

CONVERSORES ELETROMECCÂNICOS
TRABALHO 2: SIMULAÇÃO CONTROLE MÁQUINA
DE CORRENTE CONTÍNUA

André Lopes Tomé 2019021131
Marcone Márcio da Silva Faria 2019021573

1. INTRODUÇÃO

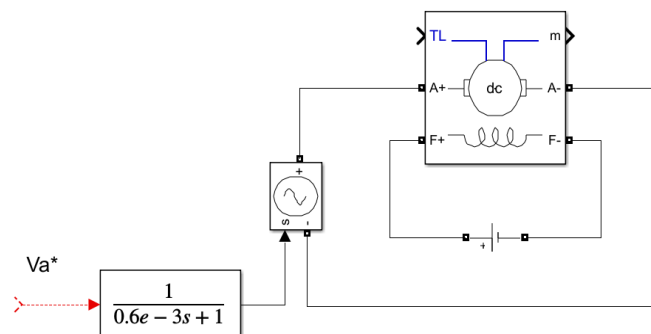
No presente trabalho o modelo de máquina de corrente contínua (MCC) utilizado foi o de número 4 no Simulink, assim como foi orientado previamente. Portanto, a máquina controlada tem potência de 10HP, tensão de armadura em 240V, velocidade nominal em 1.750 RPM e tensão nominal de campo em 300V. Estão presentes no relatório uma descrição do projeto de controle, bem como análises e testes realizados no sistema posteriormente

2. CIRCUITO DE ARMADURA

Inicialmente a máquina de corrente contínua é alimentada por um conversor estático, recebendo um sinal de referência de controle impondo a tensão de armadura requerida, assim, o conversor é representado por uma uma fonte controlada com a função de transferência de primeira ordem mostrada abaixo:

$$TF_{conv}(s) = \frac{V_a}{V_a^*} = \frac{1}{0,6e^{-3s} + 1} \quad (1)$$

onde V_a corresponde a tensão de armadura e V_a^* o sinal de controle. Abaixo é possível visualizar a simulação da máquina de corrente contínua com o conversor:



3. SISTEMA CLÁSSICO DE CONTROLE EM CASCATA

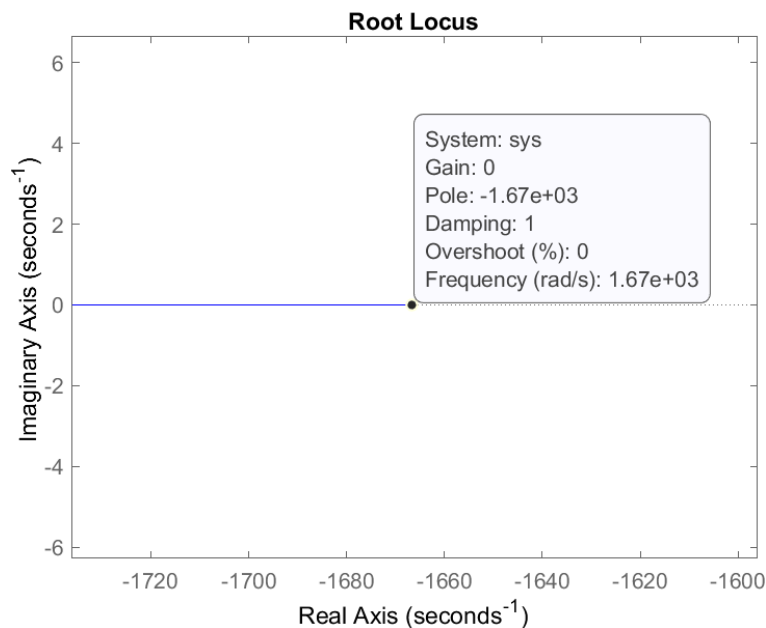
O funcionamento de uma máquina de corrente contínua ocorre mediante dois cenários: quando o conjugado assume um valor constante ou quanto a potência da máquina permanece constante. Para o primeiro caso, a máquina opera dentro de uma faixa de valores entre a velocidade nominal e a velocidade a vazio sendo aplicado, portanto, o controle sobre a tensão de armadura V_a . No segundo cenário, a máquina opera acima de sua velocidade nominal, e o controle é realizado sobre o fluxo de campo eletromagnético ϕf que é variável.

A utilização de máquinas de corrente contínua é comumente mais utilizada dentro da zona de um conjugado constante, sendo, portanto, o controle da tensão de armadura mais utilizado. Contudo, considerando as variações bruscas na corrente de armadura do circuito sendo possível inclusive que essa grandeza assuma valores superiores ao nominal, uma malha interna também foi projetada exclusivamente para o controle da corrente.

Primeiramente é calculada a frequência de chaveamento do conversor, em seguida é feita uma análise das malhas interna e externa do sistema de controle, de modo a controlar a corrente do conversor e a velocidade da máquina, sendo encontrados os ganhos de controle em cada malha.

3.1. Conversor Estático

A partir da função de transferência obtida em (1), encontra-se seu lugar das raízes para em seguida encontrarmos a frequência de chaveamento f_c do conversor:



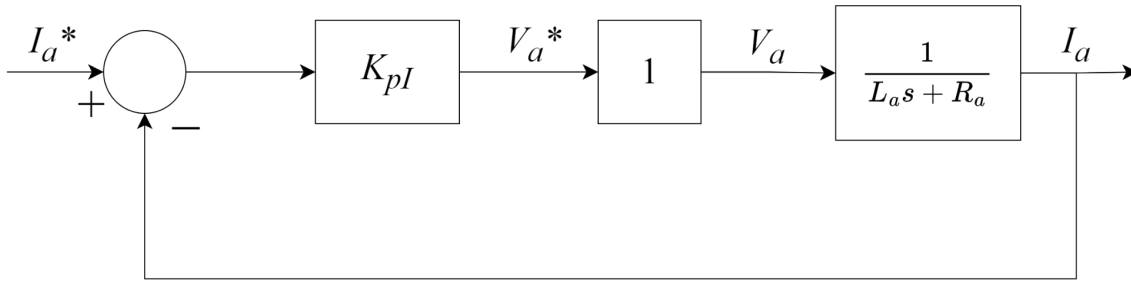
Da figura acima, resultado da análise do lugar das raízes utilizando o MatLab, temos que o polo da função de transferência do conversor adotado está em $s = -1666,67$,

indicando que a frequência de operação do mesmo corresponde a 1666,67 rad/s. A frequência de chaveamento é então calculada por:

$$f_c = \frac{1666,67}{2\pi} \rightarrow f_c = 265,25 \text{ Hz} \quad (2)$$

3.2. Projeto da Malha Interna

A malha externa do sistema opera desprezando a dinâmica observada na malha interna, desse modo, fazendo o ganho K_{pl} da função de transferência do controle de corrente muito grande é possível desconsiderar então os efeitos da malha interna na malha de velocidade. Abaixo é possível visualizar uma representação do diagrama de blocos da malha aberta:



Nesse caso, o conversor assume um ganho unitário quando considerado rápido o bastante para suprir a demanda da dinâmica da malha. Desse modo, a função de transferência da malha pode ser expressada por:

$$G_I = \frac{I_a}{I_a^*} = \frac{K_{pl}}{L_a s + (R_a + K_{pl})} \quad (3)$$

sendo os pólos em malha fechada representados por:

$$s = - \left(\frac{R_a + K_{pl}}{L_a} \right) \quad (4)$$

Em seguida é necessário determinar a frequência de corte f_1 que é limitada pela frequência de chaveamento f_c do conversor estático encontrada em (2). Nesse sentido, considerando que a malha interna deve operar o mais rápido possível no sistema sem ultrapassar, contudo, a faixa de passagem do conversor. Assim, f_1 foi considerada dez vezes menor que a frequência de chaveamento:

$$f_1 = 26,52 \text{ Hz} \quad (5)$$

A partir da relação mostrada em (6) e utilizando a equação obtida em (4) é possível, pelo método da alocação direta dos pólos, obter o pólo desejado em ω_1 :

$$s = -\omega \quad (6)$$

$$\omega = 2\pi f \quad (7)$$

da equação (7) obtemos $\omega_1 = 166,63 \text{ rad/s}$. Sabendo que o ganho K_{pl} pode ser dado por:

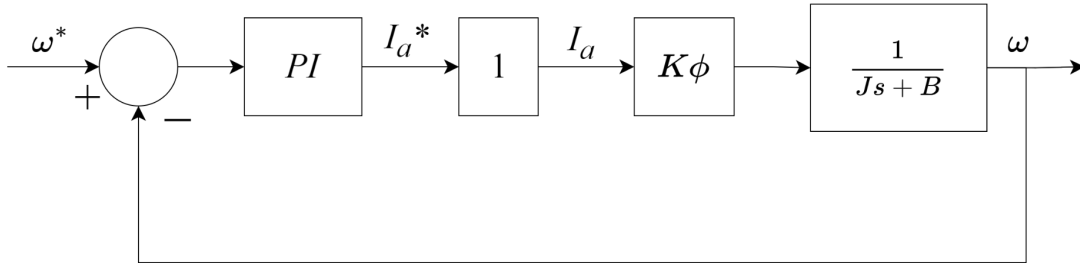
$$K_{pl} = L_a s - R_a \rightarrow K_{pl} = L_a \omega_1 + R_a \quad (8)$$

e, conhecendo os valores da resistência de armadura ($R_a = 1,086\Omega$) e da indutância de armadura ($L_a = 0,0121 \text{ H}$) do modelo da máquina CC utilizado neste trabalho, podemos calcular o ganho da malha de corrente por meio da expressão (8), de modo que $K_{pl} = 3,10$.

Com o valor obtido para o ganho e considerando o controle exercido por ele na malha, é esperado que não haja valores de sobrecorrente de armadura, de modo que a máquina não extrapole o limite térmico imposto pela corrente nominal imposta no sistema. Ademais, como pontuado anteriormente, a malha interna pode ser desprezada pela malha de controle de velocidade quando em operação.

3.3. Projeto da Malha Externa

O controle em cascata na malha fechada mostrada na figura abaixo é realizado de modo que a saída da malha seja um sinal de controle V_a^* como referência à máquina de corrente contínua:



Adicionando-se um controlador proporcional ao de grau (PI) na malha de controle, é possível então suprir a corrente de referência I_a^* da malha interna. Como a malha interna foi projetada anteriormente justamente para ser passível de ser desprezada pela ação da malha externa, o seu ganho é tido como unitário no diagrama de blocos visto acima. Desse modo, a função de transferência obtida pode ser representada por:

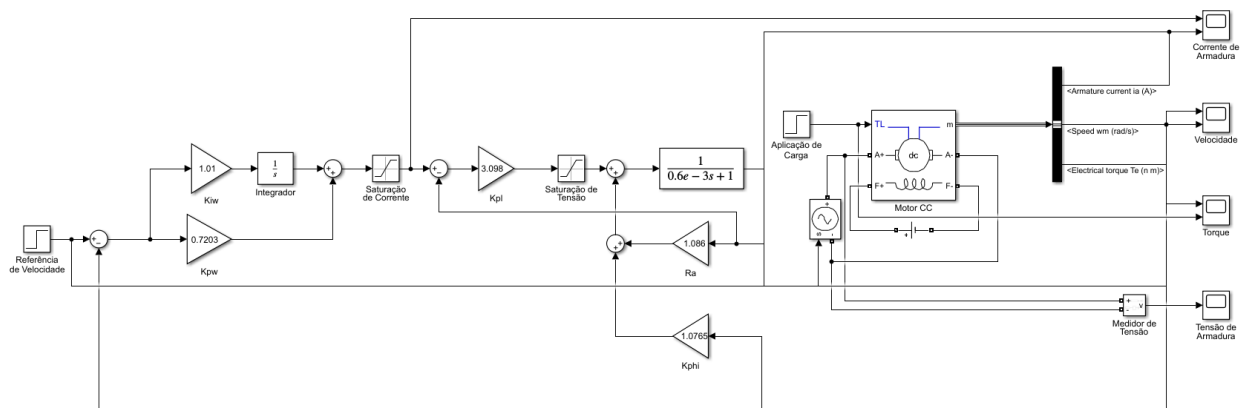
$$G_\omega = \frac{\omega_1}{\omega_2} = \frac{\frac{(K_{pl} + K_l)K\phi}{J}}{s^2 + \frac{(K_{pl}K\phi + B)s}{J} + \frac{K_{l\omega}K\phi}{J}} \quad (9)$$

utilizando-se novamente o método de alocação direta dos pólos, considerando a equação (7) podemos então encontrar $\omega_2 = 16,66$ rad/s e $\omega_3 = 1,665$ rad/s. Alocando esses pólos temos a relação:

Igualando-se o denominador da equação (9) com a equação (11) termo a termo é possível calcular os ganhos $K_{p\omega}$ e $K_{l\omega}$ a partir das expressões (12) e (13), para isso é necessário recorrer ao valor de $K\phi$ calculado ainda no trabalho 1, sendo $K\phi = 1,0765$. A densidade do fluxo assume um valor padrão de $B = 0,0034 \text{ N} \cdot \text{m} \cdot \text{s}$ e $J = 0,0425 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$, assim é possível calcular:

Conforme os parâmetros da máquina CC do simulink, temos que a velocidade equivale a $\omega = 1750 \text{ rpm} = 183,25 \text{ rad/s}$ e a tensão de armadura $V_A = 240 \text{ V}$, a corrente nominal e o torque nominal são dados por:

Na simulação, para os valores de saturação da corrente e tensão, foram considerados valores de corrente e tensão aproximadamente 80% e 50% maiores, respectivamente.

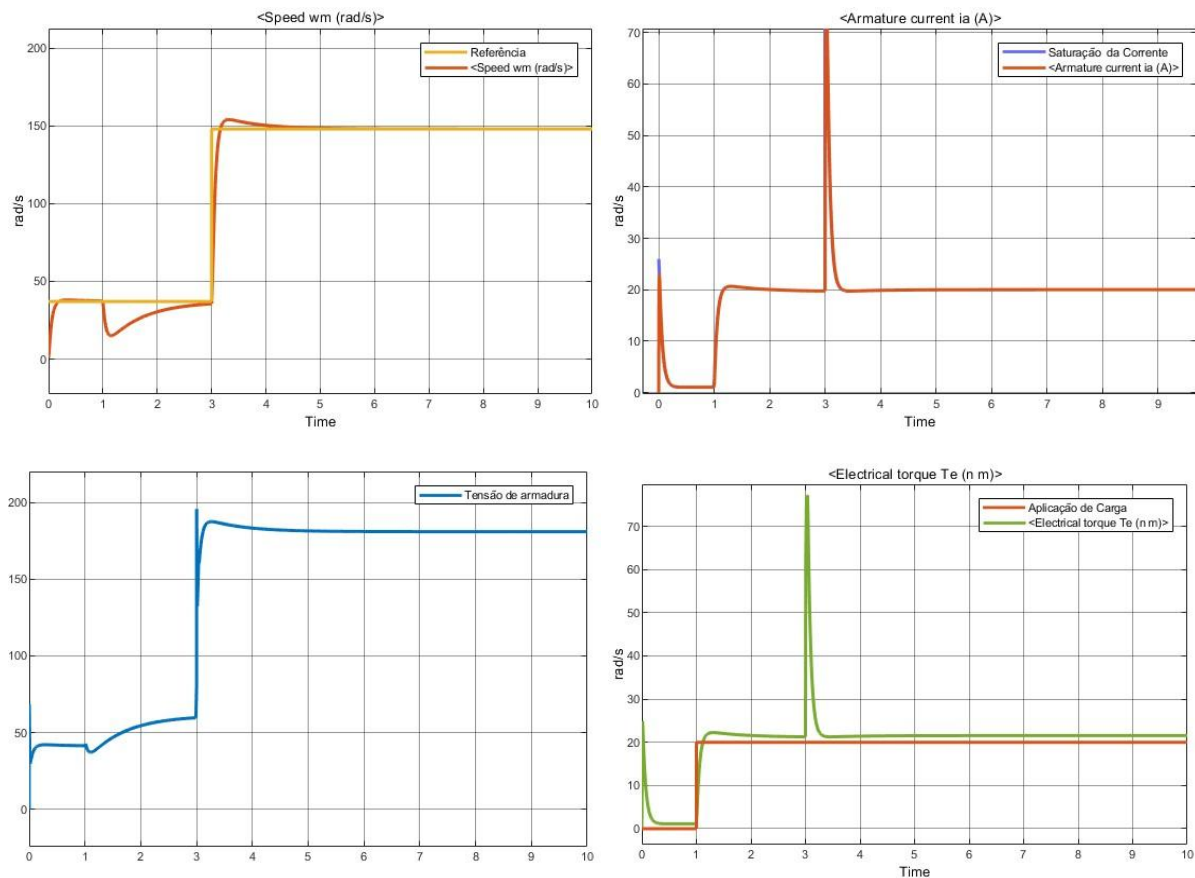


Esse ajuste foi feito para evitar que a corrente e tensão de referência saturem antes do desejado durante a simulação, causando erros na resposta do sistema, já que a corrente de armadura não atinge o valor correto dependendo do torque de carga aplicado devido ao erro em estado estacionário.

4. TESTES PARA A AVALIAÇÃO DO CONTROLE

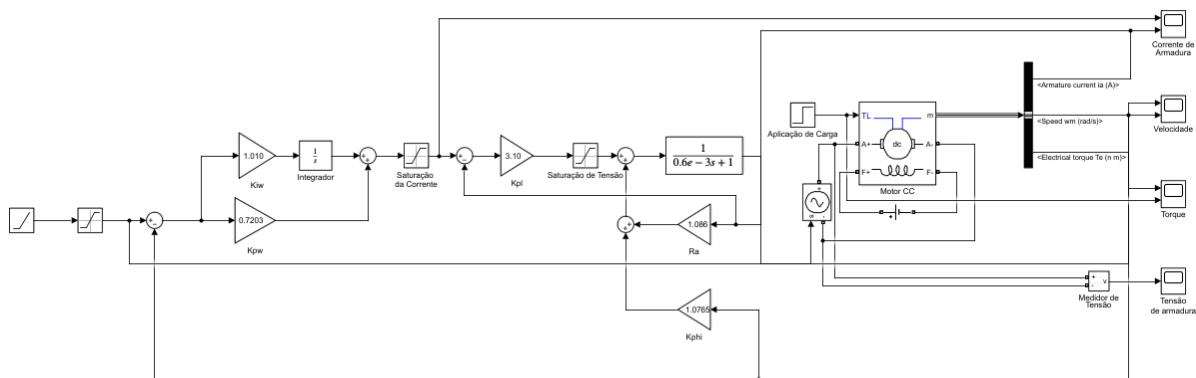
4.1. Variação em degrau da referência de velocidade de 20 a 80% da velocidade nominal com torque de carga igual a 50% do valor nominal

Sob essas especificações, são obtidos os resultados:

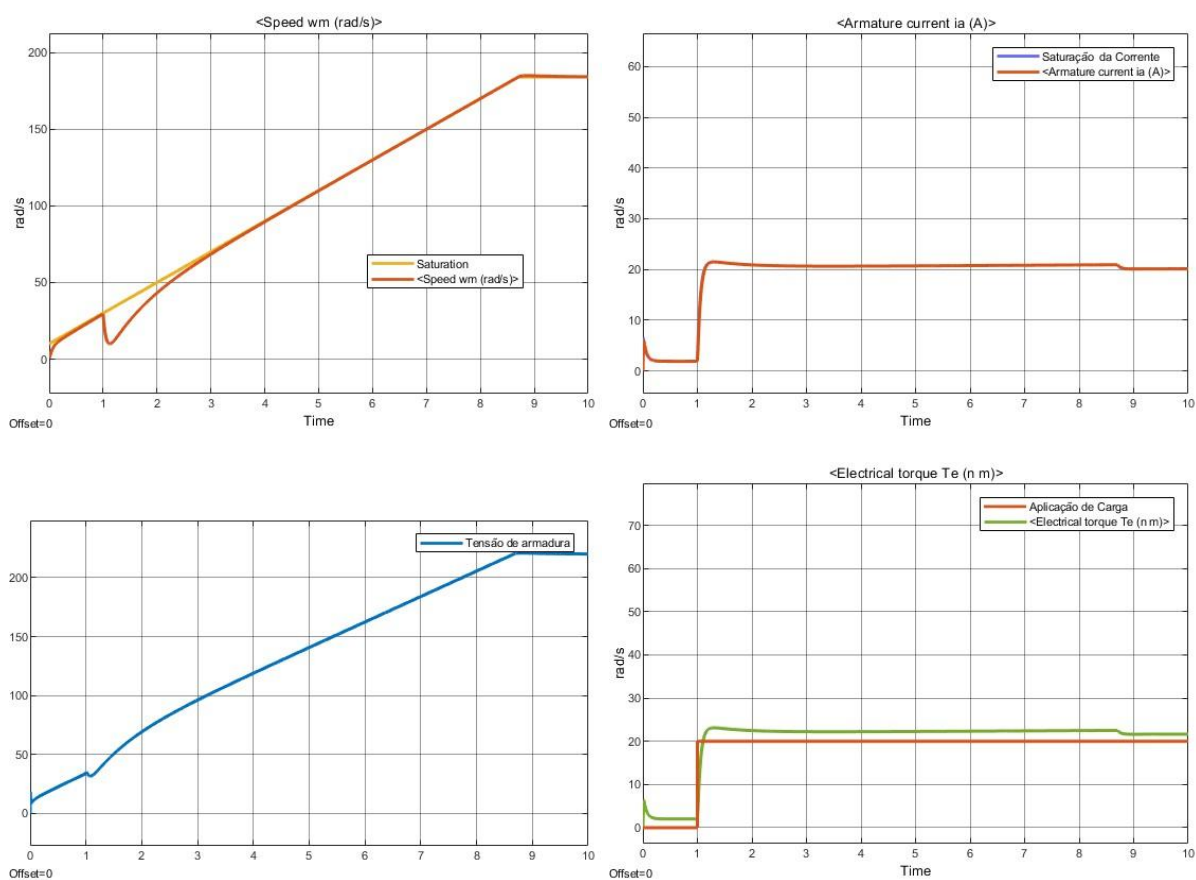


4.2. Variação em rampa da referência de velocidade de 0 a 100% da velocidade nominal – defina a inclinação da rampa para que a corrente não ultrapasse 50% da corrente nominal com torque de carga igual a 50% do nominal

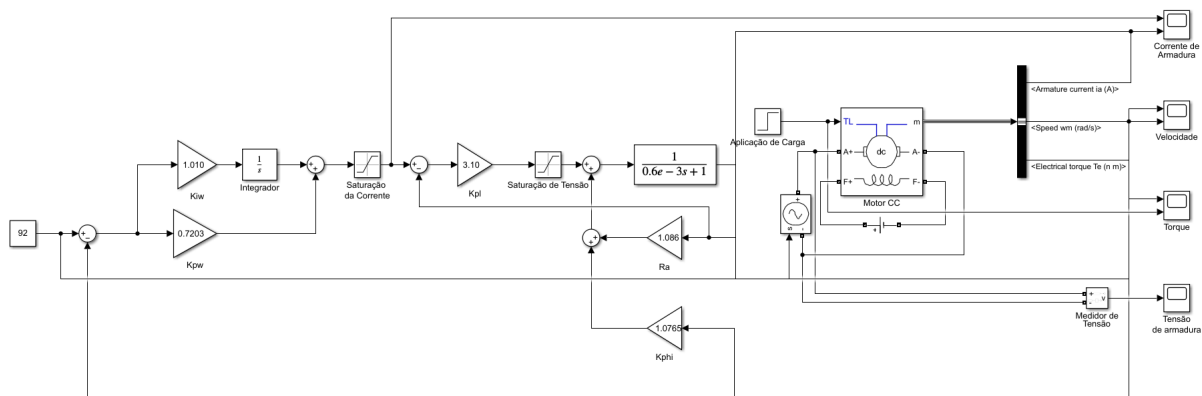
Nesse caso, para o sinal de referência da velocidade, foi inserida na simulação uma rampa com slope correspondente a metade do valor nominal da corrente e a saturação para os valores da velocidade de 0 a 100% do valor nominal, foi mantido também o torque com 50% do valor nominal. Abaixo temos a malha simulada no simulink dadas as especificações acima:

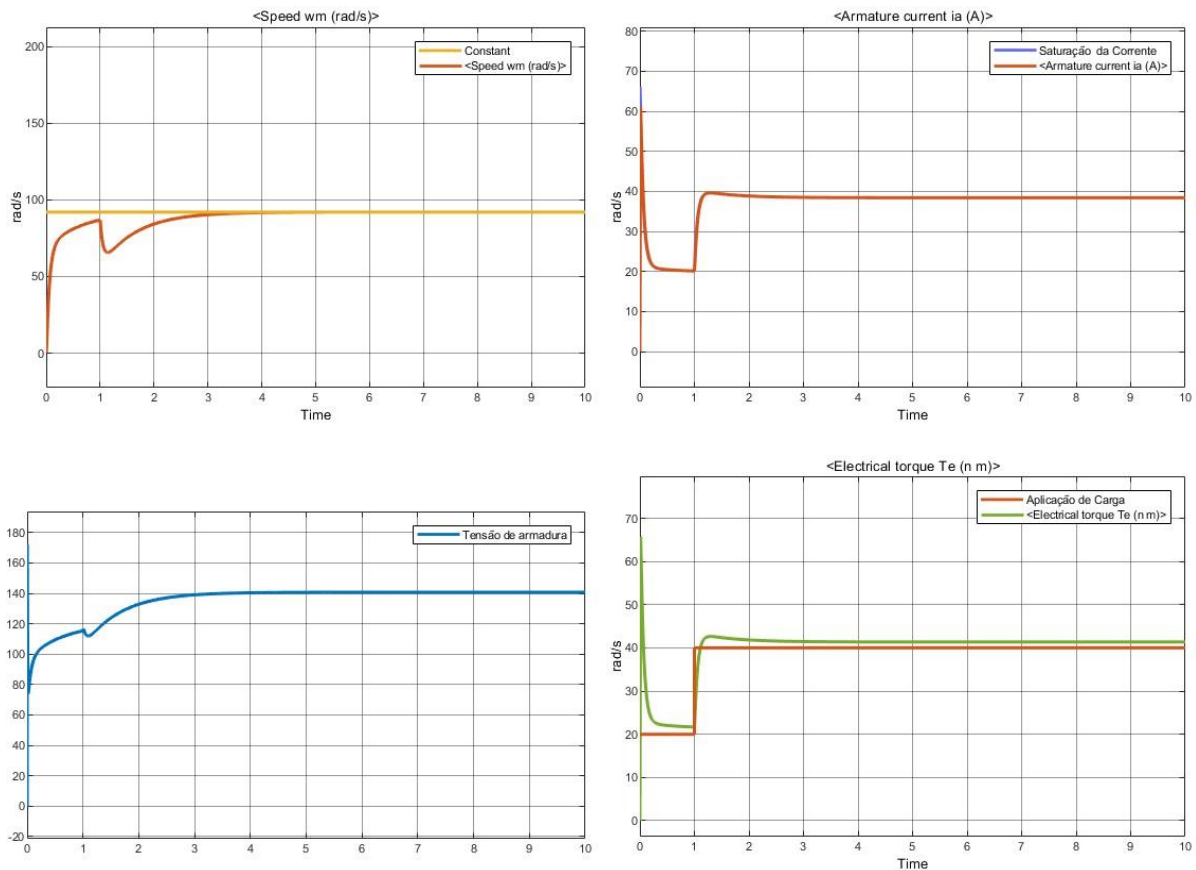


Com isso, foi possível obter os resultados:



4.3. Variação em degrau no torque de carga (perturbação) de 50 a 100% do torque nominal para a máquina operando com 50% da velocidade nominal





5. ANÁLISE DOS RESULTADOS

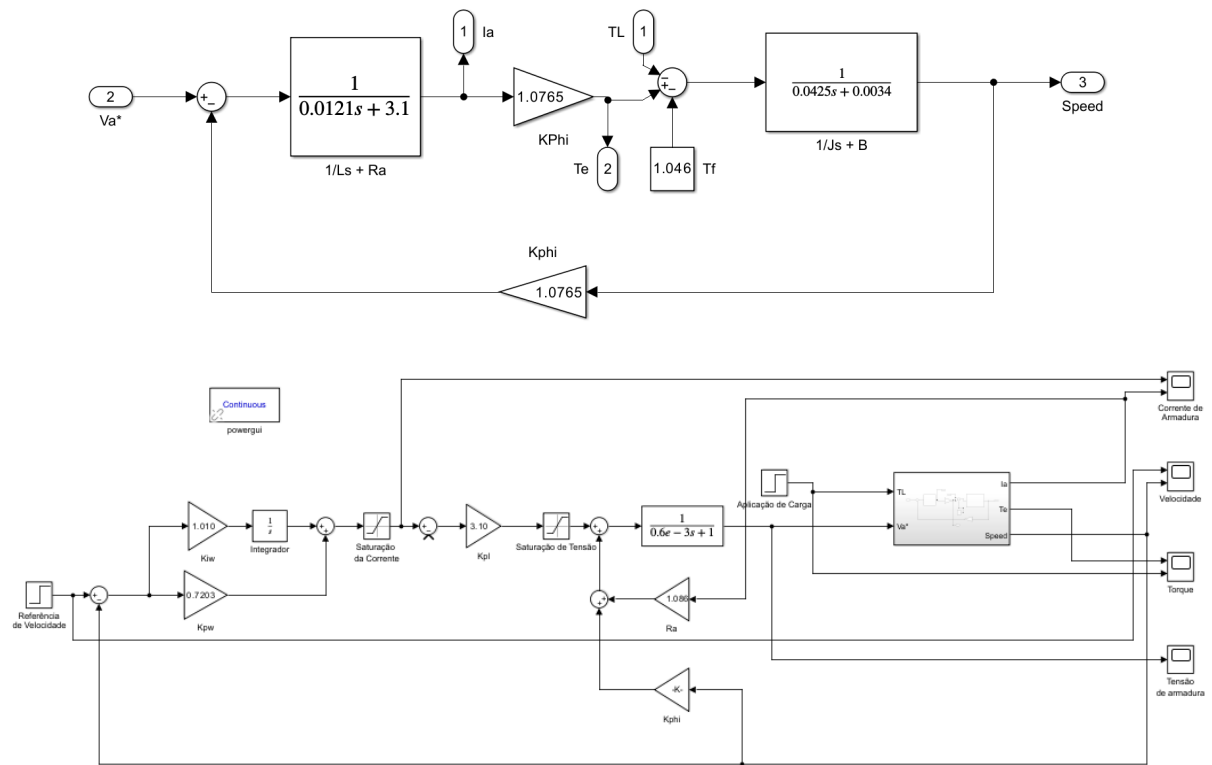
O projeto do controlador foi desenvolvido segundo o modelo do controle em cascata e os resultados apresentaram a dinâmica em acordo com a esperada. É possível identificar que sobre as variáveis do processo, ao aplicar um torque de carga, o controlador age de maneira a corrigir as mesmas a fim de manter a saída em acordo com a entrada de referência do processo, tanto na malha de velocidade quanto na malha da corrente da planta. Assim, ao aplicar um torque de carga, o torque eletromagnético reage de maneira proporcional elevando o valor da corrente de armadura em compensação à dinâmica aplicada.

A realimentação exercida com os valores de $k\phi$ e da queda de tensão resistiva em R_a colaboram para correção do erro sobre o valor da tensão induzida no sistema, a qual atua como uma entrada de perturbação e é compensada na tensão de armadura otimizando sua precisão.

Assim, por fim, é possível concluir que o controle da máquina de corrente contínua foi realizado de maneira satisfatória identificando que, assim como o esperado, a dinâmica da malha interior do controle de corrente apresentou uma dinâmica mais rápida que a malha exterior de controle direto sobre referência de velocidade. Assim, foram obtidas métricas de desempenho plausíveis com a malha real e boas respostas sobre as perturbações no processo.

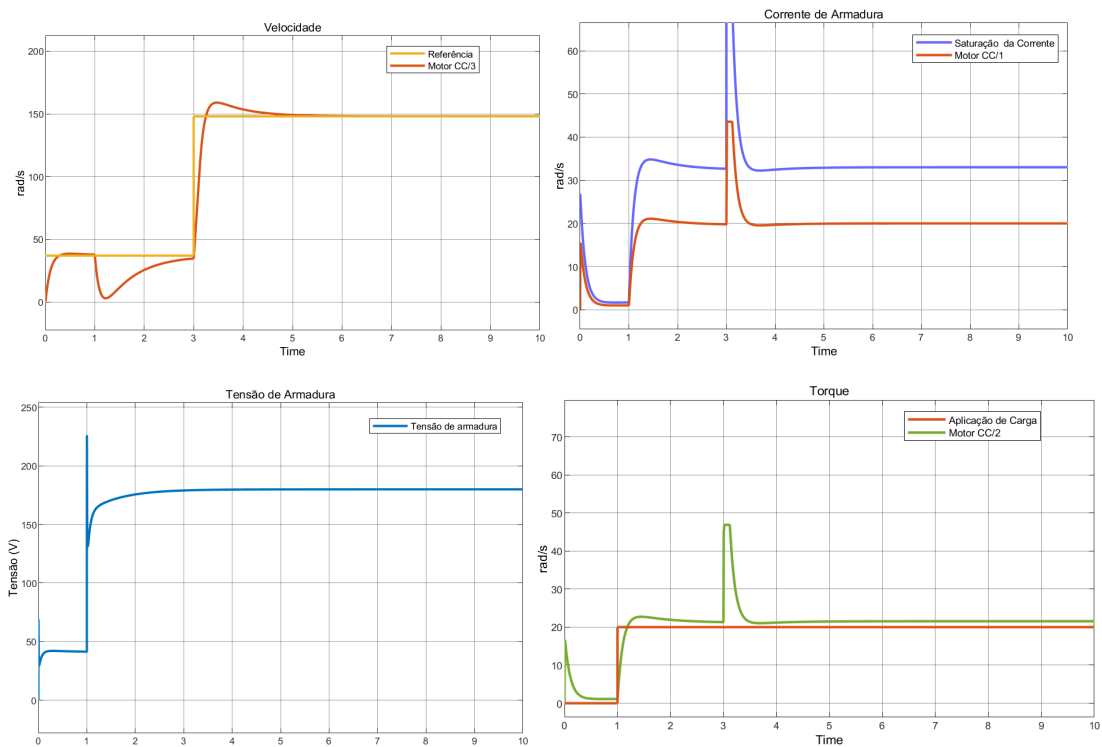
6. SUBSTITUIÇÃO DO DC MACHINE

Para a substituição do DC Machine, foi feita substituição com o seguinte bloco:

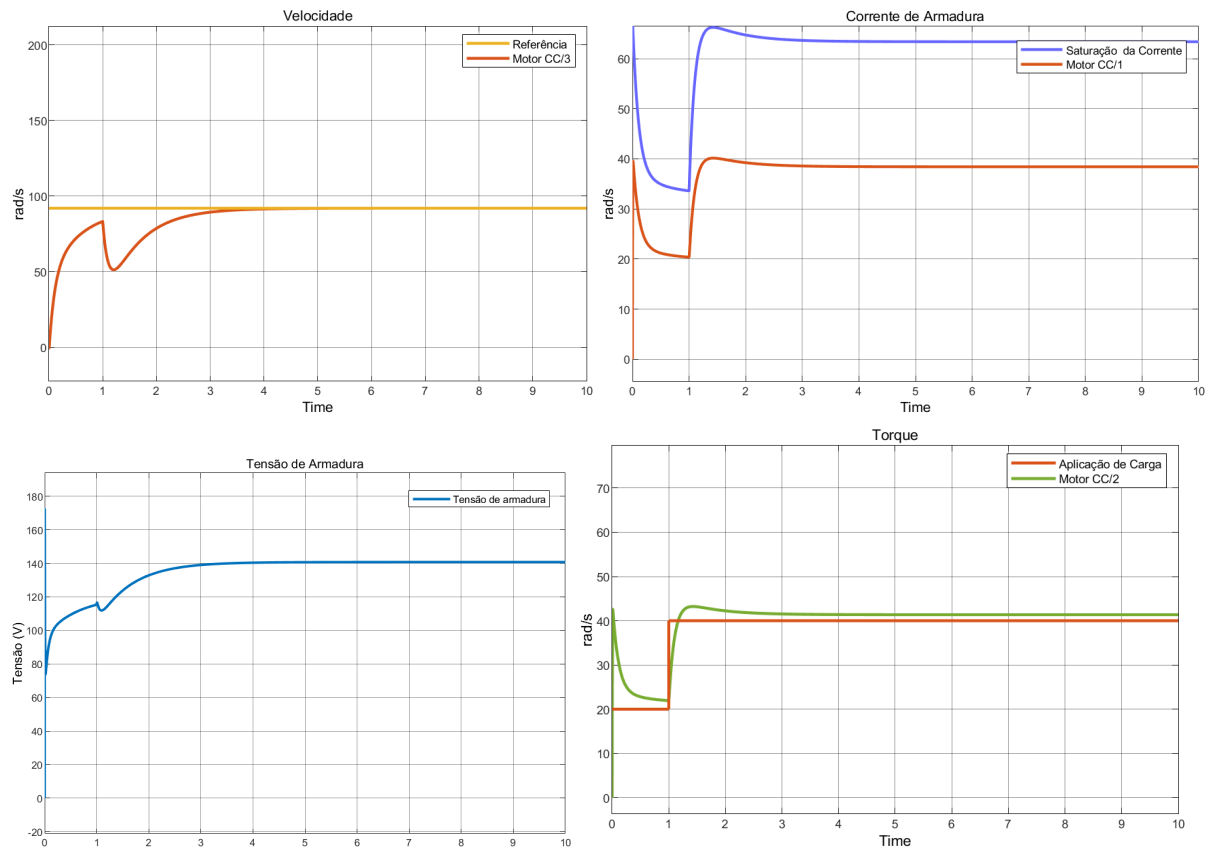


7. REPETIÇÃO DOS TESTES

7.1. Variação em degrau da referência de velocidade de 20 a 80% da velocidade nominal com torque de carga igual a 50% do valor nominal



7.2. Variação em degrau no torque de carga (perturbação) de 50 a 100% do torque nominal para a máquina operando com 50% da velocidade nominal



Assim, foi possível identificar que os resultados obtidos em simulação com a substituição do “DC Machine” por um bloco de funções que leva em consideração as mesmas entradas desenvolvido pelas funções de transferência já previamente determinadas para a planta apresentou resultados bastante similares para a análise da dinâmica da máquina sobre os mesmos parâmetros construtivos e de entrada do sistema de uma máquina de corrente contínua. O que valida o modelo desenvolvido para o comportamento da planta e de seu compensador.