

01 a 04 de outubro de 2018

Evento: XXIII Jornada de Pesquisa

PROCEDIMENTO COMPUTACIONAL PARA VALIDAÇÃO DE UM MODELO DE MOTOR DE CORRENTE CONTÍNUA¹
COMPUTATIONAL PROCEDURE FOR VALIDATING A MODEL FOR CONTINUOUS CURRENT MOTOR

Alcedir Luís Finkler², Iuri Schmidt³, Graciela Elizabeth Bönnmann Bertoldo⁴, Gilson Rogério Bastita⁵, Antonio Carlos Valdiero⁶, Manuel Pérez Reinbold⁷

¹ Projeto de pesquisa desenvolvido no Instituto Federal Farroupilha Campus Santa Rosa com alunos do curso de Eletromecânica.

² Professor EBTT no Instituto Federal Farroupilha e Mestrando em Modelagem Matemática na UNIJUI.

³ Aluno do curso de Engenharia Elétrica na Unijui.

⁴ Mestranda em Modelagem Matemática pela UNIJUI.

⁵ Mestre em Engenharia Elétrica

⁶ Professor doutor do departamento de ciências exatas e engenharias da Unijui

⁷ Professor doutor do departamento de ciências exatas e engenharias da Unijui.

Resumo - Esse trabalho apresenta uma forma de representar o modelo equivalente de um motor de corrente contínua por meio de diagramas de bloco e realizar a sua simulação com o software Simulink. Apresenta um ensaio pratico desenvolvido com um motor da empresa Cleveland Motion, e o comparativo entre os resultados obtidos na simulação computacional e simulação em bancada.

Abstract - This job presents a way to represent the equivalent model of a DC motor by means of block diagrams and carry out its simulation with Simulink software. It presents a practical test developed with a motor of the company Cleveland Motion, and the comparative one between the results obtained in the computer simulation and bench simulation.

Palavras-chave - Motor de corrente contínua; Modelo matemático; Simulink;

Keywords - Direct current motor; Mathematical Model; Simulink;

1 - INTRODUÇÃO

As máquinas de corrente contínua são equipamentos que permitem converter energia elétrica em energia mecânica ou energia mecânica em energia elétrica. Dessa forma uma máquina de corrente contínua pode operar tanto na condição de motor quanto na condição de gerador. São muito utilizadas em diversos equipamentos como um conversor eletromecânico de energia com a função de atuar no posicionamento, logo, na condição de motor. Dentre os parâmetros que as tornam ideais para essas aplicações podem ser destacadas a facilidade de controle e uma

01 a 04 de outubro de 2018

Evento: XXIII Jornada de Pesquisa

linearidade na curva velocidade tensão para certa faixa de atuação dos motores. Os motores de corrente contínua podem ser fabricados com ímãs permanentes ou com bobinas para gerar os polos magnéticos do campo. Os estudos descritos nesse artigo foram desenvolvidos em cima da dinâmica dos motores de corrente contínua com ímã permanente.

Em equipamentos de corte que se utilizam de comando numérico computadorizado para definir o percurso das ferramentas, tão importante quanto manter a posição correta é desenvolver os movimentos com suavidade. Considerando como exemplo máquinas de corte que se utilizam dos processos de plasma, oxicorte ou Laser, desenvolvendo um percurso de corte em linha reta, o deslocamento precisa ser realizado com o mínimo de vibrações possíveis, pois toda oscilação que ocorra na velocidade dos motores será refletida no corte em forma de rugosidade. Nesse sentido, um sistema de controle que possua uma resposta muito rápida pode se tornar um problema, pois pode transmitir muita vibração ao processo de corte. Por outro lado, a velocidade de deslocamento possui uma grande influência no processo de corte de forma que, a velocidade não pode ter uma redução maior do que 10%. Caso ocorra alguma redução de velocidade maior que 10%, o processo será comprometido, podendo causar chanfro nas peças. Assim, tem-se um problema em situações de mudanças de sentido de corte. Considerando uma condição onde a máquina está desenvolvendo o corte de uma peça quadrada, em dado momento está deslocando apenas em eixo X, ao chegar próximo ao canto, precisa reduzir a velocidade do eixo X e iniciar o movimento do eixo Y. Para evitar uma parada completa do equipamento é adicionado um pequeno raio aos cantos do corte. Isso precisa ser feito de forma que o vetor velocidade resultante não chegue a zero. Logo, o conjunto de controle de deslocamento precisa ser rápido na aceleração e desaceleração de forma a evitar problema em cantos de peças, porém essa resposta rápida não pode gerar oscilações durante o deslocamento. Em outras palavras, os sistemas de controle precisam ter uma resposta rápida em regime transitório e uma grande estabilidade em regime permanente. Os motores de corrente contínua são muito utilizados nessas aplicações devido a sua dinâmica.

Nesse artigo será descrito o equacionamento dos parâmetros que influenciam na dinâmica dos motores de corrente contínua. Busca-se apresentar o impacto de parâmetros como o fluxo magnético polar de forma a demonstrar como o desenvolvimento de novos materiais que apresentem uma maior densidade de fluxo magnético permite obter melhores características de desempenho. A análise se dará por meio da modelagem matemática dos parâmetros e simulação computacional utilizando-se do software Matlab. Para validação, tomar-se-á como base um motor utilizado em servoacionamento do fabricante Cleveland. Será apresentada a modelagem matemática desse motor e um comparativo entre a simulação computacional e os dados reais, obtidos em laboratório. Com esse estudo objetiva-se fornecer a técnicos e hobbistas, que trabalham com projetos de máquinas, conhecimento para realizar comparações entre diferentes motores e permitir, com isso, maior facilidade na identificação da relação custo-benefício mais adequada a sua aplicação.

2 - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

01 a 04 de outubro de 2018

Evento: XXIII Jornada de Pesquisa

Para desenvolvimento do presente artigo buscou-se avaliar demais trabalhos relacionados, suas contribuições e sugestões.

Dos Santos (2015) desenvolveu o modelo matemático de um motor de corrente contínua sem escovas e realizou a simulação via Simulink. Destacou a importância do conhecimento das funções de transferência para adequado projeto dos sistemas de controle.

Paixão (2015 e 2017) e Sauer (2017), reforçam a importância do conhecimento do modelo matemático e, buscam desenvolver ferramentas para melhor compreender o comportamento desse sistema apresenta uma plataforma para obtenção de parâmetros a ser utilizado com identificação de sistemas trabalhando com modelo caixa preta.

Bueno (2016) destacou o crescimento dos sistemas automatizados. Em seus resultados e discussões destacaram a necessidade de melhorias no controle sobre o motor elétrico.

Valer (2016) apresentou a formulação de um modelo matemático autorregressivo através do modelo caixa preta para representar a dinâmica dos propulsores. Apresentam esta como uma alternativa ao método de modelagem caixa branca demonstrado nesse artigo.

Coelho (2001) desenvolve uma plataforma para testes e simulações de um conjunto formado por motor mais tacogerador.

3 - DESENVOLVIMENTO

Os motores de corrente contínua tem seu princípio de funcionamento baseado na força de interação desenvolvida entre o campo magnético produzido por uma parte estática (estator) e o campo magnético produzido por uma parte móvel (rotor). A Figura 1 ilustra essas forças de reação. O sentido das forças é determinado pela regra da mão direita (WEG, 2003).

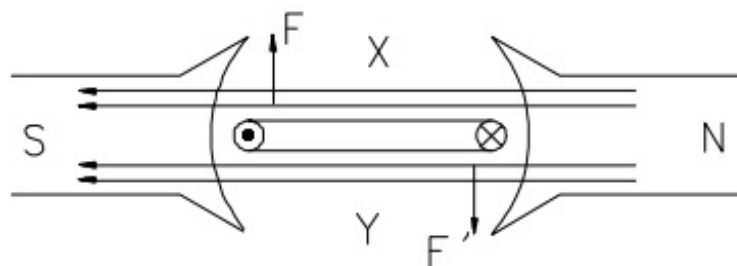


Figura 1 - Forças em um motor de corrente contínua (WEG, 2003)

A obtenção dos fluxos magnéticos descritos é conseguida por meio da circulação de corrente elétrica conforme ilustra a Figura 2. Nessa ilustração ambos campos magnéticos do estator e do rotor são produzidos pela circulação de corrente elétrica. A corrente fornecida ao bobinado do rotor é transmitida por um conjunto de escovas e coletores, os quais causam uma inversão no sentido de circulação de corrente a cada 180° de giro do motor (WEG, 2003).

01 a 04 de outubro de 2018

Evento: XXIII Jornada de Pesquisa

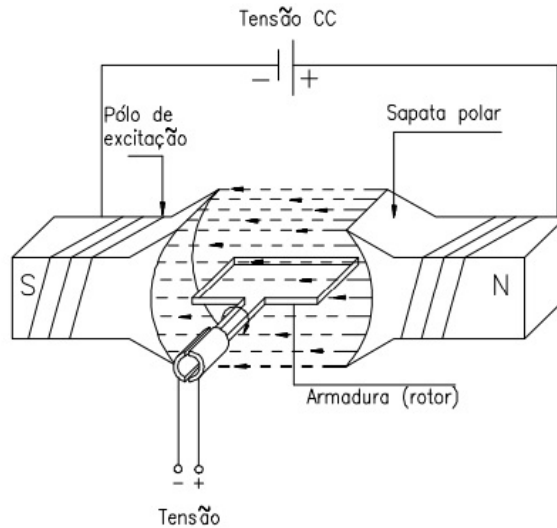


Figura 2 - Campo magnético em um motor de corrente contínua (WEG, 2003)

A movimentação da espira do rotor atravessando as linhas magnéticas produzidas pelo estator faz com que sejam induzidas tensões na bobina do rotor no sentido contrário a corrente responsável por produzir o campo magnético nessa bobina conforme apresentado na Equação 1. Essas tensões são influenciadas pelo fluxo magnético do estator $\Phi(t)$, a velocidade angular do eixo do motor $\omega(t)$ e um coeficiente que é determinado para cada motor em função do número de espiras por bobina, o passo polar em que é realizada a montagem dessas bobinas e o número de ligações em paralelo.

$$v_g(t) = k\theta(t)\omega(t) \quad [1]$$

Considerando a condição em que o Fluxo magnético externo do motor seja fornecido ou por um ímã permanente, ou que a bobina de campo seja conectada a fonte independente e com tensão constante, o fluxo magnético $\Phi(t)$ também poderá ser considerado constante e a Equação 1 poderá ser reduzida utilizando uma única constante equivalente K_e .

$$v_g(t) = k_e\omega(t) \quad [2]$$

A interação entre o campo magnético produzido pelas correntes que circulam nas bobinas do rotor com o campo magnético do estator produz um torque magnético dado pela Equação 3. Essa equação utiliza-se do mesmo coeficiente K descrito nas equações 1 e 2.

$$T_g(t) = k_e i_a(t) \quad [3]$$

01 a 04 de outubro de 2018

Evento: XXIII Jornada de Pesquisa

Assim, o circuito elétrico equivalente do motor de corrente contínua fica conforme apresentado na Figura 3.

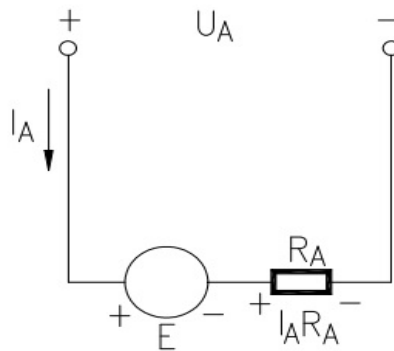


Figura 3 - Circuito elétrico equivalente de um motor de corrente contínua (WEG, 2003).

Analisando esse circuito da Figura 3 e aplicando a lei de Kirchoff das tensões, é possível obter uma representação para malha conforme Equação 4.

$$v_i(t) = R_a I_a(t) + L_a \frac{di_a(t)}{dt} + v_g(t) \quad [4]$$

Nos motores com estator bobinado ainda tem em sua representação a indutância L_f e a Resistência R_f do bobinado de campo (*field*) conforme Figura 4. Também são considerados no modelo os parâmetros mecânicos.

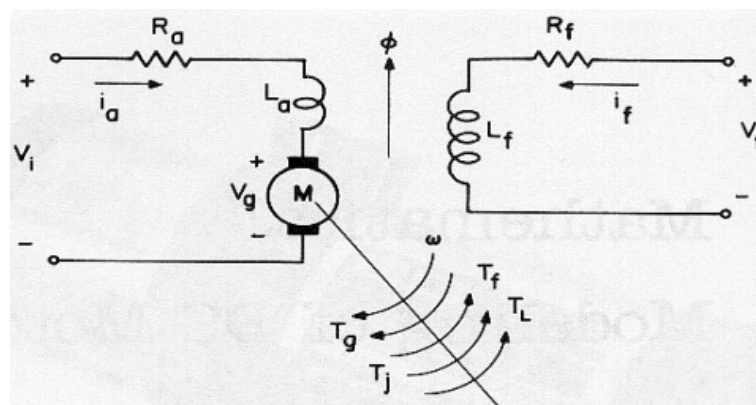


Figura 4 - Circuito elétrico equivalente de um motor de corrente contínua com estator bobinado (WEG, 2003).

A potência mecânica produzida por esse motor é função da relação torque e velocidade angular :

01 a 04 de outubro de 2018

Evento: XXIII Jornada de Pesquisa

$$P_g(t) = T_g(t)\omega(t) \quad [5]$$

Na determinação da energia entregue a carga é preciso considerar a energia que é dissipada com as resistências ôhmicas das bobinas, as perdas no núcleo, em fim, o torque necessário para suprir essas perdas será chamado de $T_f(t)$. O torque necessário para mover a carga será identificado como $T_L(t)$. Uma parte da energia ainda será destinada a acelerar a inércia do motor. O atrito do eixo do motor é representado por um coeficiente de atrito viscoso B que tem uma relação linear com a velocidade angular. Assim, a Equação 6, demonstra a relação entre esses torques.

$$T_g(t) = T_f(t) + T_L(t) + J\frac{d\omega(t)}{dt} + B\omega(t) \quad [6]$$

Considerando a Equação 4, e arranjando os termos de forma a facilitar a sua implementação em diagrama de blocos pode ser escrita como:

$$v_i = L\frac{di_a}{dt} + v_g + R_a i_a \quad [7]$$

$$v_i - v_g - R_a i_a = L\frac{di_a}{dt} \quad [8]$$

$$\frac{v_i - v_g - R_a i_a}{L} = \frac{di_a}{dt} \quad [9]$$

Partindo da equação 9, o diagrama de blocos desenvolvido no Simulink para esta primeira etapa pode ser feito conforme Figura 5.

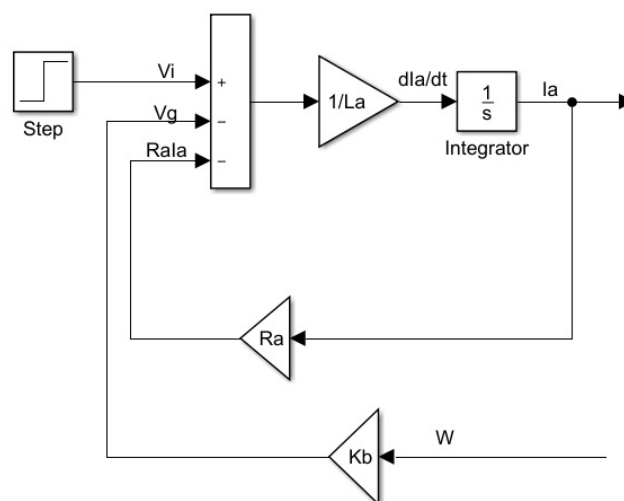


Figura 5 - Diagrama de blocos representando equação 9.

01 a 04 de outubro de 2018

Evento: XXIII Jornada de Pesquisa

Considerando a Equação 6, e arranjando os termos de forma a facilitar a sua implementação em diagrama de blocos, pode ser escrita como:

$$T_g = T_f + T_L + J \frac{d\omega}{dt} + B\omega \quad [10]$$

$$T_g - T_f - T_L - B\omega = J \frac{d\omega}{dt} \quad [11]$$

$$\frac{T_g - T_f - T_L - B\omega}{J} = \frac{d\omega}{dt} \quad [12]$$

Partindo da equação 12 o diagrama de blocos desenvolvido no Simulink para esta segunda etapa pode ser feito conforme Figura 6.

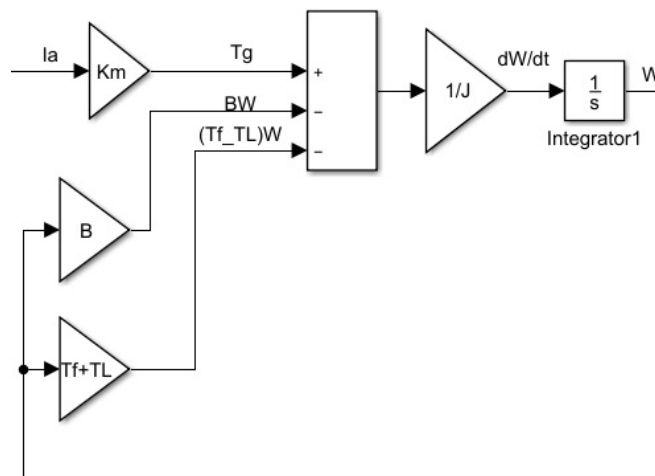


Figura 6 - Diagrama de blocos representando equação 12.

Adicionando as duas partes tem-se a representação completa em diagrama de blocos desenvolvido no Simulink das equações referente ao modelo matemático de um motor de corrente contínua conforme demonstrado na Figura 7.

01 a 04 de outubro de 2018

Evento: XXIII Jornada de Pesquisa

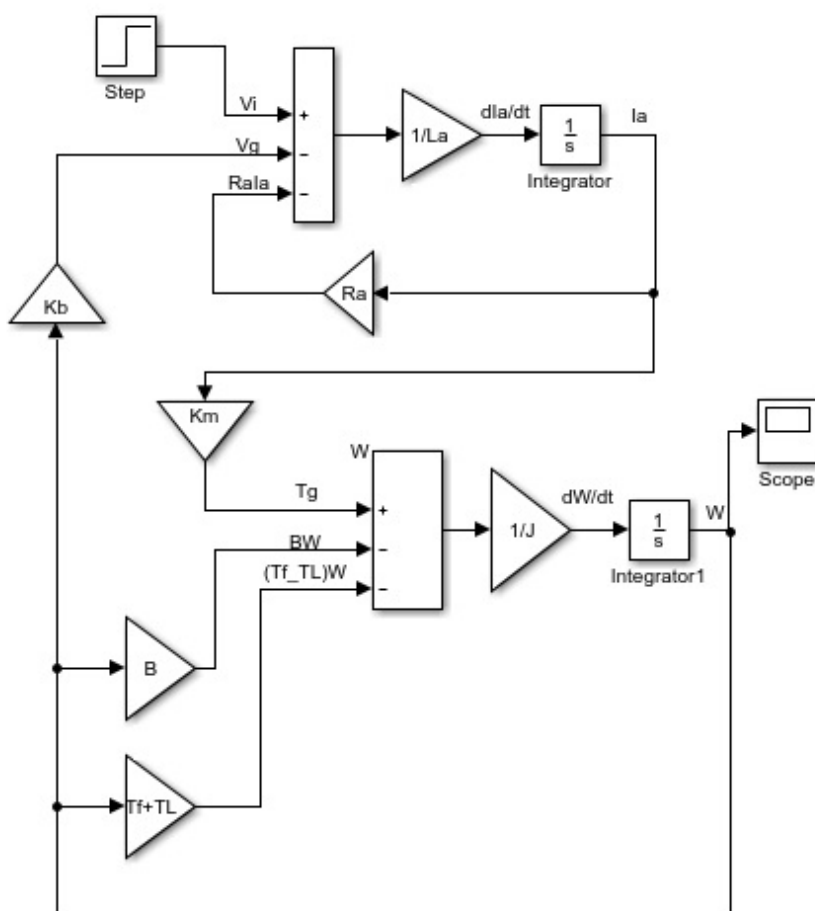


Figura 6 - Diagrama de blocos representando o modelo completo do motor de corrente contínua.

O tipo de carga em que o motor será utilizado é muito importante para definir o ponto de operação. Aplicações como ventiladores, bombas de água, talhas elétricas possuem diferentes curvas de torque x velocidade. Assim, para definir o ponto de operação de um motor e sua dinâmica é necessário ter um modelo adequado da carga. No modelo apresentado na Figura 7 está ilustrada uma situação onde o torque resultante da carga tem um acréscimo linear em função da velocidade definida por TL. Nos ensaios em bancada, bem como nas simulações computacionais, será considerado o motor operando com TL=0, ou seja, sem carga aplicada ao eixo.

4 - VALIDAÇÃO DO MODELO

O motor utilizado nas simulações foi o modelo MT-2330 da empresa Cleveland ilustrado na Figura 8. Esse motor é construído com ímã permanente e possui um tacogerador já acoplado que per-

01 a 04 de outubro de 2018

Evento: XXIII Jornada de Pesquisa

mite conectar a um osciloscópio de forma a coletar os dados de velocidade em função do tempo.



Figura 8 - Motor de corrente contínua utilizado para validação do modelo.

A medição da velocidade para conferência com o valor obtido na simulação foi realizada utilizando o tacômetro modelo TD-812 da empresa Instrutherm. A curva da velocidade em função do tempo foi obtida com o uso de um osciloscópio do fabricante Siglent, modelo SDS1042 conectado ao bobinado do taco-gerador.

A simulação em laboratório foi realizada aplicando um degrau de 55 Volts à alimentação do motor e verificando a sua curva de velocidade x tempo. Esses valores são salvos e utilizados para comparação ao gráfico obtido na simulação. A Figura 9 apresenta o resultado do ensaio.

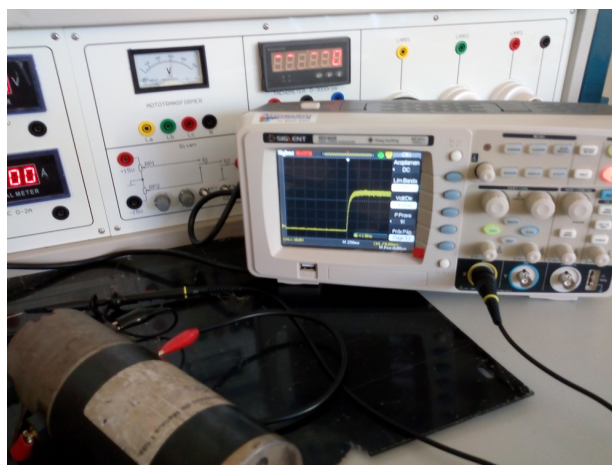


Figura 9 - Aquisição de dados com osciloscópio.

01 a 04 de outubro de 2018

Evento: XXIII Jornada de Pesquisa

Os dados correspondentes ao gráfico obtido no osciloscópio são salvo em um cartão de memória no formato CSV e podem ser importados para o Matlab e comparados aos valores obtidos em simulação.

Para realizar a simulação inicialmente é feito o ensaio de curto circuito do motor para obtenção dos parâmetros de Resistência "Ra" e Indutância "La". A obtenção do parâmetro correspondente ao coeficiente de atrito "B" pode ser estimado levando em consideração a equação 5 e corrente medida no motor.

Logo, partindo desses dados é possível simular o comportamento da curva característica do motor conforme apresentado na Figura 10.

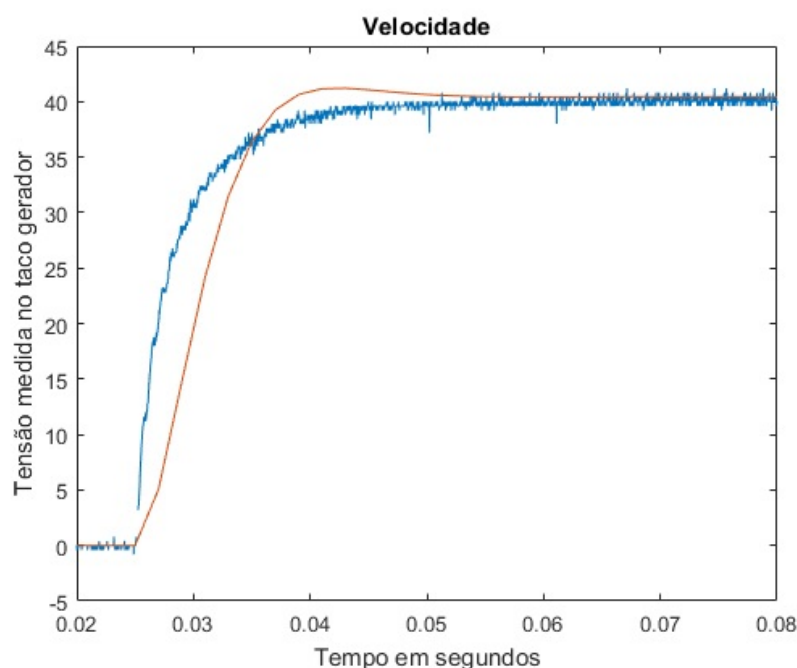


Figura 10 - Primeira simulação do modelo.

Por meio de simulações computacionais é possível ajustar os coeficientes K e J de forma a buscar obter a equação mais aproximada do resultado obtido na prática. A Figura 11 ilustra o gráfico obtido utilizando os parâmetros definidos como:

Ra=0.2
La=0.00005
Km=1.35
Kb=Km

01 a 04 de outubro de 2018

Evento: XXIII Jornada de Pesquisa

$J=0.04$
 $B=0.035$
 $T_f=0$
 $TL=0$

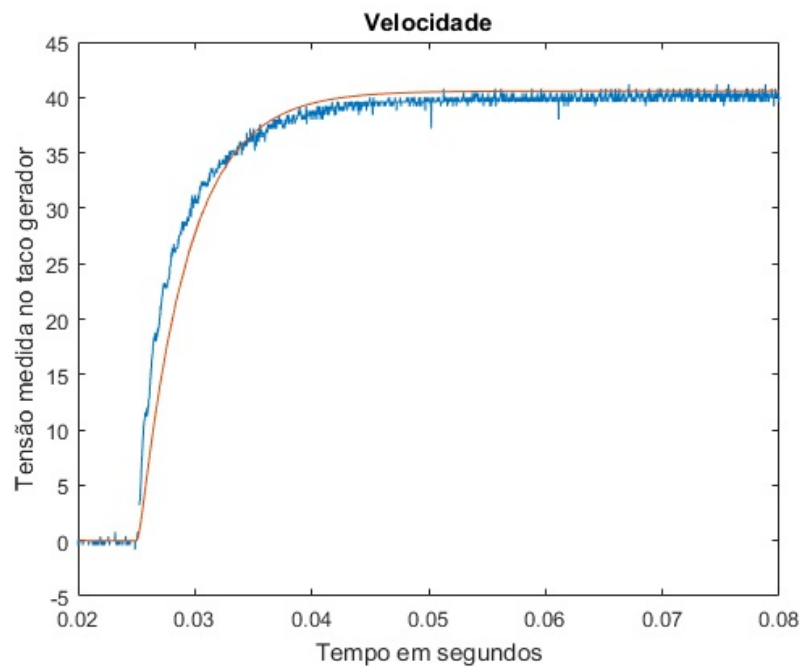


Figura 11 - Simulação do modelo após a adequação dos parâmetros.

Considerando a velocidade em regime contínuo, a tensão medida no taco gerador foi de aproximadamente 40V. Na medição realizada em bancada obteve-se a rotação de 5742RPM.

5 - CONCLUSÃO

Neste trabalho foi apresentada a modelagem matemática de um motor de corrente contínua e sua representação em diagrama de blocos. Os resultados obtidos a partir do modelo proposto foram comparados aos dados coletados a partir do motor real simulado em laboratório validando os resultados.

O conhecimento dessa modelagem permite identificar por simulações computacionais os parâmetros dos motores. Tendo essa informação dos motores, bem como das cargas, é possível estimar os pontos de operação, velocidade, torque, corrente drenada da fonte para cada aplicação, bem como projetar os circuitos de controle de forma a obter as melhores características de torque e corrente de partida de acordo com os parâmetros de aceleração desejados.

01 a 04 de outubro de 2018

Evento: XXIII Jornada de Pesquisa

6 - REFERÊNCIA

DOS SANTOS, Gustavo Cordeiro et al. MODELAGEM MATEMÁTICA E SIMULAÇÃO DO MOTOR BRUSHLESS. Salão do Conhecimento, v. 1, n. 1, 2015.

PAIXÃO, Elisiane Pelke et al. PLATAFORMA EXPERIMENTAL PARA ENSAIO DE PROPULSORES ELETROME CÂNICOS. Salão do Conhecimento, v. 1, n. 1, 2015.

SAUER, Christopher et al. PLATAFORMA DIDÁTICA PARA O ENSINO DE CONTROLE. Salão do Conhecimento, v. 3, n. 3, 2017.

PAIXÃO, Elisiane Pelke et al. PLATAFORMA EXPERIMENTAL PARA MEDIÇÃO DO EMPUXO DO SISTEMA DE PROPULSÃO DE VEÍCULOS MULTIRROTORES. Salão do Conhecimento, v. 3, n. 3, 2017.

BUENO, Felipe Oliveira et al. DESENVOLVIMENTO DO PROTÓTIPO DE UM BRAÇO ROBÓTICO DE JUNTAS ROTATIVA-ELÉTRICA E PRISMÁTICA-PNEUMÁTICA. Salão do Conhecimento, v. 2, n. 2, 2016.

VALER, Leila Ana; REIMBOLD, Manuel Martín Pérez. MODELAGEM MATEMÁTICA CAIXA PRETA DE PROPULSORES ELETROME CÂNICOS. Salão do Conhecimento, v. 2, n. 2, 2016.

COELHO, Antonio AR et al. Da teoria à prática: projeto motor taco-gerador. In: XXIX Congresso Brasileiro de Ensino de Engenharia. 2001. p. 19-22.