

CONVERSORES ELETROMECAÂNICOS
TRABALHO 1: SIMULAÇÃO MOTOR 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 tem potência de 10HP, tensão de armadura em 240V, velocidade nominal em 1.750 RPM e tensão nominal de campo em 300V.

2. GRÁFICOS CARACTERÍSTICOS ATRAVÉS DAS EQUAÇÕES

Nesta primeira parte, será utilizado o equacionamento matemático correspondente ao regime permanente da máquina em corrente contínua implementados em linhas de código. Primeiramente consideramos a máquina operando com fluxo nominal e em regime permanente.

2.1. Operação em fluxo nominal

Para se obter a curva de torque por velocidade é necessário considerar o torque eletromagnético representado pela equação:

$$T_{EM} = K\phi I_A \quad (1)$$

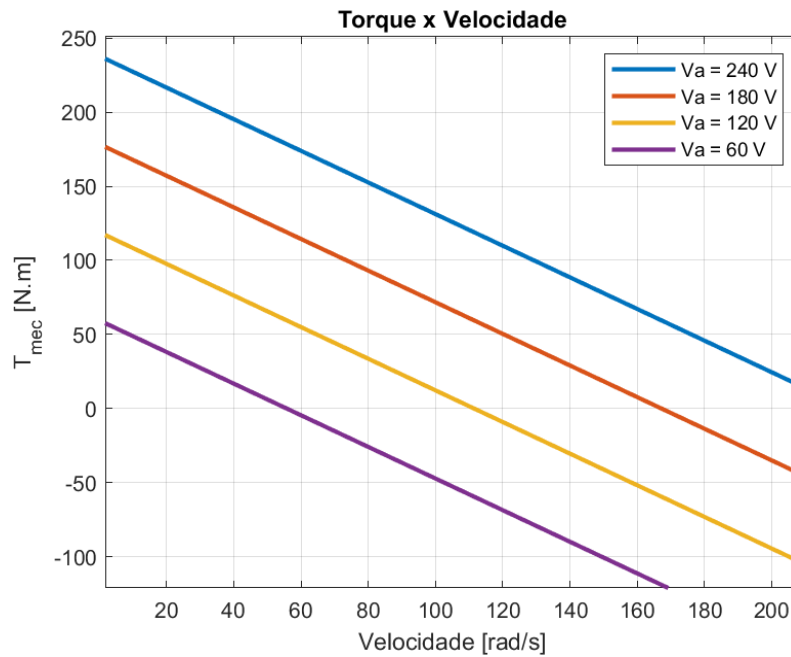
Da relação do regime permanente da máquina, é possível escrever:

$$V_A = R_A I_A + K\phi\omega \quad (2)$$

Isolando-se o valor da corrente de armadura I_A e substituindo-se na equação 1, a equação que representa o torque magnético, teremos:

$$T_{EM} = K\phi \frac{V_A - K\phi\omega}{R_A} \quad (3)$$

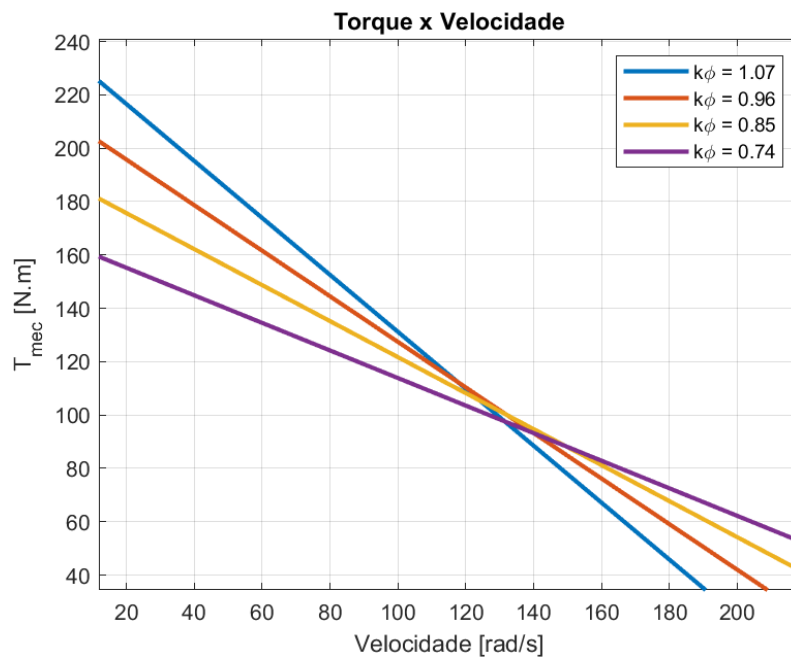
Para diferentes valores de tensão nominal é possível então obter a curva a seguir:



Dessa maneira, é possível identificar a relação diretamente proporcional estabelecida entre o torque e a tensão de armadura, em que para maiores valores de tensão, a curva do torque é deslocada de maneira ascendente; para uma mesma velocidade, maior o torque exercido.

2.2. Operação com tensão de armadura nominal

Utilizando-se a expressão (3) do torque em função da velocidade e variando proporcionalmente os valores $K\phi$ em quatro níveis diferentes: 70%, 80%, 90% e 100% do fluxo nominal aplicado na máquina é possível obter o gráfico:



2.3. Análise de curvas

No primeiro gráfico é possível notar que quanto maior a tensão de armadura, maior a corrente produzida e consequentemente, maior o torque eletromagnético da máquina CC. Dessa forma, aumentando-se o valor da tensão de armadura, menor será a velocidade para atingir o mesmo torque mecânico. É possível também analisar que, quando o torque assume valores negativos, o mesmo sinaliza que a bobina altera seu sentido de rotação. Além disso, no segundo gráfico, mantendo-se um mesmo valor de tensão de armadura é esperado que aumentando o valor do fluxo maior será o conjugado eletromagnético da máquina, o que pode ser observado quando a máquina atinge aproximadamente 130 rad/s, definindo o ponto a partir de onde, para maiores velocidades, maiores fluxos acarretam menores conjugados. Aumentando o fluxo, para uma tensão de armadura e induzida, além de corrente de armadura, constantes, a velocidade aumenta proporcionalmente.

3. CÁLCULO DE GRANDEZAS

Na segunda parte do trabalho serão analisadas e calculadas grandezas como torque nominal, torque de partida e velocidade a vazio utilizando-se dados presentes no modelo da máquina de corrente contínua simulado no simulink.

3.1. Torque nominal do motor

Considerando que a potência nominal pode ser calculada por $P = T\omega$, o torque nominal pode então representado pela expressão:

$$T_{nom} = \frac{P_{nom}}{\omega_{nom}} \quad (4)$$

desse modo, convertendo as unidades de medida pelas correspondentes do SI (Watt e rad/s), o torque nominal pode ser dado por:

$$T_{nom} = \frac{745,7 \cdot 10}{2\pi \frac{1750}{60}} = 40,7 \text{ Nm} \quad (5)$$

3.2. Velocidade a vazio aplicada a tensão

A velocidade a vazio, obtida quando o torque de carga da máquina é nulo, pode ser obtida pela equação abaixo:

$$T_{EM} - T_L = J \frac{d\omega}{dt} + B\omega \Rightarrow T_{EM} = J \frac{d\omega}{dt} + B\omega \quad (6)$$

considerando que a análise é feita quando o sistema encontra-se em estado estacionário, é possível escrever a relação:

$$T_{EM} = B\omega \Rightarrow K\phi I_A \Rightarrow I_A = \frac{B\omega_0}{K\phi_{nom}} \quad (7)$$

substituindo-se a equação (7) em (2), relação do regime permanente, teremos:

$$V_A = R_A \frac{B\omega_0}{K\Phi_{nom}} + K\Phi_{nom}\omega_0 \quad (8)$$

conforme descrito no modelo definido e também no manual do componente contido no simulink, sabemos que a constante $K\Phi_{nom}$ é calculada pela relação $K\Phi_{nom} = L_{af} I_f = 0.6458 \cdot 1.667 = 1.0765$, e $B = 0.0034$, substituindo-se esses valores na equação (8) é possível escrever:

$$240 = 1,086 \frac{0,0034\omega_0}{1,0765} + 1,0765\omega_0 \Rightarrow \omega_0 = 222,24 \text{ rad/s} \quad (9)$$

A velocidade a vazio obtida (ω_0) é de 222,24 rad/s ou 2122,23 rpm. É possível notar, portanto, que a velocidade a vazio assume um valor superior a velocidade nominal da máquina, que equivale a 1750 rpm. Isso ocorre devido ao fato da carga de entrada ser nula fazendo com que a máquina gire livremente.

3.3. Corrente e torque na partida direta com tensões plenas

Durante a partida do motor a tensão induzida é nula e assim a corrente é limitada à resistência e a indutância, sendo que no momento inicial há um pico na corrente representado pela relação:

$$I_P = \frac{V_A}{R_A} \Rightarrow I_P = \frac{240}{1,086} = 220,1 \text{ A} \quad (10)$$

o torque na partida do motor, por sua vez, pode ser calculado por:

$$T_P = K\Phi_{nom} I_P \Rightarrow T_P = 1,0765 \cdot 220,1 = 236,96 \text{ N} \cdot \text{m} \quad (11)$$

3.4. Corrente de armadura e velocidade da máquina para um torque de carga igual a metade do nominal

Considerando a metade do torque nominal como sendo $T_L = 20,35 \text{ N} \cdot \text{m}$ utilizando-se a expressão (6) considerando a dinâmica do sistema como nula teremos:

$$T_{EM} - T_L = B\omega \Rightarrow T_{EM} = 20,35 + 0,0034\omega \quad (12)$$

é necessário portanto recorrer novamente à equação (8) a fim de calcular a velocidade dessa nova configuração da máquina:

$$240 = 1,086 \frac{20,35+0,0034\omega}{1,0765} + 1,0765\omega \Rightarrow \omega = 203,23 \text{ rad/s} \quad (13)$$

dessa forma a velocidade obtida é de 203,23 rad/s ou 1940,7 rpm, em seguida calculamos a corrente de armadura:

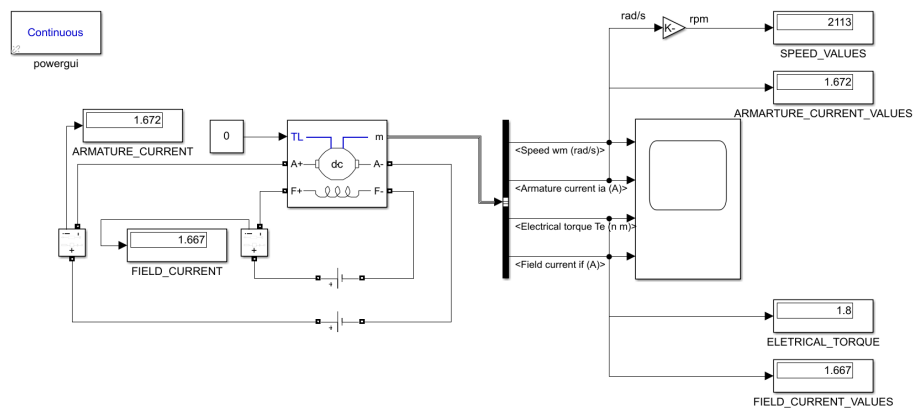
$$I_A = \frac{20,35+0,0034 \cdot 203,23}{1,0765} \Rightarrow I_A = 19,54 \text{ A} \quad (14)$$

4. SIMULAÇÕES

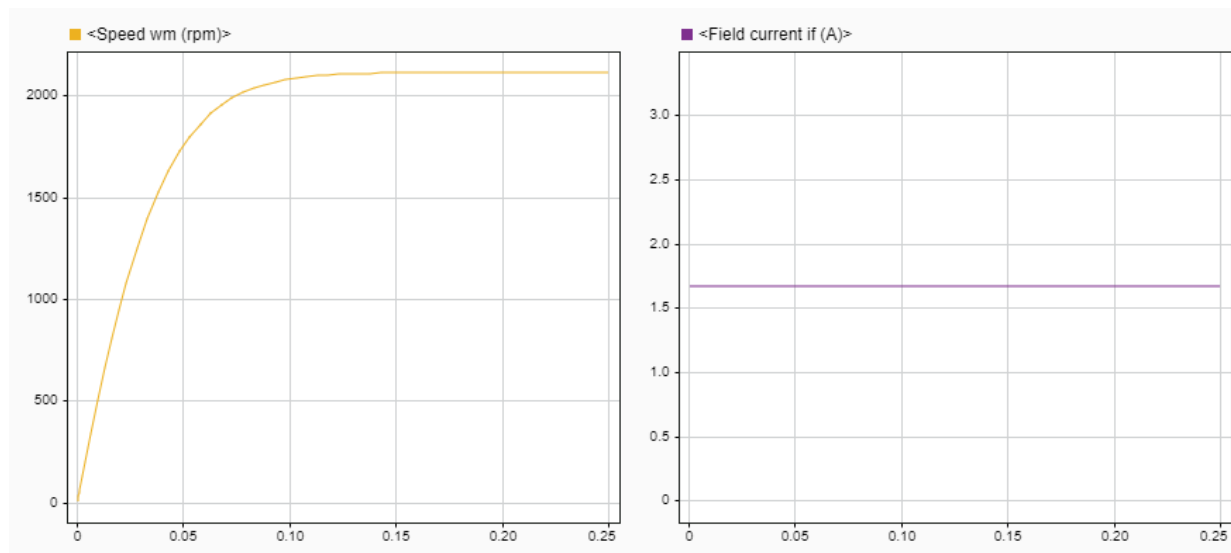
O modelo foi então simulado utilizando o simulink, adicionando ferramentas e componentes que facilitassem a amostragem e a análise dos dados experimentais, apresentando em seguida gráficos de velocidade, corrente de armadura, corrente de campo e torque eletromagnético.

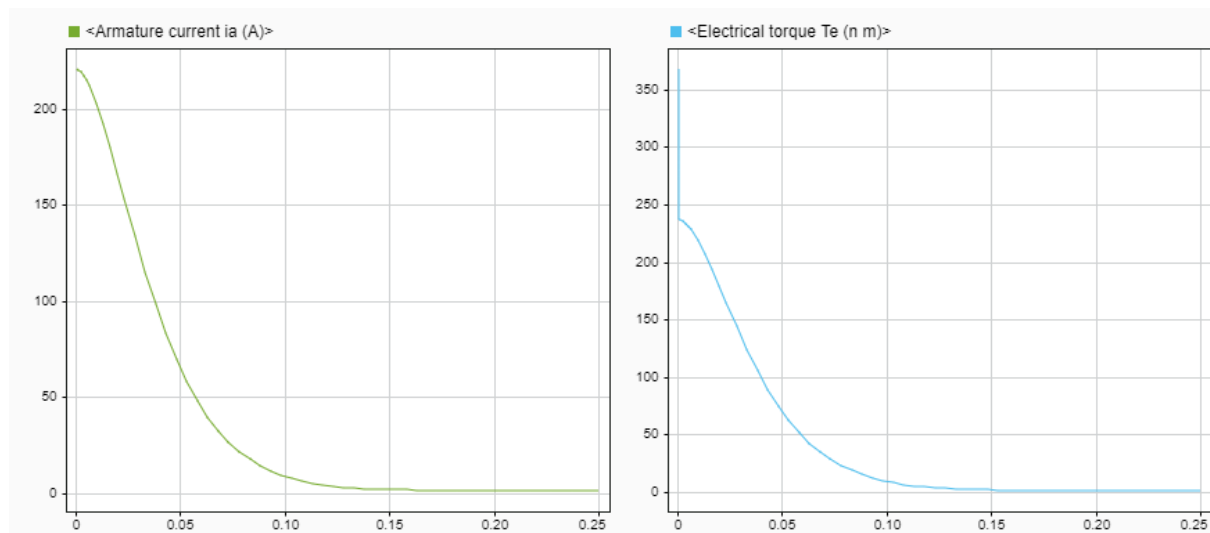
4.1. Partida direta com tensões plenas a vazio

Sistema simulado a vazio no simulink, foram adicionados displays para a medição das variáveis bem como um osciloscópio para auxiliar a visualização das grandezas ao longo do tempo:

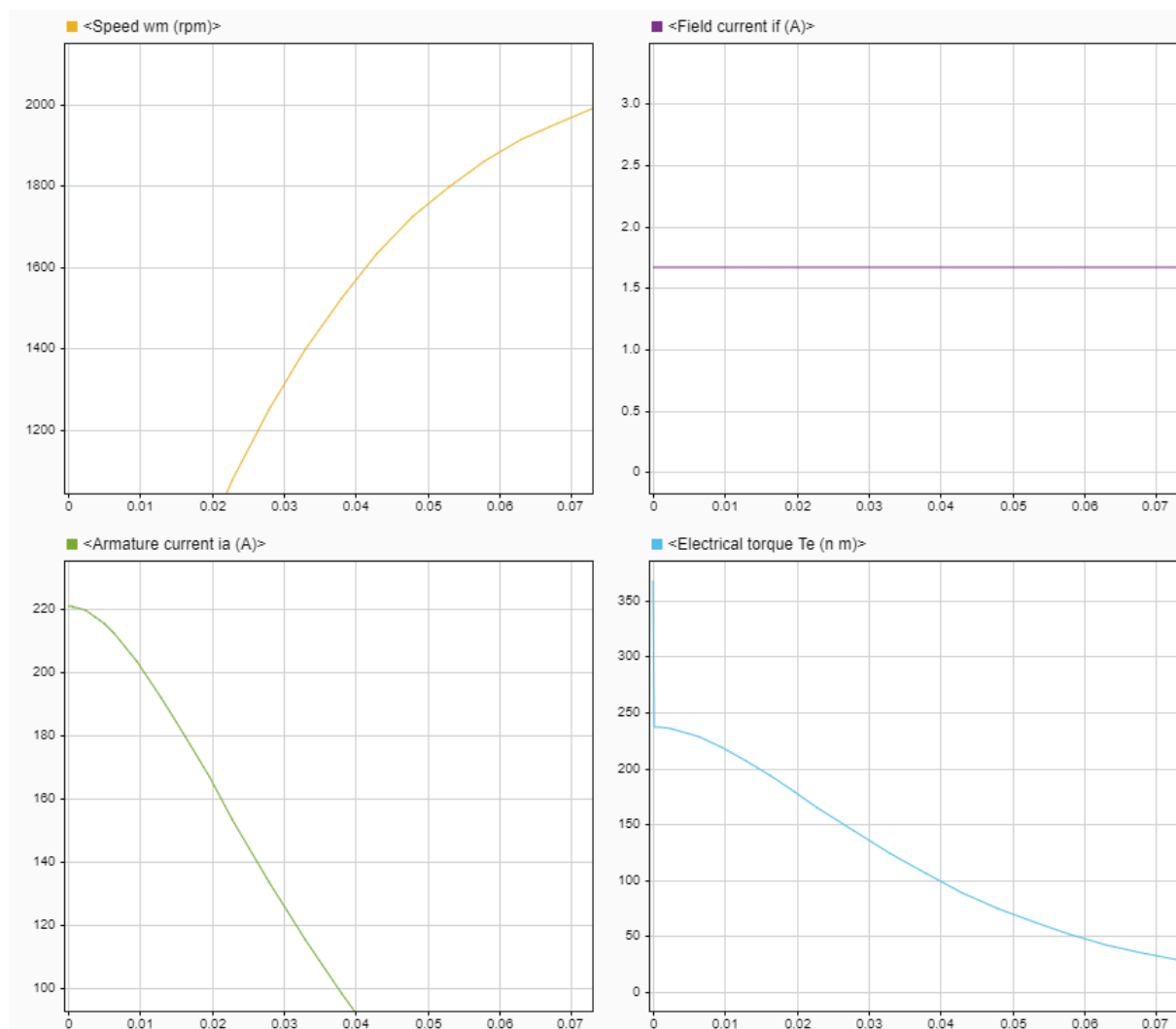


abaixo é possível visualizar o resultado da simulação do sistema a vazio, bem como o estado estacionário do mesmo:





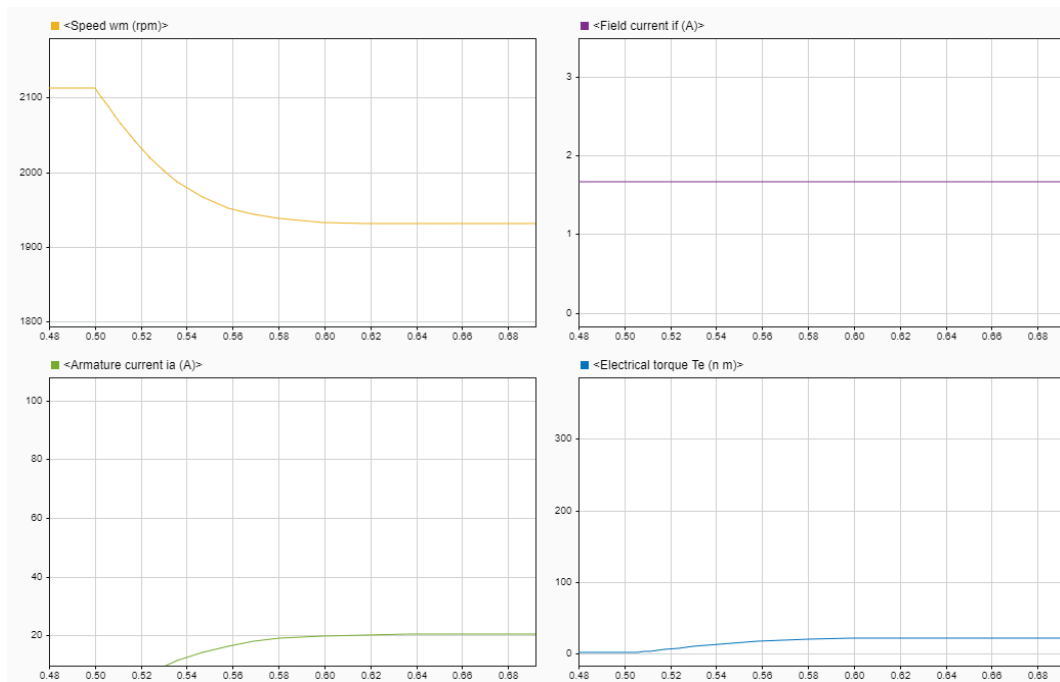
abaixo, analisamos os valores de pico da tensão e velocidade a vazio dando um zoom nos resultados obtidos:



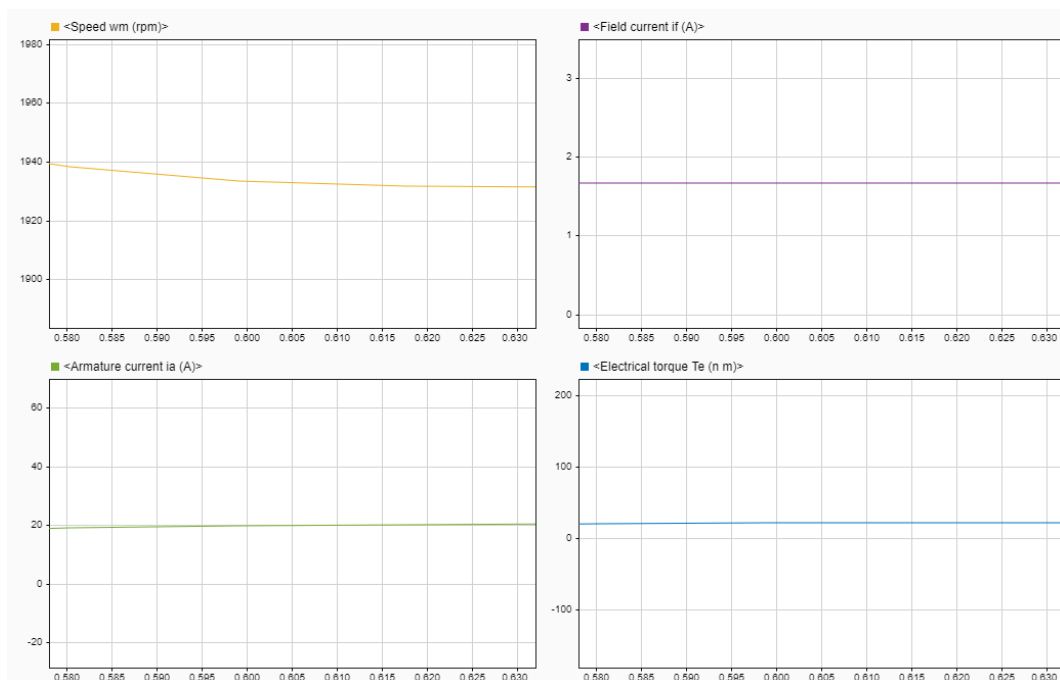
4.2. Comparação resultado de simulação obtidos anteriormente

Os valores obtidos na análise do gráfico foram condizentes uma vez que, teoricamente, foram encontrados, na partida, $I_p = 220,1 A$ e $T_p = 236,96 N \cdot m$, assim como, com tendência estacionária, a velocidade a vazio atingindo $\omega_0 = 222,24 rad/s$ ou 2122 rpm de maneira superamortecida e a corrente de campo $I_f = 1,667 A$, seguindo as referências obtidas de maneira gráfica.

4.3. Torque de carga igual a metade do nominal com step



abaixo é possível ver um zoom nos resultados obtidos considerando o estado estacionário:



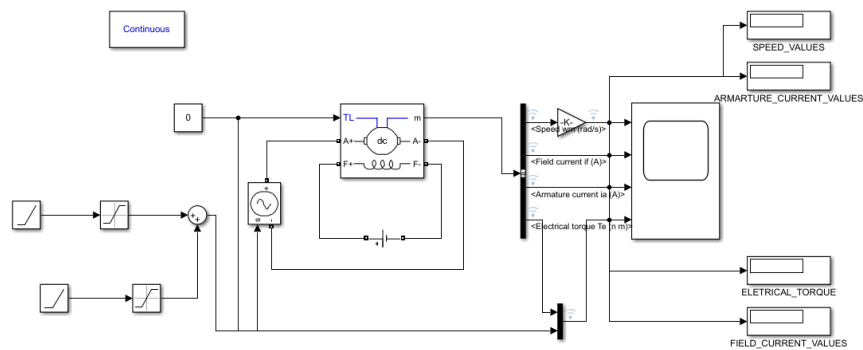
4.4. Comparação resultado de simulação obtidos anteriormente

Nesse contexto, teoricamente após a aplicação da carga, obtivemos $\omega_0 = 203,23 \text{ rad/s}$ ou 1940 rpm $I_A = 19,54 \text{ A}$ e $T_{em} = 21.04 \text{ N} \cdot \text{m}$, o que é condizente com os valores obtidos pela simulação.

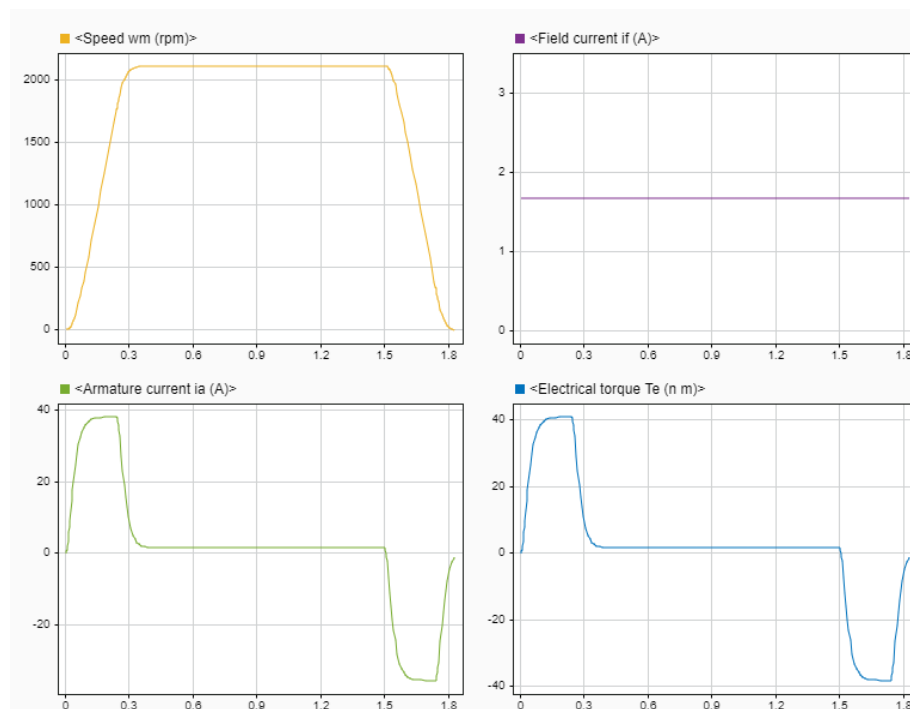
É possível perceber que, ao aplicar uma carga sobre o sistema, o mesmo reage de maneira a se adaptar à nova configuração com um maior torque sendo adicionado à entrada. Dessa maneira, a velocidade da máquina diminui proporcionalmente à tensão induzida. Acarretando, portanto, na elevação da corrente de armadura e na compensação do torque eletromagnético em função do torque de carga até que a máquina consiga atingir o seu comportamento de regime permanente.

4.5. Rampas de tensão

O sistema foi então simulado no simulink utilizando rampas de tensão:



obtivemos então os resultados:



4.6. Explicação do comportamento das variáveis do item anterior à luz da teoria

O método de acionamento por rampas de tensão busca amenizar o impacto da partida direta, uma vez que, aplicando a tensão de armadura de maneira gradual, é possível identificar a diminuição do pico de corrente e de torque aplicado sobre a máquina.

Valores de torque e de corrente de armadura elevados podem levar à danificação da máquina em razão dos limites térmicos e elétricos incorporados pelos limites nominais que são estipulados para o bom funcionamento da máquina CC.

Ao diminuir o pico de torque, também é possível identificar um tempo de acomodação maior em relação ao modo anterior, uma vez que o torque tem proporcionalidade direta com a derivada da velocidade.

Outro fator notável, é o do sinal assumido pela corrente de armadura no momento de frenagem. Nesse contexto, no circuito elétrico equivalente, ao diminuir a tensão de armadura abruptamente, a tensão induzida sobre o motor passa a ser momentaneamente maior que a de armadura, o que inverte o sentido da corrente fazendo com que a máquina atue como um gerador e force sua desaceleração.