



ESCOLA POLITÉCNICA DA UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

PME3201 - Laboratório de Simulações Numéricas

Prof. Dr. Walter Ponge-Ferreira

5^o Exercício

E5 - Grupo Motor-Rotor

1 Questão

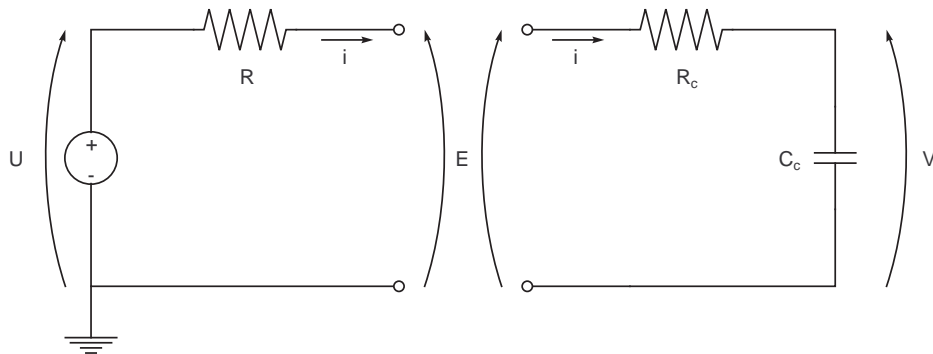


Figura 1: Circuito RC em série

Um circuito elétrico é composto por uma fonte e uma carga, conforme pode ser observado na figura 1. A fonte equivalente de Thévenin é composta por uma fonte de tensão ideal $U(t)$ e uma impedância interna $R = 1,0\Omega$. A fonte alimenta uma carga composta por um circuito RC em série. A capacitância da carga vale $C_c = 1,0\text{ mF}$ e a resistência $R_c = 1,0\Omega$.

Pede-se:

- a) Criar um componente para representar a fonte utilizando os conectores padrões do MODELICA.
- b) Elaborar um modelo de circuito composto da fonte e de uma carga resistiva $R_c = 1,0 \Omega$.
- c) Elaborar um modelo de circuito composto da fonte e de uma carga capacitiva $C_c = 1,0 \text{ mF}$.
- d) Elaborar um modelo de circuito composto da fonte e de uma carga indutiva $L_c = 1,0 \text{ mH}$.
- e) Simular e estudar a resposta dos modelos ao degrau com:

$$U(t) = \begin{cases} 0 & |t < t_o \\ U_0 & |t \geq t_o \end{cases}$$

onde $U_0 = 10,0 \text{ V}$ e $t_o = 0,001 \text{ s}$.

- f) Quais são as impedâncias de saída da fonte e de entrada da carga nos três exemplos?
- g) Criar um componente para representar a carga do circuito RC em série descrito no enunciado utilizando os conectores padrões do MODELICA.
- h) Elaborar um modelo do circuito composto pelos componentes fonte e carga com circuito RC em série.
- i) Quais são as impedâncias de saída da fonte e de entrada da carga nesse caso?
- j) Simular e estudar a resposta do modelo ao degrau.
- k) Fazer uma análise de sensibilidade para pequenas variações de R_c e C_c , e.g.:

$$R_c = \frac{1}{\sqrt{10}} \Omega, \quad 1 \Omega, \quad \sqrt{10} \Omega$$

$$C_c = \frac{1}{\sqrt{10}} \text{ mF}, \quad 1 \text{ mF}, \quad \sqrt{10} \text{ mF}$$

- 1) Fazer uma análise da resposta quando ocorre uma grande variação de R_c e C_c , e.g.:

$$\begin{aligned} R_c &= 0 \Omega, \quad 100 \Omega \\ C_c &= 0 \text{ mF}, \quad 100 \text{ mF} \end{aligned}$$

- m) Analisar e interpretar os resultados, verificando se o comportamento da fonte no circuito, é de fonte de tensão ou de fonte de corrente.

2 Questão

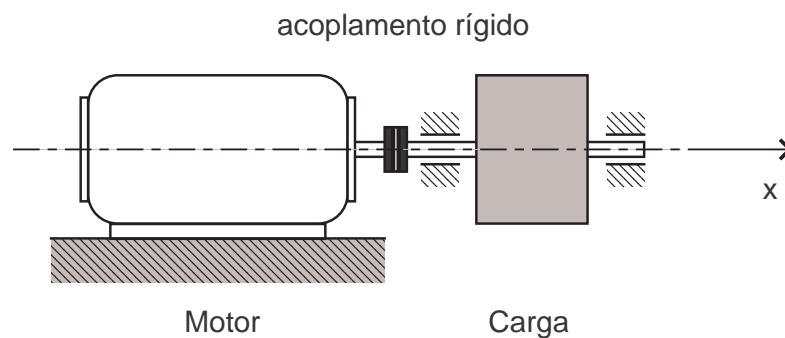


Figura 2: Grupo motor-carga com acoplamento rígido

Um motor elétrico de corrente contínua aciona um volante de inércia com momento de inércia polar $J_c = 0,1 \text{ kg m}^2$. O motor elétrico pode ser acoplado ao volante de inércia através de um acoplamento rígido (figura 2) ou de um acoplamento flexível linear ou não-linear (figura 3). A rigidez à torção do acoplamento flexível linear vale $\kappa = 10,0 \text{ Nm/rad}$. A rigidez linear e o coeficiente de terceira ordem do acoplamento não-linear enrijecedor valem $\kappa = 10,0 \text{ Nm/rad}$ e $\nu = 1,0 \text{ Nm/rad}^3$, respectivamente. O rotor interno do motor tem momento de inércia polar $J = 0,02 \text{ kg m}^2$. O coeficiente de conversão da força eletromotriz do motor vale $k = 0,1 \text{ Nm/A}$. A resistência elétrica e a indutância da armadura do motor valem $R = 1,0 \Omega$, e $L = 0,01 \text{ H}$, respectivamente. O motor é alimentado por uma fonte de tensão de $U_0 = 120 \text{ V}$. As perdas mecânicas internas do motor, como forças viscosas nos mancais e o arrasto aerodinâmico interno do rotor, podem ser modelados por um torque viscoso resistivo com constante de amortecimento $c = 0,01 \text{ Nm} \cdot \text{s/rad}$. O esquema do motor é apresentado na figura 4.

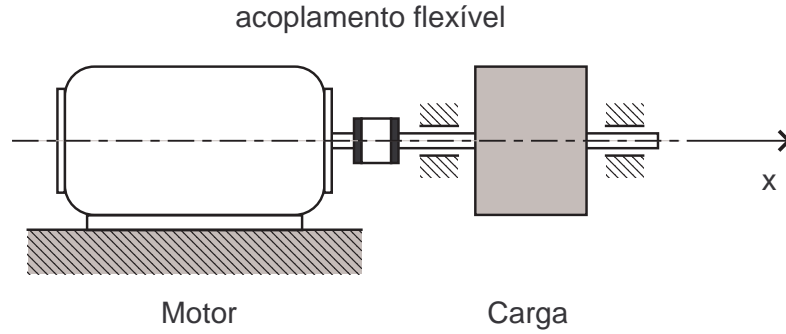


Figura 3: Grupo motor-carga com acoplamento flexível

2.1 Modelo Dinâmico do Motor Elétrico

O campo eletromagnético do estator produz um torque eletromagnético T_m e existe um torque resistivo interno $c \cdot \omega$ no motor, resultando em um torque mecânico líquido T no eixo de saída dado por:

$$J \frac{d\omega}{dt} = T_m - c\omega - T \quad (1)$$

Por outro lado, o modelo elétrico da armadura fornece a seguinte equação:

$$U = Ri + L \frac{di}{dt} + e \quad (2)$$

e para conversão eletromotriz temos:

$$\begin{aligned} e &= k_e \omega \\ T_m &= k_t i \end{aligned}$$

Para um processo ideal de conversão sem perdas as duas constantes são iguais quando expressas em um sistema de unidades coerente:

$$k_e = k_t = k$$

assim:

$$\begin{aligned} e &= k\omega \\ T_m &= ki \end{aligned} \quad (3)$$

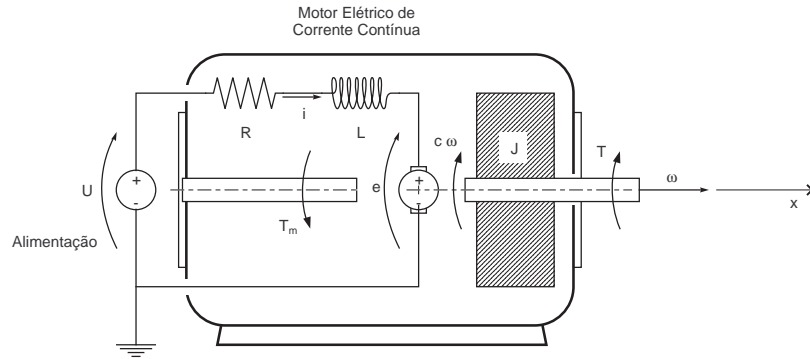


Figura 4: Motor Elétrico de Corrente Contínua

Se desejarmos podemos substituir as equações da conversão (3) nas equações diferenciais mecânica (1) e elétrica (2) e obter duas equações diferenciais acopladas:

$$J \frac{d\omega}{dt} + c\omega = k \cdot i - T \quad (4)$$

$$L \frac{di}{dt} + Ri = U - k \cdot \omega \quad (5)$$

que resumem a dinâmica do motor elétrico.

2.1.1 Solução Simplificada

Se a indutância da armadura puder ser considerada desprezível a equação elétrica (2) se reduz a:

$$i = \frac{U}{R} - \frac{k}{R} \cdot \omega$$

logo:

$$J \frac{d\omega}{dt} + c\omega = \frac{k}{R} U - \frac{k^2}{R} \omega - T$$

ou:

$$J \frac{d\omega}{dt} + \left(c + \frac{k^2}{R} \right) \omega = \frac{k}{R} U - T \quad (6)$$

A primeira parcela do termo esquerdo representa o torque de inércia necessário para acelerar o próprio rotor do motor e a segunda parcela o torque dissipativo devido às perdas mecânicas e elétricas. No termo da direita temos o torque eletromagnético e o torque de reação da carga.

Essa equação também indica que o sistema pode ser utilizado para converter energia elétrica em torque mecânico, assim operando como motor, ou em sentido inverso, converter energia mecânica em elétrica, operando como gerador.

Na condição de regime permanente quando não há mais aceleração do rotor, no caso do motor aplicamos uma fonte de tensão $U(t)$ e produzimos torque $T(t)$:

$$T = \frac{k}{R} U - \left(c + \frac{k^2}{R} \right) \omega \quad (7)$$

e o rotor gira no sentido positivo, i.e., $\omega > 0$.

No caso do gerador, também na condição de regime permanente, aplicamos um torque $T(t)$ e geramos a tensão $U(t)$:

$$U = \frac{R}{k} T + \left(\frac{R}{k} c + k \right) \omega \quad (8)$$

e nesse caso o rotor gira no sentido negativo, i.e., $\omega < 0$.

Acionando um volante com acoplamento rígido

Consideremos inicialmente uma carga de inércia J_c acoplada rigidamente ao rotor, assim:

$$T = J_c \frac{d\omega}{dt}$$

assim a equação (6) fica:

$$\begin{aligned} J \frac{d\omega}{dt} + \left(c + \frac{k^2}{R} \right) \omega &= \frac{k}{R} U - J_c \frac{d\omega}{dt} \\ (J + J_c) \frac{d\omega}{dt} + \left(c + \frac{k^2}{R} \right) \omega &= \frac{k}{R} U \end{aligned} \quad (9)$$

Temos uma equação diferencial ordinária linear de primeira ordem que pode ser resolvida analiticamente.

Solução da equação diferencial para uma carga inercial rigidamente acoplada

A solução $\omega(t)$ da equação diferencial linear (9) pode ser decomposta em duas parcelas, solução homogênea $\omega_h(t)$ e solução particular $\omega_p(t)$:

$$\omega(t) = \omega_h(t) + \omega_p(t)$$

$\omega_h(t)$ é a solução da equação diferencial ordinária homogênea associada:

$$(J + J_c) \frac{d\omega_h}{dt} + \left(c + \frac{k^2}{R}\right) \omega_h = 0$$

que tem como solução:

$$\omega_h(t) = A e^{-t/\tau} \quad (10)$$

onde A é uma constante a ser determinada pela condição inicial e τ a constante de tempo do sistema dada por:

$$\tau = \frac{J + J_c}{c + \frac{k^2}{R}} \quad (11)$$

A solução particular $\omega_p(t)$ deve atender à excitação imposta $U(t)$, para excitação degrau temos para $t \geq 0$:

$$\omega_p(t) = B$$

substituindo na equação diferencial temos:

$$(J + J_c) 0 + \left(c + \frac{k^2}{R}\right) B = \frac{k}{R} U_0 \quad | \quad t \geq 0$$

logo:

$$B = \frac{k}{R c + k^2} U_0 \quad | \quad t \geq 0$$

Assim a solução geral fica:

$$\omega(t) = A e^{-t/\tau} + \frac{k}{R c + k^2} U_0$$

Impondo-se a condição inicial $\omega(0) = 0$ vem:

$$\omega(0) = A e^{-0/\tau} + \frac{k}{R c + k^2} U_0 = 0$$

logo:

$$A = -\frac{k}{Rc + k^2} U_0$$

Portanto a solução da equação diferencial para excitação degrau com partida em repouso fica:

$$\omega(t) = \frac{k}{Rc + k^2} U_0 (1 - e^{-t/\tau}) \quad (12)$$

com:

$$\tau = \frac{J + J_c}{c + \frac{k^2}{R}}$$

Tomando-se o limite para $t \rightarrow \infty$ temos:

$$\lim_{t \rightarrow \infty} \omega(t) = \lim_{t \rightarrow \infty} \frac{k}{Rc + k^2} U_0 (1 - e^{-t/\tau}) = \frac{k}{Rc + k^2} U_0$$

Logo:

$$\omega_{reg} = \omega(\infty) = \frac{k}{Rc + k^2} U_0$$

é a resposta em regime permanente.

Assim:

$$\omega(t) = \omega_{reg} (1 - e^{-t/\tau})$$

Solução com inércia total desprezível

Por outro lado, a solução da equação diferencial (9):

$$(J + J_c) \frac{d\omega}{dt} + \left(c + \frac{k^2}{R} \right) \omega = \frac{k}{R} U$$

se a inércia total for pequena, desprezando-se a primeira parcela do termo esquerdo, obtém-se:

$$\left(c + \frac{k^2}{R} \right) \omega = \frac{k}{R} U$$

ou:

$$\omega(t) = \frac{k}{Rc + k^2} U(t)$$

ou seja, o rotor é uma fonte de movimento, de tal maneira que o rotor segue a forma da função imposta pela excitação $U(t)$.

Verifica-se que para excitação degrau partindo do repouso essa é exatamente a solução de regime permanente. Com inércia desprezível a constante de tempo fica:

$$\lim_{(J+J_c) \rightarrow 0} \tau = \lim_{(J+J_c) \rightarrow 0} \frac{J + J_c}{c + \frac{k^2}{R}} = 0$$

logo:

$$\lim_{\tau \rightarrow 0} e^{-t/\tau} = 0 \quad \forall \quad t \geq 0$$

e da equação (12) obtemos:

$$\omega(t) = \omega_{reg} \quad \forall \quad t \geq 0$$

Assim quando o momento de inércia é desprezível o rotor segue a função imposta por $U(t)$ para qualquer tipo de excitação.

2.2 Potência e Eficiência do Motor

A potência elétrica de acionamento é dada por:

$$P_s = U \cdot i \tag{13}$$

A potência elétrica efetiva para gerar a força eletromotriz é dada por:

$$P_e = e \cdot i$$

enquanto a potência do torque magnético é dada por:

$$P_m = T_m \omega$$

Pode-se verificar que:

$$P_e = e \cdot i = k \omega \cdot \frac{T_m}{k} = T_m \cdot \omega = P_m$$

mostrando que a conversão é modelada sem perdas, i.e., $k_e = k_t = k$.

A potência mecânica de saída do motor é dada por:

$$P = T \omega \tag{14}$$

Assim a eficiência elétrica do motor é dada por:

$$\eta_e = \frac{P_e}{P_s} = \frac{e \cdot i}{U \cdot i} = \frac{e}{U} = k \frac{\omega}{U} \tag{15}$$

A eficiência mecânica do motor é dada por:

$$\eta_m = \frac{P}{P_m} = \frac{T \cdot \omega}{T_m \cdot \omega} = \frac{T}{T_m} = \frac{1}{k} \frac{T}{i} \quad (16)$$

A eficiência total do motor é portanto:

$$\eta = \eta_e \cdot \eta_m = \frac{e}{U} \cdot \frac{T}{T_m} = \frac{T}{U} \cdot \frac{\omega}{i} = \frac{P}{P_s} \quad (17)$$

2.3 Componentes da Carga

2.3.1 Volante de Inércia

O eixo de coordenada longitudinal do rotor é orientado do acionamento para carga. Assim uma rotação é positiva se seu sentido é anti-horário quando observado da carga para o motor. Um torque é considerado positivo se aplicado no mesmo sentido da rotação positiva.

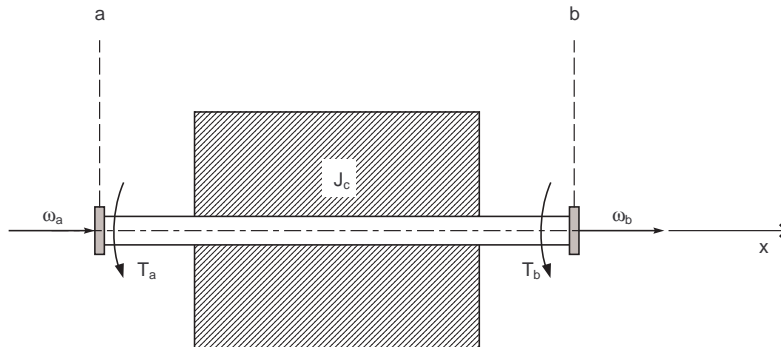


Figura 5: Volante de Inercia

Na figura 5 é apresentado o esquema de um volante de inércia com momento de inércia polar J_c . O volante de inércia é considerado rígido, portanto a rotação θ e a velocidade de rotação angular ω são iguais nos dois acoplamentos e com giro no mesmo sentido. Pela convenção de sinais adotada, as equações constitutivas do volante de inercia ficam:

$$\begin{aligned} T_a + T_b &= J \cdot \frac{d\omega}{dt} \\ \omega_a = \omega_b &= \omega \end{aligned} \quad (18)$$

2.3.2 Mola de Torção

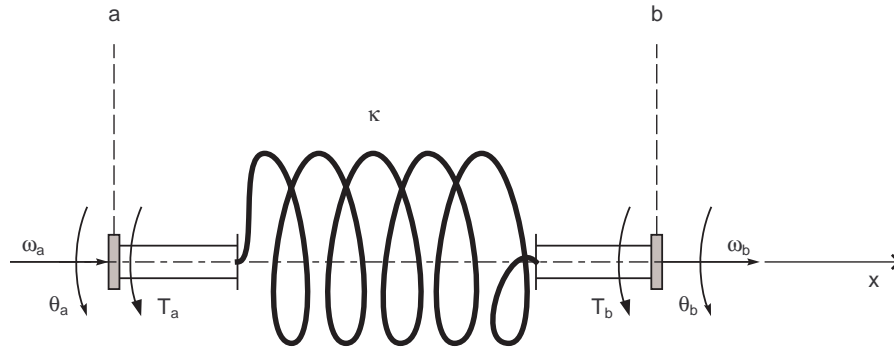


Figura 6: Mola de Torção

Na figura 6 é apresentado o esquema de uma mola de torção linear com rigidez à torção κ . A mola de torção ideal é linear e tem massa desprezível, portanto o torque passa inalterado pelo componente. Pela convenção de sinais adotada, as equações constitutivas da mola de torção ficam:

$$\begin{aligned} T_a &= \kappa(\theta_a - \theta_b) \\ 0 &= T_a + T_b \end{aligned} \quad (19)$$

Uma mola de torção não-linear enrijecedora com rigidez à torção κ e coeficiente de terceira ordem ν pode ser modelada pelas seguintes equações constitutivas:

$$\begin{aligned} T_a &= \kappa(\theta_a - \theta_b) + \nu(\theta_a - \theta_b)^3 \\ 0 &= T_a + T_b \end{aligned} \quad (20)$$

2.3.3 Ponto Fixo

Na figura 7 é apresentado o esquema de um ponto fixo, que impede o movimento de rotação de um ponto do eixo. A equação constitutiva do ponto fixo fica:

$$\theta_a = 0 \quad \Rightarrow \quad \omega_a = 0 \quad (21)$$

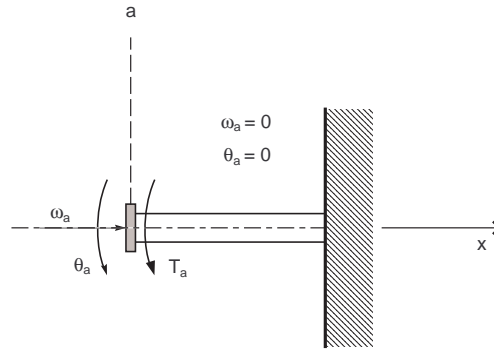


Figura 7: Ponto Fixo

2.3.4 Amortecimento Externo

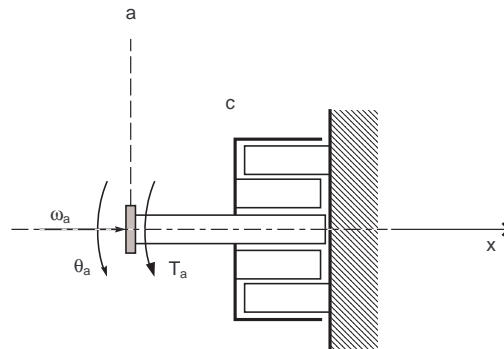


Figura 8: Amortecedor Viscoso Externo

Quando há dissipação de energia do rotor em decorrência do seu movimento em relação ao meio externo estacionário, podemos modelar esse efeito por meio de um amortecedor viscoso externo, onde o torque dissipativo é proporcional à velocidade de rotação.

Na figura 8 é apresentado o esquema de amortecedor externo com constante de amortecimento viscoso c . Pela convenção de sinais adotada, a equação constitutiva do amortecedor externo fica:

$$T_a = c \omega_a \quad (22)$$

2.3.5 Amortecedor de Torção

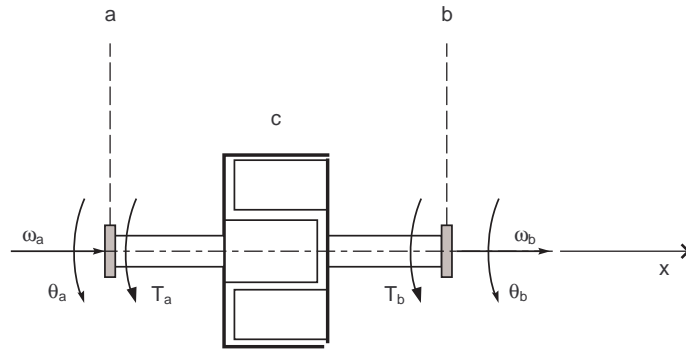


Figura 9: Amortecedor de Torção

Na figura 9 é apresentado o esquema de amortecedor de torção linear interno com constante de amortecimento viscoso c . O torque aplicado ao amortecedor de torção é proporcional à velocidade angular relativa dos dois flanges. O amortecedor de torção ideal tem massa desprezível, portanto o torque passa inalterado pelo componente. Pela convenção de sinais adotada, as equações constitutivas do amortecedor de torção ficam:

$$\begin{aligned} T_a &= c (\omega_a - \omega_b) \\ 0 &= T_a + T_b \end{aligned} \quad (23)$$

2.4 Modelo do Motor Elétrico com Componentes da Biblioteca Padrão

Um esquema com o modelo do motor elaborado com os componentes da biblioteca padrão do MODELICA é apresentado na figura 10. É considerado um motor de corrente contínua com inércia e dissipação viscosas internas. A armadura apresenta resistência e indutância elétricas, além da tensão produzida pela força contra-eletromotriz.

2.5 Tarefas

Pede-se:

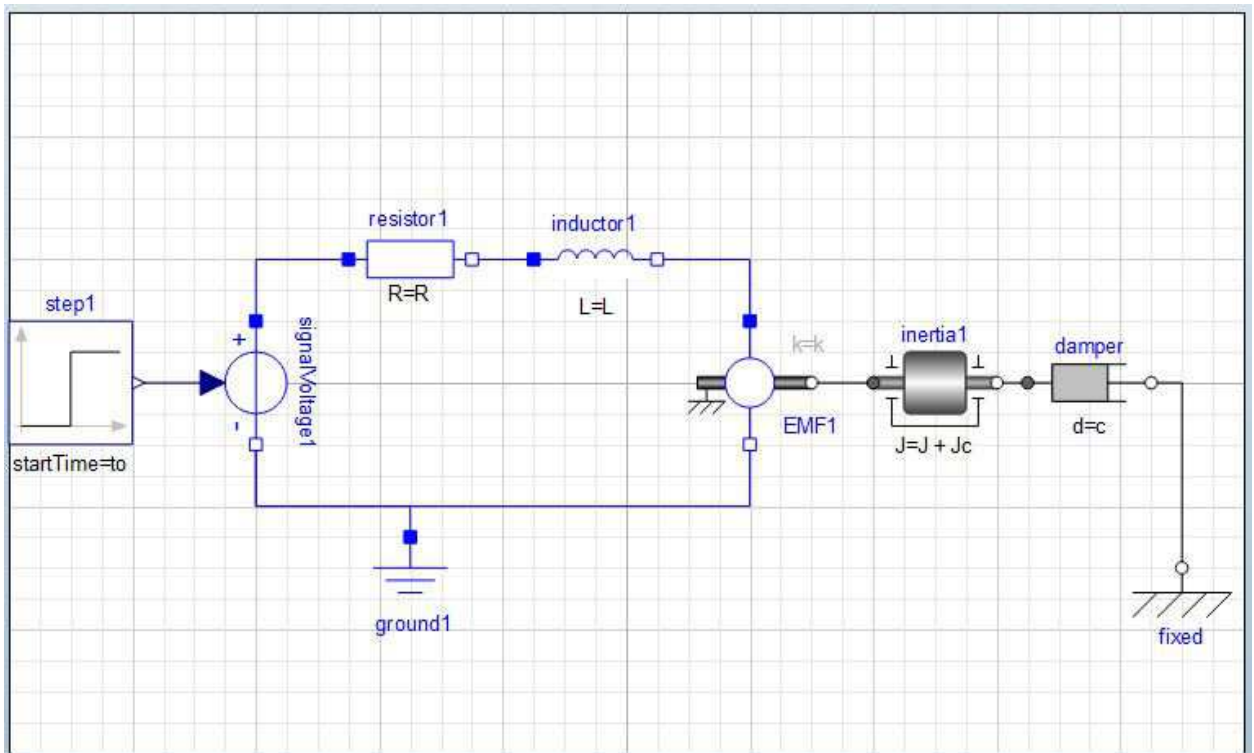


Figura 10: Modelo de Motor Elétrico de Corrente Contínua

- a) Elaborar um modelo plano do motor elétrico de corrente contínua rodando livre.
- b) Elaborar um modelo em diagrama de blocos do motor elétrico de corrente contínua rodando livre.
- c) Elaborar um modelo do motor elétrico rodando livre com os componentes da biblioteca padrão do MODELICA.
- d) Simular a resposta dos modelos a uma excitação degrau de intensidade $U_0 = 120,0 \text{ V}$.
- e) Simular a resposta dos modelos a uma excitação rampa com duração de $T_0 = 5 \text{ s}$ e intensidade máxima $U_0 = 120,0 \text{ V}$.
- f) O motor elétrico se caracteriza como uma fonte de movimento ou uma fonte de torque?
- g) Reduzir o valor do momento de inércia do rotor para $J = 0,0002 \text{ kg m}^2$ e repetir a análise.

- h) Agora o motor elétrico se caracteriza como uma fonte de movimento ou uma fonte de torque?
- i) Criar um componente para representar o motor elétrico utilizando os conectores padrões do MODELICA.
- j) Travar o eixo de saída do motor elétrico e repetir a simulação.
- k) Acoplar o volante de inércia ao motor elétrico com um acoplamento rígido e repetir a simulação.
- l) Acoplar o volante de inércia ao motor elétrico com um acoplamento flexível linear e repetir a simulação.
- m) Criar um modelo do acoplamento flexível não-linear enrijecedor utilizando os conectores da biblioteca padrão do MODELICA. Desenhar a curva característica $T \times \Delta\theta$ do acoplamento e comparar com a curva característica do acoplamento flexível linear.
- n) Acoplar o volante de inércia ao motor elétrico com um acoplamento flexível não-linear enrijecedor e repetir a simulação.
- o) Avaliar a eficiência do grupo motor-carga e analisar as potências envolvidas nas diferentes simulações.
- p) Utilizando o modelo com componentes da biblioteca padrão do MODELICA, transformar o motor elétrico de corrente contínua em um gerador elétrico. Impor a velocidade angular de $\omega_0 = 120 \text{ rad/s}$ ao eixo de saída e adicionar uma carga resistiva aos terminais elétricos do motor (desconectar a fonte de tensão). Avaliar o comportamento do gerador quando a carga elétrica aplicada aos terminais elétricos vale: $R_c = 0 \Omega$ (curto), $R_c = 0,1 \Omega$, $R_c = 1,0 \Omega$, $R_c = 10,0 \Omega$, $R_c = 100,0 \Omega$ e $R_c = \infty$ (aberto).
- q) Repetir o item anterior com o modelo em diagrama de blocos.
- r) Avaliar se o gerador se comporta como uma fonte de tensão ou fonte de corrente em cada caso.
- s) Analisar e interpretar os resultados. Discutir o efeito da forma de excitação sobre as variáveis elétricas e mecânicas do sistema. Discutir o efeito da introdução do acoplamento flexível no comportamento do sistema.

- t) Estudar o componente *DC PermanentMagnet* e o exemplo *DCPM Start* da biblioteca padrão do MODELICA.
- u) Modelar e simular o problema proposto empregando estes componentes da biblioteca padrão do MODELICA. Repetir alguns dos casos mais interessantes e comparar os resultados.

3 Questão

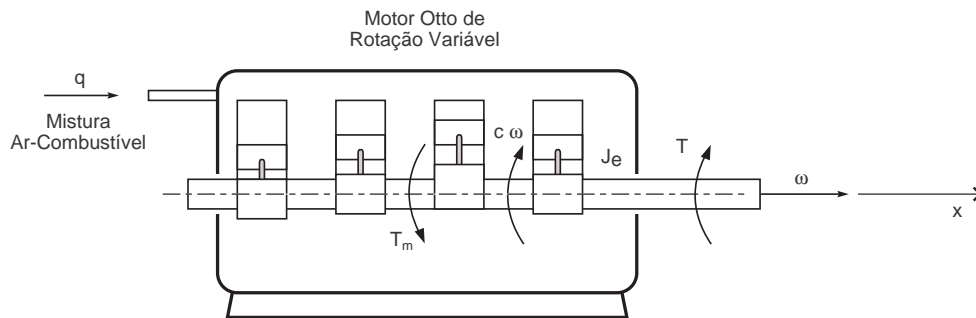


Figura 11: Motor à Combustão Ciclo Otto

Um motor à combustão com ciclo Otto aciona um volante de inércia com momento de inércia polar $J_c = 0,1 \text{ kg m}^2$. O motor à combustão pode ser acoplado ao volante de inércia através de um acoplamento rígido ou de um acoplamento flexível. A rigidez à torção do acoplamento flexível vale $\kappa = 10,0 \text{ Nm/rad}$. O rotor do motor tem momento de inércia polar equivalente a $J = 0,02 \text{ kg m}^2$. O motor Otto foi regulado para produzir uma potência de saída constante quando a vazão da mistura ar-combustível é mantida constante. A relação entre potência fornecida pelo motor e vazão da mistura é dada por:

$$P = k \cdot q \quad (24)$$

onde P é a potência de saída do eixo do motor e q a vazão da mistura ar-combustível. A constante de proporcionalidade vale $k = 3 \cdot 10^5 \text{ W s} / \text{m}^3$.

A potência produzida pela ação dos pistões é dado por:

$$P = T_m \cdot \omega \quad (25)$$

onde T_m é o torque produzida pela ação dos pistões sobre o girabrequim.

As perdas internas podem ser modelados por um torque viscoso resistivo com constante de amortecimento $c = 0,01 \text{ Nm} \cdot \text{s}/\text{rad}$. O esquema do motor é apresentado na figura 11.

As curvas de torque do motor à combustão são apresentadas no gráfico da figura 12. Para uma dada vazão de mistura ar-combustível o torque varia inversamente com a velocidade de rotação. Isso implica que as curvas são hipérboles, não podendo representar corretamente a mecânica do motor para velocidades de rotação muito baixas, pois implicariam em torques muito elevados. Para isso é necessário considerar que haja um limite superior para o torque fornecido pelo motor $T_{max} = 15 \text{ Nm}$. Além disso existem limitações técnicas para injetar o combustível e produzir a combustão em velocidades de rotação muito elevadas, assim também devemos considerar um limite superior para velocidade de rotação $\omega_{max} = 9000 \text{ rpm}$.

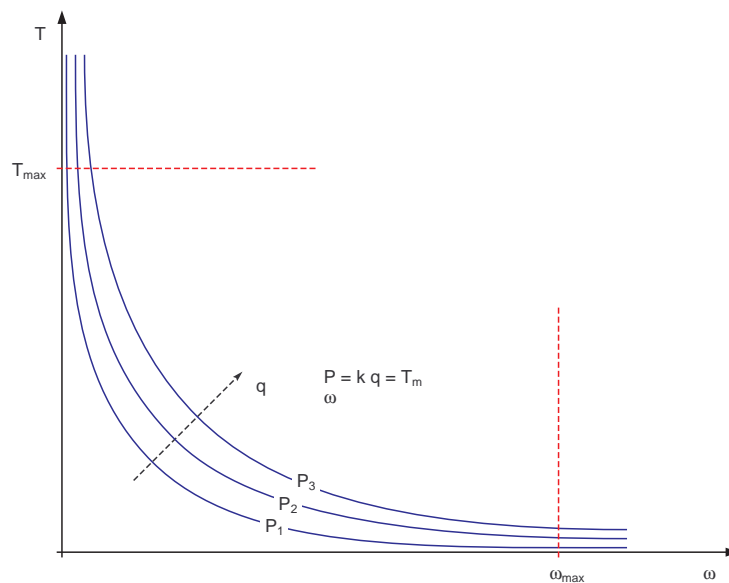


Figura 12: Curvas de torque do Motor à Combustão Ciclo Otto

3.1 Modelo Dinâmico do Motor à Combustão

A equação do momento angular do eixo do motor é dada por:

$$J \frac{d\omega}{dt} = T_m - c\omega - T \quad (26)$$

e o motor fornece uma potência constante, assim:

$$P = T_m \cdot \omega \quad \Rightarrow \quad T_m = \frac{P}{\omega}$$

e a potência fornecida em função da vazão de mistura ar-combustível é dada por:

$$P = k q$$

onde q é a vazão da mistura ar-combustível.

3.1.1 Equação Diferencial do Motor à Combustão

Podemos escrever a equação diferencial ordinária que modela o comportamento do motor à combustão:

$$J \frac{d\omega}{dt} + c\omega = \frac{P}{\omega} - T$$

ou:

$$J\omega \frac{d\omega}{dt} + c\omega^2 + T\omega = P$$

Mas temos que:

$$\frac{d\omega^2}{dt} = \frac{d\omega^2}{d\omega} \frac{d\omega}{dt} = 2\omega \frac{d\omega}{dt}$$

Assim podemos escrever:

$$\frac{J}{2} \frac{d\omega^2}{dt} + c\omega^2 + T\omega = P$$

Ou adotando-se uma variável auxiliar $\lambda = \omega^2$ obtemos:

$$\frac{J}{2} \frac{d\lambda}{dt} + c\lambda + T\sqrt{\lambda} = P \quad | \quad \lambda = \omega^2 \geq 0$$

que é uma equação diferencial ordinária de primeira ordem não-linear em λ .

Além do fator $\sqrt{\lambda}$ na equação, verifica-se que esse fator multiplica a variável $T(t)$ que depende do tipo de carregamento.

Quando o motor está livre a equação fica mais simples pois $T(t) = 0$, assim:

$$\frac{J}{2} \frac{d\lambda}{dt} + c\lambda = P \quad | \quad \lambda = \omega^2 \geq 0$$

que fornece uma equação diferencial ordinária linear em λ .

Também temos o caso do motor acoplado diretamente a um volante de inércia, assim:

$$T = J_c \frac{d\omega}{dt}$$

que resulta em:

$$\frac{J + J_c}{2} \frac{d\lambda}{dt} + c\lambda = P \quad | \quad \lambda = \omega^2 \geq 0$$

3.2 Tarefa

Pede-se:

- a) Elaborar um modelo plano do motor à combustão.
- b) Criar um componente para o motor à combustão utilizando os conectores da biblioteca padrão do MODELICA.
- c) Simular a resposta do motor livre a uma excitação degrau, para vazão da mistura de $q_0 = 0.025 \text{ m}^3/\text{s}$.
- d) Simular a resposta do motor livre a uma excitação rampa com duração de $T_0 = 5 \text{ s}$ para atingir $q_0 = 0.025 \text{ m}^3/\text{s}$.
- e) Acoplar o volante de inércia ao motor à combustão com um acoplamento rígido e repetir a simulação.
- f) Acoplar o volante de inércia ao motor à combustão com um acoplamento flexível e repetir a simulação.
- g) O motor a combustão se comporta como uma fonte de movimento ou uma fonte de torque em alguma faixa do movimento?
- h) Analisar e interpretar os resultados. Discutir o efeito da forma de excitação sobre as variáveis mecânicas do sistema. Discutir o efeito da introdução do acoplamento flexível no comportamento do sistema.
- i) O torque requerido ou a velocidade de rotação superaram os limites estabelecidos?

- j) Adicionar uma embreagem ao trem de potência entre o eixo de saída do motor e o volante de inércia. Repita o ensaio e discuta qual é finalidade da embreagem no acionado de uma carga durante a partida com motor à combustão.