

Modalidade do trabalho: Ensaio teórico
Evento: XXIII Seminário de Iniciação Científica

MODELAGEM MATEMÁTICA E SIMULAÇÃO DO MOTOR BRUSHLESS¹

**Gustavo Cordeiro Dos Santos², Luis Fernando Sauthier³, Manuel Martín Pérez Reibold⁴,
Airam Teresa Zago Romcy Sausen⁵, Paulo Sérgio Sausen⁶.**

¹ Projeto de iniciação científica desenvolvido no Departamento de Ciências Exatas e Engenharia, pertencente ao Grupo de Automação Industrial e Controle.

² Aluno do curso de Engenharia Elétrica da UNIJUI

³ Aluno do curso de Engenharia Elétrica da UNIJUI

⁴ Professor orientador, doutor.

⁵ Professora Colaboradora, doutora.

⁶ Professor Colaborador, doutor.

Introdução:

A eficiência energética é uma questão importante, uma vez que as atuais fontes de energia se mostram insuficientes, no médio prazo diante dos atuais padrões de consumo, além de trazerem consigo impactos ambientais relevantes (TRINDADE, 2012). Portanto surge como alternativa, o uso de motores de ímãs permanentes em diversas áreas, pois possuem alta eficiência e funcionalidade. Dentre esses os motores sem escovas, denominados motor Brushless se destacam (ROSA,2012). Uma das frentes de alta utilização desses motores são os veículos elétricos aéreos não tripulados. São motores de elevado rendimento e reduzida manutenção, tornando-se a melhor opção para esta aplicação. Por isso, também é amplamente utilizado na área aeroespacial, robótica, controle de processos industriais, máquinas-ferramenta de precisão, eletrônica automotiva e eletrodomésticos.

Entretanto, os motores Brushless em conjunto com outros dispositivos formam o sistema Motor-ESC-Hélice, cuja função é gerar o torque e a velocidade angulares necessários para a propulsão de aeronaves. Normalmente, em aplicações os componentes são escolhidos por métodos não definidos, sem que haja um dimensionamento correto do sistema. Isso ocorre, por que existe imprecisão em relação ao modelo.

Este trabalho apresenta a concepção e a construção da equação diferencial e a função de transferência do motor Brushless. Nessa são envolvidas as grandezas físicas velocidade angular e torque. A determinação da relação entre estas variáveis deve melhorar o dimensionamento dos componentes do sistema, permitindo comparar o desempenho das técnicas de modelagem matemática caixa branca com as técnicas da modelagem caixa preta.

Metodologia:

A metodologia desenvolvida consistiu em um estudo bibliográfico sobre cada parâmetro que forma motor Brushless, além das variáveis responsáveis pelo seu funcionamento. Desta forma, fez-se um estudo sobre o desempenho motor Brushless.

Modalidade do trabalho: Ensaio teórico
Evento: XXIII Seminário de Iniciação Científica

Uma vez compreendido o funcionamento do motor, iniciou-se a solução das equações. Para isto foi necessário verificar as grandezas físicas envolvidas na investigação, de forma a caracterizar o motor através de suas funções.

Resultados e Discussões:

Os motores Brushless usam realimentação direta da posição angular do rotor de modo que a corrente de armadura seja comutada entre as fases do motor, em sincronismo com a posição do rotor. Este conceito é conhecido como sincronização autocontrolada, ou comutação eletrônica. O inversor eletrônico e os sensores de posição são equivalentes aos comutadores mecânicos em motores de corrente contínua convencionais e, justamente por apresentarem tal característica, estes motores recebem este nome (TRINDADE, 2012).

O circuito elétrico equivalente (figura1) de um motor Brushless é simples, sendo constituído por três fases simétricas e equilibrado. Cada fase é formada por uma resistência de enrolamento, uma auto-indutância, as quais são resultantes da interação entre sua indutância própria e as indutâncias mútuas das outras fases. E ainda, cada fase possui uma fonte de tensão que representa a força eletromotriz (f.e.m) trapezoidal, a qual é produzida pelo fluxo do rotor nos enrolamentos do estator.

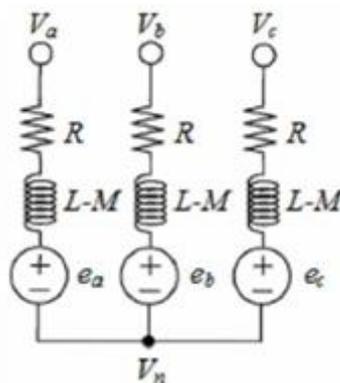


Figura 1 - Circuito equivalente do motor Brushless

A função de transferência é fundamental na teoria de controle, e os modelos matemáticos baseados em função de transferência são amplamente utilizados. A função de transferência do motor Brushless é significativa para a concepção de análise e de controle de desempenho do motor. Os enrolamentos do motor Brushless são energizados de acordo com a posição do rotor, e o motor é normalmente desenhado para ser de três fases ou multifásica. Supondo-se que o motor Brushless trifásico é controlado pela condução de ponte completa no modo de condução de duas fases, logo existe a seguinte relação:

Modalidade do trabalho: Ensaio teórico
Evento: XXIII Seminário de Iniciação Científica

$$\begin{cases} Ia = -Ib = I \\ \frac{dIa}{dt} = -\frac{dIb}{dt} = \frac{dI}{dt} \end{cases}$$

Assim, a tensão de linha VAB pode ser escrita:

$$V_{AB} = 2R_i + 2(L-M)\frac{di}{dt} + (ea - eb) \quad (1)$$

Levando em consideração o transitório das constantes ea e eb, sendo iguais em amplitude e em direção oposta quando as fases A e B são ligadas. A equação (1) pode ser expressa pela equação (2):

$$V_{AB} = U_d = 2R_i + 2(L-M)\frac{di}{dt} + 2e_A = R_{Ai} + L_A\frac{di}{dt} + K_e\Omega \quad (2)$$

A equação (2) é exatamente a equação do circuito de tensão de armadura quando dois enrolamentos de fase estão excitados. Ainda nesta equação, se a corrente pode ser expressa pela velocidade angular em seguida pode obter a função de transferência do motor através da obtenção da relação entre a tensão de barramento e da velocidade angular, obtendo-se a equação (3):

$$K_{Ti} - T_L = J\frac{d\Omega}{dt} + B_v\Omega \quad (3)$$

Primeiramente, quando o motor funciona sem carga, a corrente é dada pela equação (4):

$$i = \frac{J}{KT} \frac{d\Omega}{dt} + \frac{BV}{KT} \Omega \quad (4)$$

Substituindo a equação da corrente na equação de tensão de linha, tem-se a equação (5):

Modalidade do trabalho: Ensaio teórico
Evento: XXIII Seminário de Iniciação Científica

$$U_d = R_A \left(\frac{J}{KT} \frac{d\Omega}{dt} + \frac{BV}{KT} \Omega \right) + L_A \frac{d}{dt} \left(\frac{J}{KT} \frac{d\Omega}{dt} + \frac{BV}{KT} \Omega \right) + K_e \Omega \quad (5)$$

Rearranjando a equação (5), pode ser reescrita conforme a equação (6):

$$U_d = \frac{LAJ}{KT} \frac{d^2\Omega}{dt^2} + \frac{RAJ+LABV}{KT} \frac{d\Omega}{dt} + \frac{RABV+KeKT}{KT} \Omega \quad (6)$$

Pela transformada de Laplace, a função de transferência do motor Brushless pode ser expressa conforme a expressão (7):

$$G_u(s) = \frac{\Omega(s)}{U(s)} = \frac{KT}{LAJs^2 + (RAJ+LABV)s + (RABV+KeKT)} \quad (7)$$

Pela equação (7) percebe-se que o motor Brushless pode ser considerado como um sistema de segunda ordem, e pode ser rearranjado da seguinte maneira de acordo a expressão (8):

$$G_u(s) = \frac{KT}{(RABV+KeKT)} \frac{Wn^2}{(s^2 + 2\epsilon Wn s + Wn^2)} \quad (8)$$

De modo geral a constante de tempo mecânica é muito maior do que a eletromagnética. Se o efeito da constante de tempo eletromagnética é ignorada, isto é, a indutância da armadura é insignificante pois não varia com o fluxo de corrente.

Considerando a constante de tempo mecânica $t_m = (RAJ+LABV)/(RABV+KeKT)$ e a constante de tempo eletromagnética é $t_e = LAJ/(RAJ+LABV)$, então a equação (8) pode ser reescrita de acordo a equação (9):

$$G_u(s) = \frac{KT}{(RABV+KeKT)} \frac{1}{(s^2 t_m t_e + s t_m + 1)} \quad (9)$$

Modalidade do trabalho: Ensaio teórico
Evento: XXIII Seminário de Iniciação Científica

Para um sistema de controle da velocidade, é desejável que o tempo de atraso de resposta de velocidade seja curto o suficiente. Se a constante de tempo mecânica é grande, um sistema de controle deve ser concebido para aumentar a velocidade de resposta. Além disso, do ponto de vista de controle, um grande ganho proporcional pode causar oscilação e instabilidade (Moura,2010). Portanto, a estabilidade e a velocidade de resposta do sistema devem ser consideradas em conjunto no projeto. A velocidade de resposta deve ser aumentada sob a condição de estabilidade. Assim, a saída do sistema é igual à soma das saídas quando $U_d(s)$ e $T_L(s)$ são aplicadas ao sistema, respectivamente. Quando $U_d(s) = 0$ obtém-se a expressão para a velocidade angular com define a equação (10),

$$\Omega(s) = \left(\frac{(Ra+La)s + (Js+Bv) + Ke KT}{(RA+LAs)} \right) = - T_L(s) \quad (10)$$

Assim, a função de transferência entre o torque e a velocidade angular é dada pela expressão (11):

$$G_L(s) = \frac{\Omega(s)}{T_L(s)} = \frac{- RaLa s}{(LaJ)s^2 + (RaJ+LaBv)s + (RaBv+KeKT)} \quad (11)$$

Simulações dos Resultados:

A partir da função de transferência é possível realizar a simulação do desempenho do motor brushless utilizando a ferramenta Simulink. A figura 2 ilustra o diagrama em blocos que permite simular a velocidade angular. A figura 3 ilustra o diagrama em blocos que permite obter o torque do motor:

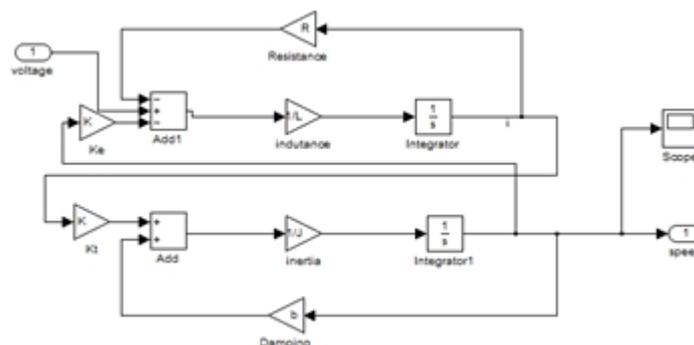


Figura 2. Diagrama para simulação da velocidade motor

Modalidade do trabalho: Ensaio teórico
Evento: XXIII Seminário de Iniciação Científica

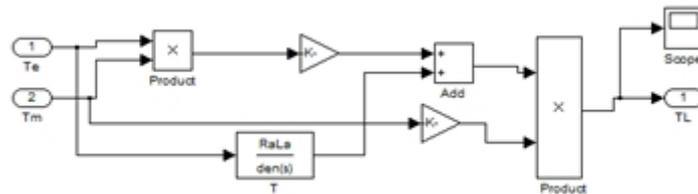


Figura 3. Diagrama para simulação do torque do motor

O desempenho, tanto da velocidade e do torque, ilustrados na figura 4 e na figura 5, respectivamente, mostram o comportamento de um sistema de segunda ordem, do tipo subamortecido. O que era esperado pelo grau 2 do denominador de ambas as funções de transferência.

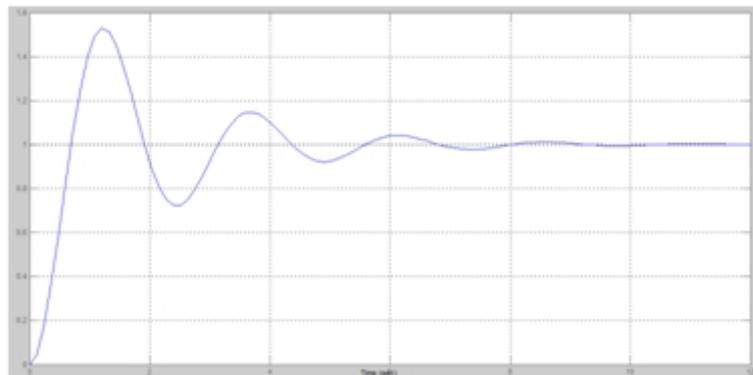


Figura 4. Resposta da velocidade do motor

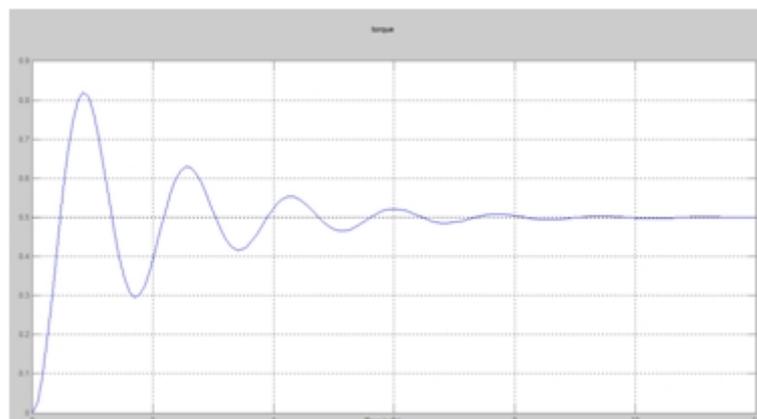


Figura 5. Resposta Torque do motor

Modalidade do trabalho: Ensaio teórico
Evento: XXIII Seminário de Iniciação Científica

Conclusão:

Com base no modelo matemático do motor Brushless, a modelagem e simulação, para o motor especificado é apresentada neste artigo. Os resultados da simulação satisfazem a análise teórica. Neste modelo matemático baseado na simulação de motor síncrono de ímã permanente é implementado usando a ferramenta gráfica Simulink oriunda do software MATLAB. Os resultados da simulação mostram as características do motor Brushless, ou seja, de desempenho velocidade do motor permanecem constantes, mesmo com variação de torque de carga. A posição do rotor a cada instante e é mostrado no gráfico.

Referências:

ROSA, Arthur da.(2012) Controlador de velocidade para motores brushless DC utilizado em veículos elétricos. Instituto Federal de Santa Catarina, Santa Catarina.

Trindade, R. H. (2010). Estudo de Máquinas Elétricas Não-Convencionais: Motor Brushless DC. Escola de Engenharia São Carlos, Universidade São Paulo, São Carlos.

Moura, Ricardo Lopes (2010). O uso de microcontroladores no acionamento e controle de motores Brushless DC. Escola de Engenharia São Carlos, Universidade São Paulo, São Carlos.