

Capítulo 11

MOTORES ELÉTRICOS DE CORRENTE CONTÍNUA E UNIVERSAL

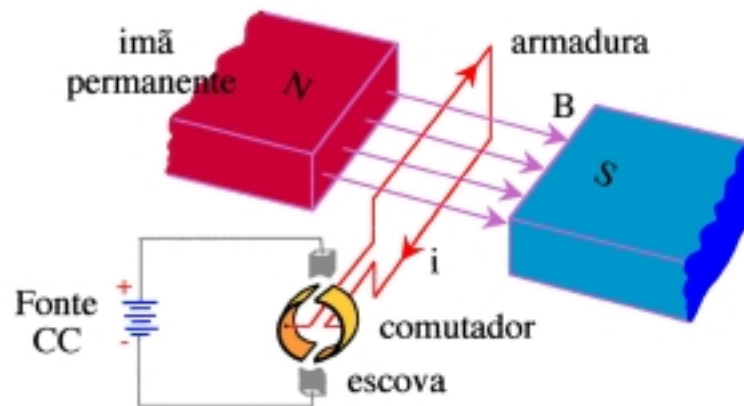
Esta aula apresenta o princípio de funcionamento dos motores elétricos de corrente contínua, o papel do comutador, as características e relações básicas, bem como as principais aplicações práticas e formas de controle da velocidade desse tipo de motor. Além disso, aborda-se rapidamente os motores universais, que, embora sejam motores de corrente contínua, também funcionam com corrente alternada.

Introdução

Um **motor de corrente contínua** converte energia elétrica em energia mecânica, como qualquer motor, mas tem uma característica que o individualiza: deve ser alimentado com **tensão contínua**. Essa tensão contínua pode provir de pilhas e baterias, no caso de pequenos motores, ou de uma rede alternada após retificação, no caso de motores maiores. Os principais componentes de um motor de corrente contínua (motor CC, por simplicidade) são descritos como segue:

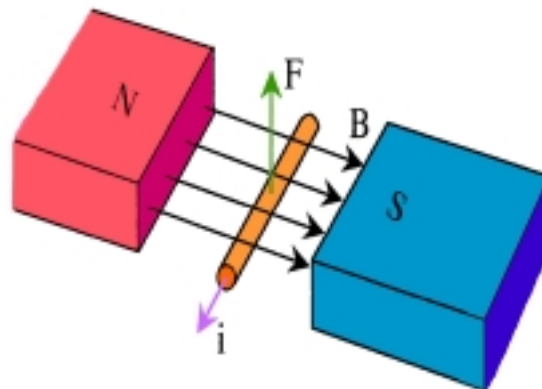
- **Estator** : contém um enrolamento (chamado **campo**), que é alimentado diretamente por uma fonte de tensão contínua; no caso de pequenos motores, o estator pode ser um simples ímã permanente;
- **Rotor** : contém um enrolamento (chamado **armadura**), que é alimentado por uma fonte de tensão contínua através do **comutador** e escovas de grafite;
- **Comutador** : dispositivo mecânico (tubo de cobre axialmente segmentado) no qual estão conectados os terminais das espiras da armadura, e cujo papel é inverter sistematicamente o **sentido** da corrente contínua que circula na armadura.

A figura abaixo mostra a estrutura básica de um motor de corrente contínua elementar com ímã permanente no estator. Observe que a armadura possui apenas uma espira (dois pólos) e que o comutador tem apenas dois segmentos. As escovas de grafite são fixas e, à medida que a armadura gira uma volta, ora cada uma delas fica em contato elétrico com uma metade do comutador, ora com a outra metade. Isso significa que a corrente na espira da armadura ora tem um sentido, ora o sentido contrário. Esse mecanismo é essencial para o funcionamento dos motores CC, evitando que a armadura estacione em uma posição de equilíbrio, como ficará claro mais adiante.



Motor de corrente contínua: princípio de funcionamento

O funcionamento dos motores CC baseia-se no princípio do eletromagnetismo clássico pelo qual um condutor carregando uma corrente e mergulhado em um fluxo magnético fica submetido a uma força eletromagnética. Embora tenha sido explicado anteriormente, esse princípio é repetido aqui por facilidade: “Um condutor transportando uma corrente elétrica e atravessado por um fluxo magnético fica submetido a uma força de natureza eletromagnética”.



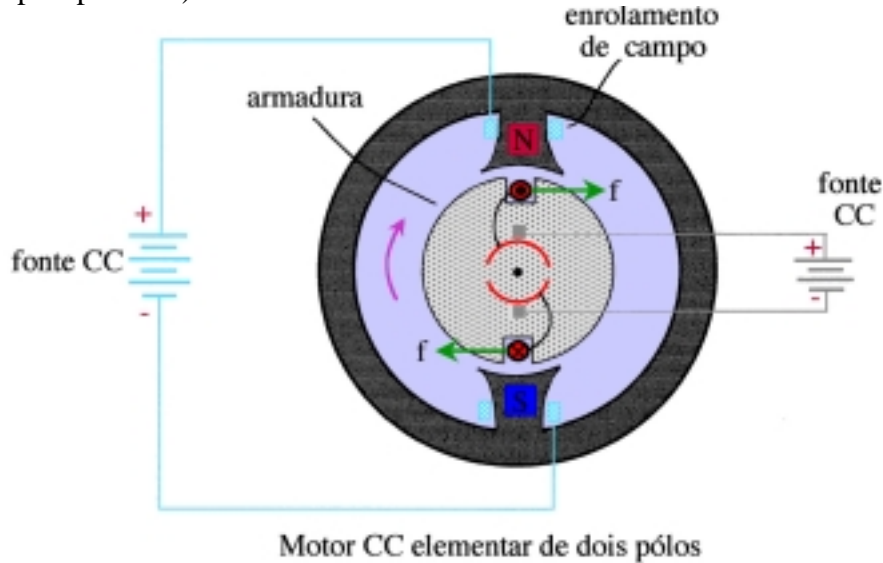
Observe que o fluxo magnético pode ser produzido por um ímã permanente, como na figura, ou um eletroímã. Note ainda que o sentido da força pode mudar se o sentido do fluxo ou o sentido da corrente também mudar. O mais importante, porém, é perceber que as direções do fluxo, da corrente e da força eletromagnética são sempre **ortogonais** entre si, ou seja, formam sempre ângulos de **90°**.

Dados os sentidos do fluxo e da corrente, o sentido da força pode ser obtido usando-se a **regra da mão esquerda**:

- Coloque o dedo **indicador** no sentido do **fluxo**;
- Coloque o dedo **médio** no sentido da **corrente**;

- O sentido da **força** será aquele apontado pelo dedo **polegar**.

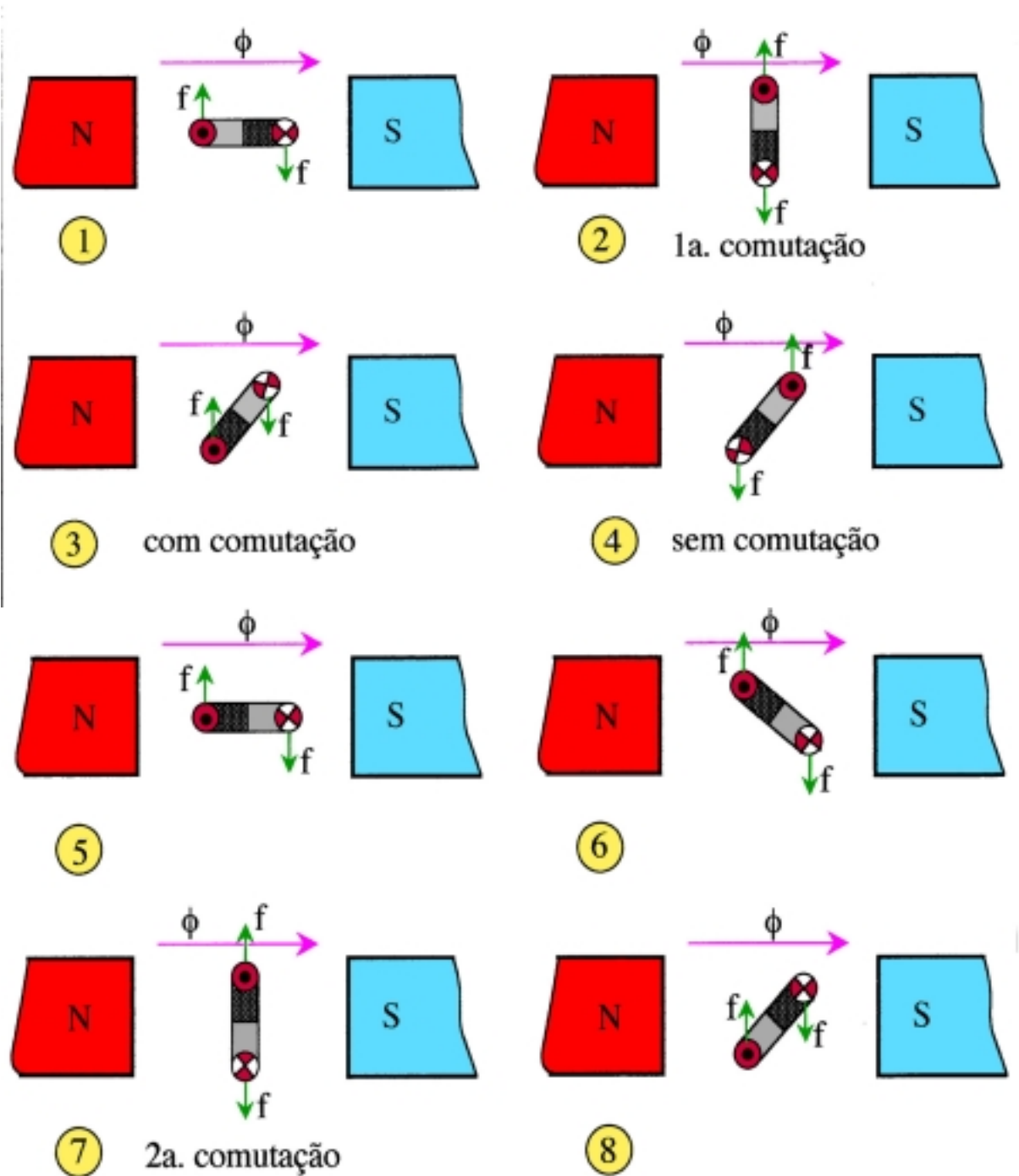
No caso de um motor CC, a criação do torque que faz o rotor (armadura) mover-se pode ser explicada com a ajuda da figura abaixo, que mostra um motor CC elementar de dois pólos (o mais simples possível) em corte transversal:



Na figura, o enrolamento de campo (estator) está dividido em duas partes ligadas em série (a ligação foi omitida na figura por simplicidade) que produzem um fluxo magnético constante no sentido norte-sul. A armadura (rotor) é formada por várias espiras enroladas em um núcleo ferromagnético e cujos terminais são conectadas nos dois segmentos do comutador (na parte central, em vermelho). A corrente que circula na armadura é fornecida por uma fonte CC e injetada através das duas escovas de grafite. Na situação ilustrada na figura, a corrente sai pela parte superior da armadura e entra na parte inferior. Em motores com mais de dois pólos, a armadura possui vários enrolamentos distribuídos pelo núcleo e o comutador é formado por vários segmentos. Aplicando-se a **regra da mão esquerda**, obtém-se os sentidos das forças eletromagnéticas que se estabelecem na parte lateral das espiras, criando um torque eletromecânico que faz a armadura girar no sentido horário.

O papel do comutador

A função do **comutador** é trocar periodicamente (duas vezes a cada volta) o sentido da corrente na armadura de tal modo a garantir que o torque tenha sempre o mesmo sentido (horário, por exemplo) e impeça que a armadura fique parada em uma posição de equilíbrio. A razão pela qual é necessário comutar a corrente de armadura pode ser melhor compreendida com a ajuda da figura abaixo, no qual o fluxo magnético é produzido por um ímã permanente por simplicidade.

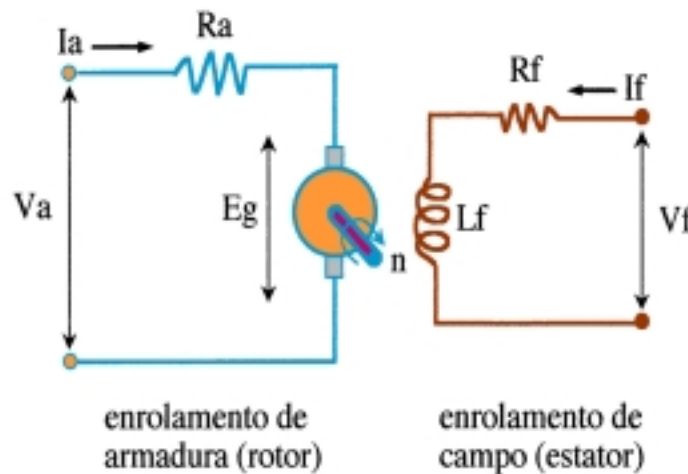


Observe que, sem o mecanismo da comutação, a espira da armadura iria estacionar na posição vertical, que é uma posição de equilíbrio. Quando a espira passa por uma posição de equilíbrio, o comutador muda a corrente, mudando também o sentido do torque e evitando que a espira volte para a posição de equilíbrio.

Motor CC com excitação independente

Existem diversos tipos de motor CC de acordo com a quantidade de fontes CC usadas e da forma como os enrolamentos de campo e de armadura são conectados. Se for utilizada somente uma fonte CC, então os enrolamentos de campo e de armadura devem ser ligados em série (dando origem ao motor CC série) ou em paralelo (dando origem ao motor CC em derivação). Por outro lado, se forem utilizadas duas fontes CC independentes, então tem-se um **motor CC com excitação independente**. Cada um desses tipos de motor CC apresenta desempenho um pouco diferente em termos de curva de torque ou velocidade em função da corrente de armadura e, por isso, tem distinta aplicação. Por simplicidade, aqui será considerado apenas o motor CC com excitação independente.

O modelo simplificado de um **motor CC com excitação independente** pode ser visto na figura abaixo.



Esse tipo de motor CC requer duas fontes CC independentes cujas tensões contínuas são representadas por V_a , chamada **tensão de armadura**, e por V_f , chamada **tensão de campo**. Na figura, a **corrente de armadura** é representada por I_a e R_a indica a resistência ôhmica do enrolamento de armadura. Esse enrolamento de armadura (rotor), ao girar dentro do fluxo magnético produzido pelo enrolamento de campo, fica sujeito à indução de uma tensão de acordo com a lei de Faraday. Afinal, trata-se de um conjunto de espiras condutoras sofrendo uma variação de fluxo magnético. Essa tensão induzida na armadura é chamada **força contra-eletromotriz** e está representada por E_g na figura. A **velocidade do motor** é representada por n . No circuito de campo I_f representa a **corrente de campo**, enquanto que R_f e L_f indicam a resistência ôhmica e indutância do enrolamento, respectivamente.

As equações fundamentais de um motor CC com excitação independente são aquelas que fornecem o torque, a força contra-eletromotriz e a velocidade do motor:

$$T = k \phi I_a \quad N.m$$

em que T é o torque do motor, ϕ é o fluxo magnético por pólo, I_a é a corrente de armadura e k é uma constante que depende do projeto construtivo do motor (número de pólos,

condutores, caminhos, etc.). Observe que, como seria de se esperar, o torque é maior quanto maior for o fluxo e maior for a corrente de armadura, pois maior será a força eletromagnética aplicada.

Por outro lado, a força contra-eletromotriz será dada por:

$$E_g = K \phi n \quad V$$

em que a velocidade n é normalmente expressa em **rpm** e K é uma constante que depende do projeto construtivo do motor. Note que a tensão induzida E_g é maior quanto maior a intensidade do fluxo e a velocidade de acionamento, como se esperava.

Do circuito do enrolamento de armadura (lado esquerdo na figura) pode-se escrever a equação:

$$E_g = V_a - R_a I_a$$

Combinando esta equação com a anterior, e lembrando que o fluxo produzido pelo campo é $\phi = L_f I_f$, obtém-se a expressão da velocidade do motor:

$$n = \frac{V_a - R_a I_a}{K L_f I_f} \quad rpm$$

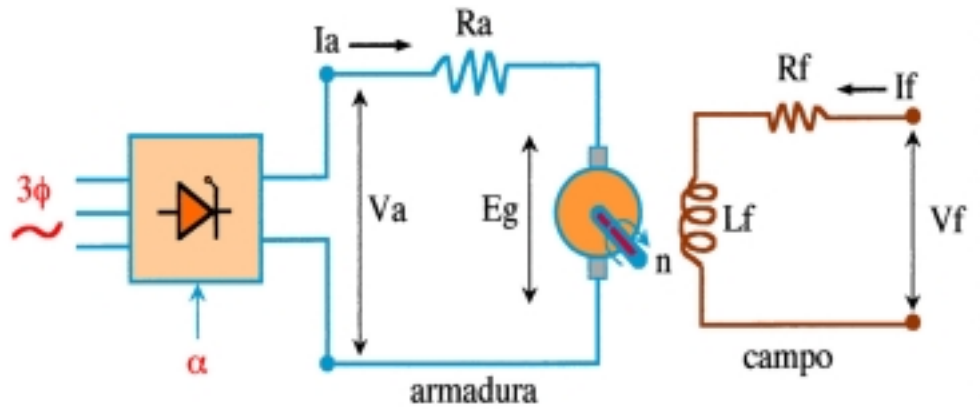
Observe que essa equação permite concluir que a velocidade de um motor CC é diretamente proporcional à tensão de armadura e inversamente proporcional à corrente de campo. Essa equação também mostra que se a corrente de campo tender a zero, então a velocidade tende ao infinito, ou seja, o motor dispara. Por essa razão, os motores CC devem ter dispositivos de segurança para desligar o motor no caso de o circuito de campo ser desconectado acidentalmente.

Controle de velocidade de motores CC

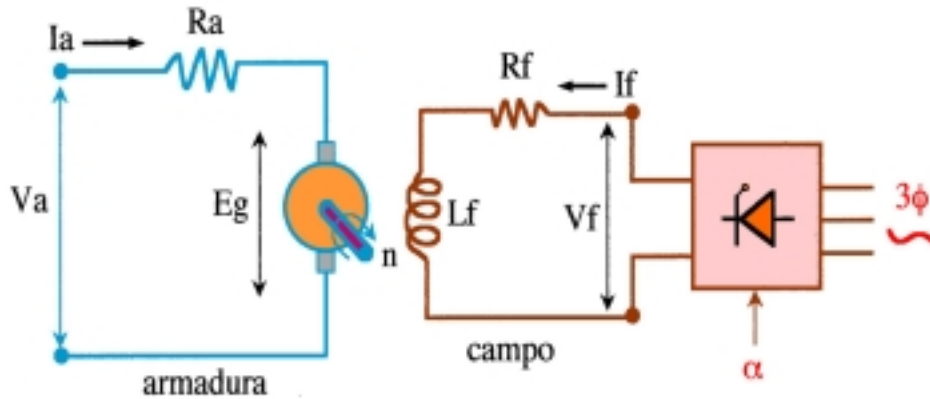
Uma das principais aplicações práticas de motores CC é no acionamento de cargas que precisam ter sua velocidade variada de forma controlada. Os motores CC com excitação independente, por exemplo, podem ter sua velocidade facilmente controlada através de dois modos com base na equação:

$$n = \frac{V_a - R_a I_a}{K L_f I_f} \quad rpm$$

Modo A : Variando-se a **tensão de armadura**, V_a , através de um retificador controlado por tiristores (mantendo as demais variáveis fixas ou quase), como ilustra a figura abaixo.



Modo B : Variando-se a **corrente de campo**, I_f , através de um retificador controlado por tiristores (mantendo as demais variáveis fixas ou quase), como ilustra a figura abaixo.



Como inverter o sentido de rotação

O sentido de rotação do eixo de um motor de corrente contínua é imposto tanto pela polaridade norte-sul do fluxo de campo, quanto pelo sentido da corrente de armadura. Para inverter o sentido de rotação basta trocar a polaridade da fonte CC que alimenta o enrolamento de campo ou da fonte CC que alimenta a armadura, no caso de excitação independente.

A propósito, o que acontece se as polaridades das duas fontes CC forem trocadas ao mesmo tempo. Pense nisso.

Porque a corrente de partida é alta

Motores CC (como também outros tipos de motores elétricos) possuem grande **corrente de partida**, algumas vezes maior que o valor de regime permanente, colocando em risco a rede de alimentação e o próprio motor. A razão dessa alta corrente de partida pode ser facilmente entendida considerando-se que, quando o motor é ligado, a armadura está completamente parada e o valor da força contra-eletromotriz E_g é zero (a velocidade é nula). Em conseqüência, toda a tensão de armadura, V_a fica aplicada sobre a resistência de

armadura, R_a , que é bem pequena, dando origem a uma grande corrente de armadura. Isso

pode ser visto com a ajuda da equação $E_g = V_a - R_a I_a$. Após a partida, o motor ganha velocidade, E_g aumenta e a corrente I_a diminui.

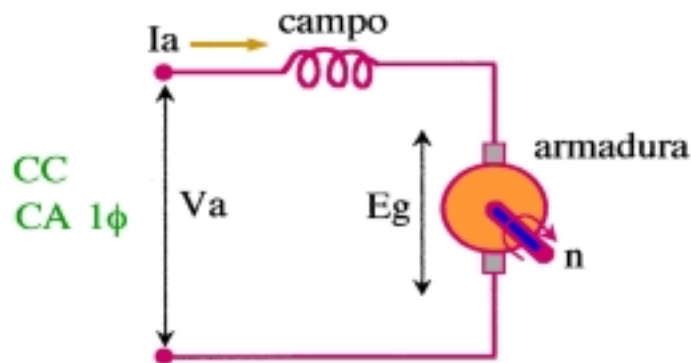
Para minimizar o efeito da corrente de partida alta, utilizam-se técnicas de redução de corrente, principalmente em motores de grande potência, tais como partida em tensão de armadura reduzida usando reostatos.

Aplicações

Os motores CC de pequeno porte são muito utilizados em brinquedos e equipamentos portáteis pelo fato de poderem ser acionados por meio de pilhas e baterias. São também muito comuns em veículos (motor de arranque, limpador de pára-brisas, etc.) pela mesma razão. Pelo fato de permitirem fácil e precisa variação de velocidade, motores CC são muito utilizados para tração elétrica de trens, metrô e ônibus elétricos. Na indústria, é usado para acionar cargas que precisam ter sua velocidade alterada de forma controlada dependendo do processo. Em geral, um motor CC é mais caro que um de corrente alternada de mesmo porte, pois tem mais enrolamentos e o comutador. A manutenção do comutador deve ser feita periodicamente, o que encarece um pouco sua operação.

Motor universal

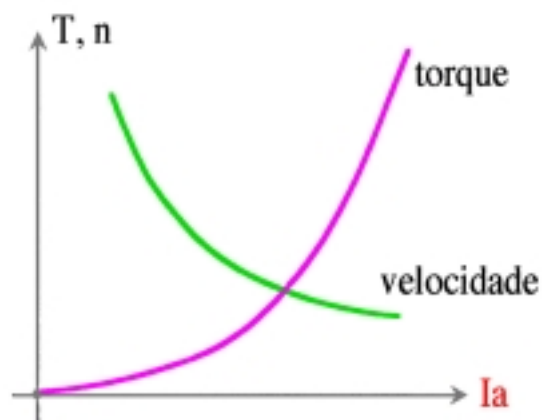
Chama-se **motor universal** um tipo de motor de funciona tanto em corrente contínua quanto em corrente alternada. Na verdade, um motor universal é um **motor CC com excitação série**, ou seja, um motor CC cujos enrolamentos de campo e de armadura estão conectados em série, podendo, portanto ser alimentado por uma única fonte, que pode ser contínua ou alternada monofásica. A figura abaixo mostra o modelo de um **motor universal**.



Esse motor quando alimentado por tensão contínua funciona como um motor CC descrito anteriormente. Porém, ao ser alimentado por tensão alternada senoidal monofásica o motor funciona do mesmo jeito, pois as correntes de campo e de armadura são as mesmas (enrolamentos estão em série) e quando uma muda sua polaridade, a outra muda ao mesmo tempo. Em outras palavras, o sentido do fluxo produzido pelo campo e o sentido da

corrente de armadura mudam ao mesmo tempo, mantendo o sentido da força eletromagnética e, portanto do torque.

Os motores universais possuem características de desempenho muito interessantes, o que determina o tipo de aplicação em que é usado. Essas características estão mostradas na figura abaixo, em que se apresentam as curvas de torque e de velocidade em função da corrente de armadura.



Observe que os motores universais possuem **elevado torque em baixa rotação**, para um certo valor de corrente de armadura. Essa característica torna os motores universais adequados para acionamento, em corrente alternada, de vários eletrodomésticos (liquidificadores, aspiradores de pó, furadeiras), bem como acionamento de veículos elétricos de transporte de massa (trens, carros elétricos, metrô).