

Capítulo 4

Motores eléctricos



4.1 Breve histórico

Os dispositivos que convertem energia elétrica em energia mecânica de rotação são conhecidos como motores elétricos. Com as descobertas das relações entre eletricidade, magnetismo e movimento, foi possível desenvolver motores elétricos de corrente contínua e alternada, monofásico e trifásico.

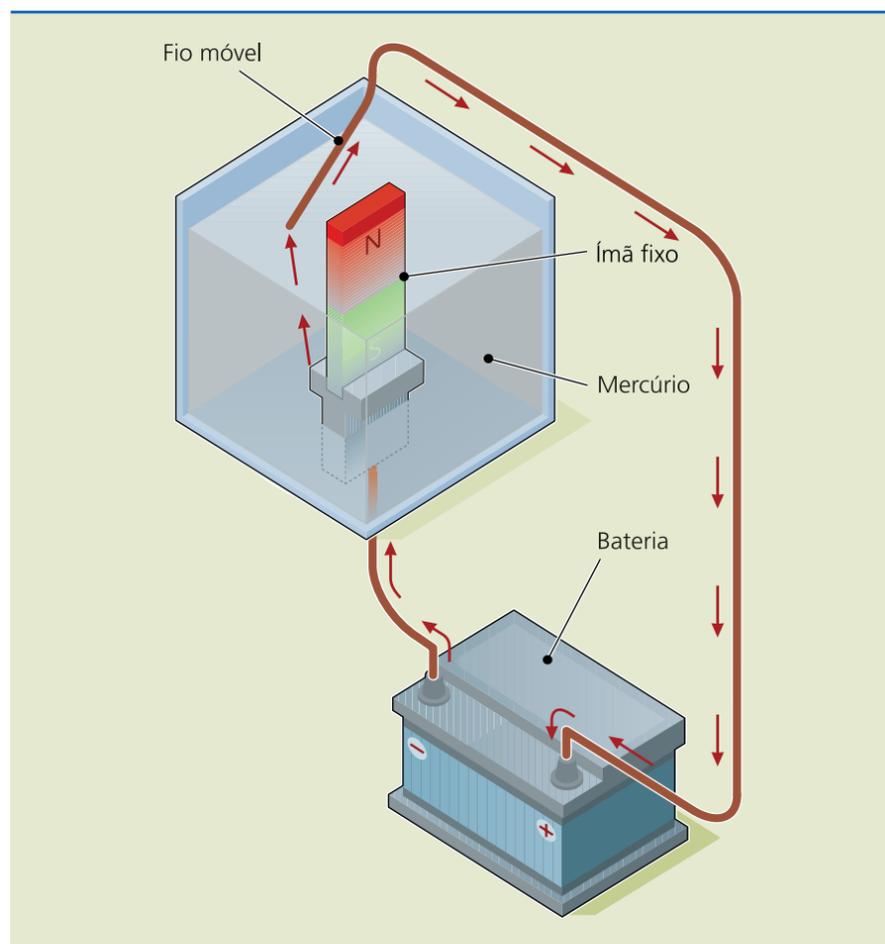
A base de funcionamento dos motores elétricos é o princípio da força magnética: um circuito indutor, chamado **estator**, produz um campo magnético fixo para que o circuito induzido, denominado **rotor**, entre em movimento ao ser percorrido por corrente elétrica.

Um dos pioneiros na pesquisa dos motores elétricos foi Michael Faraday. Em 1822, durante seus experimentos, ele observou a manifestação de um movimento circular ao montar um circuito em série com uma pilha de corrente contínua, ímãs e dois recipientes cheios de mercúrio.

Em um dos recipientes, Faraday prendeu um ímã em forma de barra na posição vertical e manteve um fio móvel mergulhado no mercúrio. Ao fechar o circuito, nele se estabeleceu corrente elétrica e o fio móvel passou a girar ao redor da barra magnetizada (figura 4.1).

Figura 4.1

Experimento de Faraday com ímã fixo e fio móvel.



No outro recipiente, Faraday manteve o fio fixo e o ímã móvel. Assim, ao fechar o circuito, o ímã passou a girar ao redor do fio fixo (figura 4.2). Faraday atribuiu esses movimentos à ação do campo magnético.

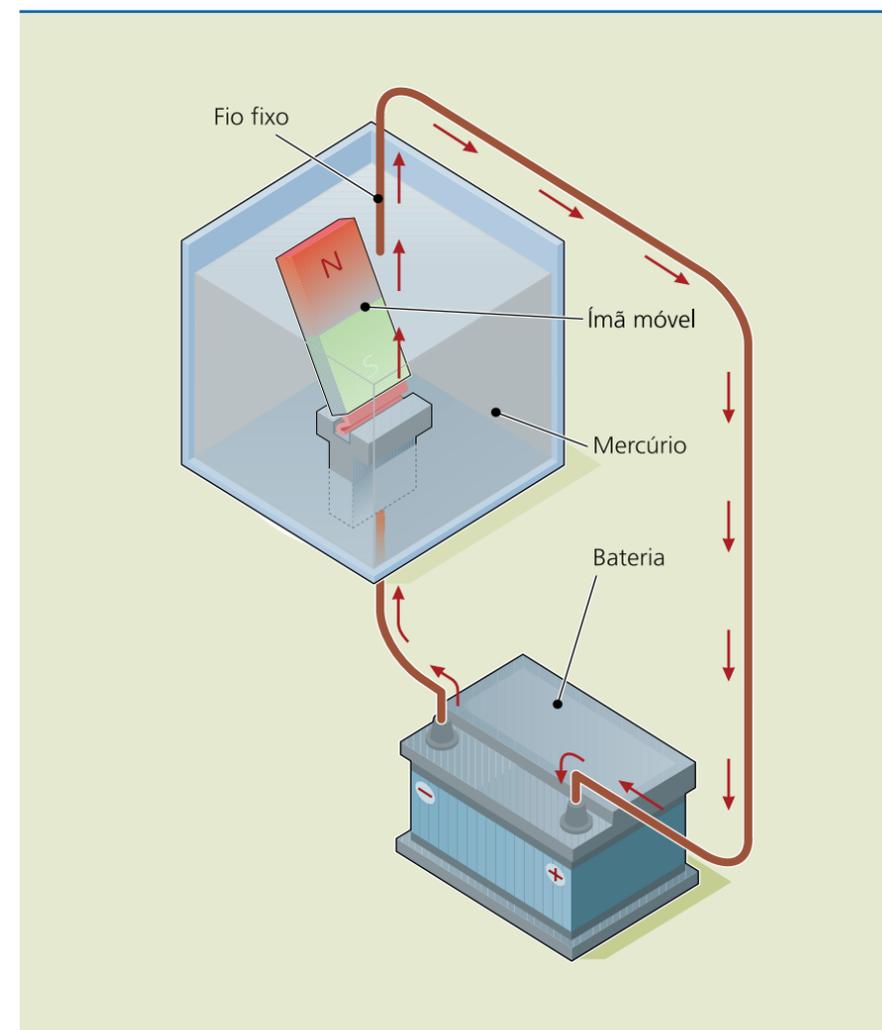


Figura 4.2

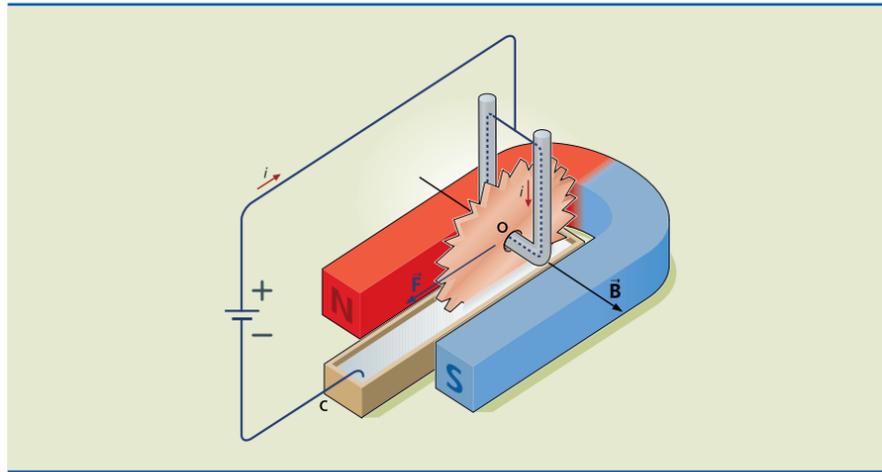
Experimento de Faraday com ímã móvel e fio fixo.

Alguns anos mais tarde, em 1828, Peter Barlow desenvolveu o primeiro motor elétrico, conhecido como **roda de Barlow** (figura 4.3). Trata-se de uma roda metálica com dentes imersos em um recipiente cheio de mercúrio. A roda fica suspensa por um eixo horizontal sob a ação de um campo magnético uniforme, originário de um ímã em forma de ferradura. Ao se aplicar uma diferença de potencial fornecida por uma bateria, uma corrente i se estabelece, percorrendo a roda e o mercúrio. Nessas condições, surge uma força magnética com direção e sentido, resultante da interação entre os campos magnéticos do ímã permanente e da corrente elétrica, que faz a roda girar.

Na roda de Barlow, o circuito elétrico sempre estará fechado, pois os dentes da roda estão imersos no mercúrio. Para inverter o sentido de rotação da roda, deve-se inverter o sentido da corrente elétrica e, para isso, é necessário inverter os polos da bateria.



Figura 4.3
Roda de Barlow.

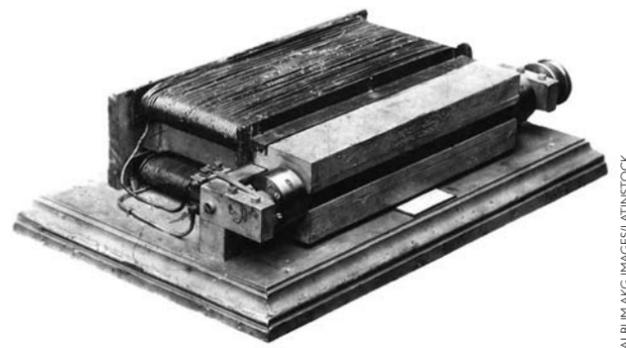


Em 1833, W. Ritchie montou um experimento mais sofisticado, composto por fios enrolados ao redor de um núcleo de ferro girando ao redor de um ímã permanente. Esse conjunto, ao ser energizado, conseguiu realizar giros completos ao redor de um eixo. Tal façanha foi possível porque no dispositivo havia uma peça que possibilitava inverter o sentido da corrente que circulava nos fios cada vez que completava 180° de giro. Assim, W. Ritchie inventou o **comutador**, responsável pela inversão da corrente na bobina (rotor), de maneira que o giro de 360° se complete.

Todos os experimentos feitos até então utilizavam ímã permanente para gerar campo magnético fixo. A substituição do ímã permanente por um eletroímã foi proposta em 1841, por Charles Wheatstone e William Fothergill Cooke, ao agruparem os enrolamentos do circuito induzido em forma de bobina. A substituição do ímã permanente pelo eletroímã foi um avanço fundamental para que os motores adquirissem maior potência.

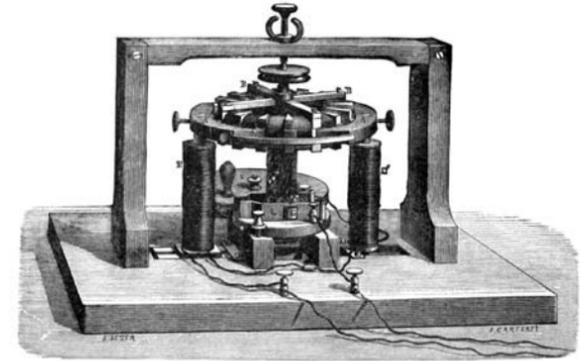
Em 1866, Werner Siemens, utilizando um eletroímã, criou uma máquina que transformava energia mecânica em elétrica (figura 4.4), chamada **gerador CC** ou **dínamo**. Ela possuía a capacidade de se autoinduzir, porque retirava do próprio enrolamento do rotor a tensão necessária para gerar o magnetismo. Quando se aplicava uma tensão elétrica contínua em seus terminais, o rotor entrava em movimento, característica semelhante, portanto, à do motor elétrico.

Figura 4.4
O primeiro dínamo elétrico (1866).



ALBUM AKG-IMAGES/LATINSTOCK

Figura 4.5
Dínamo de Pacinotti.



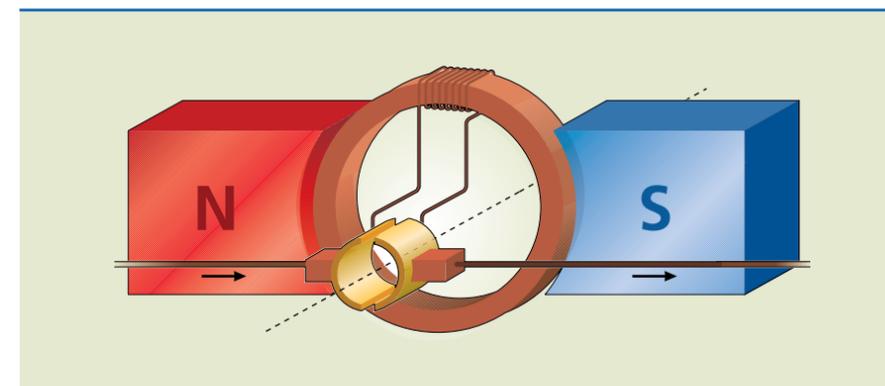
O dínamo ilustrado na figura 4.5 foi desenvolvido pelo italiano Antonio Pacinotti, porém, de acordo com alguns historiadores, ele apresentou o invento a uma oficina para obter a patente e o proprietário, o belga Zénobe-Théophile Gramme, patenteou-o, mas com seu nome, em 1871, depois de realizar alguns melhoramentos.

Figura 4.6
Dínamo de Gramme.



Como se observa na figura 4.6, o grande anel na parte superior da máquina de Gramme é um ímã permanente. Na parte inferior, há um ímã e, entre os polos do ímã, um disco preso a uma manivela. Próximo a essa manivela, encontram-se bobinas constituídas de fios de cobre com espiras em volta de um núcleo de ferro de formato circular, conforme ilustra a figura 4.7.

Figura 4.7
Representação da parte inferior do dínamo de Gramme.



Ao girar a manivela, as espiras de cobre atravessam o campo magnético uniforme, gerando, então, corrente elétrica. Sabe-se que, pelo princípio da indução eletromagnética, essa corrente será alternada, mas, com o uso do comutador, a corrente obtida era contínua.

Pulsação é a grandeza simbolizada por ω na equação da corrente. Representa a velocidade angular.

No entanto, com apenas uma bobina, a corrente contínua gerada apresenta **pulsação** muito elevada. Para solucionar o problema, Gramme utilizou 16 bobinas, combinadas em oito pares, resultando em uma tensão e corrente contínuas quase constantes, como mostra a figura 4.8.

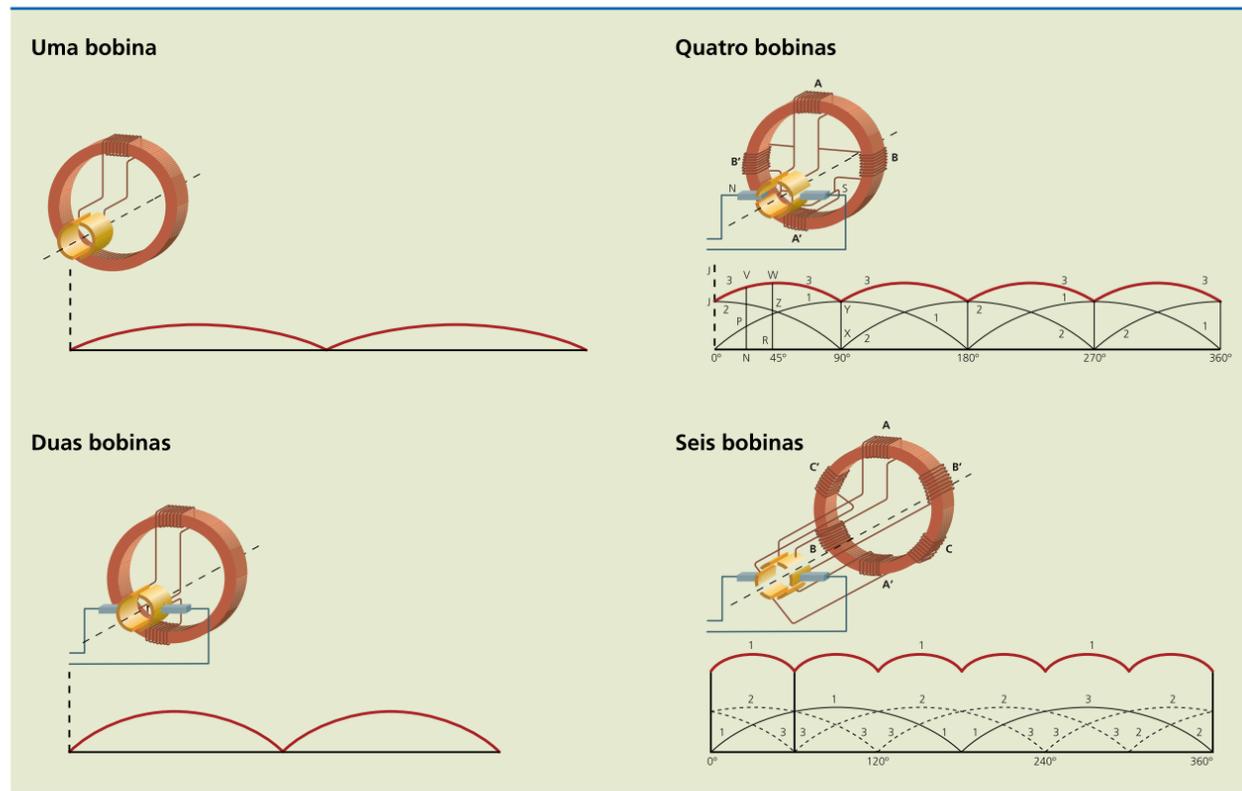


Figura 4.8
Aumento do número de polos de um dínamo.

Vale salientar que o dínamo de Gramme também poderia ser usado como motor CC, bastando para isso alimentá-lo com corrente contínua.

O dínamo de Gramme foi usado em diferentes aplicações práticas, como para acender as luzes de faróis, nas fábricas e no processo de galvanização de metais. Graças a esse sucesso, Gramme passou a ser conhecido como o inventor do primeiro dínamo capaz de produzir corrente contínua a ser utilizado na prática. É interessante salientar que o fornecimento da energia mecânica para fazer o dínamo funcionar era obtido das máquinas a vapor desenvolvidas por James Watt.

Não demorou muito tempo para que se tentasse substituir as máquinas a vapor por motores elétricos. Em 1879, surgiu a primeira locomotiva elétrica, com potência de 2 kW, porém o motor elétrico ainda apresentava desvantagens quando comparado com as máquinas térmicas, entre elas o uso de comutador, de elevado custo de fabricação.

Além das pesquisas para tentar aperfeiçoar os motores CC, iniciou-se também o desenvolvimento de motores que utilizassem corrente alternada (a primeira máquina CA havia sido construída em 1832, pelo italiano S. Dal Negro), assim como o estudo e a aplicação do princípio do campo magnético girante, por Galileu Ferraris.

Finalmente, em 1883, Nikola Tesla desenvolveu o primeiro gerador de corrente alternada. Com base nesse modelo, a empresa Westinghouse passou a construir enormes geradores de energia elétrica com capacidade suficiente para aproveitar, por exemplo, a energia hidráulica das cataratas do Niágara e transformá-la em energia elétrica. Tesla também estudou e desenvolveu máquinas com sistema polifásico.

Comparado com o gerador de corrente contínua, o gerador de corrente alternada é mais simples de ser fabricado, mais silencioso, mais seguro e de baixa manutenção.

Em 1891, o russo Michael von Dolivo-Dobrovolski, que dois anos antes havia patenteado o motor trifásico com rotor de gaiola (figura 4.9), inaugurou uma fábrica em série de motores assíncronos.

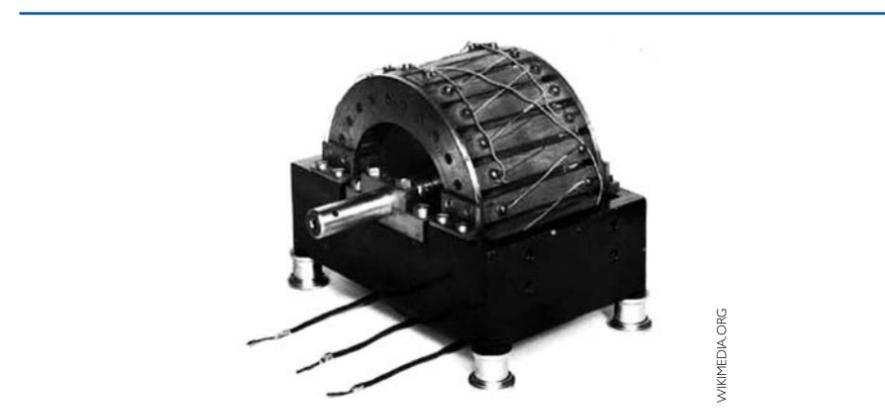


Figura 4.9
O primeiro motor trifásico com rotor de gaiola.

4.2 Motores de corrente contínua

O motor de corrente contínua funciona segundo o princípio da força magnética: quando dois campos magnéticos interagem, manifesta-se uma força de natureza magnética.

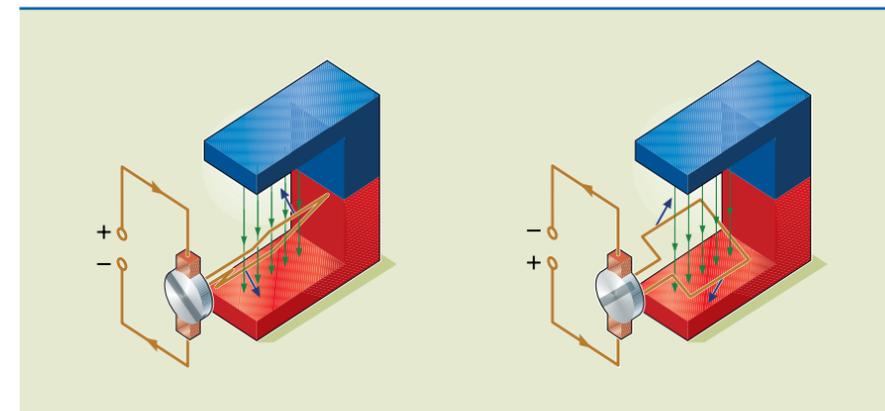


Figura 4.10
Princípio de funcionamento do motor CC.



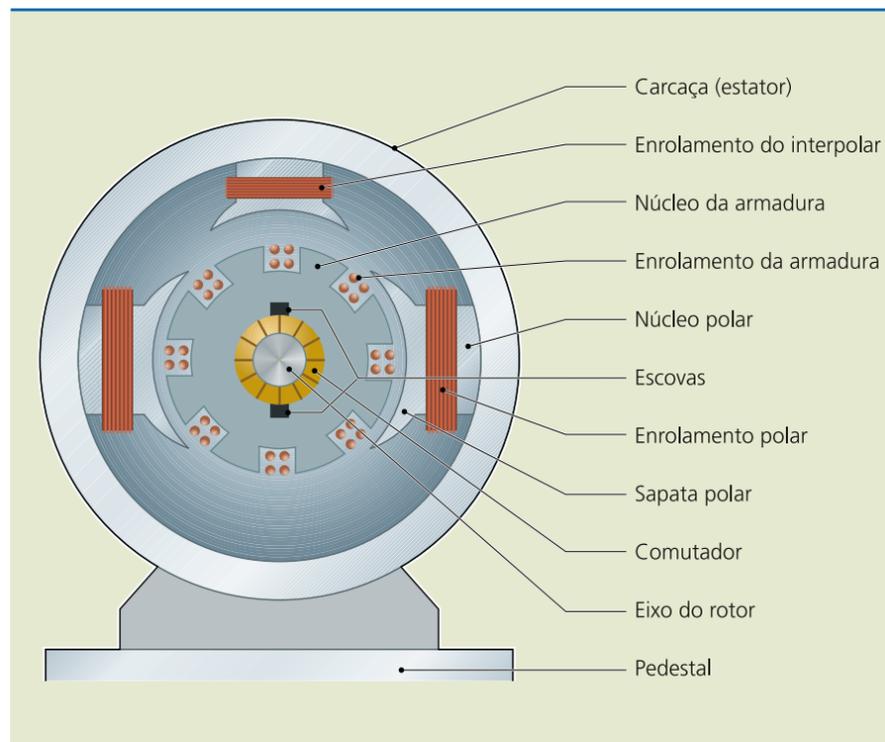
Como se pode notar na figura 4.10, ao fornecer corrente elétrica à espira – que representa o rotor –, seu campo magnético interage com o campo magnético do ímã permanente – que representa o estator –, estabelecendo um binário de forças que põe a espira em movimento.

Graças ao comutador, a corrente inverte de sentido na espira, fazendo com que ela continue girando. A velocidade do giro é determinada pelo número de rotações do eixo em relação ao tempo (rpm). O torque produzido é proporcional à intensidade do campo magnético e ao valor da corrente elétrica no rotor, também conhecido como armadura.

A figura 4.11 mostra detalhes internos de um motor CC.

Figura 4.11

Detalhes internos de um motor CC (corte frontal).



Para entender as partes que formam o motor, consideramos que ele é formado por estator e rotor.

No estator, encontram-se os seguintes componentes:

- **Carcaça** – Serve como suporte dos demais componentes e também fecha o circuito magnético, pois fornece o retorno do fluxo magnético.
- **Enrolamento de campo** – Gera a força magnetomotriz (f.m.m.) necessária à produção do fluxo magnético para gerar o movimento.
- **Polos** – São as ranhuras soldadas na carcaça, que recebem os enrolamentos de campo.
- **Escovas** – Consistem em dois pedaços de grafite que ficam em contato com o comutador, fornecendo a corrente elétrica ao circuito da armadura.

No rotor, encontram-se os seguintes componentes:

- **Eixo da armadura** – Produz a rotação para o núcleo da armadura, que, por sua vez, é utilizado para reduzir as perdas magnéticas no enrolamento da armadura.
- **Enrolamento da armadura** – Compõe-se de fios enrolados em formato de bobina, por onde a corrente elétrica circula.
- **Comutador** – É responsável pela inversão da corrente elétrica no enrolamento da armadura.

Pode-se representar um motor elétrico CC por meio de um circuito elétrico, conforme ilustra a figura 4.12, em que:

- V_{ta} é a tensão da armadura (V);
- I_a é a corrente da armadura (A);
- r_a é a resistência da armadura (Ω);
- V_g é a força contraeletromotriz (V);
- r_s é a resistência do campo série (Ω);
- r_f é a resistência do campo em derivação (Ω);
- I_f é a corrente do campo em derivação (A);
- V_t é a tensão nos terminais do motor (V);
- I_L é a corrente na linha do motor (A).

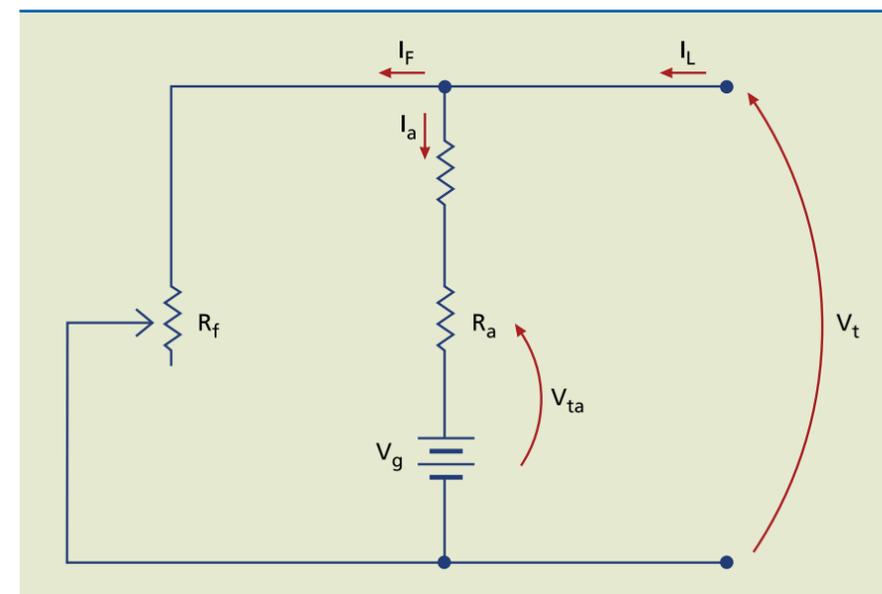


Figura 4.12

Circuito equivalente de um motor CC.

4.2.1 Principais tipos de motores de corrente contínua

Motor em derivação

Também é conhecido como **motor paralelo**. O torque aumenta proporcionalmente à elevação da intensidade da corrente na armadura, enquanto sua velocidade diminui. Para controlar a velocidade, coloca-se uma resistência variável (reostato) nas bobinas de campo, para controlar a tensão de entrada (figura 4.13).



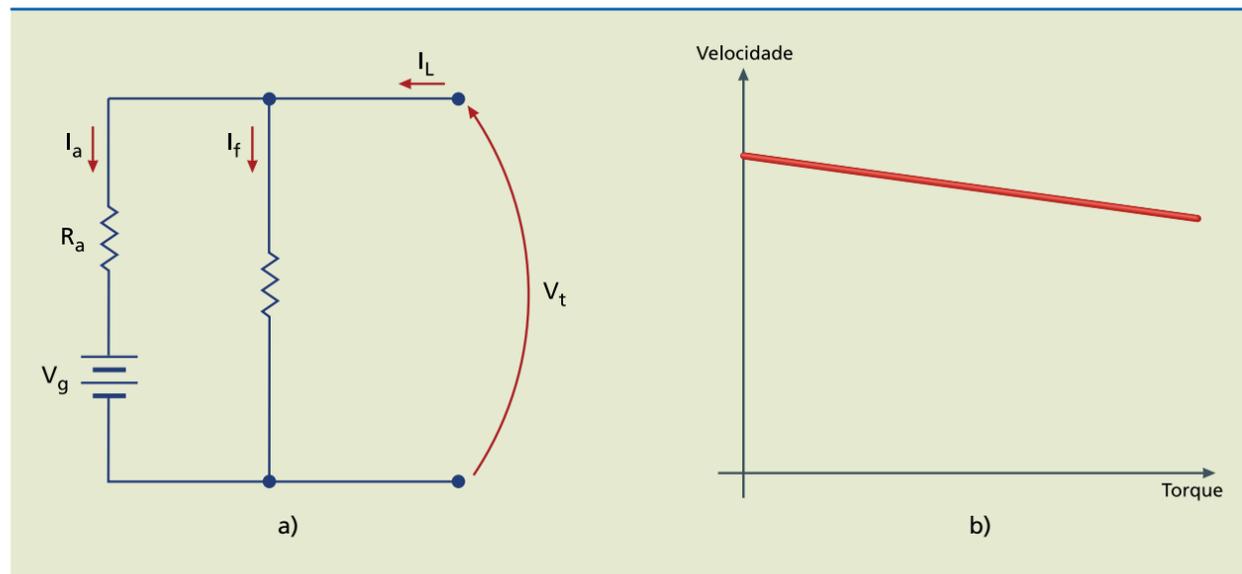


Figura 4.13

Características de um motor em derivação: (a) circuito equivalente e (b) gráfico velocidade • torque.

Motor série

As bobinas de campo são conectadas em série com a armadura; assim, a velocidade varia inversamente proporcional ao valor da carga aplicada (figura 4.14). Esse tipo de motor gira lentamente com cargas elevadas e rapidamente quando está vazio, por isso pode se danificar facilmente. É utilizado em guinchos e guindastes, pois fornece torque elevado, porém baixa rotação.

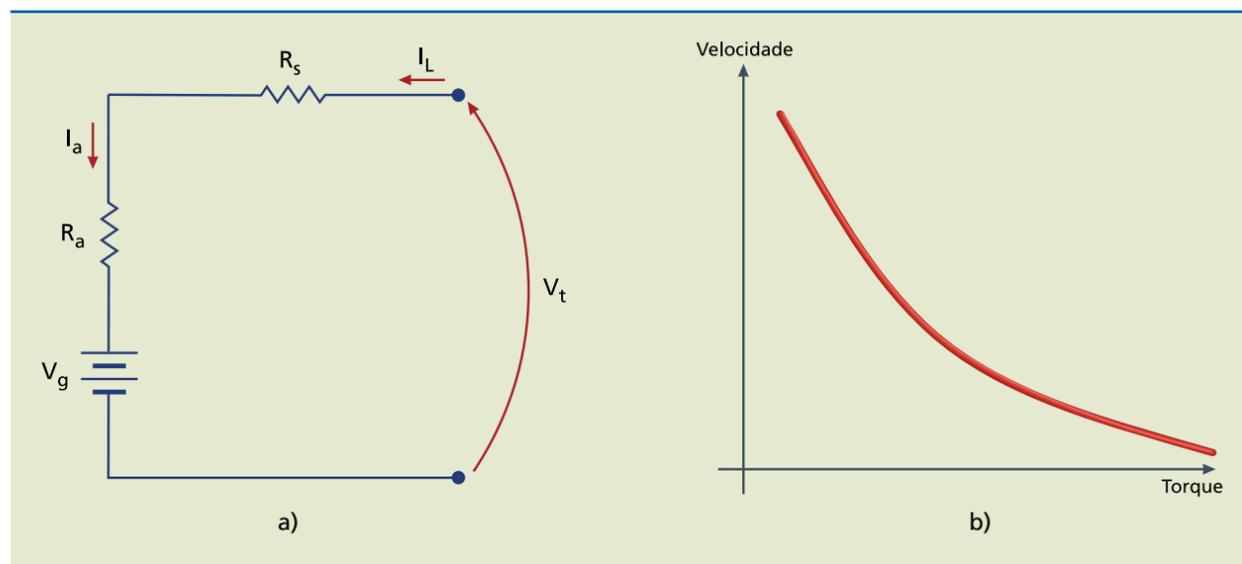


Figura 4.14

Características de um motor série: (a) circuito equivalente e (b) gráfico velocidade • torque.

Motor composto

Associa características dos motores em derivação e série. A eficiência de seu funcionamento depende do valor da carga. Graças aos avanços da tecnologia, foi possível desenvolver um motor de corrente contínua sem escovas (BLDC, sigla

em inglês de *brushless direct current*). Nesse modelo, os ímãs permanentes ficam no rotor e os eletroímãs, no estator. Seu acionamento se faz por meio de um MOSFET de alta potência, comandado por um computador, que energiza os eletroímãs enquanto o rotor gira. Assim, além de não emitir faíscas e possuir refrigeração mais eficaz, o motor é muito mais preciso. Infelizmente, o alto custo de manufatura desse modelo impede que substitua totalmente o motor CC comum. No entanto, o BLDC é utilizado em *hardwares*, CDs e DVDs, assim como auxilia na refrigeração de um PC, já que o ventilador (*cooler*) é um motor CC sem escovas.

Motor de passo

É um motor com posicionamento preciso, de maneira que cada impulso elétrico do sinal de alimentação corresponde a um ângulo fixo de rotação.

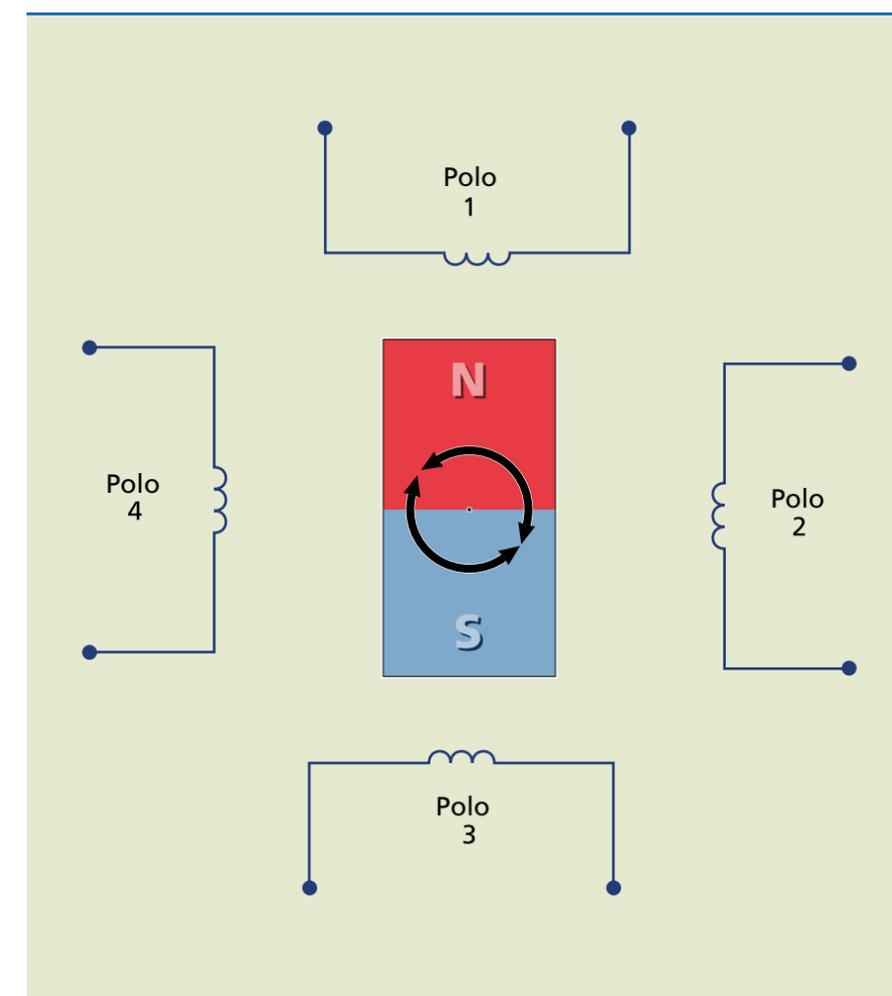


Figura 4.15
Princípio de funcionamento de um motor de passo.

Como se observa na figura 4.15, o estator é composto de quatro polos e o rotor é um ímã permanente. Para entender o funcionamento desse motor, vamos considerar que, ao energizar os enrolamentos, o polo 1 é um polo sul magnético e o polo 3, um polo norte. Nessas condições, o ímã se movimentará até

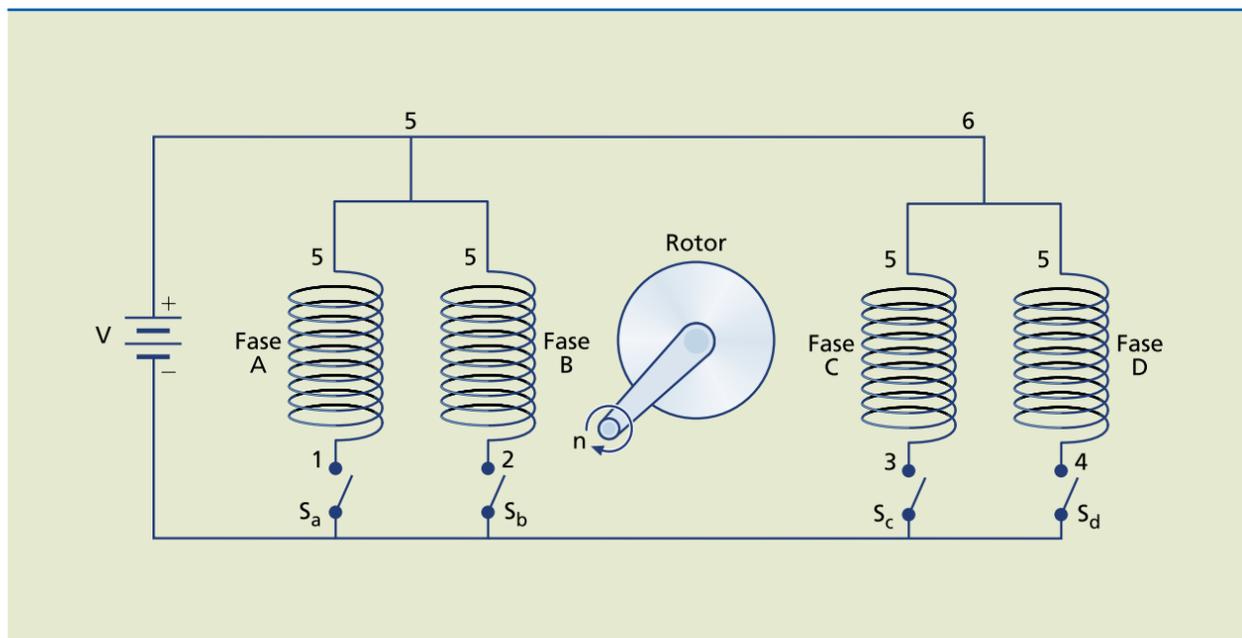


ficar alinhado com esse campo. Se, no próximo pulso, o polo 2 é sul e o polo 4 é norte, o rotor (ímã) executará outro giro de 90°, efetuando mais um passo.

Essa sincronia de passos é possível porque o rotor também é composto por polos, porém em número ímpar, e não par, como o estator; assim, os polos do estator e do rotor nunca estarão alinhados no mesmo momento. Então, o ângulo de passo será determinado pelo número de polos do estator e do rotor, normalmente entre 1,8° e 30°.

Figura 4.16
Motor de passo de quatro fases.

Podem ser utilizadas sequências para movimentar um motor de passo: passo completo e meio passo.



Uma sequência de comandos do motor de passo de quatro fases (figura 4.16) para os dois sentidos de rotação pode ser vista na tabela 4.1.

Tabela 4.1
Sequência de comandos de motor de passo de quatro fases.

Passo	Sa	Sb	Sc	Sd
P1	LIGADA	DESLIGADA	LIGADA	DESLIGADA
P2	LIGADA	DESLIGADA	DESLIGADA	LIGADA
P3	DESLIGADA	LIGADA	DESLIGADA	LIGADA
P4	DESLIGADA	LIGADA	LIGADA	DESLIGADA

Trocando o estado das chaves de LIGADA e DESLIGADA para “1” e “0”, respectivamente, podemos verificar como o motor de passo gira nos dois sentidos (tabelas 4.2 e 4.3).

Passo	Sa	Sb	Sc	Sd
P1	1	0	1	0
P2	1	0	0	1
P3	0	1	0	1
P4	0	1	1	0

Tabela 4.2
Sequência de comandos para rotação no sentido horário do motor de passo.

Passo	Sa	Sb	Sc	Sd
P1	0	1	1	0
P2	0	1	0	1
P3	1	0	0	1
P4	1	0	1	0

Tabela 4.3
Sequência de comandos para rotação no sentido anti-horário do motor de passo.

No caso do meio passo, o circuito que energiza os enrolamentos magnetiza apenas uma bobina (ou um grupo de bobinas) do estator; assim, em vez de o rotor se alinhar de maneira a apontar para um dos polos do estator, ele fica entre dois polos.

As tabelas 4.4 e 4.5 mostram como o motor gira nos sentidos horário e anti-horário para meio ângulo de passo.

Passo	Sa	Sb	Sc	Sd
P1	1	0	1	0
P2	1	0	0	0
P3	1	0	0	1
P4	0	0	0	1
P5	0	1	0	1
P6	0	1	0	0
P7	0	1	1	0
P8	0	0	1	0

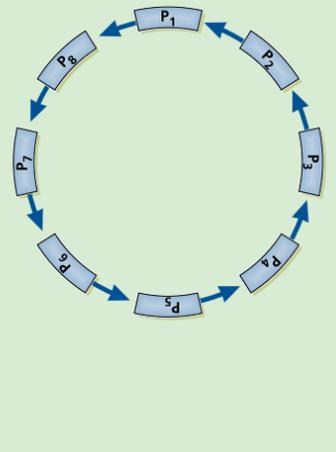
Tabela 4.4
Sequência de comandos para meio ângulo de passo no sentido horário de rotação.



Tabela 4.5

Sequência de comandos para meio ângulo de passo no sentido anti-horário de rotação.

Passo	Sa	Sb	Sc	Sd
P1	0	0	1	0
P2	0	1	1	0
P3	0	1	0	0
P4	0	1	0	1
P5	0	0	0	1
P6	1	0	0	1
P7	1	0	0	0
P8	1	0	1	0



A tabela 4.6 apresenta a relação de valores de ângulo de passo e de meio ângulo de passo e respectivos números de passos por volta.

Tabela 4.6

Relação de valores de ângulo de passo e de meio ângulo de passo e respectivos números de passos por volta.

Motor de passo	Ângulo de passo	Passos por volta	Meio ângulo de passo	Passos por volta
A	0,72°	500	0,36°	1 000
B	1,80°	200	0,90°	400
C	2,00°	180	1,00°	360
D	2,50°	144	1,25°	288
E	5,00°	72	2,50°	144
F	7,50°	48	3,75°	96
G	15,00°	24	7,50°	48

Observando as tabelas 4.2 a 4.5, conclui-se que é possível projetar um circuito de acionamento sequencial de um motor de passo utilizando um dispositivo eletrônico flip-flop JK como contadores síncronos, que são mais apropriados para gerar uma sequência qualquer.

Finalizando, a figura 4.17 mostra a relação entre torque e velocidade em um motor de passo, indicando que a velocidade de rotação depende do tempo entre os passos determinados pelo circuito de acionamento.

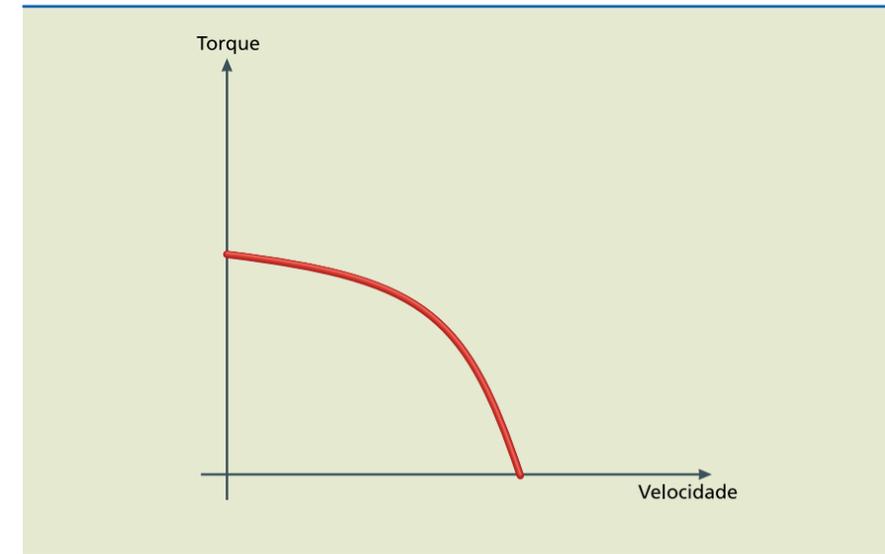


Figura 4.17

Relação entre torque e velocidade de um motor de passo.

Servomotor

É um motor que funciona geralmente por corrente contínua. Ele possui um sensor óptico que assegura que seu posicionamento seja bastante preciso. Entre suas características destacam-se:

- rotação, suave e uniforme em todas as velocidades;
- torque constante;
- baixo nível de ruído e vibração;
- boa capacidade de sobrecarga.

Os servomotores necessitam de um sinal pulsado como entrada de referência, conhecido como PWM (sigla em inglês de *pulse-width modulation* – modulação por largura de pulso). O sensor de posicionamento é um dispositivo eletromecânico usado para verificar movimento ou posição, chamado *encoder*. O *encoder* utiliza sensores ópticos, que fornecem pulsos que podem ser interpretados como movimento, posição ou direção. Em um servomotor, ele é instalado internamente.

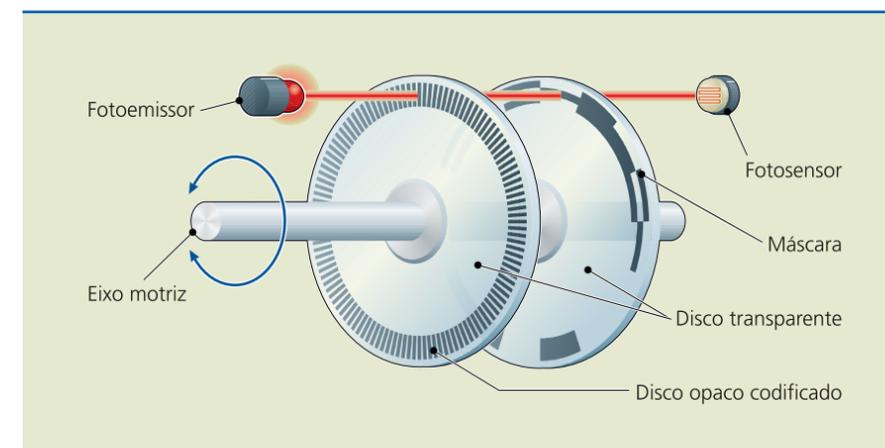


Figura 4.18

Encoder rotativo incremental.

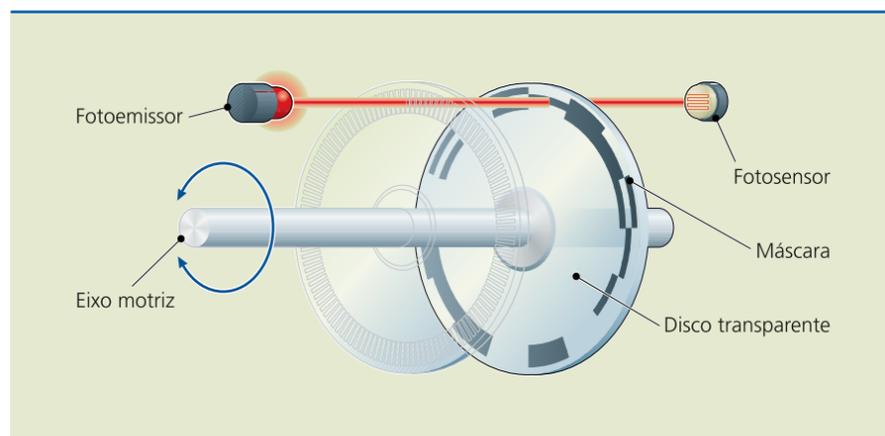


Como mostra a figura 4.18, em um *encoder* rotativo incremental, instala-se no eixo do motor um disco codificado com fendas composto por um elemento emissor de luz e um elemento fotossensível. Um feixe de luz é emitido e, ao atravessar uma das fendas do disco codificado, aciona o elemento fotossensível. Assim, enquanto o motor girar, o disco acompanhará essa rotação. A passagem e a interrupção contínuas do feixe de luz no elemento fotossensível produzirão um sinal elétrico binário conhecido como trem de pulsos. Esse código binário, ao ser inserido em um circuito, informa a posição angular do eixo do motor.

Geralmente, o *encoder* incremental fornece dois pulsos quadrados (dois canais) defasados de 90° . A leitura de um deles fornece apenas a velocidade, enquanto a leitura dos dois fornece também o sentido do movimento. Existe ainda outro sinal, chamado de zero, que informa a posição absoluta “zero” do *encoder*.

Figura 4.19

Encoder rotativo absoluto.



Outro tipo de *encoder* rotativo é o absoluto (figura 4.19). Seu princípio de funcionamento é o mesmo do incremental, porém ele não fornece um trem de pulsos, e sim um valor numérico específico para cada posição angular, pois o disco codificado é dividido em segmentos transparentes e opacos. A principal diferença entre o *encoder* incremental e o absoluto é que no incremental a posição é dada por pulsos a partir do pulso zero (referencial), enquanto no absoluto ela é determinada pela leitura de um código específico para cada posição de seu curso. Esse detalhe evita que os motores de passo com *encoder* absoluto percam a posição real caso aconteça um corte de sinal de alimentação elétrica. Já os motores de passo com *encoder* incremental perdem a posição real na ausência de sinal elétrico.

Outro sensor que pode ser usado em um servomotor é o *resolver* (figura 4.20), geralmente utilizado em robôs e outras aplicações cujas posições devem ser continuamente determinadas. Sua finalidade é medir o ângulo do eixo, informando a posição do rotor do servomotor; ele faz isso por meio da produção de formas de onda defasadas de 90° .

O *resolver* é um transformador de alta frequência, em que o enrolamento primário está localizado no rotor, e os dois enrolamentos secundários, no estator. A

posição do rotor é informada por uma tensão proporcional, gerada por um circuito, que recebe as amplitudes e fases das tensões induzidas nos enrolamentos secundários.

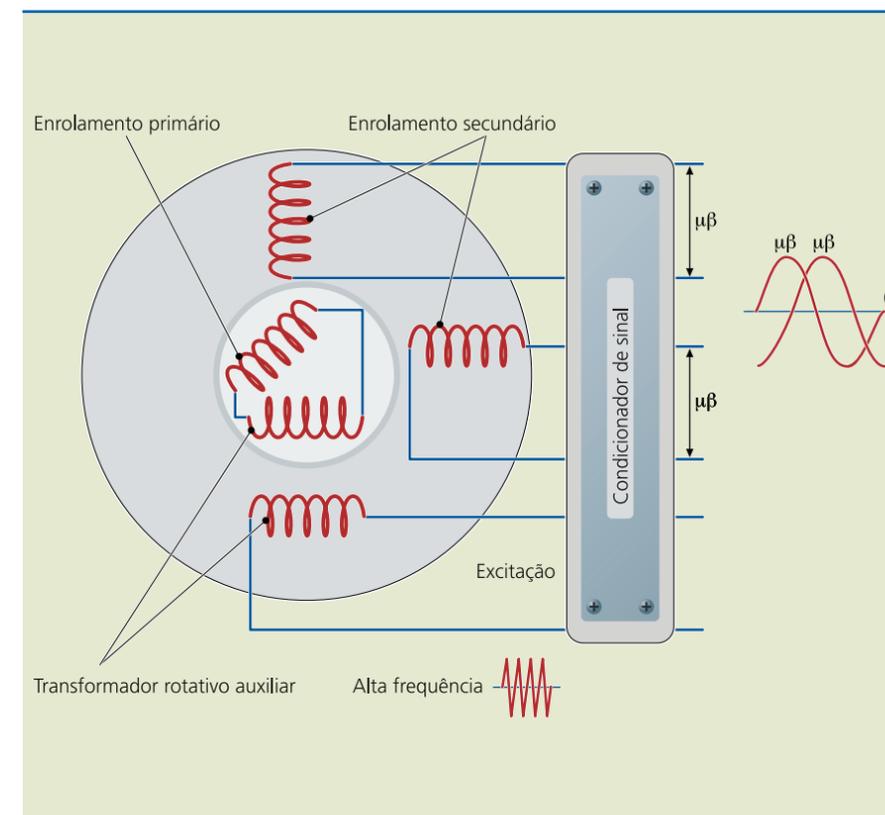


Figura 4.20

Resolver.

Atualmente, com a utilização de materiais magnéticos conhecidos como terras raras (ver na tabela periódica dos elementos químicos), que possuem grande força coerciva e alta retentividade magnética, os servomotores são, na maioria, motores de corrente alternada sem escovas, com ímãs permanentes elaborados com esses materiais.

4.3 Motores de corrente alternada

Na busca de aperfeiçoamento dos motores elétricos de corrente contínua, muitas pesquisas e experimentos foram realizados. Um dos principais resultados foi alcançado por Nikola Tesla, ao desenvolver inventos utilizando a corrente alternada monofásica e, principalmente, trifásica. Graças a esses estudos, passaram a ser produzidas máquinas elétricas mais simples, compactas, leves, com maior durabilidade, melhor rendimento e de fácil manutenção.

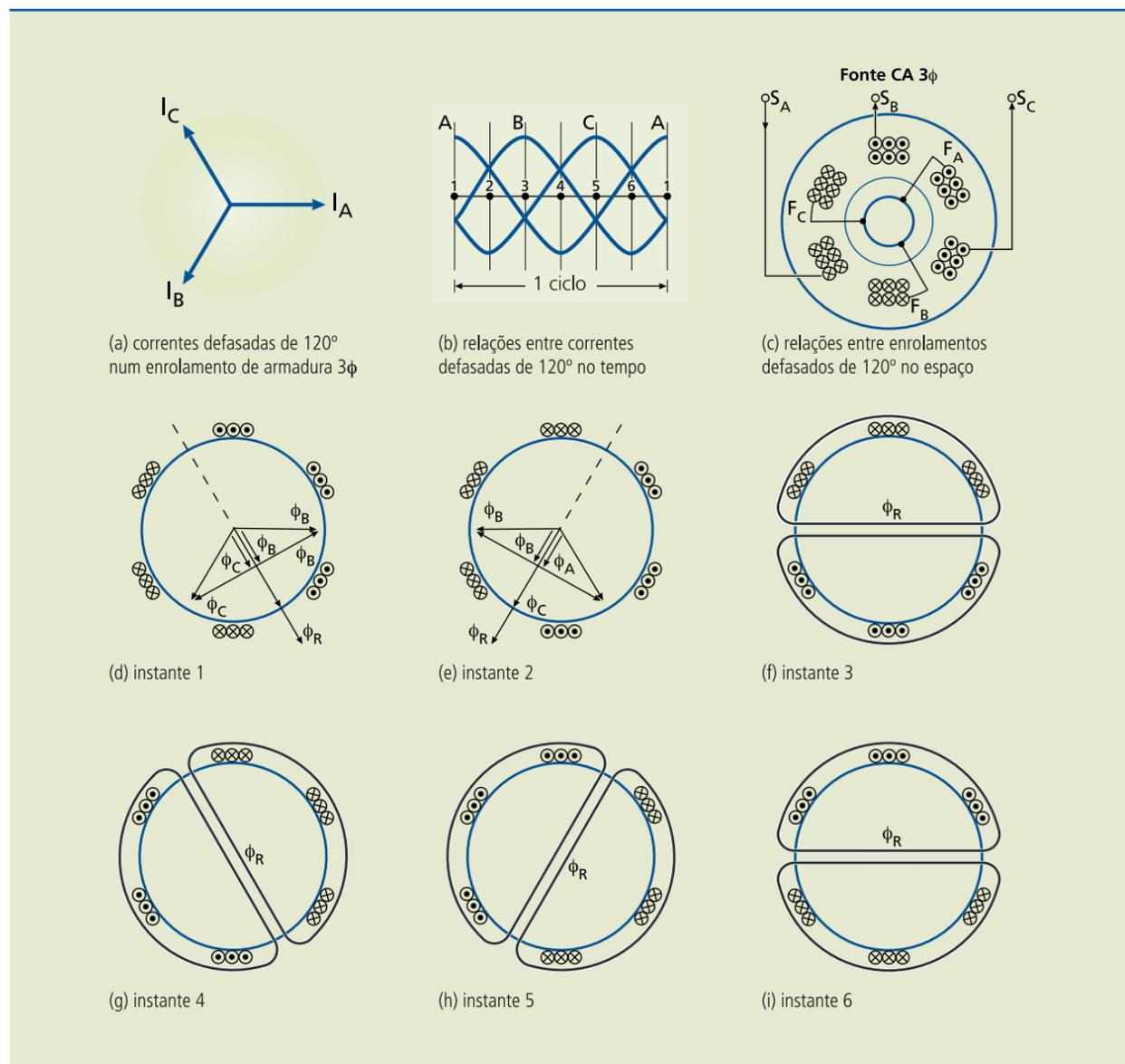
4.4 Motores trifásicos

Com a descoberta do campo magnético girante, foi possível desenvolver máquinas elétricas cujo sistema de alimentação era composto por três fases de mesma intensidade e defasadas de 120° , mais conhecido como sistema trifásico.



Figura 4.21
Princípio do campo magnético girante.

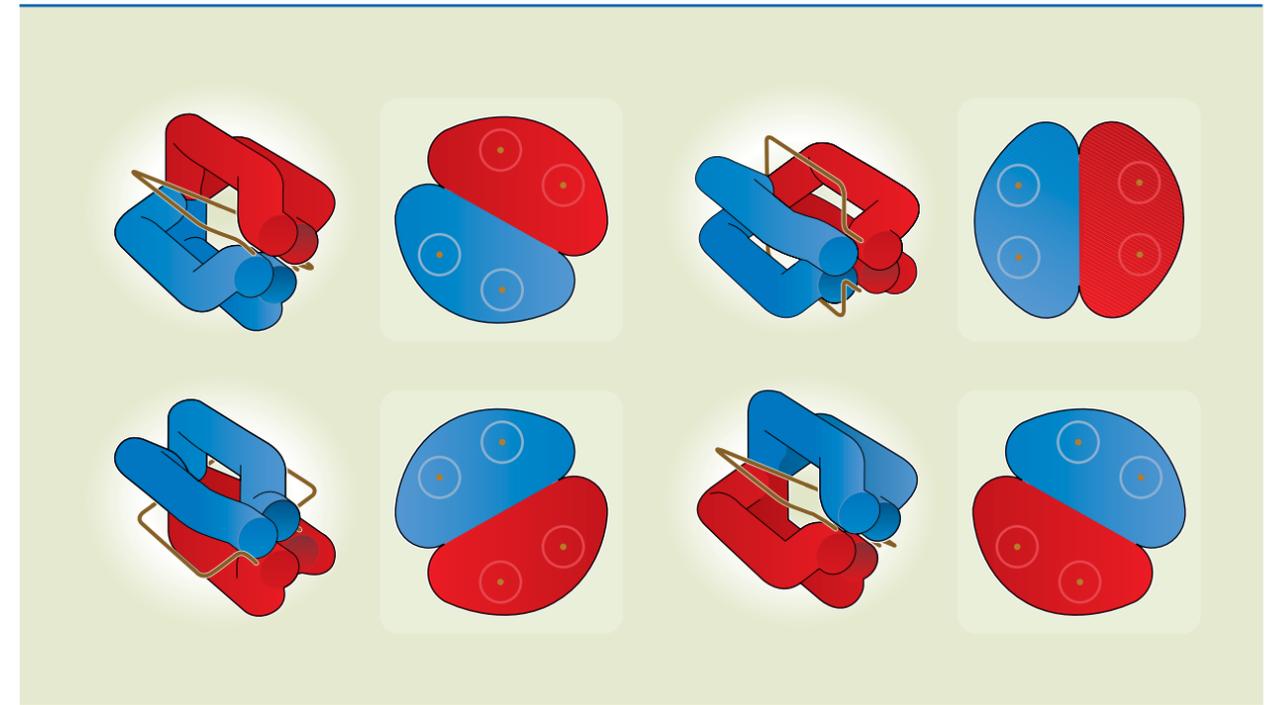
A figura 4.21 apresenta detalhes do posicionamento dos enrolamentos e a defasagem de 120° entre as correntes que circulam em suas bobinas em um campo magnético girante.



Como se observa nas figuras 4.21a e 4.21b, as correntes que serão fornecidas ao motor trifásico são equilibradas (mesma intensidade) e simétricas (defasadas de 120°). A figura 4.21c mostra os enrolamentos do motor trifásico, espaçados fisicamente de 120° . Cada um desses enrolamentos receberá uma corrente elétrica do sistema trifásico. O detalhe é que, como as correntes estão defasadas de 120° e os enrolamentos também, em cada um dos enrolamentos surgirá um campo magnético variável e, se os analisarmos a cada fração de segundo, ou seja, a cada 60° , veremos que sempre dois enrolamentos estarão com campo magnético, e o terceiro não. Nessas condições, olhando com atenção o sentido do fluxo magnético em cada instante, perceberemos que a variação do campo magnético nas

bobinas resulta em um grande campo magnético que “gira” a certa velocidade, denominada síncrona. Assim, como mostra a figura 4.22, quando se inverte o sentido da corrente em dois dos enrolamentos, o campo magnético resultante vai “girar” para o outro lado.

Figura 4.22
Campo magnético girante.



A ABNT estabelece as seguintes normas básicas para os fabricantes de motores:

- NBR 5383 – Prescreve como determinar as características das máquinas de indução.
- NBR 5432 – Define a padronização para os motores de indução.
- NBR 7094 – Fixa as especificações dos motores de indução.

De acordo com a NBR 5410, os motores de aplicação normal acionam cargas industriais de até 200 cv. No setor residencial ou comercial, a aplicação normal pode considerar motores de até 2 cv.

Além das normas brasileiras, as normas de instituições como DIN, NEMA e IEC também podem ser aplicadas, dependendo da finalidade de uso.

4.5 Motores assíncronos

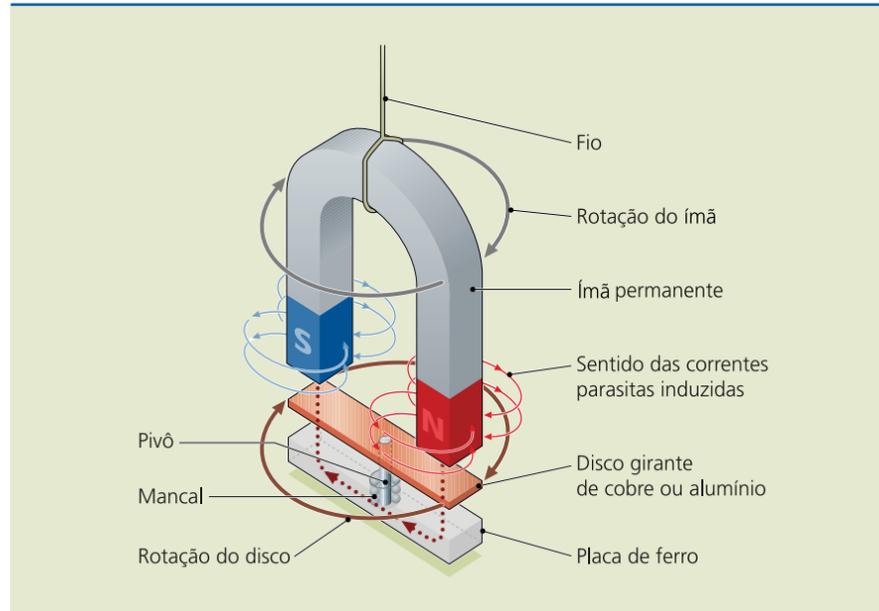
Se o rotor for inserido no meio de um campo magnético girante, ele será induzido por causa da variação de fluxo magnético; um campo magnético se manifestará no rotor, fazendo-o girar ao tentar acompanhar o campo do estator. Os motores que funcionam segundo o princípio da indução são classificados como motores assíncronos, pois o rotor gira a uma velocidade menor do que a síncrona.



4.5.1 Princípio de funcionamento

O motor assíncrono funciona por indução pelo campo magnético girante. Vamos fazer uma analogia para compreender melhor a diferença entre as velocidades síncrona e assíncrona.

Figura 4.23
Princípio do motor de indução.



A figura 4.23 apresenta uma montagem que explica o princípio do motor de indução. Um ímã em forma de ferradura está suspenso por um fio sobre um disco de cobre ou alumínio, que, por sua vez, está sobre uma placa de ferro. A função dessa placa é fechar o circuito magnético, completando o percurso do fluxo magnético proveniente do ímã permanente. A função do mancal e do pivô é garantir que o disco possa girar livremente.

Se o ímã começar a girar, seu campo magnético também vai girar. Essa movimentação induzirá no disco correntes parasitas (fenômeno de ação geradora), que produzem um campo magnético induzido que se opõe ao movimento do ímã (lei de Lenz). Pode-se dizer que o campo magnético das correntes parasitas produz um polo sul no disco, próximo ao polo norte do ímã, e um polo norte no disco próximo ao polo sul do ímã. Com isso, é estabelecida uma atração entre o disco e o ímã. Como o ímã está em movimento, o disco também entra em movimento (ação motora), tentando acompanhar a rotação do ímã permanente. No entanto, o disco não se movimenta com a mesma velocidade do ímã, pois, se isso acontecesse, seria como se o disco estivesse parado em relação ao ímã, não formando correntes parasitas nem o torque no disco.

A velocidade síncrona de um motor de indução em rpm é:

$$N_s = \frac{120 \times f}{p} \quad (4.1)$$

em que:

- f é a frequência do motor, cuja unidade é o hertz (Hz);
- p , o número de polos do motor.

A diferença entre as velocidades síncrona e assíncrona chama-se escorregamento, dado por:

$$s = \frac{(N_s - N_r) \cdot 100}{N_s} \quad (4.2)$$

em que N_r é a velocidade assíncrona (do rotor) em rpm.

4.5.2 Componentes de um motor de indução

A figura 4.24 mostra um motor TFVE e suas partes internas. A sigla TFVE designa motores elétricos totalmente fechados, com a ventilação fornecida externamente.

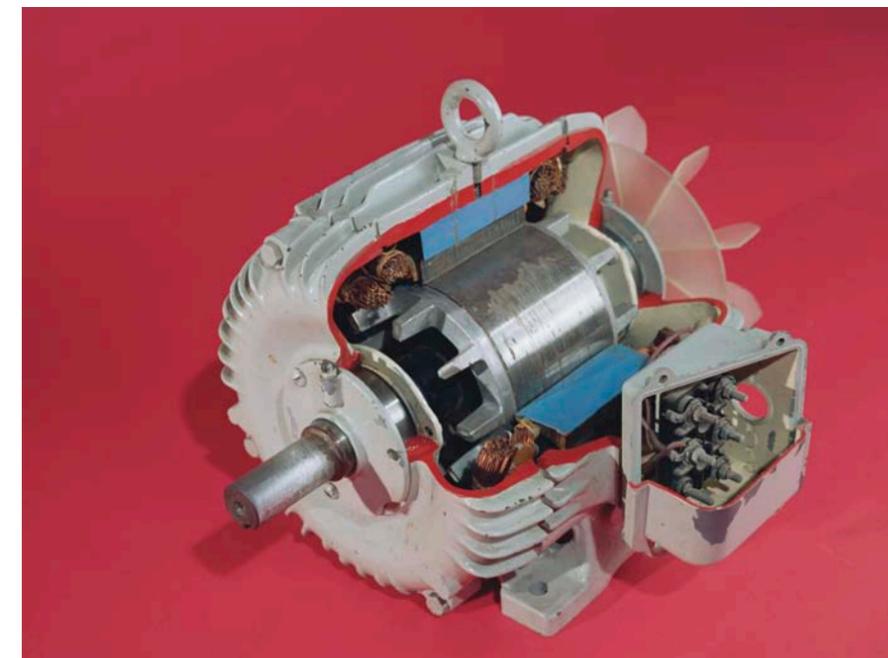


Figura 4.24
Interior de um motor de indução.

Os principais componentes desse motor são:

- Tampa defletora

Possui ranhuras que permitem a passagem do ar que vem do ventilador. Também evita que agentes externos como poeiras e outros corpos entrem em contato com o ventilador e com demais partes internas do motor.



- Ventilador

Está acoplado ao eixo rotor; sua função é refrigerar as partes internas do motor.

- Tampas dianteira e traseira

Servem para vedar o motor e para assentar o rolamento de sustentação dianteiro do eixo do motor.

- Caixa de ligação

Armazena os fios da alimentação elétrica dos terminais do enrolamento do estator. Pode ser montada na lateral – para motores com carcaça de ferro fundido – ou na parte superior do motor – para motores com carcaça de alumínio injetado. Dependendo do número de polos e da tensão desejada (220, 380 ou 440 V), os motores de indução podem possuir três, seis, nove ou doze terminais.

- Carcaça aletada

O invólucro do motor protege e veda o elemento estrutural, para receber o calor produzido internamente. As aletas auxiliam na dissipação do calor, uma vez que estão em contato com a tampa defletora.

- Núcleo do estator

Concentra e fornece o caminho para o fluxo magnético. Por ser laminado, diminui as perdas por correntes parasitas. Não é diferente no caso do enrolamento do estator, em que o núcleo é feito de lâminas de aço.

- Enrolamento do estator

Gera o campo magnético rotativo, ao receber, por exemplo, corrente elétrica trifásica. Os grupos de bobinas são isolados eletricamente e separados fisicamente em 120° um dos outros. Os motores TFVE podem ser fabricados com dois, quatro, seis ou oito polos.

- Rotor

Faz parte do núcleo do motor trifásico. Diferentemente do enrolamento do estator, que é composto por grupos de bobinas, o enrolamento do rotor (conhecido como gaiola) é constituído por barras de cobre ou alumínio, sem conexão elétrica com o meio externo. Nesse modelo de rotor, cada par de barras opostas forma uma única espira de uma bobina. O conjunto de barras é fundido no rotor de aço laminado, e elas são curto-circuitadas em suas extremidades por anéis aletados. O campo magnético girante proveniente do enrolamento do estator induz tensão elétrica no rotor, fazendo com que uma corrente induzida de curto-circuito circule pelas barras. Assim, manifesta-se um campo magnético que, ao tentar acompanhar a rotação do campo girante, leva o rotor a girar.

Existe outro tipo de rotor cujo enrolamento é semelhante ao do estator, conhecido como rotor bobinado. O acesso a esse enrolamento se dá por três terminais em contato com escovas fixas presentes em três anéis solidários ao eixo do motor.

4.5.3 Circuito equivalente de um motor de indução

No capítulo 1, na seção referente a transformadores, foi utilizado um circuito elétrico equivalente para verificar como o transformador se comporta em situações extremas (ensaio a vazio e em curto), a fim de determinar as perdas no ferro (perdas magnéticas) e as perdas no cobre (efeito Joule), para saber qual é o rendimento de um transformador real.

Em um motor de indução por circuito equivalente, é possível verificar parâmetros como corrente no estator, conjugado, potência mecânica etc. por meio de variações de carga, frequência e tensão. Como os enrolamentos trifásicos do motor são semelhantes, eles podem ser considerados uma carga trifásica equilibrada, bastando, então, analisar uma das fases do motor, considerando o rotor bloqueado, conforme a figura 4.25, em que:

- U_1 é a tensão aplicada por fase ao estator (V);
- R_1 , a resistência do enrolamento por fase do estator (Ω);
- XL_1 , a reatância indutiva por fase devido à dispersão do fluxo no estator (H);
- e_1 , a tensão induzida por fase no estator (V);
- I_1 , a corrente por fase no estator (A);
- e_2 , a tensão induzida por fase no rotor (V);
- R_2 , a resistência por fase do rotor (Ω);
- XL_{2r} , a reatância indutiva por fase devido à dispersão do fluxo do rotor (H);
- $\left[\frac{R_2}{s} \right]$ é a carga de caráter resistivo que varia com o escorregamento (Ω);
- I_2 é a corrente por fase no rotor (A).

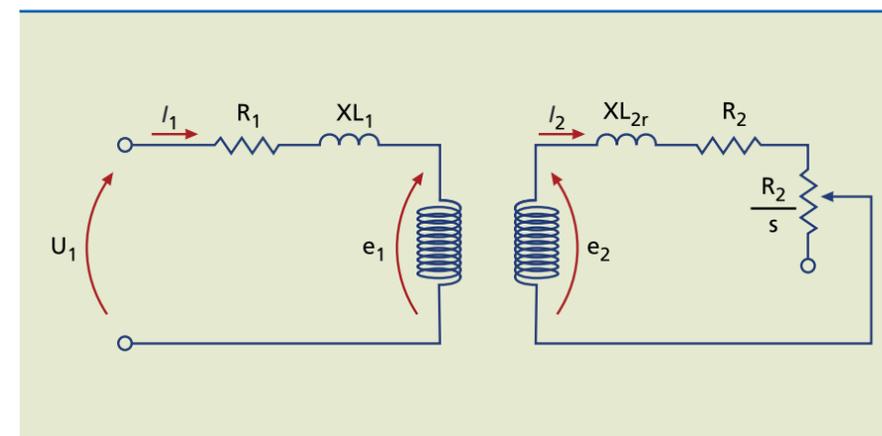


Figura 4.25

Circuito equivalente de uma das fases do motor.

Pelo desenho do circuito equivalente apresentado na figura 4.25, nota-se que o estator está sendo comparado ao primário de um transformador, enquanto o



rotor é o secundário. Assim, a corrente I_2 pode ser determinada pelas seguintes expressões:

$$I_2 = \frac{s \cdot e_2}{\sqrt{R_2^2 + (s \cdot XL_{2r})^2}} \text{ ou } I_2 = \frac{e_2}{\sqrt{\left(\frac{R_2}{s}\right)^2 + XL_{2r}^2}} \quad (4.3)$$

Analisando essas equações, é possível observar que a tensão induzida e a reatância indutiva do rotor variam de acordo com o escorregamento. Se o rotor girasse na velocidade síncrona, o escorregamento seria igual a zero; se o rotor estivesse bloqueado, seria igual a um. Na prática, o escorregamento dos motores de indução está entre 1% e 8%.

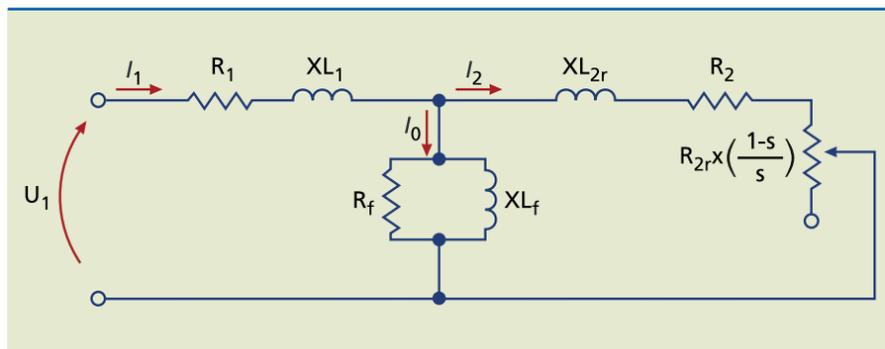
A frequência do rotor (f_2) vale:

$$f_2 = s \cdot f_1 \quad (4.4)$$

em que f_1 é a frequência do estator.

Os parâmetros do rotor podem ser refletidos no estator, como mostra a figura 4.26, em que:

Figura 4.26
Circuito equivalente refletido no estator de uma das fases do motor.



- R_f são as perdas no ferro (Ω);
- XL_f , as perdas referentes à magnetização (H);
- R_{2r} , as perdas por efeito Joule do rotor (Ω);
- I_0 é a corrente a vazio do motor (A);
- o produto $\left[R_{2r} \cdot \left(\frac{1-s}{s} \right) \right]$ representa as perdas mecânicas do rotor.

As perdas mecânicas ocorrem nos rolamentos do rotor e no sistema de ventilação. Então, a potência desenvolvida na carga, que varia com o escorregamento, vale:

$$\frac{R_{2r}}{s} = R_{2r} + R_{2r} \cdot \left(\frac{1-s}{s} \right) \quad (4.5)$$

Para efetuar uma análise do motor de indução em duas situações extremas (a vazio e rotor bloqueado), o circuito equivalente pode ser simplificado conforme a figura 4.27, em que:

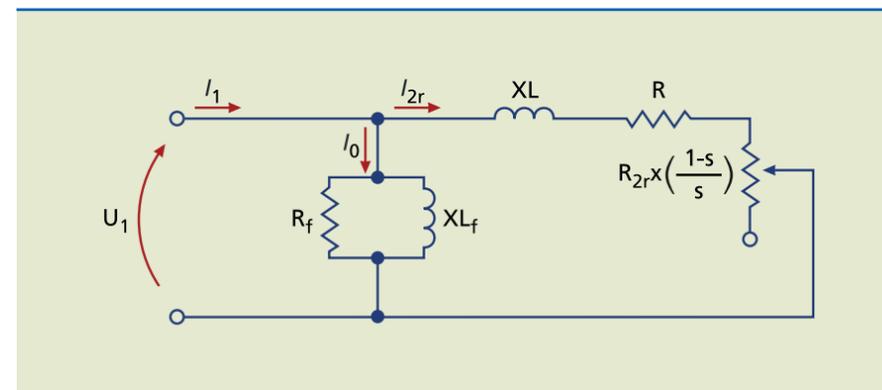


Figura 4.27
Circuito equivalente simplificado de uma das fases do motor.

em que:

- R é a resistência global do motor (Ω);
- XL a reatância de dispersão global do motor (H).

Os parâmetros citados (resistência global do motor e reatância de dispersão global do motor) são assim calculados:

$$R = R_1 + R_{2r} \text{ e } XL = XL_1 + XL_{2r} \quad (4.6)$$

Um ensaio a vazio de um motor, em que se aplica sua tensão nominal, significa que não há carga mecânica sobre o eixo. O escorregamento tenderia a zero e os valores das impedâncias R e XL seriam tão altos que tenderiam a um circuito aberto. Assim, com aparelhos de medição elétrica, mediríamos a tensão, a corrente, as potências ativa e reativa desenvolvidas, determinando:

$$R_f = \frac{U_1^2}{P_v} \text{ e } XL_f = \frac{U_1^2}{Q_v} \quad (4.7)$$

em que:

- P_v é a potência ativa medida a vazio (W);
- Q_v é a potência reativa medida a vazio (Var).

Vale salientar que, nesse caso, R_f representaria todas as perdas no ferro, inclusive as perdas mecânicas relativas à ventilação e ao atrito do rolamento, e XL_f , todo o efeito de magnetização do núcleo do motor.

Um ensaio com rotor bloqueado, em que está circulando a corrente nominal do motor, significa que o eixo não gira. O escorregamento tenderia a um e os valores das impedâncias R e XL seriam menores do que os do eixo central. Nesse



caso, as perdas no ferro e as da magnetização seriam desprezíveis, e as geradas pela rotação não existiriam, uma vez que o eixo está bloqueado. Assim:

$$R = \frac{P_B}{I_1^2} \text{ e } XL = \frac{Q_B}{I_1^2} \quad (4.8)$$

em que:

- P_B é a potência ativa medida com rotor bloqueado (W);
- Q_B , a potência reativa medida com rotor bloqueado (Var).

Vale salientar ainda a determinação de R_{2r} :

$$R_{2r} = R - R_1 \quad (4.9)$$

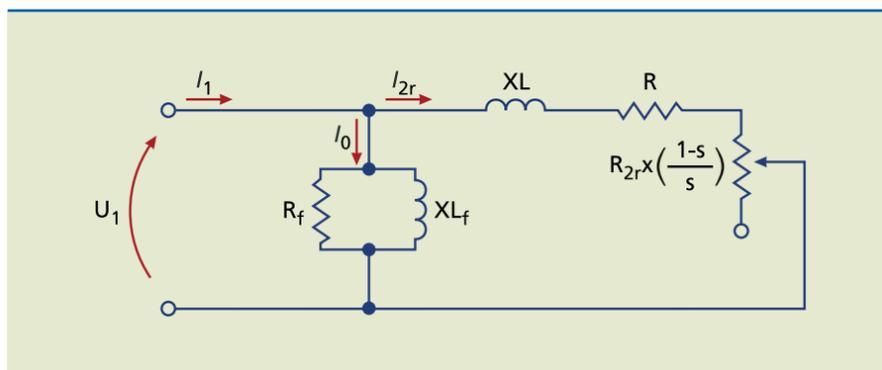
4.5.4 Perdas e rendimento

As perdas em um motor de indução já foram demonstradas na seção anterior.

Voltando ao circuito equivalente do motor, podemos efetuar deduções mostradas na figura 4.28.

Figura 4.28

Circuito equivalente aproximado.



$$I_1 = I_0 + I_{2r} \quad (4.10)$$

considerando que:

$$I_0 = \frac{U_1}{R_f} - j \frac{U_1}{XL_f} \text{ e } I_{2r} = \frac{U_1}{\sqrt{\left[R + R_{2r} \cdot \left(\frac{1-s}{s} \right) \right]^2 + XL^2}}$$

Como a análise é feita por fase, as potências totais desenvolvidas, que dependem dos valores de linha, são:

$$P = 3 \cdot U_1 \cdot I_1 \cdot \cos \varphi \text{ e } P_M = C \cdot \omega \quad (4.11)$$

em que:

- P é a potência elétrica útil total (W);
- $\cos \varphi$, o fator de potência do motor;
- C é o conjugado (torque) do motor (Nm);
- ω é a velocidade angular da rotação (rad/s).

O rendimento de um motor é determinado por meio da relação entre a potência mecânica que ele fornece e a potência elétrica que consome:

$$\eta = \frac{P_M}{P} \quad (4.12)$$

4.5.5 Curva característica de um motor de indução

Lembrando que o produto $\left[R_{2r} \cdot \left(\frac{1-s}{s} \right) \right]$ representa as perdas mecânicas do

rotor, temos que $P_M = 3 \cdot R_{2r} \cdot \left(\frac{1-s}{s} \right) \cdot I_{2r}^2$.

Como a velocidade angular do rotor em relação à velocidade síncrona angular vale $\omega = \omega_s \cdot (1 - s)$, o conjugado do motor pode ser calculado da seguinte maneira:

$$C = \frac{3 \cdot R_{2r} \cdot I_{2r}^2}{\omega_s \cdot s} \quad (4.13)$$

O conjugado é um parâmetro muito importante, utilizado para analisar o comportamento do motor de indução, como podemos observar no gráfico da figura 4.29.

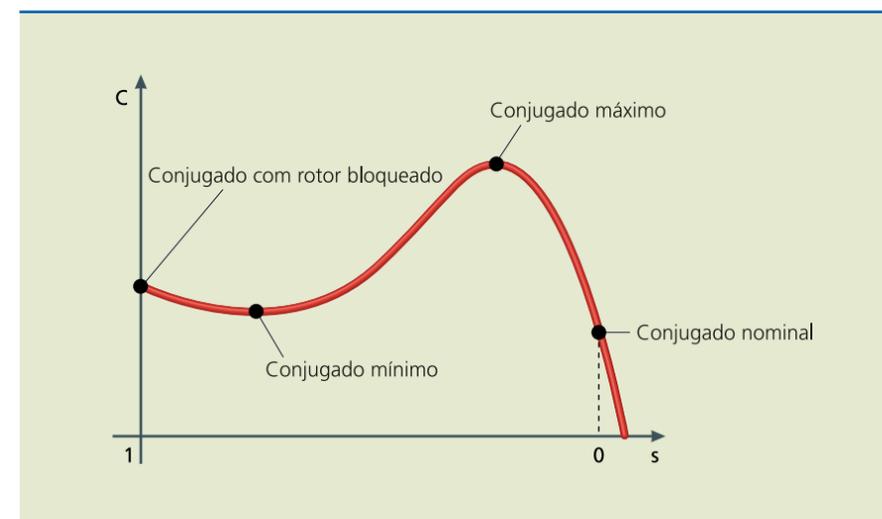


Figura 4.29

Curva conjugado · escorregamento com terminologia da NBR 7094.



O conjugado de partida ou com rotor bloqueado é o valor mínimo de torque que o motor desenvolverá em condição de repouso, considerando que a tensão e a frequência aplicadas são as nominais. O conjugado mínimo é o menor valor de torque que o motor desenvolverá durante o repouso até a rotação em que o torque máximo acontece. Já o conjugado máximo é o maior valor de torque que o motor desenvolverá, desde que a tensão e a frequência aplicadas sejam nominais e que não exista queda acentuada na rotação. Finalmente, o conjugado nominal é o torque necessário para produzir a potência nominal à rotação nominal. Na unidade do Sistema Internacional (em Nm), o conjugado nominal vale:

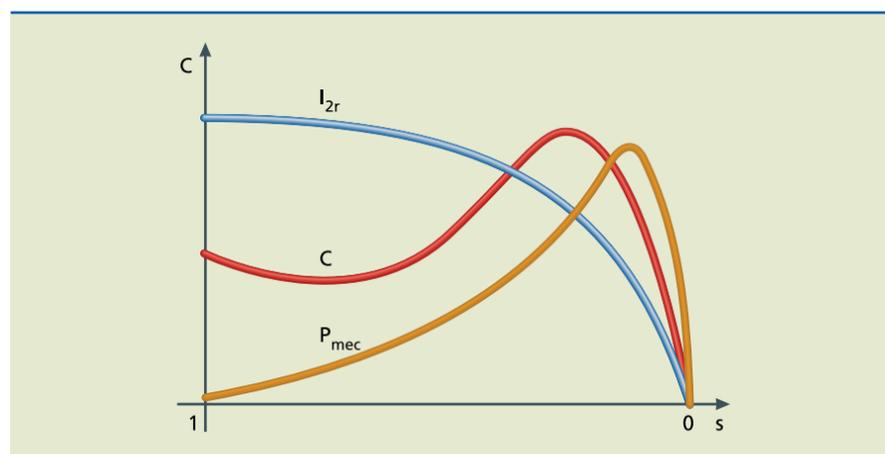
$$C = \frac{P \cdot 7022}{N_r} \quad (4.14)$$

em que:

- P é a potência desenvolvida no motor, em cavalo-vapor (CV);
- N_r é a rotação do rotor (nominal), em rpm.

A corrente refletida I_{2r} e a potência mecânica também podem ser representadas graficamente (figura 4.30).

Figura 4.30
Curva conjugado, corrente e potência mecânica • escorregamento.



Vale salientar que, nas análises anteriores, a tensão e a frequência do motor foram consideradas constantes; dessa maneira, o conjugado do motor é uma função quadrática da tensão elétrica.

A NBR 7094 estabelece basicamente três tipos de motores, de acordo com os valores necessários de torque, escorregamento e corrente de partida:

Categoria D – Possuem torque e escorregamento altos na partida, porém com corrente de intensidade normal. São utilizados em aplicações em que existem picos de cargas, como prensas, e torques elevados com limite de corrente, como elevadores.

Categoria H – Possuem torque alto na partida, porém com corrente normal e baixo escorregamento. São utilizados em aplicações em que se necessita de torques elevados de partida, como transportadoras e britadeiras.

Categoria N – Possuem torque nominal na partida, com corrente também nominal e baixo escorregamento. São os mais utilizados em acionamento de ventiladores, máquinas universais, bombas hidráulicas etc.

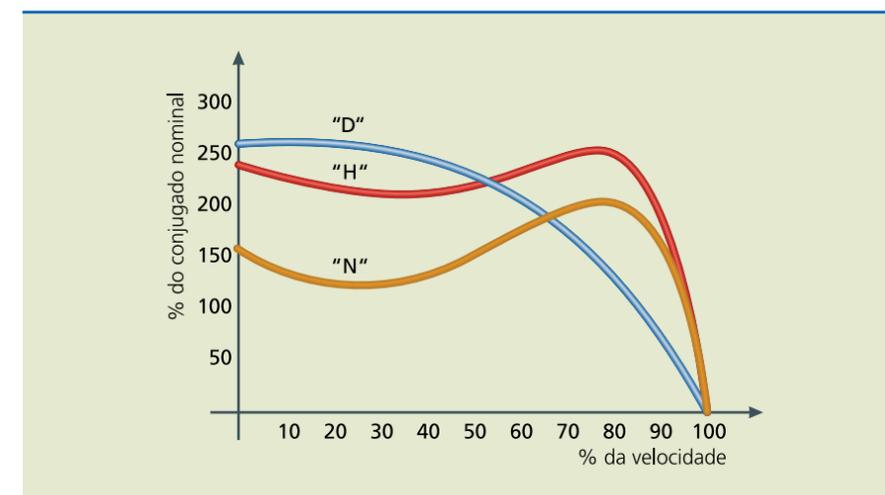


Figura 4.31
Curva conjugado • escorregamento das categorias D, H e N.

Além das normas nacionais da ABNT, a classificação dos motores trifásicos pode seguir normas internacionais, especialmente a National Electrical Manufacturer's Association (NEMA), cujas categorias são indicadas a seguir, com as correspondentes curvas conjugado • escorregamento representados na figura 4.32.

Categoria A – É um motor de indução normal para uso em velocidade constante; possui um conjugado médio, com corrente de partida alta. Não é recomendado para partida direta de motores de potência elevada.

Categoria B – É um motor de utilização geral, pois tem as características da categoria A, mas com a vantagem de possuir corrente de partida menor. É usado em motores de potência mais elevada.

Categoria C – É um motor que possui o dobro do conjugado das categorias anteriores, acelerando rapidamente. No entanto, sob condições de partidas sucessivas, ele tende a se aquecer em demasia. É recomendado para cargas instantâneas elevadas com pouca inércia.

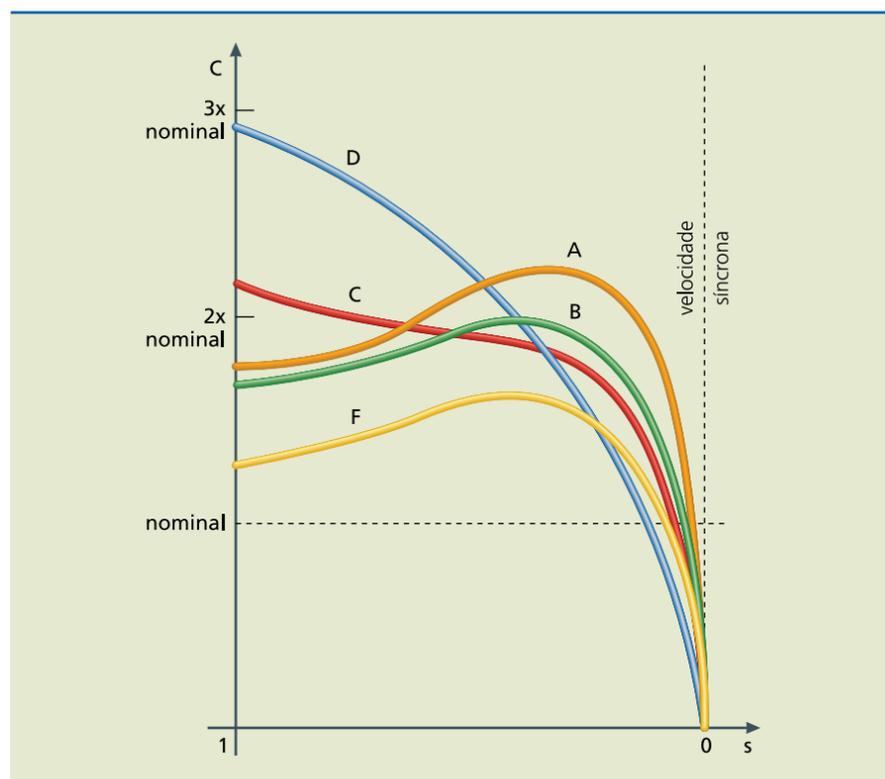
Categoria D – É um motor de alto conjugado, projetado para partidas mais pesadas, mas não frequentes, como uma guilhotina.

Categoria F – É um motor de baixo conjugado e possui baixa corrente de partida, em comparação com as categorias anteriores. Apesar de possuir baixa regulação de velocidade, baixa capacidade de sobrecarga e baixo rendimento, pode substituir os motores da categoria B, principalmente em potências elevadas.



Figura 4.32

Curva conjugado · escorregamento das categorias A, B, C, D e F para a norma NEMA.



Além dos parâmetros discutidos nos parágrafos anteriores, devemos conhecer também mais três parâmetros importantes sobre os motores elétricos: a corrente de partida, a classe de isolamento e o fator de serviço.

A corrente de partida pode ser compreendida como a situação em que o motor sai da condição de repouso ou ainda se encontra com o rotor bloqueado e há uma elevação da corrente elétrica, na ordem de cinco a seis vezes seu valor nominal. Essa é a corrente de partida.

A classe de isolamento diz respeito à temperatura de trabalho que os enrolamentos do motor podem suportar sem comprometer sua vida útil. A NBR 7034 estabelece cinco classes de isolamento – A, E, B, F e H, dentre as quais as mais utilizadas para motores normais são as classes B e F –, definidas pela temperatura máxima que o material pode suportar continuamente, sem que afete sua vida útil:

- Classe A, que suporta até 105 °C.
- Classe E, que suporta até 120 °C.
- Classe B, que suporta até 130 °C.
- Classe F, que suporta até 155 °C.
- Classe H, que suporta até 180 °C.

O fator de serviço (FS) é um indicador que, em situações desfavoráveis, mostra qual é a sobrecarga máxima aplicada continuamente que um motor pode suportar, sem prejuízo do isolamento do motor. Esse valor, que nos motores normais

vai de 1,0 a 1,25 (ou seja, aumento máximo de até 25%), deve ser multiplicado pela potência nominal.

Os motores elétricos trifásicos devem possuir dispositivos de proteção para evitar falhas na operação. Esses dispositivos protegem o motor de:

- sobretensões, que poderiam prejudicar o isolamento do enrolamento, causando curtos-circuitos;
- subtensões, pois, à medida que a tensão diminui, a corrente aumenta, ocasionando a queima dos enrolamentos;
- desbalanceamento de tensão (quando as tensões não possuem mais o mesmo valor), pois um desbalanceamento de 5% proporciona aumento de 25% em sobrecarga, o que se traduz em elevação da corrente elétrica;
- falta de fase, pois, quando uma das correntes trifásicas deixa de circular no motor, as outras praticamente dobram de valor.

4.6 Motores monofásicos

Os motores monofásicos são utilizados em instalações industriais e residenciais, onde existe apenas uma alimentação elétrica alternada monofásica. Eles são classificados em motor comutador, de indução e síncrono.

4.6.1 Motor comutador

Possui o rotor bobinado, equipado com comutador e escovas. Existem dois tipos de motor comutador: o motor de repulsão e o motor série.

No motor de repulsão (figura 4.33) as escovas estão curto-circuitadas. Dessa maneira, por ação da indução eletromagnética, o campo do estator produz uma corrente no enrolamento do rotor, que, por sua vez, gera um campo magnético cujos polos dependem da posição das escovas. A interação dos campos provoca a manifestação da força magnética, fazendo o rotor girar.

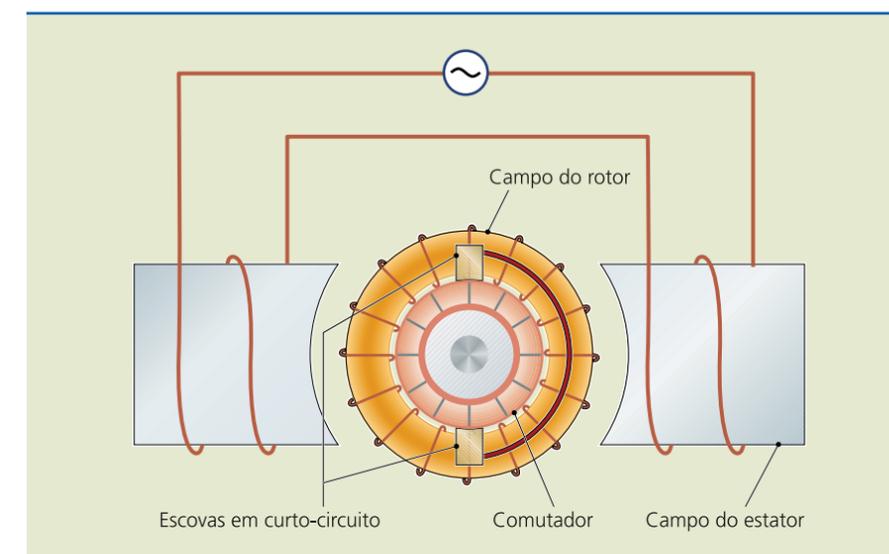


Figura 4.33
Motor de repulsão.



Como esse tipo de motor possui elevado conjugado de partida e altas velocidades com cargas leves, é utilizado em aplicações com partida com carga pesada.

Os motores série CA são parecidos com os CC, porém apresentam comportamento diferenciado. Por exemplo, se um motor série CC fosse ligado em uma fonte CA, haveria grande faiscamento nas escovas e baixo consumo de corrente, por causa da alta impedância do enrolamento em série, além de redução do rendimento e queda do fator de potência.

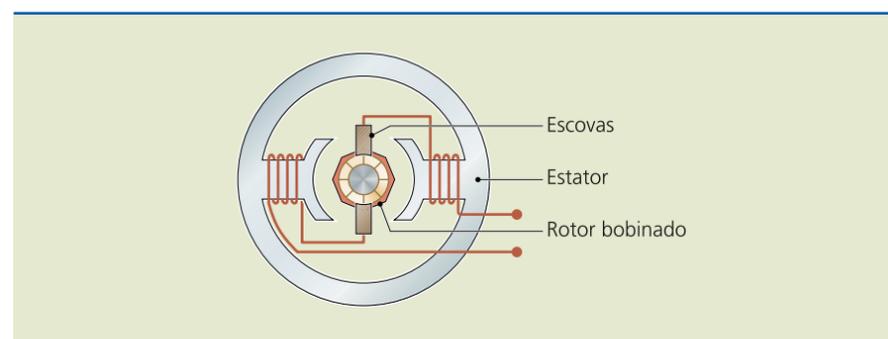
Para ligar um motor série CC em uma fonte CA, seriam necessárias algumas modificações:

- Construção do campo série com o menor número possível de espiras, para reduzir as perdas magnéticas.
- Acréscimo de uma resistência em série com as ligações do rotor ao comutador, para reduzir a corrente e, conseqüentemente, o faiscamento das escovas.
- Utilização de enrolamentos compensadores, para reduzir a reação do rotor por causa do aumento do número de condutores, realizado para compensar a diminuição de fluxo magnético.

Os motores série CA possuem alta eficiência em aplicações que tenham baixa frequência, principalmente em locomotivas elétricas, guindastes e elevadores.

Outro tipo de motor comutador é o universal (figura 4.34). Trata-se de um motor CC do tipo série, com o estator e o rotor feitos de chapas laminadas para operar em CA, a fim de reduzir as perdas magnéticas. Por apresentar tais características, esse motor pode funcionar tanto em corrente contínua como em corrente alternada.

Figura 4.34
Motor série.



4.6.2 Motor de indução

O motor de indução monofásico não possui o campo magnético girante característico do motor trifásico; assim, ele não possui torque de partida. A explicação para sua partida é que, ao aplicar uma tensão alternada no estator, surge um campo magnético estacionário (não gira) que inverte de sentido

continuamente. A inversão do campo no estator induz uma tensão no rotor, que se alinha com o campo do estator, porém sem conjugado de partida. Desse modo, é necessário um dispositivo auxiliar de partida para que a força magnética gerada entre os campos do estator e do rotor inicie a rotação e mantenha sua velocidade constante.

O motor de fase dividida baseia-se em um princípio simples, que pode ser explicado da seguinte maneira: ao aplicarmos uma alimentação monofásica CA em dois enrolamentos em paralelo, porém defasados de 90°, denominados principal e de partida, o campo magnético que se estabelece produz um conjugado de partida suficiente para fazer o rotor se movimentar. Esse tipo de motor é utilizado em máquinas com torque baixo, como máquinas de lavar roupa.

Quando, no motor de fase dividida, colocamos um capacitor em série com o enrolamento de partida, a defasagem entre a tensão de alimentação e a corrente do enrolamento de partida é alterada, podendo chegar próximo de 90°, resultando em uma elevação do torque. Esse tipo de motor é denominado motor com capacitor de partida.

Além do princípio da fase dividida, existe outro princípio de partida, chamado de polo sombreado, fendido ou ranhurado (figura 4.35). Nessa configuração, uma bobina curto-circuitada, denominada bobina de sombreadamento, é instalada em torno de uma parte de cada polo ou ranhura do motor.

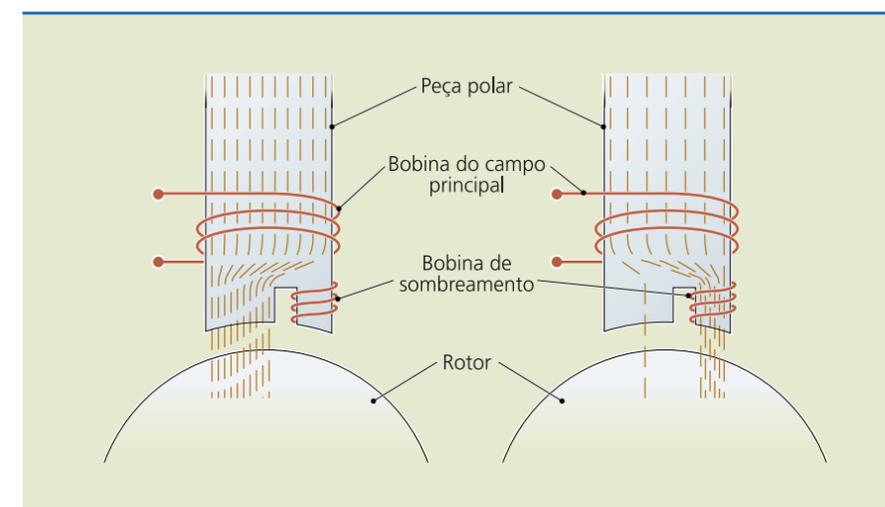


Figura 4.35
Comportamento do campo magnético em um motor de polo ranhurado.

Nessas condições, quando a intensidade do campo principal aumenta, uma corrente induzida se estabelece na bobina curto-circuitada, cujo campo se opõe (lei de Lenz) ao campo principal, fazendo com que este se concentre no lado oposto. Quando o campo principal diminui de intensidade, o campo da bobina sombreada também diminui, unindo-se ao campo principal, pois o sentido do campo da bobina curto-circuitada também inverte (lei de Lenz). A bobina de sombreadamento sofre pequeno desvio em relação ao campo principal, fazendo com que um pequeno conjugado de partida se manifeste. Esse método de partida é utilizado em motores como pequenos ventiladores, máquinas de cortar frios e relógios.



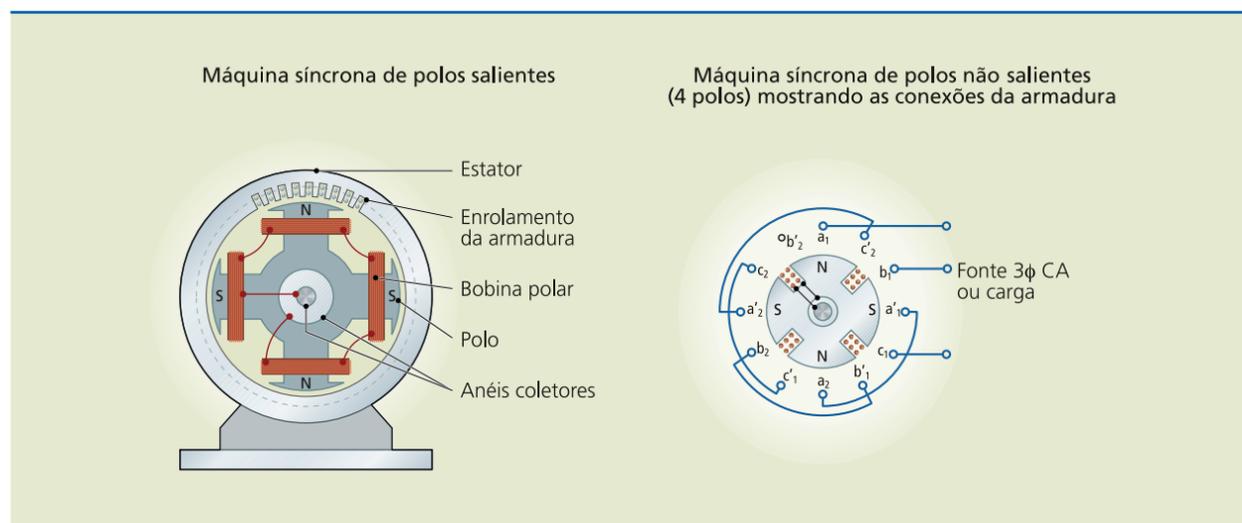
Há também o motor de indução com partida por repulsão, que possui os enrolamentos conectados a um comutador em contato direto com as escovas de partida. Na partida, esse motor se comporta como um motor de repulsão, porém, quando a velocidade do rotor se aproxima da máxima, um dispositivo curto-circuita os segmentos do comutador, fazendo com que ele se comporte como motor de indução.

4.6.3 Motor síncrono

O motor síncrono CA é um motor de velocidade constante que pode ser utilizado na correção de fator de potência, além de fornecer torque à carga que ele mesmo aciona (figura 4.36). Seu rendimento é maior, comparado aos motores de indução de mesma potência.

Figura 4.36

Máquina síncrona de campo móvel.



Esse motor entra em funcionamento quando o enrolamento de campo recebe tensão elétrica contínua por meio de dois anéis coletores e o enrolamento da armadura está conectado à rede trifásica ou a uma carga. O enrolamento de campo pode ser ligado a uma fonte de tensão alternada, monofásica ou trifásica, porém funcionará como motor síncrono, cujo rotor girará na mesma velocidade do estator, ou seja, em velocidade síncrona.

O motor síncrono não possui conjugado de partida, devendo ser acelerado por um meio externo e então conectado à linha. Ele apresenta uma característica própria relacionada à estabilização do sincronismo, que pode ser observada quando se eleva a intensidade da corrente de campo e uma corrente sincronizante instantânea se estabelece, produzindo uma potência sincronizante. Essa potência sincronizante faz com que máquinas que fornecem potência se atrasem até a potência de sincronismo e máquinas que consomem potência se adiantem até o sincronismo. Como uma máquina de natureza CA não possui velocidade constante em um ciclo de rotação, a condição descrita não se estabiliza; ao contrário, essa oscilação periódica continua a aumentar – é como se a máquina estivesse tentando alcançar a velocidade síncrona estável e não conseguisse.

Para eliminar a busca de sincronismo e possibilitar um conjugado de partida, os polos do rotor possuem barras curto-circuitadas em cada extremidade por meio de anéis, conhecidas como enrolamentos amortecedores (figura 4.37).

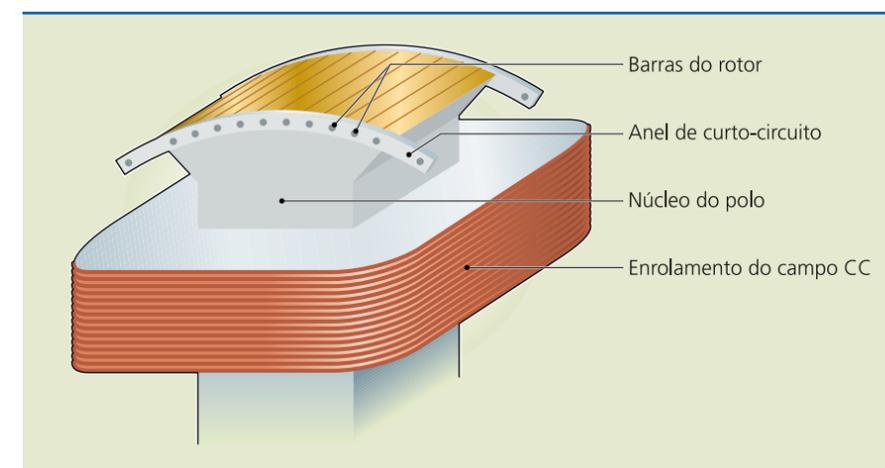


Figura 4.37

Enrolamento amortecedor em um polo de um motor síncrono.

A ação dos enrolamentos amortecedores pode ser entendida analisando a seguinte situação: quando uma corrente alternada é aplicada no enrolamento do estator, induz-se uma corrente na bobina da armadura. Os polos desse campo são submetidos a uma força, que coloca em movimento o rotor. Como a frequência inverte o sentido da corrente no estator, os polos magnéticos do rotor recebem uma força contrária, tendendo a parar o rotor. No entanto, se um meio externo fizer com que o rotor se movimente em uma velocidade muito próxima à síncrona, surgirá um conjugado que manterá o rotor em movimento, até que um polo magnético do rotor fique em sincronismo com um polo magnético oposto no estator. Nessas condições, o rotor girará na velocidade síncrona, mesmo com aplicação de carga no eixo do motor.

O meio externo a que se faz referência é justamente o enrolamento amortecedor, o qual possibilitará que o motor síncrono seja acelerado e entre em sincronismo. O enrolamento de campo CC é curto-circuitado quando se aplica a tensão alternada no estator, acelerando o motor a vazio como se fosse um motor de indução. Depois aplica-se uma tensão contínua no enrolamento de campo, para finalmente ajustar a corrente contínua, de maneira que seja mínima.

