em ohm ( $\Omega$ ) de cada fase.

Step angle – Ângulo de passo em graus.

Maximum flux linkage – Máximo fluxo induzido nas fases (V.s).

*Maximum detent torque* – Torque máximo de retenção devido ao imã permanente (N.m).

*Total inertia* – Inércia do rotor mais a carga  $(kg.m^2)$ .

*Total friction* – Coeficiente de atrito total, motor mais carga, (*N.m.s*).

*Initial speed* - Velocidade angular inicial (*rad/s*).

*Initial position* – Posição inicial do rotor (graus).

A seguir é apresentado o modelo do driver que aciona este modelo de motor.

#### *7.2.* Modelo de *driver*

O *driver* alimenta os terminais do motor através de um conversor bipolar a partir de duas fontes de tensão controladas por um sequenciador de fases. A Figura 51 apresenta o modelo de *driver* implementado.



Figura 48 – Modelo de driver no Simulink

As saídas do sequenciador, *fase\_a* e *fase\_b*, podem assumir três valores: -1, 0 e + 1. Esses valores são multiplicados pela tensão entre os terminais V+ e V-, e o valor desse produto é colocado em um gerador de tensão equivalente a esses sinais.

O sequenciador recebe duas entradas, pulso e direção, e determina como as fases serão excitadas. O terminal direção determina o sentido da rotação, enquanto o terminal pulso determina que um incremento na rotação deve ser dado. Este modelo de sequenciador pode ser utilizado em modo meio passo ou passo completo. A Figura 52 mostra esquematicamente como, em função dos sinais de entrada, as fases são energizadas em modo meio passo. Este gráfico é coerente com a Tabela 2, apresentada anteriormente. O modo passo completo é obtido se a sequência de energização seguir a Tabela 1. Os dois primeiros gráficos apresentam as entradas do sequenciador. Os dois últimos mostram as saídas do *driver* para os terminais do motor de passo.



Figura 49 - Entrada e saída do sequenciador

Na Figura 52, o sequenciador recebe nove pulsos de passo, um a cada 0,01s, sempre na mesma direção. Se o motor utilizado for de 200 passos por volta, uma rotação de  $0,9^o$  deve ser realizada a cada pulso. A entrada de direção é constante, logo o motor gira em um só sentido. A seguir é apresentado o gerado de pulsos que envia os pulsos para o sequenciador.

## 7.3. Gerador de pulsos

Segundo a malha de controle proposta no Capítulo 4, os pulsos para o motor de passo devem ser gerados em função de uma velocidade demandada. Ou seja, o gerador de pulsos deve gerar pulsos de passo e direção que gerem uma velocidade no motor proporcional ao sinal de entrada. A Figura 53 apresenta o modelo de gerador implementado no Simulink.



Figura 50 - Modelo de gerador de pulsos

Este gerador de pulsos recebe a velocidade através do terminal *omega* e, se for positiva, coloca *1* na saída *dir* e calcula o inverso do módulo de *omega* para usar como período. Se a velocidade for negativa, o gerador coloca *0* na saída *dir*. Então, o gerador calcula a integral do tempo e compara com o valor do período calculado a partir da velocidade de entrada. Quando a integral é maior que o período calculado, é gerado um pulso na saída *pulso* e a integral do tempo reiniciada. Este modelo é utilizado por ser semelhante ao "estouro" do *timer* de microcontrolador PIC.

## 7.4. Controlador

O modelo de controlador é baseado na malha de controle proposta no Capítulo 4. O controlador recebe o erro, diferença entre posição medida e demandada, e calcula a velocidade de saída a ser demandada ao gerador de pulsos. A Figura 51 apresenta o modelo de controlador.



Figura 51 – Modelo de controlador

A frequência do gerador de pulsos determina o espaço de tempo em que a saída do controlador é calculada. O subsistema que calcula a saída do controlador é apresentado na Figura 52.



Figura 52 – Subsistema com algoritmo de controle

O cálculo da saída é feito através da comparação de três valores:

*V\_PD* – Velocidade de saída calculado por uma lei de controle PD;

*V\_MAX* – Velocidade de saída máxima que não ultrapassa a aceleração máxima;

*V\_MIN* – Velocidade de saída mínima que não ultrapassa a desaceleração máxima.

Se  $V\_PD$  for maior que  $V\_MAX$ , então a saída é dada por  $V\_MAX$ . Se  $V\_PD$  for menor que  $V\_MIN$ , então a saída é dada por  $V\_MIN$ . Se  $V\_PD$  estiver entre  $V\_MAX$  e  $V\_MIN$ , então a saída é dada por  $V\_PD$ . A saída deve estar dentro de um limite para evitar que o motor atinja uma velocidade excessiva. Este algoritmo é feito a partir da base de regras proposta no Capítulo 4. A seção seguinte apresenta estes modelos integrados para a simulação do sistema motor-controlador.

## 7.5. Simulação de um motor com controlador

A simulação do sistema com os motores e o controlador proposto é feita a partir dos modelos apresentados. A Figura 53 apresenta o modelo implementado em Simulink.



Figura 53 - Modelo de motor, redutor e controlador

Os parâmetros do motor são os apresentados na Figura 47. O modelo do *encoder* é apresentado na Figura 54. O *encoder* deste modelo possui 6000 ppr (pulsos por revolução).



Figura 54 - Modelo do encoder

Neste sistema, o motor está ligado a um redutor com relação de transmissão de 20:1. A posição demandada para o sistema é dada em relação aos incrementos do *encoder*. Primeiro é apresentado o resultado da simulação de um degrau na posição demandada. É demandada na entrada a posição 250, ou seja, o *encoder* deve realizar 250 pulsos de rotação no sentido positivo, o que resulta em uma rotação de 15° no *encoder*. Como entre o *encoder* e o motor existe o redutor de 20:1, o motor deve realizar uma rotação de 300°. A Figura 55 apresenta o resultado da simulação.



Figura 55 - Gráficos do motor

Os gráficos mostram que o motor acelera entre aproximadamente os instantes *0 e 0,2s*, possui velocidade constante entre *0,20s* e *0,32s*, e desacelera entre *0,32s* e *0,5s*. O torque eletromagnético gerado alcançou o pico de cerca de *1Nm*. E a velocidade alcançou *20,2rad/s* de pico. A frequência máxima do gerador de pulsos é de *1000 passos/segundo*, o que resulta em um período de *0,001s*. Como o motor utilizado realiza *400ppr* em modo de excitação meio-passo, a cada pulso na entrada do *driver* o motor deve girar *0,9°*. Logo, a velocidade máxima do motor deve ser de aprox. *15,7rad/s*. Ao observar o gráfico da Figura 56, pode ser observado que a velocidade quando o controlador demanda a velocidade máxima varia entre *20,2rad/s* e *12,6rad/s*. Isto ocorre devido à natureza oscilatória do motor de passo.



Figura 56 - Velocidade máxima do motor

A Figura 57 mostra a posição do *encoder* ao longo do tempo. Pode ser observado que o motor alcança o valor demandado em aproximadamente 0,5s.



Figura 57 - Posição do encoder

Em seguida são apresentados os resultados para o motor sendo demandado de uma trajetória senoidal. A Figura 58 apresenta o resultado para a frequência de 0,05Hz e amplitude de 40 incrementos do *encoder*.



Figura 58 - Sistema demandado de 40inc. de amplitude, a 0,05Hz

No caso apresentado na Figura 58, o sistema é capaz de seguir a trajetória com um erro próximo à resolução do *encoder*. Logo, o erro observado é devido em grande parte à discretização na medida do *encoder*. A Figura 59 apresenta o resultado para a mesma amplitude, mas uma frequência dez vezes maior, ou seja, *0,5Hz*. O erro aumentou devido à maior velocidade demandada.



Figura 59 - Sistema demandado de 40inc. de amplitude, a 0,5Hz

A seção a seguir mostra como o controlador deve ser ajustado.

#### 7.6. Ajuste do controlador

Na seção 4.3 são propostos alguns ensaios para determinar as constantes  $\alpha$ e  $V_s$ . A partir destas constantes, a eq. (4.12) fornece uma estimativa para o ganho proporcional  $K_p$ . O ganho  $K_D$  pode ser estimado inicialmente com um valor quase nulo. O ajuste fino das constantes  $K_p$  e  $K_D$  pode ser feito observando o comportamento do sistema quando a saída do controlador usa o valor calculado pela lei PD,  $V_{PD}$ . A simulação do degrau apresentada na seção anterior possui  $\alpha = 5000$  e  $V_s = 1000$ . A partir destes valores, a eq. (4.12) estima  $K_p \cong 10$ . A constante proporcional pode ter um valor baixo, então é estimado por  $K_D = 0.02$ . A Figura 60 mostra, para este caso, o controlador usando o valor calculado pelo PD.



Figura 60 – Saída com  $K_P = 10$  e  $K_D = 0.02$ 

A linha Vc é a saída do controlador, enquanto Vpd é o valor calculado pela lei de controle PD. Nesta condição, a desaceleração é muito lenta e o sistema demora a alcançar a meta. Se o motor não estiver perdendo passos, o valor de Vc corresponde a aproximadamente a velocidade do motor (em *passos/s*, ou pps). Como o valor de  $K_p$  é baixo, o controlador usa o valor calculado pelo PD durante grande parte da desaceleração. Entretanto, é provável que o sistema consiga desacelerar da mesma forma como acelerou, então o valor de  $K_p$  pode ser aumentado. A Figura 61 apresenta o resultado da saída do controlador se  $K_p = 15$ .





Nesta condição ocorre uma resposta exagerada do controlador e o sistema ultrapassa a meta, tendo que inverter o movimento para alcançar o valor correto, ou seja, um *overshoot*. A desaceleração neste caso é semelhante à aceleração, mas o sistema começa a desacelerar muito tarde. Devido à base de regras, o instante em  $t \approx 0.35s$ , onde  $V_{PD} = V_C$ , determinou o início da desaceleração. A Figura 62 apresenta o resultado da saída do controlador se  $K_P = 13$ .



Figura 62 – Saída com  $K_{P} = 13$  e  $K_{D} = 0.02$ 

Neste caso, a saída do controlador é igual ao calculado pelo PD em dois momentos: no início da desaceleração e no final do movimento. Entre os instantes t=0 e t=0,18s o motor acelera. Esta aceleração é aproximadamente igual a  $\alpha$ , por que ao longo deste intervalo  $V_{PD} \ge V_{MAX}$ . No instante t=0,18s a saída é igual à máxima, ou seja, ocorre a saturação da saída do controlador. E entre os instantes t=0,18s e t=0,32s o motor mantém uma velocidade constante próxima a  $V_s$ . Em t=0,32s o motor começa a desaceleração. Isto ocorre porque  $V_{MIN} < V_{PD} < V_s$ . Entre os instantes t=32s e t=52s o sistema desacelera. O valor da desaceleração é aproximadamente  $\alpha$ , por que  $V_{PD} \leq V_{MIN}$ . A partir de t=0,52s o erro é nulo e a saída do controlador também. Este ajuste pode ser considerado bom, pois o motor realizou um perfil de velocidade trapezoidal, onde a aceleração é próxima da desaceleração. Se a aceleração estiver próxima da máxima, então a desaceleração também estará. Logo, o motor opera próximo das condições ótimas.

Nestes ajustes é suposto que a velocidade do motor é aproximadamente a demandada pelo controlador. A Figura 63 apresenta, em um mesmo gráfico, a velocidade do motor e a demandada pelo controlador.



Figura 63 - Velocidade do motor vs. demandada

Devido à natureza oscilatória do motor de passo, a velocidade angular oscila muito. Entretanto, é possível notar que a saída do controlador  $V_c$  corresponde a aproximadamente a velocidade média do motor.

Na seção seguinte é apresentada a simulação dos motores de passo no manipulador proposto.

## 7.7. Simulação do manipulador

O modelo do manipulador utiliza a equação de movimento, eq. (6.52), para calcular os torques dos atuadores. A Figura 64 apresenta o modelo implementado no Simulink.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1012012/CA



Figura 64 - Modelo com motores e manipulador

A função "*manipulador\_dinamica*" recebe os ângulos, velocidades e acelerações das juntas e calcula o torque necessário em cada junta para realizar este movimento. Nos modelos dos motores de cada junta, a entrada de torque da

carga recebe este torque calculado. Esta função também calcula a posição e orientação da extremidade. Estes dados são calculados para geração de gráficos. O código em MATLAB desta função é apresentado no Apêndice B. A função " $M_gen$ " calcula a matriz de inércia do manipulador a partir das coordenadas das juntas.

Os blocos "*Motor-Redutor*" incluem os modelos dos motores e controladores de cada junta, como apresentado anteriormente. As diferenças entre os blocos de cada junta são apresentados abaixo.

- Parâmetros do motor;
- Modo de excitação do motor;
- Relação de transmissão dos redutores;
- Resolução dos encoders;
- Parâmetros do controlador.

Os parâmetros dos motores estão no Apêndice C. A Tabela 5 possui os demais dados de cada bloco.

Bloco	Modo Excitação	Transmissão	Encoder	$K_{P}$	$K_D$
1	Meio Passo	20:1	6000ppr	13	0,02
2	Meio Passo	20:1	6000ppr	13	0,02
3	Meio Passo	20:1	4000ppr	19	0,02
4	Meio Passo	10:1	4000ppr	10	0,02
5	Passo Completo	10:1	2500ppr	15	0,02
6	Passo Completo	10:1	2500ppr	15	0,02

Tabela 5 - Configuração dos blocos Motor-Redutor

O coeficiente de atrito do motor utilizado na simulação é estimado em função dos mancais, mas não é um valor crítico para a simulação. E em muitos casos o atrito do motor é desprezível comparado com o da carga. Em alguns dos motores simulados, o valor torque de retenção não é fornecido pelo fabricante. Então é estimado como 5% do torque de fixação, que é um parâmetro fornecido. O fluxo máximo induzido é um parâmetro não fornecido pelo fabricante, mas é importante para a simulação. Assim, é necessário calcular este valor a partir de um ensaio do motor. A seção seguinte mostra como este cálculo é feito a partir de uma instrumentação do motor.

# 7.8. Cálculo do fluxo máximo induzido dos motores utilizados

O fluxo máximo induzido  $\Psi_M$  nos motores não é fornecido pelos fabricantes dos motores testados. O cálculo de  $\Psi_M$  é feito através da eq. (3.16). Logo, é necessário medir a tensão em uma das fases com o circuito aberto e a velocidade angular do rotor. A Figura 65 apresenta o esquema da bancada utilizada para medir tensão e velocidade angular dos motores. A bancada consiste de um torno onde o eixo do motor de passo é fixado à placa universal. Desta forma, é gerada uma velocidade constante no rotor do motor de passo. Um tacômetro é acoplado ao eixo do rotor. O osciloscópio mede a forma de onda gerada em um dos enrolamentos do motor com o circuito aberto.



Figura 65 – Esquema da bancada de medidas

A Figura 66 apresenta uma foto da bancada de medidas, onde é possível ver o motor girando, o tacômetro medindo a velocidade de rotação e o osciloscópio mostrando a forma de onda. Para três velocidades de rotação, a máxima tensão alternada medida no osciloscópio é usada no cálculo do fluxo induzido máximo.



Figura 66 - Foto da bancada de medidas

A Figura 67 apresenta uma foto do osciloscópio e um esquema de como a tensão máxima é medida.



Figura 67 – Medida de tensão no osciloscópio

O torno mecânico é acionado em três velocidades distintas, gerando assim um valor de tensão máxima para cada condição. A Tabela 6 apresenta os valores medidos e o fluxo induzido máximo calculado através da eq. (3.16).

Motor	N(RPM)	$E_{\!\!M}$ (V)	$\boldsymbol{\theta}_{s}\left(^{o} ight)$	m	р	$\Psi_{_M}$ (Vs)	$\Psi_{_M}$ (Vs) média	
AK85H/3.75-1.8	70,1	7,2	1,8	2	50	0,0196		
AK85H/3.75-1.8	117,5	11,8	1,8	2	50	0,0192	0,019	
AK85H/3.75-1.8	204,4	20	1,8	2	50	0,0187		
AK85H8/3.36-1.8	70,1	5,4	1,8	2	50	0,0147		
AK85H8/3.36-1.8	117,5	9	1,8	2	50	0,0146	0,014	
AK85H8/3.36-1.8	204,4	15	1,8	2	50	0,0140		
AK57H/3Gxx-1.8	70,1	3, <b>5</b>	1,8	2	50	0,0095		
AK57H/3Gxx-1.8	117,5	6,8	1,8	2	50	0,0111	0,010	
AK57H/3Gxx-1.8	204,4	10	1,8	2	50	0,0093		
AK56H/3-1.8	70,1	3	1,8	2	50	0,0082		
AK56H/3-1.8	117,5	5,6	1,8	2	50	0,0091	0,0094	
AK56H/3-1.8	204,4	11,6	1,8	2	50	0,0108		

Tabela 6 – Cálculo do Fluxo Máximo Induzido

Desse modo, todos os parâmetros do motor de passo são conhecidos.

#### 7.9. Resultado da simulação do manipulador

Na simulação do manipulador com motores de passo e o controle proposto, é demandado o vetor posição das juntas  $\overline{q} = [15^\circ; 15^\circ; 22, 5^\circ; 22, 5^\circ; 36^\circ; 0^\circ]$ . O manipulador parte da posição onde todos os ângulos das juntas são nulos. A partir da cinemática direta, pode-se determinar que a extremidade do manipulador parte da posição (0,350; 0,00; -0,210)m e deve alcançar a posição (0,4714; 0,1147; -0,0778)m. A Figura 68 mostra o gráfico do erro da posição da extremidade ao longo do tempo.



Figura 68 - Erro da posição da extremidade

O gráfico do erro ao longo do tempo mostra que o manipulador demora cerca de 0,65s para alcançar a posição desejada. Ao final do movimento, o erro de

posicionamento da extremidade é de cerca de *0,5mm*. A Figura 69 mostra a posição dos elos do manipulador em vários instantes de tempo. As linhas tracejadas representam os elos e o círculo a extremidade.



Figura 69 - Movimento do manipulador

A Figura 70 mostra o rastro do movimento da extremidade.



Figura 70 - Rastro do manipulador

As simulações mostraram que o desempenho do manipulador é adequado para diversas aplicações industriais. O erro do posicionamento final é devido, principalmente, ao erro de quantização do *encoder* e a resolução do motor de passo.