



Atuadores

Aula 02 - Máquinas Elétricas: Máquinas de Corrente Contínua



Material Didático do Instituto Metrópole Digital - IMD
Versão 2.0 - Todos os Direitos reservados

Apresentação

Voltaremos o nosso foco, nesta aula, para as máquinas de corrente contínua, que são equipamentos muito utilizados em aplicação de conversão eletromecânica de energia. Começaremos com uma breve introdução; logo em seguida, comentaremos o princípio de funcionamento desses motores e as formas de interconexão de suas partes para o correto funcionamento.

Objetivos

- Descrever as características de um motor de corrente contínua.
- Listar as diferentes formas de funcionamento.
- Apresentar a descrição e as vantagens e desvantagens desse tipo de motor.

Estrutura Física e Aspectos de Funcionamento

O motor de corrente contínua é o mais tradicional conversor rotativo de energia elétrica, tendo atingido as características construtivas finais já no último quarto do século XIX. A estrutura básica de um motor de corrente contínua convencional tem duas partes fisicamente distintas, que são associadas a dois circuitos elétricos de funções bem específicas: (1) o estator, que aloja os polos indutores, os polos auxiliares e, eventualmente, os enrolamentos compensadores; e (2) o rotor, que acomoda as bobinas associadas à conversão de energia e às lâminas do comutador.

Como ilustrado na Figura 1(a), os polos indutores – assim chamados porque induzem tensões nas bobinas do rotor – têm a geometria de polos salientes e são envoltos por bobinas do enrolamento do campo indutor. Os polos auxiliares, fisicamente bem menores que os principais (indutores), são fixados entre estes e, por essa razão, denominados interpolos. São também envoltos por bobinas e têm a função principal de anular o fluxo magnético que por ventura surgir na região interpolar, devido à corrente de armadura, e, por essa razão, são conectados em série com a armadura. As bobinas que constituem o enrolamento de campo, uma vez percorridas por corrente contínua, geram o fluxo magnético indutor.

Nos motores de ímãs permanentes, as peças polares dos polos principais, em vez de serem de ferro e acomodarem bobinas excitadas por corrente contínua, são feitas de material com propriedades magnéticas permanentes. Embora ocorra a perda da possibilidade do controle do fluxo indutor (também denominado principal), o emprego de ímãs permanentes resulta em motores menores, mais leves e mais eficientes. Nos motores comerciais de ímãs permanentes e de aplicação geral utilizam-se ímãs de materiais cerâmicos, chamados ferrites. Os ímãs de terras raras, especialmente os de samário-cobalto (SaCo) ou de neodímio-ferro-boro (NdFeB), têm sido os preferidos nos motores de alto desempenho ou em motores que precisam ser compactos e leves. Ligas de alumínio, níquel, cobalto e ferro também são utilizadas.

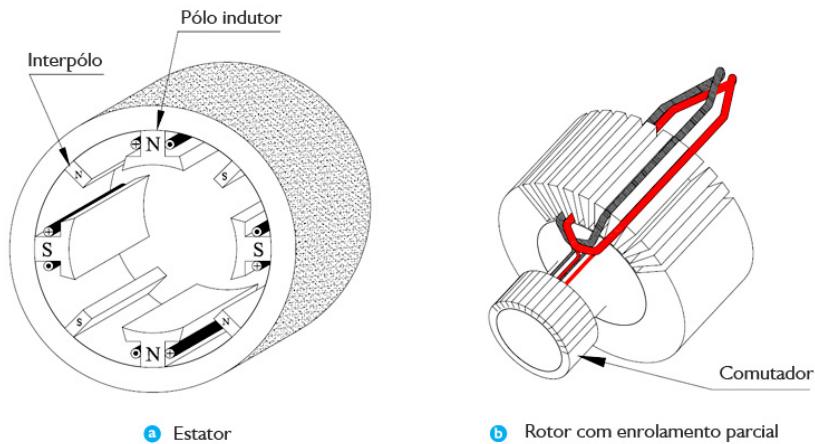


Figura 1 - Construção básica de um motor de corrente contínua.

Fonte: Fitzgerald e Kingsley (1984).

O rotor tem geometria cilíndrica e aloja o enrolamento de armadura, constituído por bobinas distribuídas em ranhuras, como ilustrado na Figura 4.1(b). No eixo do rotor e externamente à estrutura cilíndrica da armadura é fixado o comutador, cuja função será explicada mais adiante. É no enrolamento de armadura que é induzida a tensão elétrica associada à conversão. O termo armadura é empregado para os circuitos que têm a maior potência elétrica dos motores elétrica rotativa. Nas máquinas síncronas – que, semelhante às contínuas, têm dois circuitos com funções distintas e bem definidas – o circuito de campo está no rotor e o da armadura, no estator. No grupo das máquinas de indução não há a destinação entre o campo e a armadura e, por essa razão, não se emprega essa nomenclatura.

O comutador é um conjunto de barras de cobre isoladas entre si e dispostas sobre uma superfície circular fixada no eixo. As bobinas do enrolamento de armadura são conectadas em série, formando um enrolamento fechado, sendo os terminais dessas bobinas soldados às barras, como ilustrado na Figura 1(b). Nesta são mostradas apenas duas bobinas do enrolamento. Como as bobinas giram solidárias com o rotor, escovas estacionárias – fixadas na carcaça em relação ao comutador e pressionadas por molas contra as barras – fazem a conexão elétrica entre os terminais externos e internos da armadura.

As bobinas da armadura ligadas em série formam grupos paralelos entre as escovas. A forma com que essas bobinas são ligadas às barras definem dois tipos básicos de enrolamentos: o imbricado e o ondulado.

Como ilustrados respectivamente nas Figuras 2(a) e 2(b), o enrolamento imbricado tem os terminais de suas bobinas ligados a barras.

A posição das escovas no comutador é escolhida para ter contato elétrico com aquelas barras ligadas a condutores, que estão transitoriamente na região interpolar (observe as bobinas em traço mais forte nas Figuras 2(b)). Na região interpolar, idealmente, a bobina tem tensão induzida nula, por causa da ausência de fluxo.

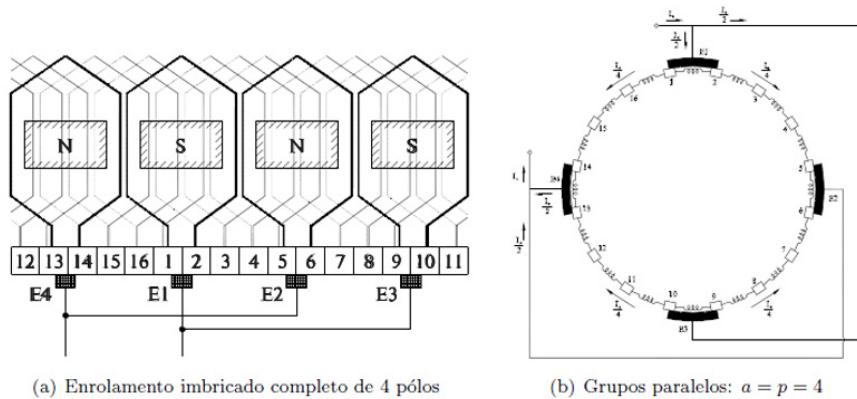


Figura 2 - Características dos enrolamentos imbricados.

Fonte: Fitzgerald e Kingsley (1984).

Atividade 01

1. Pesquise e responda: por que as escovas curto-circuitam essas bobinas da região interpolar, como é mostrado na Figura 2?

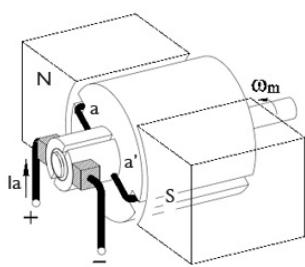
Torque e Comutação

A obtenção de torque em motores elétricos rotativos, devido à conversão eletromecânica de energia (elétrica em mecânica ou vice-versa), se dá pela interação dos fluxos de estator e do rotor, que, neste texto, é denominado torque eletromecânico (**Tem**). Para que o torque desenvolvido seja unidirecional (e, assim, o rotor gire continuamente), cada polo indutor deve interagir sempre com o mesmo fluxo produzido pela corrente nos condutores da armadura, o que significa dizer que as correntes nos condutores sob uma determinada região polar devem ter sempre o mesmo sentido. O **Tem** se inverte quando somente a corrente de excitação ou a corrente de armadura é invertida: no primeiro caso os

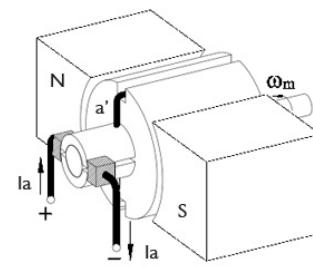
polos do campo indutor são invertidos e, no segundo caso, invertem-se os polos da armadura. Se, por acaso, os dois fluxos são invertidos, o sentido do torque se mantém.

Para entender a comutação, considere um motor elementar de dois polos, funcionando no modo motor e com a armadura tendo uma bobina de uma espira. Para a posição da bobina e corrente externa, como ilustradas na Figura 3(a), a sobreposição do fluxo gerado pela corrente nos condutores **a** e **a'** com a corrente do fluxo indutor resulta em uma distribuição não uniforme do fluxo na região dos dentes, nos quais os condutores estão colocados. Assim, gera-se uma força que age sobre a estrutura cilíndrica do rotor, da região de maior concentração de fluxo para a de menor fluxo, isto é, o torque eletromecânico gerado age no sentido de impulsionar o rotor no sentido anti-horário (observe Figura 3(d)).

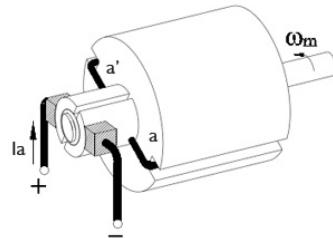
Na posição intermediária – posição interpolar –, a bobina concatena o máximo fluxo e, portanto, a tensão induzida nela é nula (lei de Faraday). Como ilustrado na Figura 3(b), nesta posição a escova curto-circuita a bobina e, idealmente, deseja-se que a corrente na bobina seja nula. Quando o rotor desloca o equivalente a π radianos, o sentido da corrente nos lados **a** e **a'** da bobina é invertido por ação do comutador, pois, sendo as escovas estacionárias, cada uma delas está sempre em contato com uma bobina (não importa qual seja), que se localiza instantaneamente debaixo do mesmo polo, como ilustrado na Figura 3(c). Esse processo de inversão de corrente, denominado comutação, deve ser feito de maneira suave e linear, como ilustrado idealmente na Figura 4. O intervalo de tempo no qual a corrente é invertida na bobina é o tempo de comutação t_c .



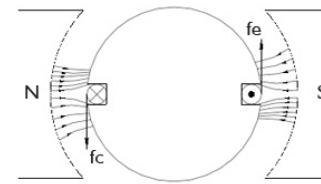
a Corrente na bobina para o rotor na posição θ



b Curto-circuito da bobina



c Corrente na bobina para o rotor na posição $\theta + \pi$



d Produção de torque: $T_{em} = f_e(2r)$

Figura 3 - Produção de torque e a necessidade de comutação.

Fonte: McPherson e Laramore (1990).

Pelo fato de o comutador e as escovas garantirem sempre o mesmo sentido de corrente nos condutores da armadura posicionados sob o mesmo polo, o fluxo criado por essa corrente é estacionário e se posiciona, no caso ideal, em quadratura (eixo q) com o eixo magnético do fluxo do campo indutor (eixo d), como ilustrado na Figura 5. Observe que os enrolamentos do campo indutor e de armadura são designados por solenoides colocados nestes eixos (Figura 5(b)). Diz-se, então, que a motor de corrente contínua é de campo estacionário, em contraste com o motor de indução e síncronas, que funcionam por causa do campo girante.

Enquanto o enrolamento de campo tem a função de gerar o fluxo magnético de excitação, a armadura é a parte do motor relacionada com a maior potência elétrica envolvida no processo de conversão eletromecânica de energia, seja como gerador, seja como motor. Valores típicos da potência elétrica envolvida no circuito de campo estão na faixa de 3% a 5% da potência de armadura.

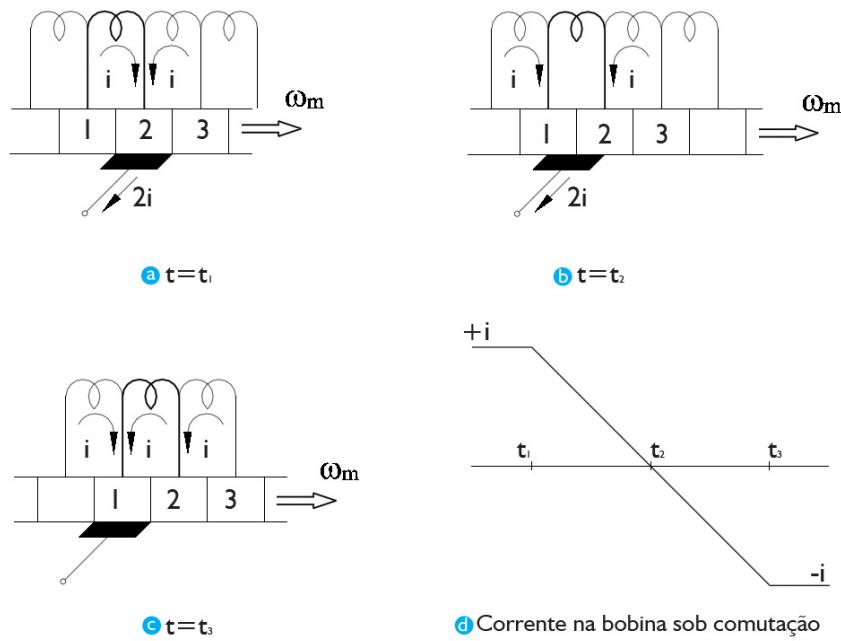


Figura 4 - Comutação da corrente em uma bobina: tempo de comutação $tc = t_3 - t_1$.
Fonte: Autoria própria.

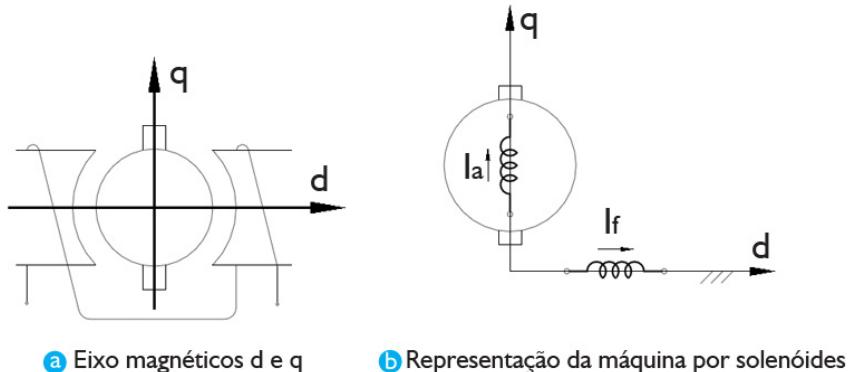


Figura 5 - Eixos magnéticos do campo indutor (eixo d) e da armadura (eixo q).
Fonte: Autoria própria.

Claramente, há duas regiões distintas: uma caracterizada por uma relação aproximadamente linear entre o fluxo magnético e a corrente de excitação (em determinada região); e outra, conhecida como região de saturação, na qual está presente o fenômeno da não linearidade magnética. Para um dado fluxo de entreferro por polo, se a armadura estiver girando, haverá a geração de tensões nas diversas bobinas que compõem o enrolamento de armadura. Pela lei de Faraday, a tensão gerada em uma bobina é igual à variação temporal do fluxo concatenado. Para um motor de p polos, o valor médio da tensão gerada em uma bobina de uma espira quando a armadura gira o equivalente a um passo

polar, isto é, $2\pi/p$ radianos mecânicos. Este valor é igual à variação do fluxo concatenado dividida pelo tempo que a armadura leva para se deslocar $2\pi/p$ radianos mecânicos – a variação do fluxo concatenado, devida ao deslocamento angular $2\pi/p$, de uma bobina de uma espira.

$$\Delta\phi = \phi_{fg} - (-\phi_{fg}) = 2\phi_{fg}$$

Equação na qual ϕ_{fg} designa o fluxo radial por polo do campo indutor que atravessa o entreferro, que é obtido a partir da densidade média do fluxo magnético sob o polo, dada por:

$$\phi_{fg} = B_{fg}(\text{médio})l\tau$$

Na qual l é o comprimento longitudinal da armadura e τ_p é a medida do passo polar, isto é, o comprimento do arco correspondente à distribuição de fluxo de um polo.

Se o rotor gira com velocidade angular ω_m radianos mecânicos por segundo, o tempo decorrido para o deslocamento angular do rotor correspondente ao arco polar $\Delta\Theta = 2\pi/p$

$$\Delta t = \frac{2\pi/p}{\omega_m}$$

Assim, a tensão média induzida em uma bobina de uma espira (dois condutores) é a variação do fluxo concatenado pela bobina pelo tempo decorrido. Portanto, a tensão média induzida na bobina é:

$$e_a(\text{bobina}) = \frac{\Delta\phi}{\Delta t} = \frac{p}{2\pi} \phi_{fg} \omega_m$$

Se o enrolamento de armadura tem o total de Z_a condutores divididos em grupos paralelos, cada caminho paralelo tem Z_a/a condutores em série. A tensão elétrica média gerada entre as escovas E_a é a tensão média gerada em cada grupo e é o resultado da multiplicação da tensão média de um condutor por Z_a/a (numero de condutores em serie):

$$e_a = \frac{Z_a}{a} e_a(\text{bobina}) = \frac{pZ_a}{2a\pi} \phi_{fg} \omega_m$$

(1)

Como o fluxo indutor é estacionário, esta tensão depende do deslocamento das bobinas da armadura em torno do estator e, por esta razão, é frequentemente denominada tensão de velocidade. Como o fluxo ϕ_{fg} é produzido pela corrente de campo I_f , considera-se que:

$$\Psi_{af} = \frac{Z_a}{a\pi} \phi_{fg} = L_{af} I_f$$

(2)

É o fluxo de campo médio que concatena o enrolamento de armadura ou, em outras palavras, o fluxo mútuo. O fator L_{af} tem a dimensão de indutância e é denominada indutância mútua fictícia entre os enrolamentos de armadura e de campo. A denominação de mútua fictícia é devida ao fato de que os eixos magnéticos da armadura e do campo são ortogonais entre si e, por essa razão, não haveria mutualidade entre esses enrolamentos. Essa indutância mútua relaciona a tensão gerada à corrente de excitação e à velocidade, nas condições de linearidade magnética. Por estar associada ao fluxo mútuo, seu valor depende da corrente de armadura, por causa da reação de armadura, se esta não for

compensada. Do fluxo de excitação por polo Φ_f gerado pela corrente de campo que circula nas bobinas, o fluxo de entreferro Φ_{fg} designa uma parte é o fluxo de campo por polo que resulta após a subtração do fluxo de dispersão do campo e do efeito da reação de armadura, quando esta existir e não for compensada.

Ao combinar as equações (1) e (2), a tensão resultante na armadura pode ser descrita por

$$\Psi_{af} = \frac{Za}{a\pi} \phi_{fg} = L_{af} I_f$$

(3)

O circuito de armadura é caracterizado pelos parâmetros elétricos indutância de armadura L_a e resistência total de armadura r_a (soma da resistência do enrolamento de armadura com a das escova), bem como pela tensão interna E_a – observe a designação do circuito colocada na Figura 6. Como, neste capítulo o interesse é o regime permanente, a corrente de armadura é constante e, consequentemente, $L_a \frac{dI_a}{dt} = 0$. Portanto, ao se empregar a lei de Kirchoff ao circuito elétrico de armadura, com a tensão terminal de armadura designada por V_{ta} , tem-se:

$$V_{ta} = E_a \pm r_a I_a$$

(4)

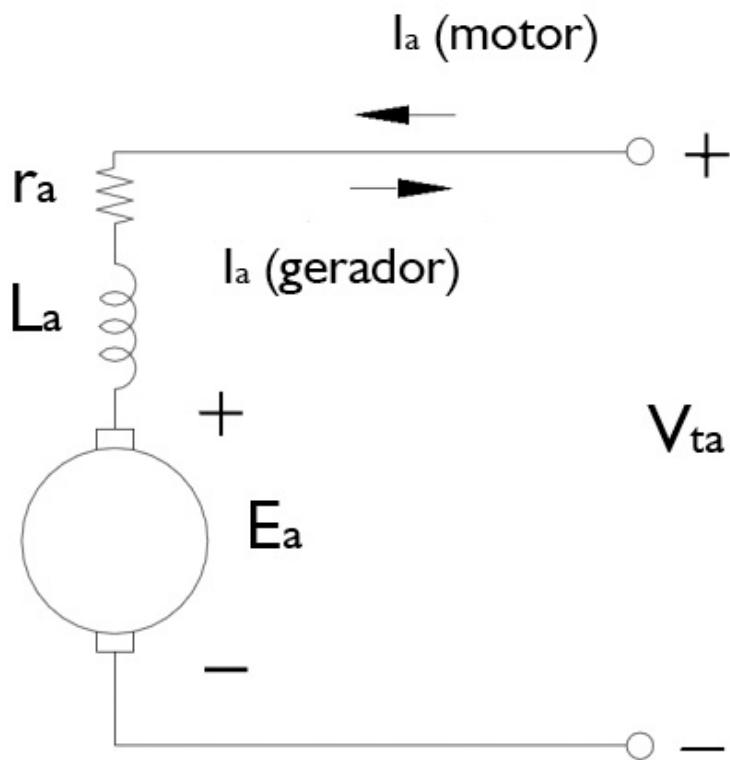


Figura 6 - Circuito elétrico de armadura.

Fonte: Autoria própria.

$$V_{ta} = G_a I_f \omega_m \pm r_a I_a$$

(5)

Na qual é adotado o sinal (+) para o motor e o sinal (-) para o gerador. No modo motor, a tensão de velocidade apresenta valores típicos de 90% a 95% da tensão terminal V_{ta} . O circuito de campo, por ser estacionário, não tem tensão induzida e, portanto, é caracterizado apenas pelos parâmetros resistência r_f e indutância própria L_f .

No modo motor, a partir da Equação (5) tem-se a corrente de armadura

$$I_a = \frac{V_{ta} - G_a I_f \omega_m}{r_a}$$

(6)

A corrente calculada circula do terminal positivo da tensão E_a para o terminal negativo – esse sentido da corrente, por convenção, é admitido positivo. No modo gerador tem-se $E_a > V_{ta}$ e, portanto, ao se empregar a Equação (6), a corrente tem o seu sentido invertido ($I_a < 0$). A potência eletromecânica (P_{em}) de uma máquina elétrica operando no modo motor é a fração da potência elétrica de entrada convertida em mecânica – por sua vez, operando no modo gerador, designa a fração da potência mecânica convertida em elétrica.

No modo motor, P_{em} é determinada, se as perdas ferro são ignoradas, a partir da subtração das perdas no cobre de armadura da potência elétrica de entrada da armadura, isto é,

$$P_{em} = V_{ta}I_a - r_a I_a^2 = (V_{ta} - r_a I_a)I_a$$

(7)

No modo gerador, o valor de P_{em} é obtido ao se subtrair as perdas mecânicas da potência entregue ao eixo da fonte mecânica externa.

$$P_{em} = G_{af}I_a \omega_m$$

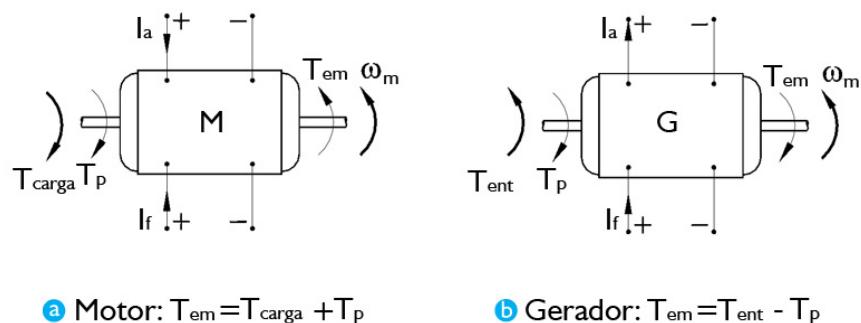
(8)

O torque eletromecânico T_{em} desenvolvido pela máquina, nos modos motor e gerador, é determinado pelo coeficiente $\frac{P_{em}}{\omega_m}$. Portanto, a partir da Equação (8), tem-se:

$$T_{em} = G_{af}I_a$$

(9)

Se o torque eletromecânico é quem impulsiona o rotor, a energia elétrica é convertida em energia mecânica, o que caracteriza a operação motora (potência elétrica é fornecida à armadura). Se, ao contrário, potência mecânica é fornecida ao eixo do rotor, temos a conversão de energia mecânica em elétrica, e a máquina de corrente contínua opera no modo gerador. Na Figura 7 estão ilustradas as diferenças de operação entre o motor e o gerador, no que diz respeito às grandezas velocidade, torque, corrente e tensão. Observe que a ação do torque eletromecânico gerado no modo motor atua no mesmo sentido da velocidade de eixo e, no modo gerador, atua no sentido contrário ao da velocidade de eixo, o que lhe dá a característica de frenagem.



a) Motor: $T_{em} = T_{carga} + T_p$

b) Gerador: $T_{em} = T_{ent} - T_p$

Figura 7 - Modos de Funcionamento da máquina de corrente contínua.

Fonte: Fitzgerald e Kingsley (1984).

O torque resistente ao movimento em máquinas rotativas está associado ao atrito do tipo Coulomb (atrito seco), aos rolamentos com lubrificação (atrito viscoso) e às hélices de ventilação do rotor (atrito com o ar) e, portanto, designa perdas mecânicas. Ao se considerar as características de cada um destes torques, a expressão geral do torque resistente (usualmente denominado torque de perdas rotacionais T_p) é:

$$T_p = T_{p0} = b_m \omega_m + b_a \omega_m^2$$

Na qual T_{p0} é devido ao atrito seco, b_m e b_a são os coeficientes de atrito viscoso e de atrito com o ar, respectivamente. Geralmente, para cálculo de eficiência, a potência de perdas rotacionais é a soma das perdas mecânicas com as perdas no núcleo e, consequentemente, o torque de perdas T_p é associado a esta potência.

Ao se empregar a **segunda lei de Newton** ($F = m \cdot a$) (<http://brasilescola.uol.com.br/fisica/segunda-lei-newton.htm>) ao movimento de rotação e recorrer à Figura 8, as equações de regime permanente da máquina de corrente contínua são:

(a) Modo motor

$$T_{em} - T_{carga} - T_p = 0 \Rightarrow T_{em} = T_{carga} + T_p$$

(b) Modo gerador

$$T_{ent} - T_{em} - T_p = 0 \Rightarrow T_{ent} = T_{em} + T_p$$

Nas quais T_{carga} é o torque da carga mecânica externa acionada pelo motor ou, em outras palavras, é o torque disponível no eixo (**torque de saída**), enquanto T_{ent} é o torque aplicado no eixo do gerador pela turbina. É importante ressaltar que, **no motor**, o torque eletromecânico desenvolvido é igual à soma do **torque de saída** e o **torque de perdas**, enquanto que, **no gerador**, o torque de entrada é igual à soma do **torque eletromecânico** e o **torque de perdas**.

O fluxo de potência nos motores de corrente contínua pode ser melhor compreendido a partir de gráficos, como o da Figura 8. No modo motor, ilustrado na Figura 8(a), a potência de entrada é a potência elétrica entregue nos terminais de armadura e de campo. Parte dessa potência é dissipada nas resistências dos enrolamentos do campo e da armadura (perdas r_2) e a parte restante é convertida em mecânica, denominada potência mecânica desenvolvida P_{em} . Esta potência, expressa por $P_{em} = E_{ala}$, é composta pelas perdas mecânicas rotacionais P_{rot} e pela potência de saída P_{carga} . A perda no material magnético – devido ao movimento relativo entre o rotor e o fluxo de campo – é, geralmente, incorporada às perdas rotacionais.

No modo gerador, a potência de entrada é a potência mecânica que aciona o eixo do gerador. Uma parte desta potência supre as perdas mecânicas P_{rot} e a outra parte é convertida em energia elétrica $P_{em} = E_{ala}$.

A subtração das perdas elétricas P_{e2} de P_{em} resulta na potência elétrica de saída P_{carga} , efetivamente tomada pela carga elétrica externa, como ilustrado na Figura 8(b).

Na Figura 9 ilustra-se o funcionamento da máquina de corrente contínua nos quadrantes do plano velocidade-torque. A convenção adotada foi a de receptor, para o qual a potência é positiva se consumida e negativa se gerada pelo dispositivo sob análise. Consequentemente, se a máquina funciona no modo motor, a potência eletromecânica é positiva e, portanto, velocidade e torque são positivos com corrente de armadura positiva.

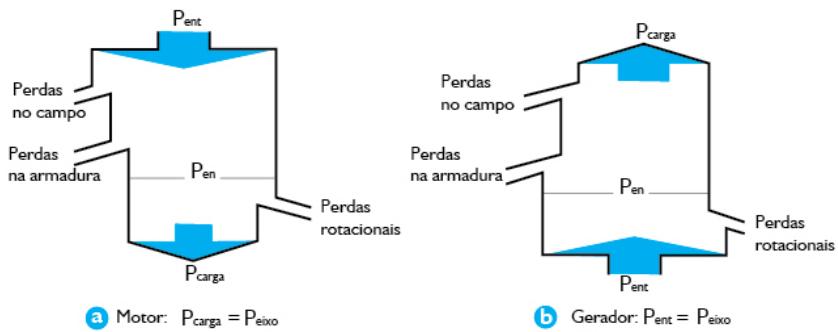


Figura 8 - Fluxo de potência nas máquinas de corrente contínua.

Fonte: Fitzgerald e Kingsley (1984).

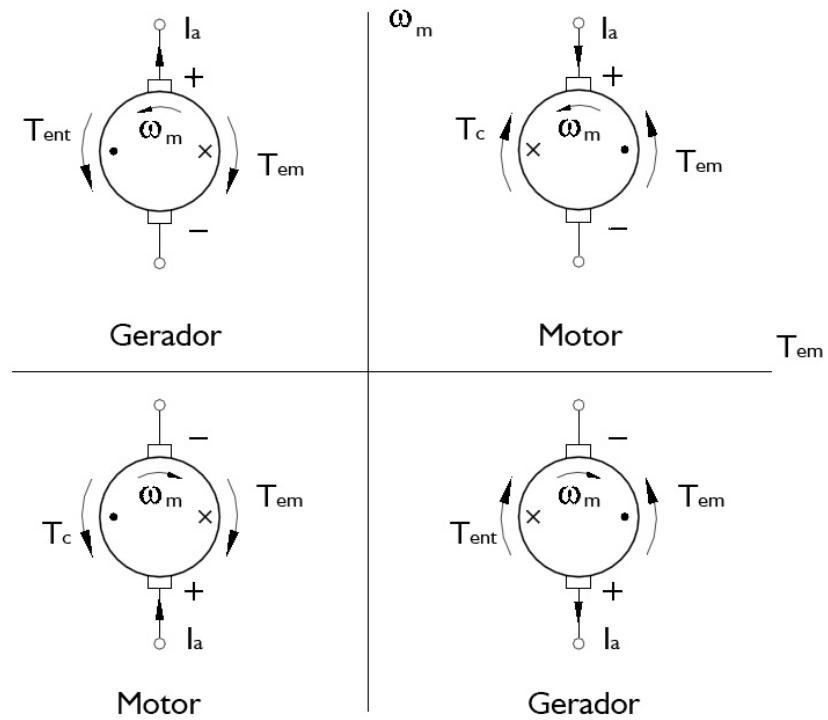


Figura 9 - Operação da máquina de contínua no Plano ω_m T_{em} .

Fonte: Fitzgerald e Kingsley (1984).

Atividade 02

1. Descrever, de forma resumida, a diferença entre uma máquina de corrente contínua trabalhando no modo motor e no gerador.

Classificação e Funcionamento

Os Motores de corrente contínua são classificadas de acordo com as conexões do enrolamento do campo indutor: motores de campo separado, de campo paralelo, de campo série e de campo composto.

Excitação Separada

Se o enrolamento de campo tem seus terminais ligados a uma fonte separada da fonte do circuito de armadura, como ilustrado na Figura 10, o motor é dito ser de excitação separada e, por esta razão, é denominado motor excitação independente. Em alguns casos, os enrolamentos de

campo e de armadura são conectados em paralelo e alimentados por uma mesma fonte de tensão contínua. Nesse caso, pode ser denominado motor excitação paralela, motor "shunt" ou motor derivação.

A partir da Equação (10) obtém-se a equação fundamental da velocidade, que é a equação de uma reta com inclinação negativa determinada pelo coeficiente $\frac{r_a}{G_{af}I_f}$.

$$\omega_m = \frac{V_{ta}}{G_{af}I_f} - \frac{r_a}{G_{af}} I_a$$

(10)

Embora a equação fundamental da velocidade seja função das correntes de armadura e de campo e da tensão de armadura – grandezas facilmente mensuráveis –, prefere-se a equação da velocidade de eixo em função do torque eletromecânico. Ao combinar, então, as Equações (9) e (10) e assumir um fluxo indutor constante, obtém-se a característica estática torque-velocidade, dada por:

$$\omega_m = \frac{V_{ta}}{G_{af}I_f} - \frac{r_a}{(G_{af}I_f)^2} T_{em}$$

(11)

A característica estática torque-velocidade é denominada característica natural, pois depende apenas dos parâmetros intrínsecos à máquina de corrente contínua, tal como a resistência do enrolamento de armadura r_a . Ao se inserir uma resistência r_x em série com a armadura, a curva T – w deixa de ser natural.

Alguns valores característicos podem ser obtidos, mediante a análise dessa equação:

(a) A velocidade ideal a vazio ω_{m0} é a velocidade obtida com $T_{em} = 0$:

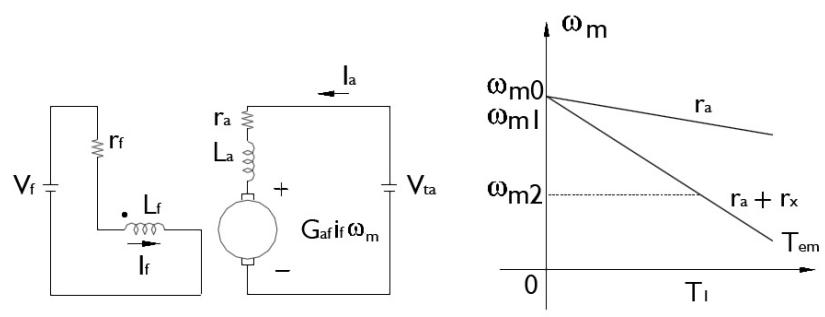
$$\omega_{m0} = \frac{V_{ta}}{G_{af} I_f}$$

(b) A queda de velocidade $\Delta\omega_m$ em relação à ideal a vazio ω_{m0} , devido ao torque de carga, é definida pelo torque de carga em regime permanente $T_{em} = T_{carga}$:

$$\Delta\omega_m(T) = \omega_{m0} - \omega_m = \frac{r_a}{(G_{af})^2} T_{em}$$

(12)

Observe que a queda de velocidade $\Delta\omega_m(T)$ é diretamente proporcional à resistência de armadura e inversamente proporcional ao quadrado da corrente de campo. Portanto, se o fluxo do campo indutor é constante, ao se inserir resistências externas r_x em série com a armadura, para um mesmo torque de carga, a queda de velocidade do eixo do motor aumenta, como ilustrado na Figura 10(b) para dois valores da resistência de armadura.



a) Circuito equivalente

b) Característica estática $T_{em} - \omega$

Figura 10 - Motor com campo separado.

Fonte: McPherson e Laramore (1990).

Excitação Paralela

Diferentemente do motor de excitação separada, o motor com campo paralelo ou "shunt" tem a sua corrente de campo dependente da tensão de armadura, porque os enrolamentos de campo e de armadura são conectados em paralelo, conforme ilustrado na Figura 11. Geralmente coloca-se uma resistência r_x em série com o campo, para que se tenha o controle da corrente de campo. As equações de regime do motor são

$$V_{ta} = (r_f + r_x)I_f$$

(13)

$$\Delta\omega_m(T) = \omega_{m0} - \omega_m = \frac{r_a}{(G_{af}I_f)^2} T_{em}$$

(14)

Ao se explicitar I_f em (13) e substituir em (14), obtém-se a corrente de armadura dada por:

$$I_a = \frac{V_{ta}}{r_a} - G_{af}\omega_m \frac{V_{ta}}{(r_f + r_x)r_a}$$

(15)

A equação da velocidade é obtida ao substituir (14) na Equação básica (9) do torque e, depois de alguns arranjos, tem-se a equação da velocidade em função da tensão de armadura aplicada e da resistência externa em série com o enrolamento de campo:

$$\omega_m = \frac{r_f + r_x}{G_{af}} - \frac{(r_f + r_x)^2 r_a}{G_{af}^2 V_{ta}^2} T_{em}$$

A característica $\omega_m - T_{em}$ do motor de campo paralelo é semelhante aquela do motor excitação separada. Observe que quanto maior o valor da resistência externa r_x , maior é a velocidade a vazio, devido à diminuição do fluxo indutor.

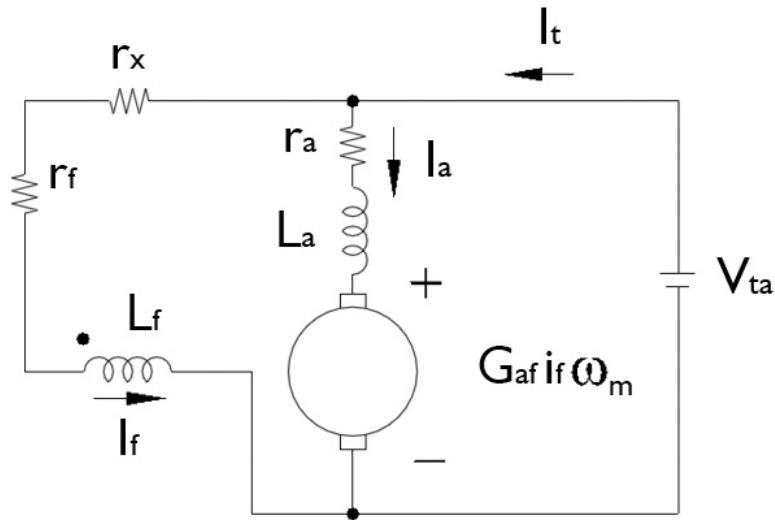


Figura 11 - Circuito equivalente do motor de campo paralelo.

Fonte: McPherson e Laramore (1990).

Excitação Série

Se o enrolamento de campo é conectado em série com a armadura, como mostrado na Figura 12(a), o motor é denominado motor campo série e o projeto do enrolamento de campo deve ser diferente daquele utilizado na excitação separada, pois, sendo as correntes de armadura elevadas, há a necessidade de condutores com área maior e um enrolamento de menor número de espiras para produzir a mesma força magnetomotriz de excitação do equivalente motor excitação separada. Como a corrente de campo é a corrente de armadura, qualquer variação da corrente de armadura significa variação da corrente de excitação e, portanto, variação no fluxo por polo que atravessa o entreferro. Na prática existe uma limitação no valor do fluxo por causa do fenômeno da

saturação magnética (veja a curva de magnetização). As equações do motor série são obtidas ao se considerar $I_s = I_a$ e ϕ_{sga}/a nas equações básicas do motor:

$$V_{ta} = G_{as}I_a\omega_m + (r_f + r_x)I_f \quad (16)$$

$$T_{em} = G_{as}(I_a)^2 \quad (17)$$

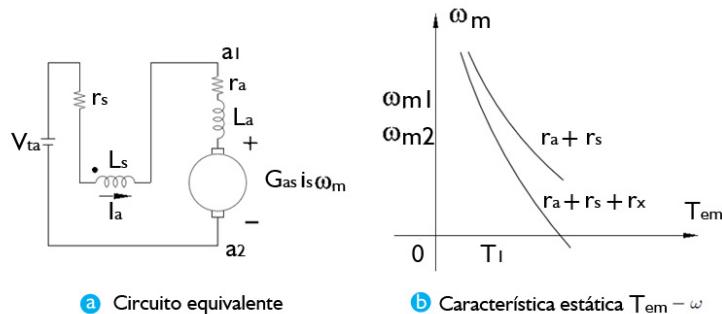
Observe que o torque eletromecânico é proporcional ao produto de fatores sempre positivos. A inversão do sentido da corrente não produz inversão do torque e, portanto, o motor pode também funcionar em corrente alternada, embora exija, para esse fim, um projeto especial.

Ao se explicitar a corrente de armadura em (17) e substituí-la em (16), resulta, após alguns rearranjos, na equação característica velocidade-torque do motor série, dada por:

$$\omega_m = \frac{V_{ta}}{\sqrt{G_{as}T_{em}}} - \frac{r_a + r_s}{G_{as}}$$

A correspondente curva característica $\omega_m - T_{em}$, para uma dada tensão de armadura, está ilustrada na Figura 12(b) e as seguintes observações são feitas:

- a.** A curva velocidade-torque eletromecânico é não linear, pois o seu termo variável é inversamente proporcional a $\sqrt{G_{as}T_{em}}$;



a) Circuito equivalente

b) Característica estática $T_{em} - \omega$

Figura 12 - Motor campo série.

Fonte: McPherson e Laramore (1990).

- b. A velocidade ideal a vazio ($T_{em} = 0$) é "infinita", o que significa que a curva característica não intercepta o eixo da velocidade;
- c. O motor apresenta velocidades elevadas quando o torque exigido pela carga é baixo e, à medida que este se eleva, a velocidade decresce fortemente. Isto o torna atraente em aplicações em que se deseja um alto torque de partida por unidade de corrente, pois neste caso a corrente de armadura exigida é alta e, por consequência, o fluxo gerado por polo é alto também;
- d. Para valores altos de torque, a variação de velocidade é menos pronunciada do que na faixa de baixos valores de torque.

Excitação Composta

A combinação das características de desempenho das máquinas de campo paralelo e de campo série é obtida ao se conectar os circuitos de campo separado e série, e, por essa razão, essas máquinas são denominadas de campo composto. Se o enrolamento do campo série ligado em série com a armadura, a ligação é conhecida por ligação paralelo-longos; se o enrolamento série for ligado externamente ao circuito da armadura, a ligação é dita ligação paralelo-curtas. Na Figura 4.13 estão ilustradas as duas combinações entre as excitações série e paralela.

A depender da forma com que o circuito do campo série é conectado, a sua f_{mm} é somada ou subtraída de $f.m.m$ do campo principal. No primeiro caso é dito aditivo e, no segundo, subtrativo. Para os

enrolamentos de campo separado e série, de N_f e N_s espiras por polo, respectivamente, a excitação resultante por polo é:

$$N_f I_{feq} = N_f I_f \pm N_s I_s \left\{ \begin{array}{l} I_s = I_a \text{ paralela - longa} \\ I_s = I_a + I_f \text{ paralela - curta} \\ + \text{ composto aditivo} \\ - \text{ composto subtrativo} \end{array} \right.$$

$$I_{feq} = I_f \pm \frac{N_s}{N_f} I_s$$

(18)

na qual a corrente I_{feq} é a corrente equivalente que, se circulasse somente na bobina do enrolamento separado de N_f espiras por polo, produziria a mesma força magnetomotriz que resulta da excitação simultânea dos campos separado e série, como ilustrado na Figura 13(c). O efeito do enrolamento série é o de acrescentar a parcela de corrente $(N_s/N_f)I_s$ à excitação separada. As correntes presentes na Equação 19 são as correntes medidas: isto significa que o efeito de reação de armadura não está representado nesta equação. A reação de armadura é desmagnetizante, o que significa que, embora a corrente de campo seja a mesma, a fmm correspondente é menor. Assim sendo, pode-se pensar em uma fmm de reação de armadura Fmm_{RA} que, combinada àquela estabelecida somente pelos campos paralelo e série, resulta na seguinte força magnetomotriz efetiva:

$$Fmm_{efetiva} = N_f I_f \pm N_s I_s - Fmm_{RA}$$

(19)

A cada uma das fmm nos enrolamentos do campo indutor corresponde uma fem gerada na armadura (respectivamente $G_{af}I_f\omega_m$ e $G_{as}I_s\omega_m$, o que leva à fem total de armadura.

$$E_a = (G_{af}I_f \pm G_{as}I_s)!m$$

(20)

As equações de tensão da armadura e do torque desenvolvido tornam-se, então,

$$V_{ta} = r_a I_a + r_s I_s + E_a$$

(21)

$$T_{em} = (G_{af}I_f \pm G_{as}I_s)I_a$$

(22)

Se for considerada a ligação paralelo-longas, para a qual $I_s = I_a$, a combinação das Equações (20) e (21) resulta na seguinte equação de regime permanente da velocidade:

$$\omega_m = \frac{V_{ta}}{G_{af}I_f - G_{as}I_a} - \frac{r_a - r_s}{\frac{I_f}{G_{af}I_a} \pm G_{as}}$$

(23)

Se ao enrolamento de campo paralelo não for ligada nenhuma resistência de controle e se o enrolamento for alimentado por uma fonte de tensão V_f , basta considerar $I_f = V_{ta}/r_f$. Para a ligação paralelo-curta, a corrente de excitação série torna-se $I_s = I_a + I_f$. Para valores baixos de corrente de armadura, o efeito da excitação série não é significativo, mas, à medida que a corrente de carga aumenta, a sua influência passa a ser notável.

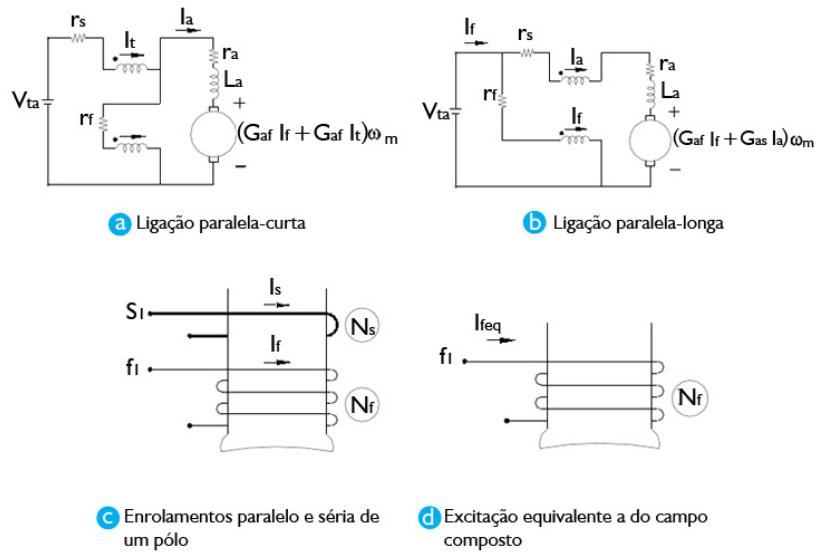


Figura 13 - Motor composto aditivo.

Fonte: McPherson e Laramore (1990).

Resumo

Nessa aula estudamos o motor de corrente contínua. Vimos o princípio de funcionamento, a forma como realiza a transformação de energia elétrica em mecânica e a diferente forma de interconexão de suas partes para a produção de torque.

Autoavaliação

1. Qual a diferença entre os termos motor, gerador e máquina elétrica?
2. Quais as partes que compõem um motor de corrente contínua?
3. Quais as características do torque num motor de corrente contínua?
4. De acordo com as conexões do enrolamento do campo indutor do motor de corrente contínua como é classificado?

Referências

ADKINS, B.; HARLEY, R. G. **The General Theory of Alternating Current Machines**. London: Chapman and Hall, 1975.

FITZGERALD, A.; Kingsley – Kusko. **Teoria e análise das máquinas elétricas**. [s.l.]: Ed. Hispano Europa, 1984.

GOURISHANKAR, Vembu. **Conversão de energia eletromecânica**. [s.l.]: Ed. Alfaomega, 1990.

KOSTENKO, M. P.; PIOTROVSKI, L. M. **Máquinas Eléctricas**. 2nd ed. Moscú: Editorial Mir, 1979. v 2.

McPHERSON, G.; LARAMORE, R. D. **An Introduction to Electrical Machines and Transformers**. New York: John Wiley & Sons, 1990.

SAY, M. G. **Introduction to the Unifield Theory of Electromagnetic Machines**. Great Britain: Pitman Press, 1971.

WHITE, D. C.; WOODSON, H. H. **Electromechanical Energy Conversion**. New York: John Wiley & Sons, 1959.