

Instituto Mauá de Tecnologia  
Núcleo de Sistemas Eletrônicos Embarcados - NSEE  
Simulador motor BLDC

Juliano Tusi Amaral Laganá Pinto  
julianotusi@gmail.com

24 de junho de 2015



# Sumário

<b>1</b>	<b>Introdução</b>	<b>4</b>
1.1	Objetivo . . . . .	4
1.2	Sistema de interesse . . . . .	4
1.3	Hipóteses . . . . .	5
1.4	Modelo matemático . . . . .	5
<b>2</b>	<b>Implementação</b>	<b>7</b>
2.1	Bloco BLDC . . . . .	7
2.2	Bloco BLDC com lógica de comutação em blocos . . . . .	8
<b>3</b>	<b>Ferramentas adicionais</b>	<b>9</b>
3.1	Medição de posição . . . . .	9
3.2	Medição de velocidade . . . . .	10

# Revision History

Revision	Date	Author(s)	Description
0.0.1	16.10.14	Juliano Laganá	Criação do documento
0.0.2	21.10.14	Juliano Laganá	Adição do encoder e do método M/T aos blocos especificados
0.0.3	24.06.15	Juliano Laganá	Substituição do modelo elétrico de fases individuais pelo modelo elétrico com as fases acopladas

# 1 Introdução

## 1.1 Objetivo

O objetivo desse documento é disponibilizar um manual de uso da biblioteca “BLDC.slx” para simulação do motor DC sem escovas (BLDC).

## 1.2 Sistema de interesse

O sistema de interesse é um motor DC sem escovas acoplado à uma carga constante. A figura 1.1 ilustra um modelo simplificado do sistema. Os torques mostrados no desenho são:

- $T_e$  : Torque elétrico gerado pelo motor.
- $T_d$  : Torque de atrito viscoso no mancal.
- $T_l$  : Torque da carga.

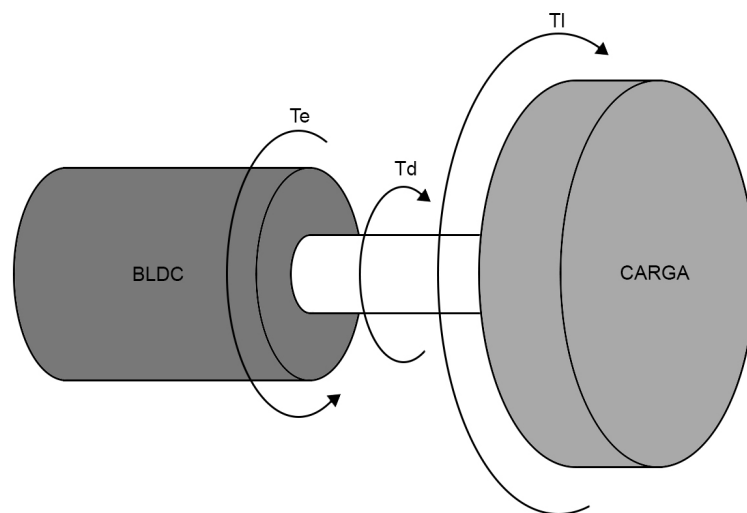


Figura 1.1: Modelo simplificado do sistema

## 1.3 Hipóteses

- Todas as fases de alimentação do BLDC tem a mesma resistência.
- Todas as fases de alimentação do BLDC tem a mesma indutância.
- Todas as partes do sistema são consideradas corpos rígidos.
- O atrito no mancal é diretamente proporcional à velocidade angular do rotor em relação ao estator.
- A força contraeletromotriz gerada em cada fase de alimentação tem o formato trapezoidal.

## 1.4 Modelo matemático

O modelo matemático implementado é o proposto por [1].

- Dinâmica mecânica:

$$J \cdot \frac{d^2 \theta_m}{dt^2} = T_e - T_l - K_d \cdot \frac{d\theta_m}{dt}$$

- Dinâmica elétrica:

$$v_{ab} = R(i_a - i_b) + L \frac{d}{dt}(i_a - i_b) + e_a - e_b$$

$$v_{bc} = R(i_a + 2i_b) + L \frac{d}{dt}(i_a + 2i_b) + e_b - e_c$$

$$i_a + i_b + i_c = 0$$

- Forças contraeletromotrizes geradas em cada fase:

$$e_a = \frac{f_a(\theta_e) \cdot K_e}{2} \cdot \frac{d\theta_m}{dt}$$

$$e_b = \frac{f_b(\theta_e) \cdot K_e}{2} \cdot \frac{d\theta_m}{dt}$$

$$e_c = \frac{f_c(\theta_e) \cdot K_e}{2} \cdot \frac{d\theta_m}{dt}$$

- Torque gerado por cada fase e torque elétrico total:

$$T_a = \frac{f_a(\theta_e) \cdot K_t \cdot i_a}{2}$$

$$T_b = \frac{f_b(\theta_e) \cdot K_t \cdot i_b}{2}$$

$$T_c = \frac{f_c(\theta_e) \cdot K_t \cdot i_c}{2}$$

$$T_e = T_a + T_b + T_c$$

- Relação entre ângulo elétrico e ângulo mecânico:

$$\theta_e = \theta_m \cdot \frac{P}{2}$$

$J$  = Inércia do sistema motor+carga

$K_d$  = Coeficiente de atrito viscoso do mancal

$K_e$  = Constante de força contraeletromotriz

$K_t$  = Constante de torque

$P$  = Número de pólos

$\theta_m$  = Ângulo do rotor em relação ao estator

$\theta_e$  = Ângulo elétrico

$L$  = Indutância de cada fase

$R$  = Resistência de cada fase

$v_{ab}$  = Tensão entre as fase  $a$  e  $b$

$v_{bc}$  = Tensão entre as fases  $b$  e  $c$

$i_a$  = Corrente na fase  $a$

$i_b$  = Corrente na fase  $b$

$i_c$  = Corrente na fase  $c$

$e_a$  = Força contraeletromotriz gerada na fase  $a$

$e_b$  = Força contraeletromotriz gerada na fase  $b$

$e_c$  = Força contraeletromotriz gerada na fase  $c$

$T_a$  = Torque elétrico gerado pela fase  $a$  no rotor

$T_b$  = Torque elétrico gerado pela fase  $b$  no rotor

$T_c$  = Torque elétrico gerado pela fase  $c$  no rotor

$T_e$  = Torque elétrico total aplicado no rotor

$f_a(\theta_e)$  = Função que reproduz o comportamento trapezoidal da força contraeletromotriz na fase  $a$

$f_b(\theta_e)$  = Função que reproduz o comportamento trapezoidal da força contraeletromotriz na fase  $b$

$f_c(\theta_e)$  = Função que reproduz o comportamento trapezoidal da força contraeletromotriz na fase  $c$

## 2 Implementação

### 2.1 Bloco BLDC

O modelo matemático apresentado na seção 1.4 foi implementado no bloco “BLDC” ilustrado na figura 2.1. Todos os parâmetros do motor podem ser alterados clicando-se duas vezes em cima do bloco.

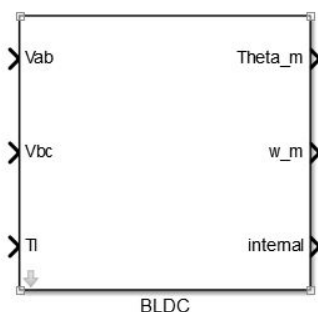


Figura 2.1: Bloco simulink para simulação do BLDC

- Entradas

1. Vab - Tensão entre as fases  $a$  e  $b$  [V]
2. Vbc - Tensão entre as fases  $b$  e  $c$  [V]
3. Tl - Torque da carga [N.m]

- Saídas

1. Theta\_m - Ângulo entre o rotor e o estator ( $\theta_m$ ) [rad]
2. w\_m - Velocidade angular entre o rotor e o estator ( $\frac{d\theta_m}{dt}$ ) [rad/s]
3. internal - Sinal multiplexado [4x1] composto pelos seguintes sinais:
  - Correntes [3x1] -  $i_a$ ,  $i_b$  e  $i_c$  [A]
  - Torques [3x1] -  $T_a$ ,  $T_b$  e  $T_c$  [N.m]
  - FCEMs [3x1] -  $e_a$ ,  $e_b$  e  $e_c$  [V]
  - Torque total -  $T_e$  [N.m]

## 2.2 Bloco BLDC com lógica de comutação em blocos

Para o devido funcionamento do BLDC é necessário comutar a tensão entre cada fase periodicamente. O bloco apresentado na figura 2.2 implementa internamente a estratégia de comutação em blocos através da utilização de três sensores de efeito hall separados por 120 graus. Todos os parâmetros do motor podem ser alterados clicando-se duas vezes em cima do bloco.

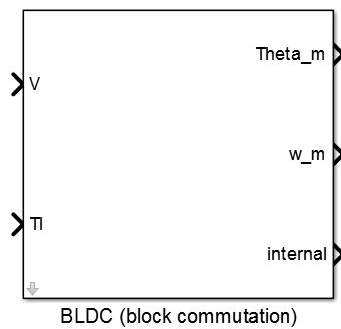


Figura 2.2: Bloco simulink para simulação do BLDC utilizando comutação em blocos

- Entradas

1. V - Tensão aplicada nas fases [V]
2. Tl - Torque da carga [N.m]

- Saídas

1. Theta\_m - Ângulo entre o rotor e o estator ( $\theta_m$ ) [rad]
2. w\_m - Velocidade angular entre o rotor e o estator ( $\frac{d\theta_m}{dt}$ ) [rad/s]
3. internal - Sinal multiplexado [4x1] composto pelos seguintes sinais:
  - Correntes [3x1] -  $i_a$ ,  $i_b$  e  $i_c$  [A]
  - Torques [3x1] -  $T_a$ ,  $T_b$  e  $T_c$  [N.m]
  - FCEMs [3x1] -  $e_a$ ,  $e_b$  e  $e_c$  [V]
  - Torque total -  $T_e$  [N.m]
  - Hall [3x1] -  $H_1$ ,  $H_2$  e  $H_3$  (Níveis lógicos de cada sensor Hall acoplado ao motor)



## 3 Ferramentas adicionais

### 3.1 Medição de posição

Para medição de posição angular do rotor foi desenvolvido um bloco que simula o funcionamento de um encoder de quadratura, ilustrado na figura 3.1. O número de pulsos por revolução pode ser configurado clicando-se duas vezes no bloco.

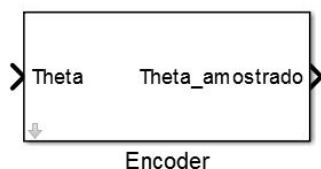


Figura 3.1: Bloco simulink para simulação de um encoder de quadratura

- Entradas
  1. Theta - Ângulo mecânico entre o rotor e o estator. [graus]
- Saídas
  1. Theta\_amostrado - Ângulo mecânico entre o rotor e o estator, amostrado pelo encoder de quadratura simulado. [graus]
- Restrições
  1. Para o correto funcionamento desse bloco, o step size da simulação deve ser configurado para nunca exceder  $\frac{360}{4 \cdot N_r \cdot V_{máx}}$  segundos; onde  $N_r$  é o número de pulsos por rotação do encoder (especificado clicando-se duas vezes em cima do bloco) e  $V_{máx}$  é o valor máximo da derivada da entrada Theta em graus/s. Exemplo: Para a correta simulação de um encoder com  $N_r = 300$ , amostrando um BLDC cuja velocidade angular atinge no máximo 1200 graus/s (portanto o valor máximo da derivada da entrada Theta também é 1200 graus/s), faz-se necessário configurar a simulação para que o step size nunca exceda  $2,5 \cdot 10^{-4}$  segundos.

## 3.2 Medição de velocidade

O algoritmo M/T para estimação de velocidade [2] foi implementado no simulink e está ilustrado na figura 3.2

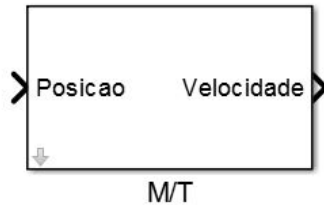


Figura 3.2: Bloco que implementa o algoritmo de estimação de velocidade M/T

- Entradas
  1. Posicao - Essa entrada deve ser conectada à saída “Theta\_amostrado” do bloco simulador de encoder de quadratura. [graus]
- Saídas
  1. Velocidade - Velocidade estimada pelo algoritmo M/T. [graus/s]

# Referências Bibliográficas

- [1] Stefan Baldursson. Bldc motor modelling and control-a matlab®/simulink® implementation. 2005.
- [2] Tsutomu Ohmae, Toshihiko Matsuda, Kenzo Kamiyama, and Makoto Tachikawa. A microprocessor-controlled high-accuracy wide-range speed regulator for motor drives. *IEEE Transactions on industrial electronics*, IE-29(3):207–211, August 1982.