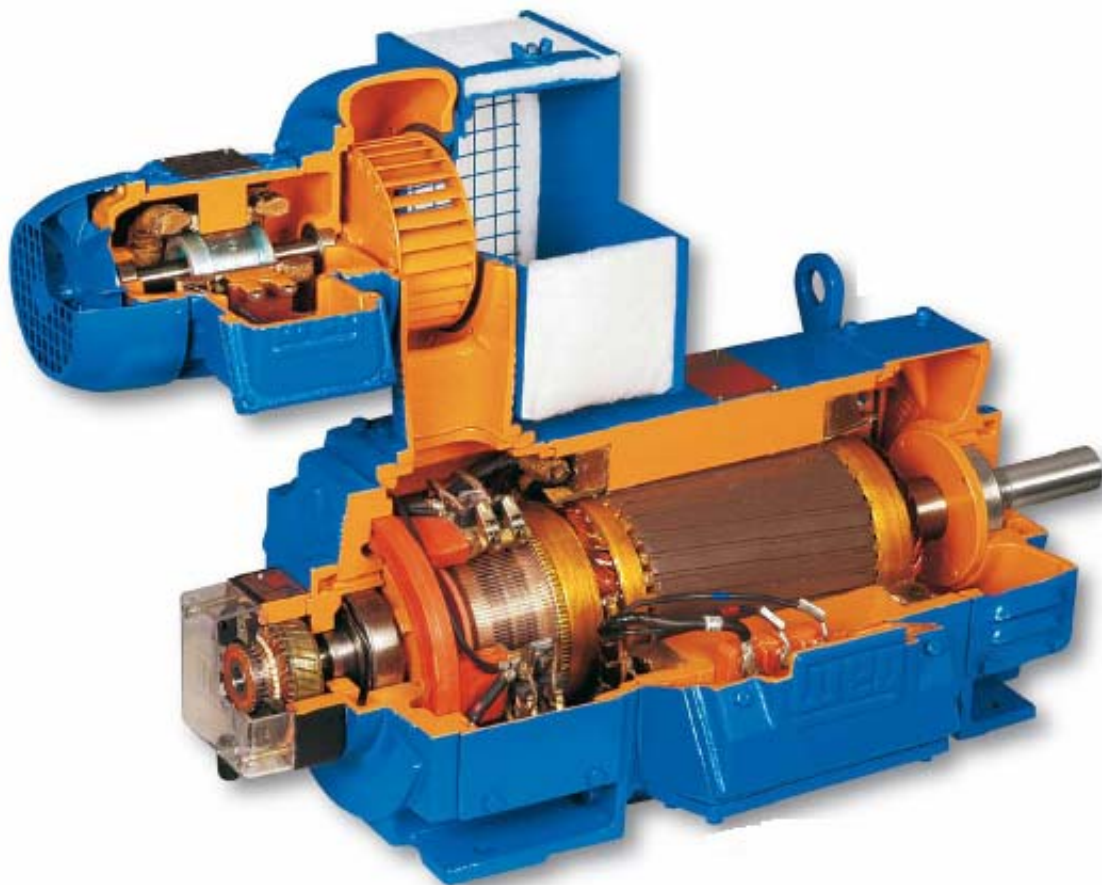




CEFETR - CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA DO RN
UNED - UNIDADE DE ENSINO DESCENTRALIZADA DE MOSSORÓ

GERÊNCIA EDUCACIONAL DA GESTÃO TECNOLÓGICA
Rua Raimundo Firmino de Oliveira, 400 – Conjunto Ulrick Graf – Mossoró/RN
CEP. 59.628-330 – Fone: (84) 3315-2769

GERADORES E MOTORES CC **(MÁQUINAS DE CORRENTE CONTÍNUA)**



CURSO: ELETROTÉCNICA

TURMA: 2º MÓDULO

DISCIPLINA: MÁQUINAS E ACIONAMENTOS ELÉTRICOS

PROFESSOR: GILENO JOSÉ DE VASCONCELOS VILLAR

OUTUBRO/2006

SUMÁRIO

APRESENTAÇÃO	II
1 – MÁQUINAS ELÉTRICAS ROTATIVAS	1
1.1 – A CONVERSÃO ELETROMECAÂNICA DE ENERGIA	1
1.2 – FUNDAMENTOS DOS GERADORES E MOTORES ELÉTRICOS	2
1.3 – PRODUÇÃO DE ELETRICIDADE POR MEIO DO ELETROMAGNETISMO	4
2 – MÁQUINAS DE CORRENTE CONTÍNUA	6
2.1 – MOTORES E GERADORES	6
2.2 – COMPONENTES DA MÁQUINA CC	6
2.2.1 – Armadura	8
2.2.2 – Comutador	8
2.2.3 – Escovas	8
2.2.4 – Enrolamento de Campo	8
2.3 – PERDAS E EFICIÊNCIA DE UMA MÁQUINA CC	9
3 – GERADORES DE CORRENTE CONTÍNUA	10
3.1 – GERADOR CC SIMPLES	10
3.1.1 – Retificação por Meio de um Comutador	11
3.2 – ENROLAMENTOS DA ARMADURA	13
3.2.1 – Enrolamento Imbricado	13
3.2.2 – Enrolamento Ondulado	14
3.3 – REAÇÃO DA ARMADURA NO GERADOR CC	14
3.4 – EXCITAÇÃO DO CAMPO	15
3.5 – AUTO-EXCITAÇÃO DE UM GERADOR SHUNT (EM DERIVAÇÃO)	17
3.6 – CIRCUITO EQUIVALENTE DO GERADOR CC	18
3.7 – EQUAÇÃO DA TENSÃO NO GERADOR CC	19
3.8 – REGULAÇÃO DE TENSÃO NOS GERADORES CC	20
4 – MOTORES DE CORRENTE CONTÍNUA	22
4.1 – PRINCÍPIO DO MOTOR CC	22
4.2 – SENTIDO DE ROTAÇÃO DA ARMADURA	23
4.3 – REAÇÃO DA ARMADURA NO MOTOR CC	24
4.4 – EQUAÇÃO DO TORQUE NO MOTOR CC	25
4.5 – CIRCUITO EQUIVALENTE DO MOTOR CC	25
4.6 – VELOCIDADE DE UM MOTOR	26
4.7 – REGULAÇÃO DE VELOCIDADE NO MOTOR	27
4.8 – TIPOS DE MOTORES CC	27
4.8.1 – Motor Shunt (Motor em Derivação)	27
4.8.2 – Motor Série	28
4.8.3 – Motor Composto (Compound)	28
4.9 – INVERSÃO DO SENTIDO DE ROTAÇÃO DO MOTOR CC	29
4.10 – RELAÇÃO ENTRE VELOCIDADE E TORQUE	30
4.11 – REQUISITOS DE PARTIDA DOS MOTORES CC	30
BIBLIOGRAFIA	31

1 – MÁQUINAS ELÉTRICAS ROTATIVAS

1.1 – A CONVERSÃO ELETROMECHANICA DE ENERGIA

A eletricidade é a única forma de energia cujo *controle, utilização e conversão* em outras formas de energia são relativamente fáceis, ela provavelmente continuará a ser a forma principal de energia utilizada pelo homem.

A primeira indicação da possibilidade de *intercâmbio entre energia elétrica e mecânica* foi apresentada por Michael Faraday em 1831. Esta descoberta é considerada por alguns como o maior avanço individual no progresso da ciência para atingir o aperfeiçoamento final da humanidade.

A *conversão eletromagnética* de energia relaciona as forças elétricas e magnéticas do átomo com a força mecânica aplicada à matéria e ao movimento. Como resultado desta relação, *a energia mecânica pode ser convertida em energia elétrica*, e vice-versa, através das **MÁQUINAS ELÉTRICAS**.

A energia elétrica produzida através desta conversão eletromecânica de energia pode ser *reconvertida* várias vezes, antes que a energia seja finalmente convertida à forma que realizará o *trabalho útil*.

- ⇒ Mecânica (Motores).
- ⇒ Térmica (Estufas).
- ⇒ Luminosa (Lâmpadas).
- ⇒ Química (Processos Eletroquímicos).
- ⇒ Outras formas de Energia Elétrica.

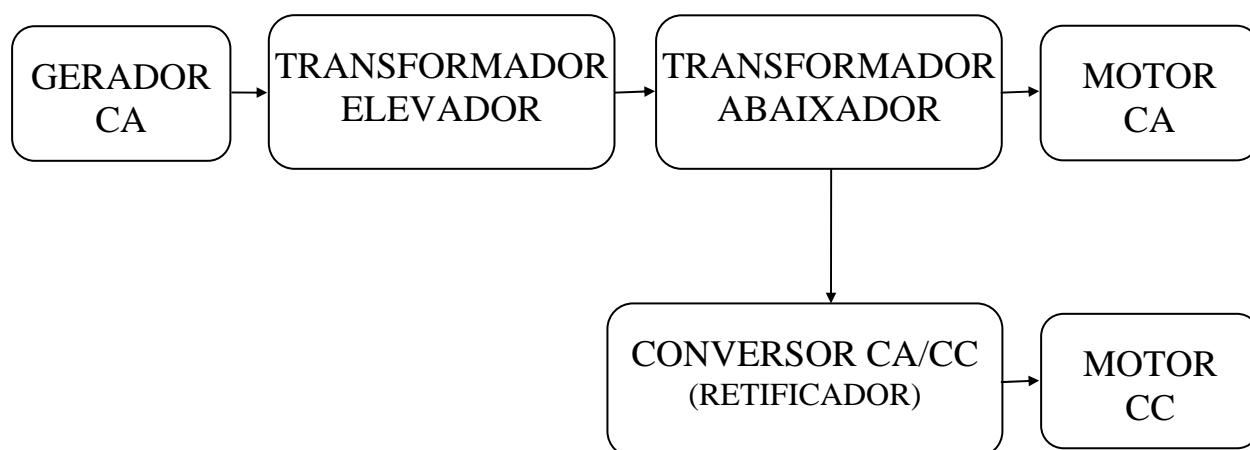


Fig. 1-1 : As principais etapas do sistema elétrico e as máquinas elétricas.

1.2 – FUNDAMENTOS DOS GERADORES E MOTORES ELÉTRICOS

Quase todas as pessoas vivem e trabalham no extremo de um circuito elétrico. Diferentes formas de energia podem ser convertidas em eletricidade (energia elétrica) e, do mesmo modo, a eletricidade pode ser convertida em diferentes formas de energia. O gerador elétrico é o dispositivo que transforma energia *mecânica* em energia *elétrica*. O motor elétrico, essencialmente um gerador usado de modo diferente, transforma energia *elétrica* em energia *mecânica*. Os geradores são usados para fornecer quase toda a energia elétrica usada atualmente. Um dos nossos principais problemas é encontrar fontes de energia para o acionamento desses geradores. Por este motivo, torna-se cada vez maior a necessidade de novas fontes alternativas de energia.

Embora seja grande a variedade de geradores e motores elétricos, verificaremos que todos eles são basicamente muito semelhantes. Todos os geradores e motores elétricos usam a interação entre condutores em movimento e campos magnéticos (ou vice-versa). Neste ponto, é conveniente rever o que foi estudado sobre magnetismo e efeitos magnéticos (em Eletrotécnica), antes de prosseguir com o estudo dos geradores e dos motores elétricos.

É importante lembrarmos que o funcionamento dos geradores e motores de CC e de CA depende simplesmente da **interação de campos magnéticos e condutores percorridos por corrente elétrica**.

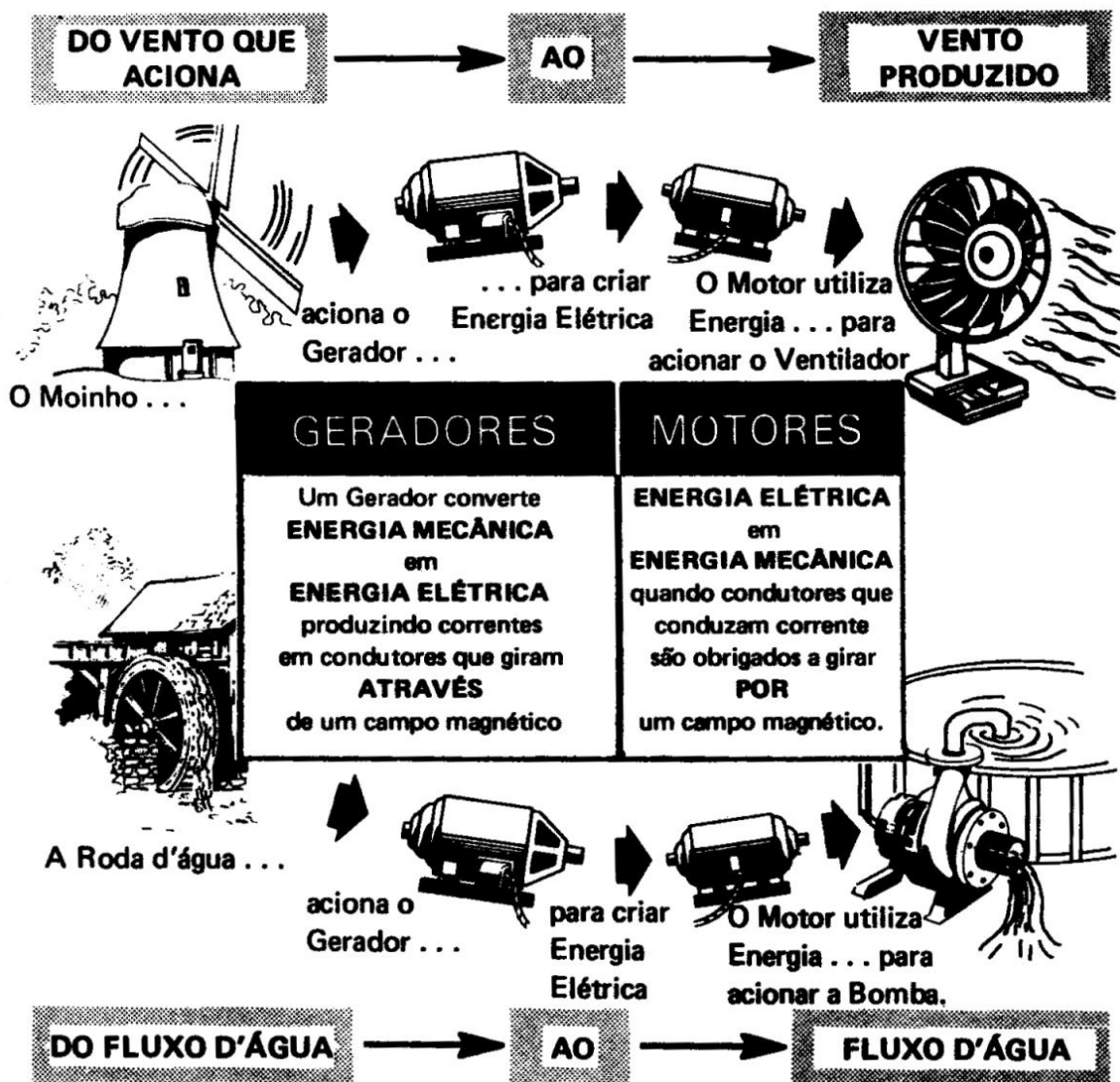


Fig. 1-2 : A conversão eletromecânica da energia nos geradores e motores elétricos.

Como vimos anteriormente, **uma fem é induzida em um condutor que se move através de um campo magnético**. Todas as usinas geradoras, que proporcionam quase toda a energia elétrica consumida atualmente no mundo, **usam este princípio simples** para converter uma forma qualquer de energia em energia elétrica.

A maioria das estações geradoras usa a energia térmica produzida pela queima de combustíveis fósseis, tais como carvão, óleo ou gás natural para obter vapor. O vapor é utilizado então para acionar uma turbina acoplada a um gerador. Ocorrem, assim, várias transformações de energia: primeiro, a energia *química* do combustível é convertida em *calor*; depois, a energia *térmica* é transformada em energia *mecânica*, ou de movimento, na turbina; e, finalmente, a energia *mecânica* é convertida em energia *elétrica* no gerador. Independentemente da fonte original de energia – carvão, óleo, gás, plutônio, urânio, queda d'água, sol, vento – **a etapa final é sempre a conversão da energia mecânica de rotação em energia elétrica**, em um gerador. O mesmo acontece em todos os pequenos conjuntos geradores nos navios e nos veículos motorizados, e também nas fontes de energia de emergência.

É de grande importância lembrarmos que no Brasil a energia elétrica é quase que totalmente produzida em *usinas hidrelétricas*, que é uma das formas mais baratas e limpas de se produzir eletricidade. Também devemos lembrar que o potencial hidrelétrico do Brasil já foi praticamente esgotado, o que exige uma busca incessante por fontes alternativas de energia. No nosso Estado, por exemplo, teremos em breve a implantação de uma *usina termelétrica* que utilizará o *gás natural* como combustível para obter o vapor que acionará as pás da turbina. Por fazer uso de um combustível abundante na região, o preço do kWh produzido será bastante baixo, o que viabilizará o investimento.

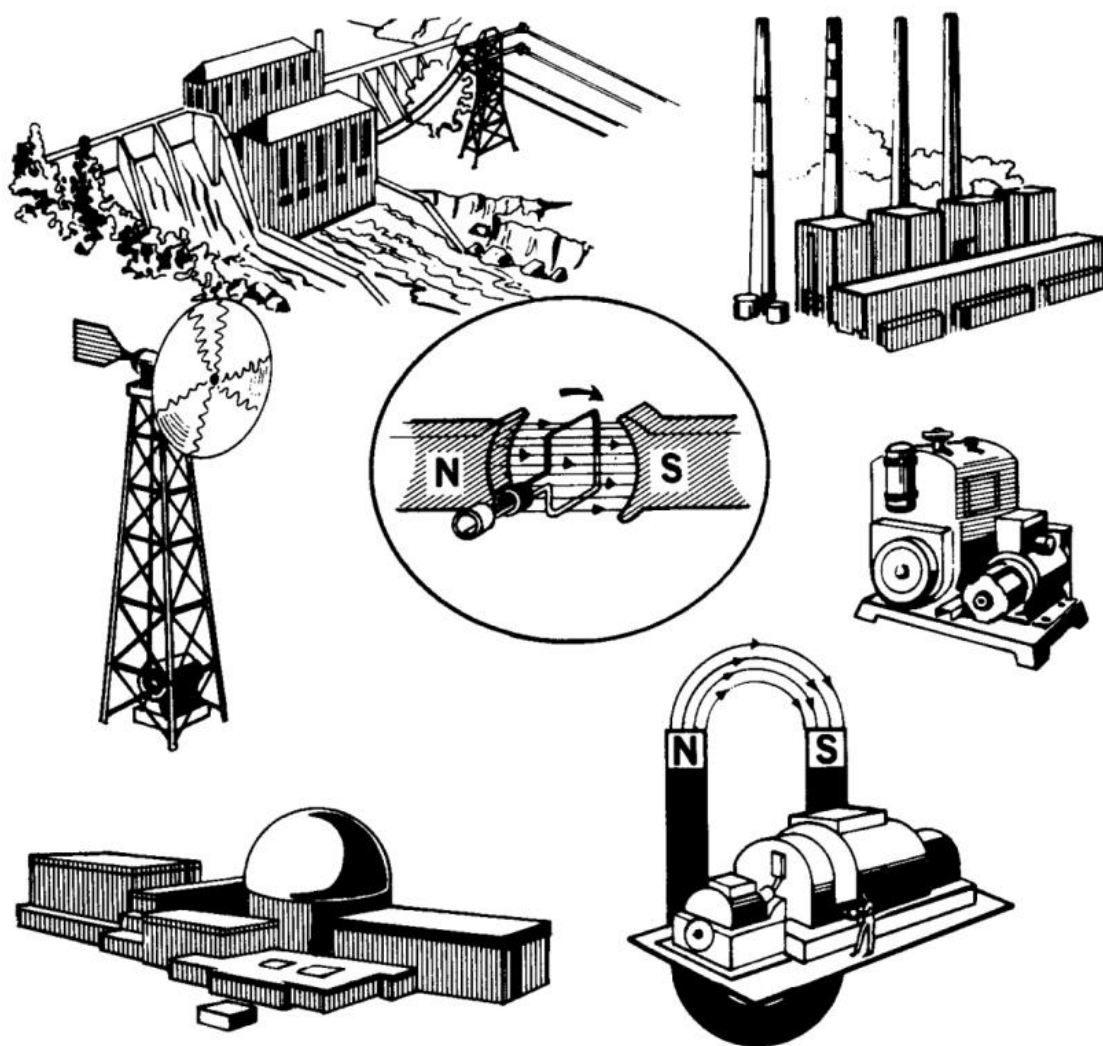


Fig. 1-3 : As principais formas de se produzir energia elétrica.

1.3 – PRODUÇÃO DE ELETRICIDADE POR MEIO DO ELETROMAGNETISMO

Você sabe que se pode produzir eletricidade movimentando um fio em um campo magnético. Desde que haja movimento relativo entre o condutor e o campo magnético, há produção de eletricidade. A tensão obtida é conhecida como *tensão induzida* ou *fem induzida*, e o processo para obtê-la, cortando o campo magnético com um condutor, é chamado de *indução* e explicado pela **Lei de Faraday**.

O valor da tensão induzida no condutor que corta o campo magnético depende de diversos fatores. ❶ : quando se aumenta a VELOCIDADE de corte das linhas do campo magnético pelo condutor, a *fem* também aumenta. ❷ : quando a INTENSIDADE DO CAMPO MAGNÉTICO aumenta, a *fem* induzida também aumenta. ❸ : se o NÚMERO DE ESPIRAS que corta o campo magnético é aumentado, a *fem* induzida é novamente aumentada.

A polaridade da *fem* induzida será tal que a corrente resultante criará um campo magnético que reagirá com o campo do ímã e se oporá ao movimento da bobina. Este fenômeno ilustra o princípio conhecido como **Lei de Lenz**. Esta lei afirma que, *quando existe indução eletromagnética, o sentido da fem induzida é tal que o campo magnético dela resultante se opõe ao movimento que produz a fem*.

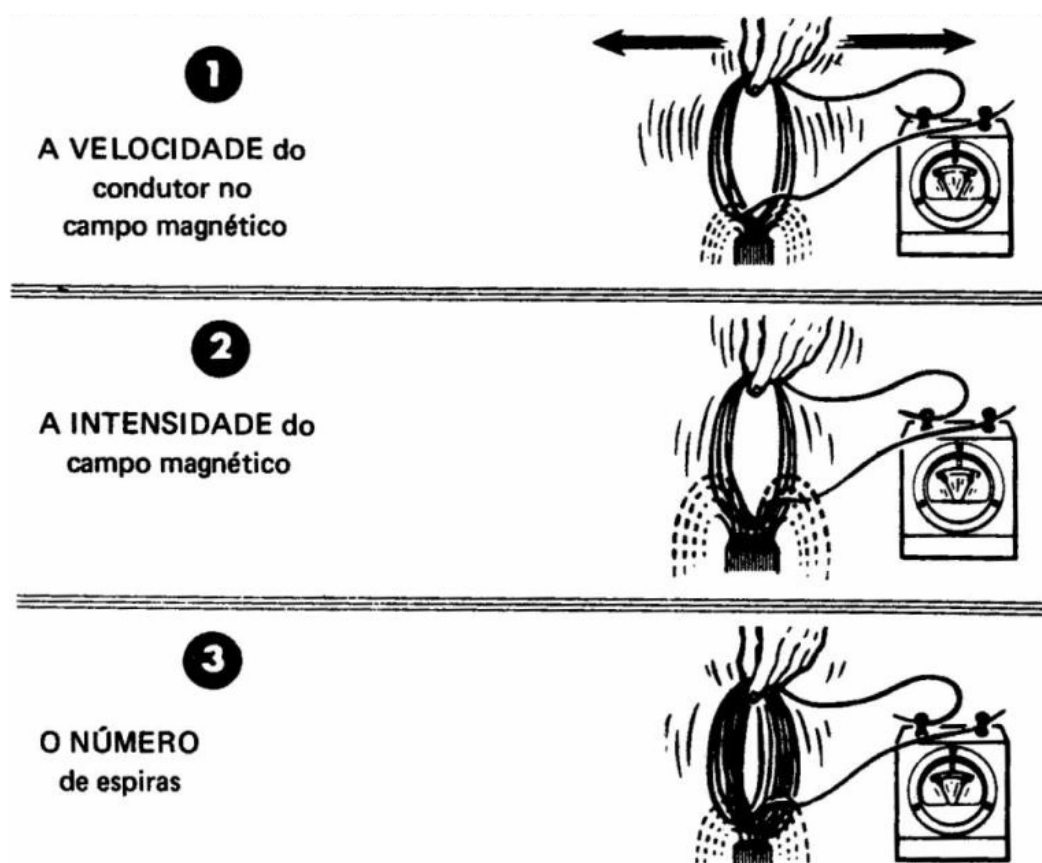


Fig. 1-4 : Os fatores que determinam o valor da *fem* induzida.

De acordo com a Lei de Faraday um fluxo magnético variável com o tempo, enlaçando uma bobina ou enrolamento, induz nesta uma f.e.m. (tensão induzida):

$$E = -N \cdot \frac{\Delta\phi}{\Delta t}$$

Simplificando, a tensão induzida (E) em cada condutor é proporcional à intensidade do campo magnético multiplicada pela velocidade do condutor no campo: $E \approx \text{fluxo} \times \text{velocidade}$.

Você também sabe que a polaridade da tensão induzida, e, portanto, o sentido da corrente gerada, é determinado pelo *sentido do movimento relativo* entre o campo magnético e o condutor que o corta (*Lei de Lenz*).

O SENTIDO DO MOVIMENTO RELATIVO DETERMINA O SENTIDO DA CORRENTE

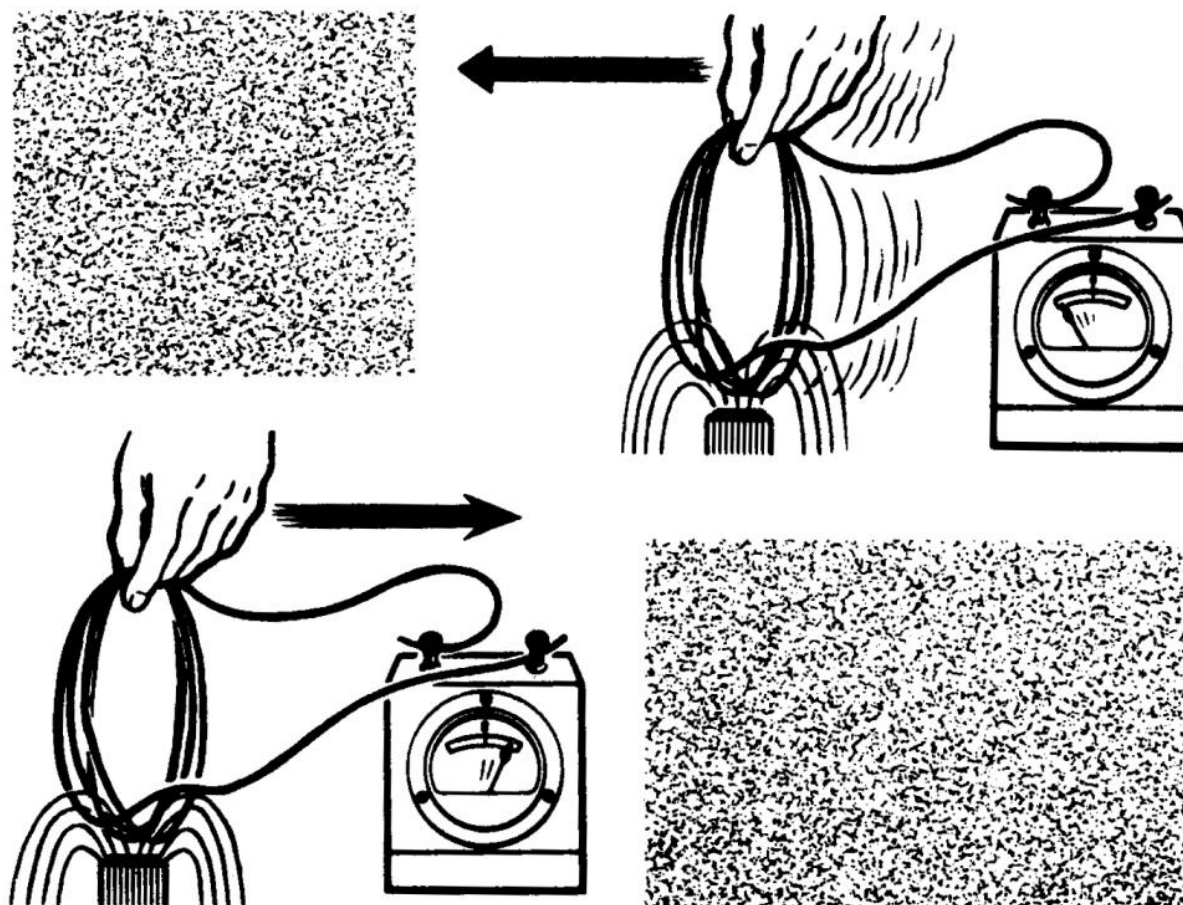


Fig. 1-5 : Indicação do sentido da corrente induzida através de um amperímetro de zero central.

Resumindo o que você já sabe sobre a eletricidade produzida pelo magnetismo:

1. O movimento de um condutor através de um campo magnético gera uma *fem* que pode estabelecer a circulação de uma *corrente elétrica*, no caso de haver um circuito fechado.
2. Quanto mais rápido for o movimento, quanto maior o número de espiras e quanto maior a intensidade do campo magnético, tanto maior será a *fem* induzida e mais intensa será a *corrente*.
3. Invertendo-se o sentido do movimento do condutor, a *polaridade da fem* induzida também é invertida e, portanto, o *sentido da corrente*.
4. Não importa qual se mova, se o condutor ou o campo magnético, porque o *resultado será sempre o mesmo*.

2 – MÁQUINAS DE CORRENTE CONTÍNUA

2.1 – MOTORES E GERADORES

Um *motor* é uma máquina que converte energia elétrica em energia mecânica de rotação. Os motores são os responsáveis pelo funcionamento das máquinas de lavar, das secadoras de roupa, dos ventiladores, dos condicionadores de ar e da maioria das máquinas encontradas nas indústrias. O *gerador*, por sua vez, é uma máquina que converte energia mecânica de rotação em energia elétrica. A energia mecânica pode ser fornecida por uma queda-d'água, vapor, vento, gasolina, óleo diesel ou por um motor elétrico.

2.2 – COMPONENTES DA MÁQUINA CC

A Fig. 2-1 mostra um corte de uma máquina CC comercial típica, simplificada para dar ênfase às partes principais. As partes principais dos geradores e motores de corrente contínua são basicamente as mesmas.

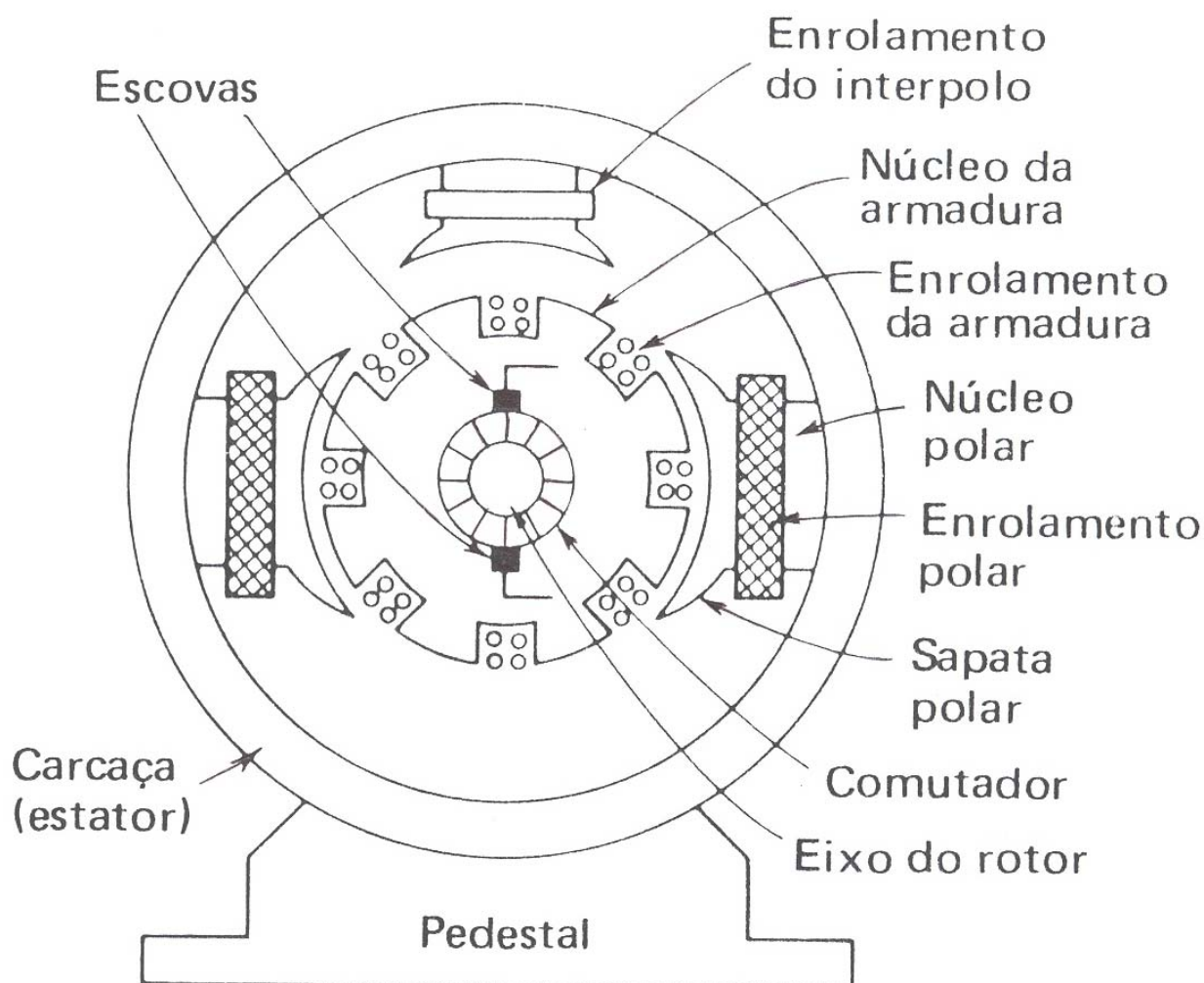


Fig. 2-1 : As partes principais de uma máquina CC.

A Fig. 2-2 mostra uma vista explodida de uma máquina CC comercial típica, apresentando detalhes dos seus componentes em perspectiva.

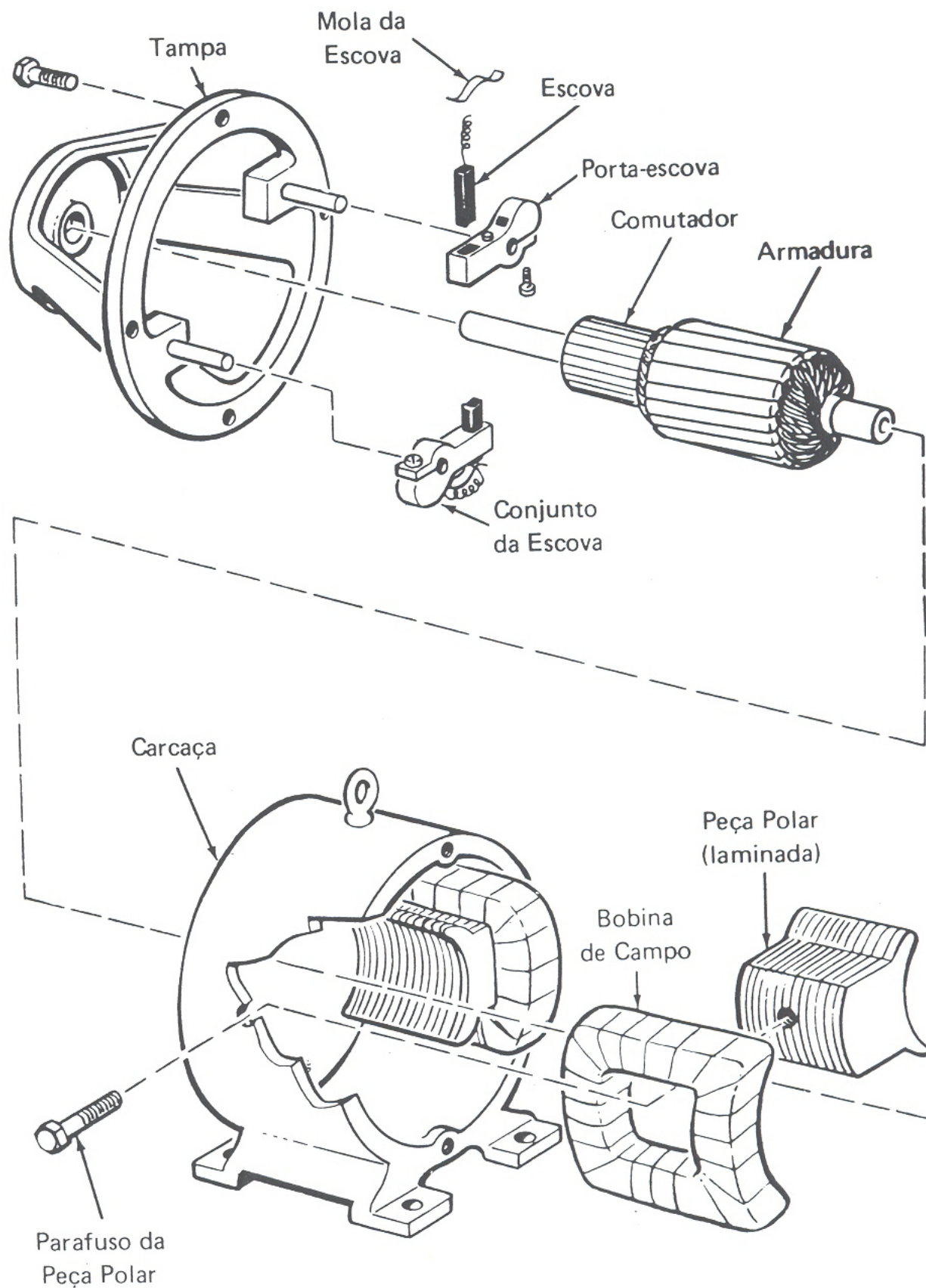


Fig. 2-2 : Vista explodida de uma máquina CC.

2.2.1 – Armadura

Em um motor, a armadura recebe a corrente proveniente de uma fonte elétrica externa. Isto faz a armadura girar. Em um gerador, a armadura gira por efeito de uma força mecânica externa. A tensão gerada na armadura é então ligada a um circuito externo. Em resumo, a armadura do motor recebe a corrente de um circuito externo (a fonte de alimentação), e a armadura do gerador libera corrente para um circuito externo (a carga). Como a armadura gira, ela é também chamada de rotor.

O *núcleo da armadura* é construído de camadas laminadas de aço, provendo uma faixa de baixa relutância magnética entre os pólos. As lâminas servem para reduzir as correntes parasitas no núcleo, e o aço usado é de qualidade destinada a produzir uma baixa perda por histerese. O núcleo contém ranhuras axiais na sua periferia para colocação do *enrolamento da armadura*, constituído de bobinas isoladas entre si e do núcleo da armadura, colocadas nas ranhuras e eletricamente ligadas ao comutador.

2.2.2 – Comutador

Uma máquina CC tem um comutador para converter a corrente alternada (induzida) que passa pela sua armadura em corrente contínua liberada através de seus terminais (no caso do gerador). O comutador é constituído por segmentos de cobre, com um par de segmentos para cada enrolamento da armadura. Cada segmento do comutador é isolado dos demais por meio de lâminas de mica. Os segmentos são montados em torno do eixo da armadura e são isolados do eixo e do ferro da armadura. No estator da máquina são montadas duas escovas fixas, que permitem contatos com os segmentos opostos do comutador.

2.2.3 – Escovas

São conectores de grafita fixos, montados sobre molas que permitem que eles deslizem (ou “escovem”) sobre o comutador no eixo da armadura. Assim, as escovas servem de contato entre os enrolamentos da armadura e a carga externa (no caso do gerador).

As escovas estão sempre instantaneamente conectadas a um segmento do comutador e em contato com uma bobina localizada na zona interpolar.

2.2.4 – Enrolamento de Campo

Este eletroímã produz o fluxo interceptado pela armadura. Em um motor, a corrente para o campo é fornecida pela mesma fonte que alimenta a armadura. Em um gerador, a fonte de corrente de campo pode ser uma fonte separada, chamada de *excitador*, ou proveniente da própria armadura. Constituído de umas poucas espiras de fio grosso para o campo-série ou muitas espiras de fio fino para o campo-shunt (em derivação).

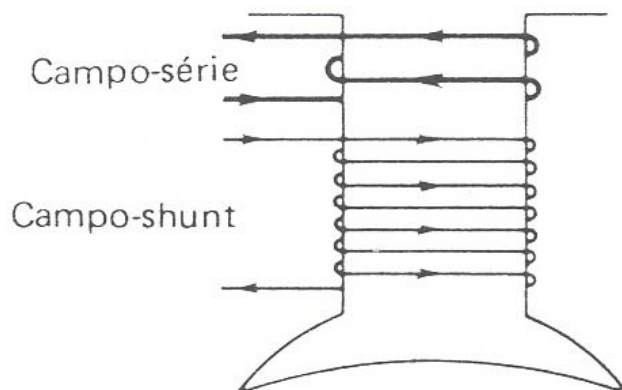


Fig. 2-3 : Enrolamentos de campo-série e campo-shunt.

2.3 – PERDAS E EFICIÊNCIA DE UMA MÁQUINA CC

As perdas nos geradores e motores consistem nas perdas no cobre dos circuitos elétricos (enrolamento da armadura e enrolamento de campo), nas perdas no ferro dos circuitos magnéticos (núcleo do rotor e estator) e nas perdas mecânicas produzidas pela rotação da máquina. As perdas incluem:

1. Perdas elétricas (ou no cobre).
 - (a) Perdas no enrolamento da armadura $R_a I_a^2$.
 - (b) Perdas nos enrolamentos de campo.
 - i) $R_f I_f^2$ no campo em derivação.
 - ii) $R_s I_s^2$ no campo em série.
2. Perdas rotacionais.
 - 2.1. Perdas mecânicas.
 - (a) Perdas por atrito.
 - i) Atrito nos rolamentos (mancais).
 - ii) Atrito nas escovas.
 - iii) Atrito com o ar (ventilação).
 - 2.2. Perdas no núcleo (ou no ferro).
 - (a) Perdas por correntes parasitas.
 - (b) Perdas por histerese.

As perdas no cobre estão presentes, porque é consumida uma certa potência quando se faz passar uma corrente através de uma resistência. À medida que a armadura gira no campo magnético, a *fem* induzida nas partes de ferro permite a passagem de correntes parasitas ou de Foucault, que aquecem o ferro representando assim um desperdício de energia. As perdas por histerese ocorrem quando um material magnético é magnetizado inicialmente num sentido e em seguida no sentido oposto. Outras perdas rotacionais são produzidas pelo atrito dos rolamentos nos mancais, pelo atrito das escovas apoiadas sobre o comutador e pelo atrito com o ar (sistema de ventilação).

A eficiência (ou rendimento) é a razão entre a potência útil na saída e a potência total na entrada.

$$\text{Eficiência} = \frac{\text{Saída}}{\text{Entrada}} \quad (2.1)$$

$$\text{Eficiência} = \frac{\text{Entrada} - \text{Perdas}}{\text{Entrada}} \times 100\% = \frac{\text{Saída}}{\text{Saída} + \text{Perdas}} \times 100\% \quad (2.2)$$

A eficiência (ou rendimento) é geralmente expressa na forma de percentagem.

$$\text{Eficiência}(\%) = \frac{\text{Saída}}{\text{Entrada}} \times 100\% \quad (2.3)$$

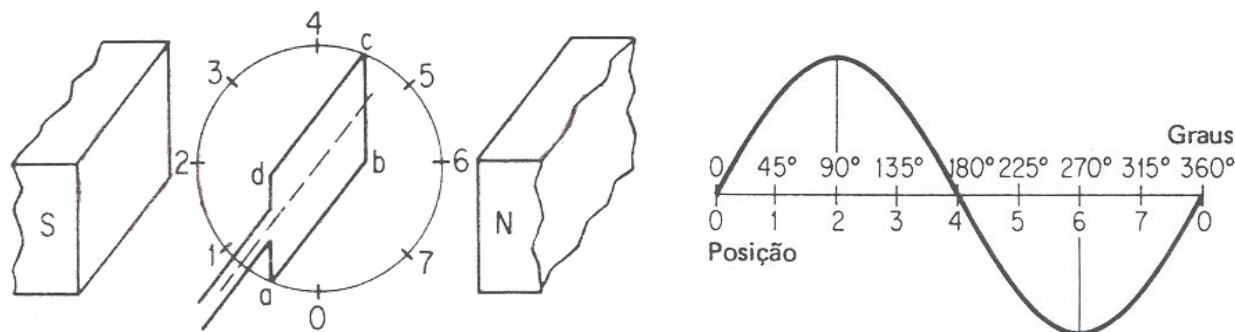
3 – GERADORES DE CORRENTE CONTÍNUA

3.1 – GERADOR CC SIMPLES

Se uma bobina com uma única espira é posta a girar num campo magnético uniforme a uma velocidade constante, a fem induzida num determinado lado da bobina variará com o seu movimento através das várias posições de 0 a 7, conforme mostra a Fig. 3-1.

Usando o lado *ab* da bobina como referência, note-se que, quando ele estiver na posição 0 da Fig. 3-1(a), a fem induzida na bobina será zero, uma vez que o condutor *ab* (bem como o condutor *cd*) está se movimentando *paralelamente* ao campo magnético, sem experimentar a variação de fluxo. Quando o condutor *ab* se movimenta para a posição 1, girando no *sentido horário*, ele corta o campo magnético uniforme num ângulo oblíquo de 45° . A fem induzida neste condutor em movimento ascendente, com respeito a uma carga externa, será positiva (na fonte a corrente sai do positivo) e seu valor será de aproximadamente 70,7% da máxima tensão induzida ($v = v_{\text{máx}} \cdot \text{sen } \theta$; onde $\theta = 45^\circ$). A variação na tensão é mostrada graficamente na Fig. 3-1(b), onde a fem é positiva na posição 1 e tem o valor aproximado indicado. Quando a bobina alcança 90° , posição 2, o condutor *ab* tem o máximo fluxo concatenado, uma vez que se move perpendicularmente ao campo magnético, e tem o máximo valor positivo mostrado na Fig. 3-1(b). A posição 3, que corresponde a um ângulo de 135° , leva a uma fem no lado *ab* da bobina idêntica à produzida na posição 1 ($\text{sen } 135^\circ = \text{sen } 45^\circ$), com polaridade positiva uma vez que o condutor ainda se movimenta ascendentemente, mas a variação do fluxo concatenado ocorre numa razão menor que a da posição 2. Quando o condutor *ab* alcança 180° , posição 4, a fem induzida é novamente zero, uma vez que não há variação de fluxo concatenado quando o condutor se movimenta paralelamente ao campo magnético. Na posição 5, correspondendo a 225° , a fem induzida no condutor *ab* tem a polaridade invertida, uma vez que *ab* agora se move *descendentemente* no mesmo campo magnético uniforme. A fem induzida aumenta até um máximo negativo a 270° , na posição 6, e finalmente decresce, passando pela posição 7 e voltando a zero na posição 0.

Deve-se notar que a natureza da fem induzida em um condutor que gira num campo magnético é, ao *mesmo tempo*, senoidal e alternativa. Posteriormente, ver-se-á que uma fem alternada é produzida nos condutores de todas as máquinas girantes, quer de CC quer de CA. Observe-se que durante este processo não há fem induzida nos condutores *bc* ou *ad*, uma vez que eles se movimentam na *mesma* direção no *mesmo* campo e produziram, portanto, fem iguais em oposição. Os lados da bobina *ab* e *cd*, entretanto, *auxiliam-se* mutuamente e a fem total produzida pela bobina é o dobro do valor representado abaixo na Fig. 3-1(b). Deve-se notar que não se produz fem nas posições 0 e 4, conhecidas como *zonas neutras* ou *interpolaes* da máquina.



(a) Posições instantâneas de rotação à velocidade constante.

(b) As fem nas posições respectivas.

Fig. 3-1 : A tensão gerada por uma bobina móvel em um campo uniforme.

3.1.1 – Retificação por Meio de um Comutador

A fim de se converter a tensão alternada (CA) em unidirecional (CC), é necessário empregar-se um dispositivo de chaveamento mecânico, que é acionado pela rotação mecânica do eixo da máquina. Tal dispositivo é o comutador elementar mostrado na Fig. 3-2(a). Consiste de dois segmentos, apoiados no eixo da armadura, mas dela isolados, bem como isolados um do outro. Cada segmento do comutador do condutor é ligado, respectivamente, a um lado da bobina. Desde que os lados da bobina e os segmentos do comutador estão mecanicamente ligados ao mesmo eixo, a ação mecânica da rotação é a de reverter as ligações e a bobina da armadura a um circuito externo estacionário, no mesmo instante em que se inverte a *fem* induzida no respectivo condutor (isto é, quando o lado da bobina se desloca para um pólo de nome oposto).

Como mostram as Figs. 3-1 e 3-2, a *fem* induzida em um condutor *ab* é de polaridade positiva para os primeiros 180° de rotação (posições de 0 a 4), e de polaridade negativa para os outros 180° (posições de 4 a 0), usando-se o método da Regra de Fleming da Mão Direita (gerador) para a determinação da polaridade. Mas, na Fig. 3-2, o condutor *ab* está ligado ao segmento 1 do comutador e o condutor *cd* ao segmento 2. Para os primeiros 180° de rotação, portanto, a *fem* positiva produzida pelo condutor *ab* é ligada à escova estacionária positiva. Para os seguintes 180° de movimento, a *fem* negativa produzida pelo condutor *ab* está ligada à escova estacionária negativa. O mesmo efeito ocorre na ordem inversa para o condutor *cd*. Assim, a ação do comutador é de inverter simultaneamente as ligações ao circuito externo no mesmo instante em que se inverte o sentido da *fem* em cada um dos lados da bobina. Cada escova, positiva ou negativa, respectivamente, é mantida, pois, sempre na *mesma* polaridade. A Fig. 3-2(b) mostra a forma de onda da *fem* (e da corrente) produzida como resultado do processo acima para um ciclo completo (ou 360°) de rotação.

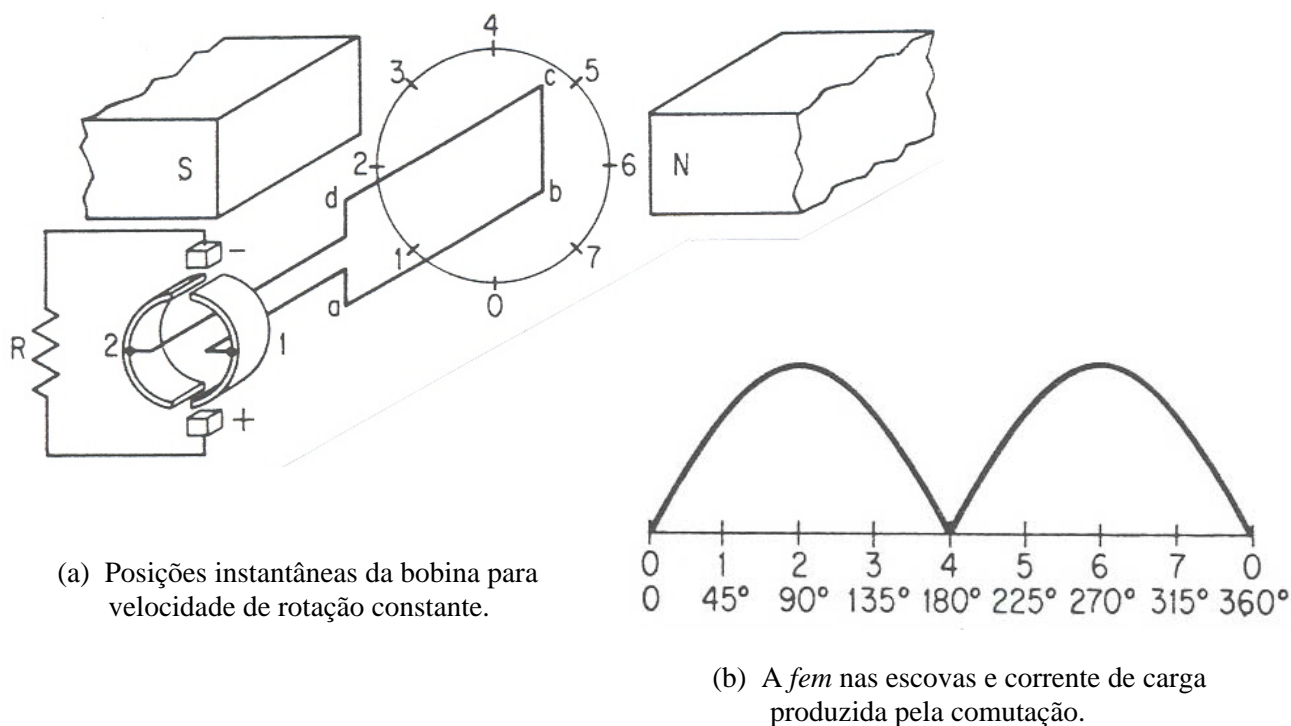


Fig. 3-2 : Gerador bipolar com comutador de dois segmentos.

A corrente unidirecional pulsante, que tem um valor zero duas vezes por ciclo, como mostra a Fig. 3-2(b), é dificilmente utilizável como alimentação CC comercial. A *fem* de saída pode ser tornada menos pulsativa pelo uso de um grande número de bobinas ou segmentos do comutador. O efeito de aumentar-se o número de bobinas e segmentos é mostrado na Fig. 3-3(a) e a forma de onda resultante é mostrada na Fig. 3-3(b). Com apenas duas escovas e quatro segmentos, há agora quatro comutações mostradas como *a*, *b*, *c* e *d* na Fig. 3-3(b), num ciclo de rotação completo (tempo de *t* a *t'*). Logo, a *fem* resultante é menos pulsante.

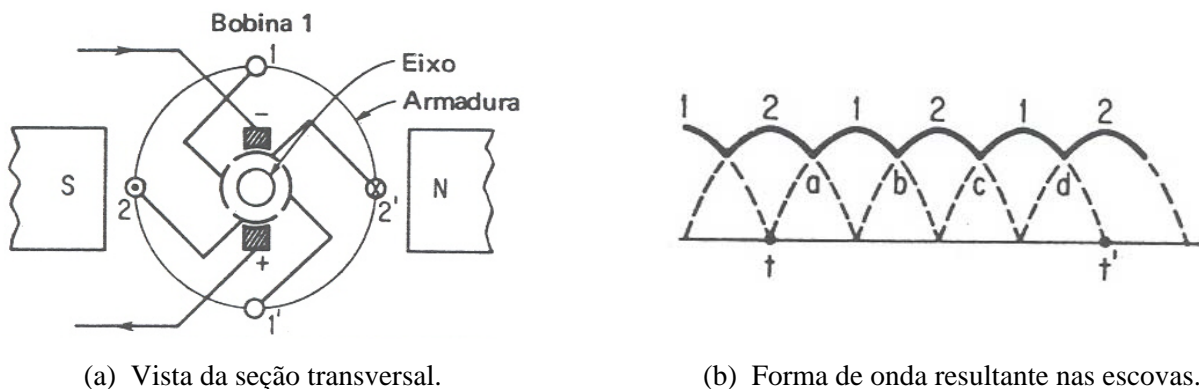


Fig. 3-3 : Efeito de quatro condutores e segmentos sobre a forma de onda na saída.

Em um gerador, a área onde nenhuma tensão pode ser induzida numa espira da armadura é chamada de *plano de comutação* ou *plano neutro*. Este plano está a meia distância entre pólos norte e sul adjacentes. As escovas são sempre colocadas de modo a produzir um curto-circuito entre as bobinas da armadura que estão atravessando o plano neutro, e simultaneamente a saída é retirada das outras bobinas. Nesse instante não há corrente e, portanto, não há centelhas nas escovas.

Se deslocarmos as escovas alguns graus, elas colocarão a bobina em curto quando ela ainda estiver cortando o campo magnético. Como consequência, uma tensão será induzida na bobina em curto e a corrente de curto-circuito causará centelhas nas escovas. Esta corrente de curto-circuito pode danificar seriamente tanto as bobinas quanto o comutador.

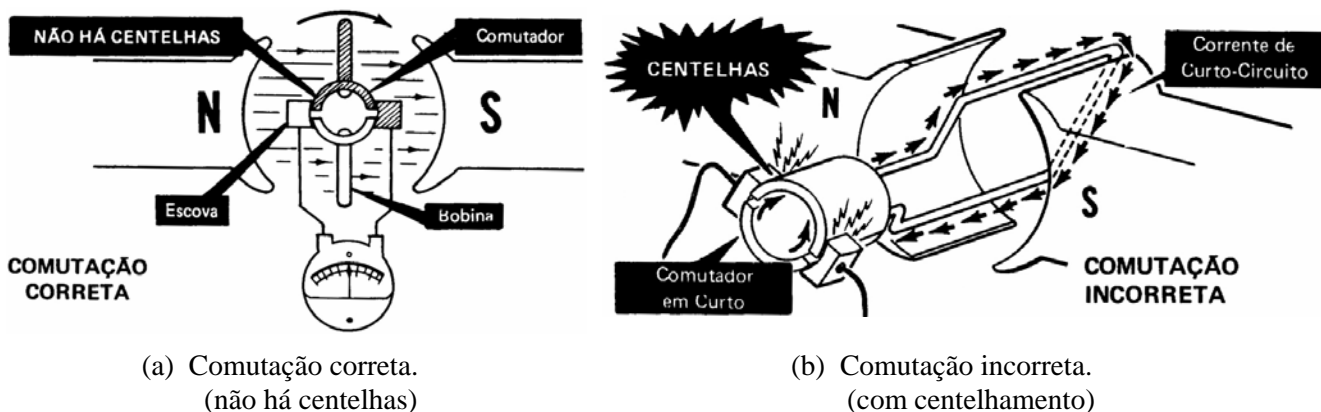


Fig. 3-4 : A importância da ação comutadora ocorrer exatamente no plano neutro.

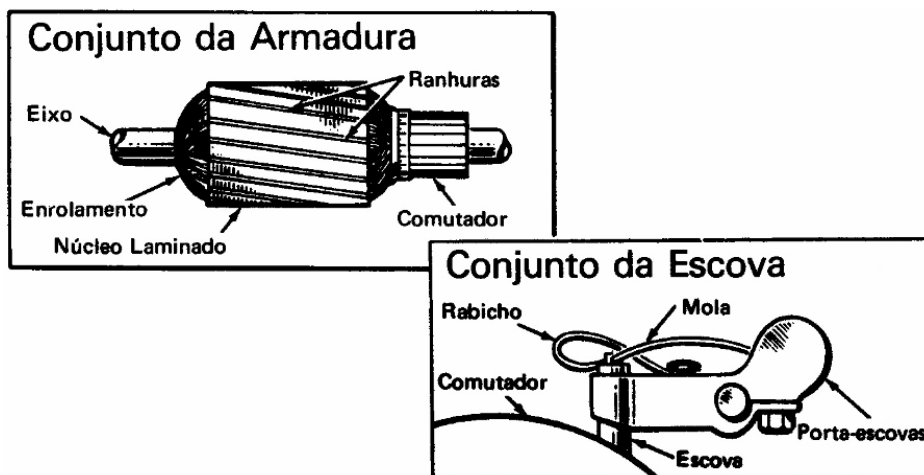


Fig. 3-5 : Detalhes construtivos do conjunto da armadura e do conjunto da escova.

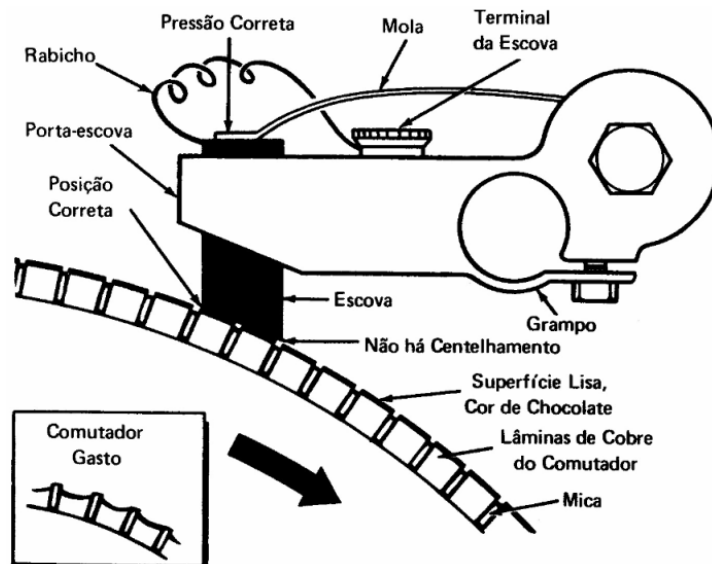


Fig. 3-6 : Detalhes do posicionamento da escova para uma comutação correta.

3.2 – ENROLAMENTOS DA ARMADURA

Os enrolamentos da armadura, que na máquina CC ficam posicionados no rotor, são sempre de *pólos lisos* e são distribuídos igualmente nas ranhuras adjacentes ao entreferro em volta da periferia da armadura. Essencialmente, há dois tipos, dependendo do tipo de fechamento ou reentrada do enrolamento: enrolamentos de circuito fechado, empregados nas máquinas de CC; e enrolamentos de circuito aberto, empregados usualmente em máquinas de CA (motor síncrono e motor de anéis).

As bobinas da armadura usadas em grandes máquinas CC são geralmente enroladas na sua forma final antes de serem colocadas na armadura. As bobinas pré-fabricadas são colocadas entre fendas do núcleo laminado da armadura. Há duas formas de se ligar as bobinas, *enrolamento imbricado* e *enrolamento ondulado*, ambos são enrolamentos de circuito fechado ou em série.

3.2.1 – Enrolamento Imbricado

Num *enrolamento imbricado simples*, as extremidades de cada bobina são ligadas a segmentos comutadores adjacentes (Fig. 3-7). Dessa forma, todas as bobinas ficam ligadas em série. Num *enrolamento imbricado duplo*, há, na verdade, dois conjuntos separados de bobinas, cada conjunto ligado em série. Estes dois conjuntos de bobinas são ligados entre si somente através das escovas. Analogamente, um *enrolamento imbricado triplo* é formado por três conjuntos separados de bobinas ligados em série. Num enrolamento imbricado simples, uma única escova faz o curto-circuito entre as duas extremidades da mesma bobina.

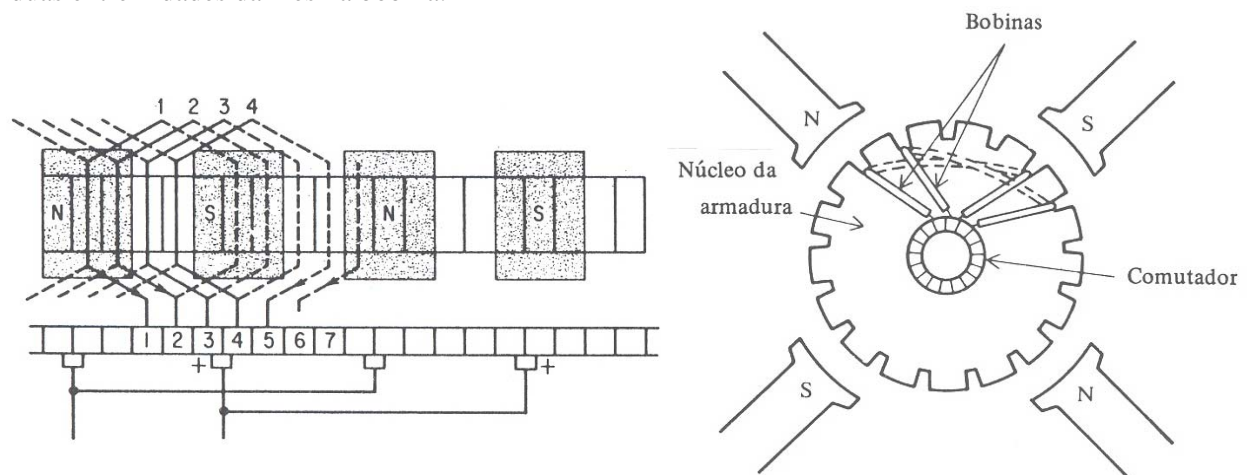


Fig. 3-7 : Enrolamento imbricado de máquina CC.

3.2.2 – Enrolamento Ondulado

Num *enrolamento ondulado*, as extremidades de cada bobina são ligadas aos segmentos do comutador com dois pólos de intervalo (Fig. 3-8). Em vez de curto-circuitar uma única espira, a escova faz curto-circuito em um pequeno grupo de espiras ligadas em série.

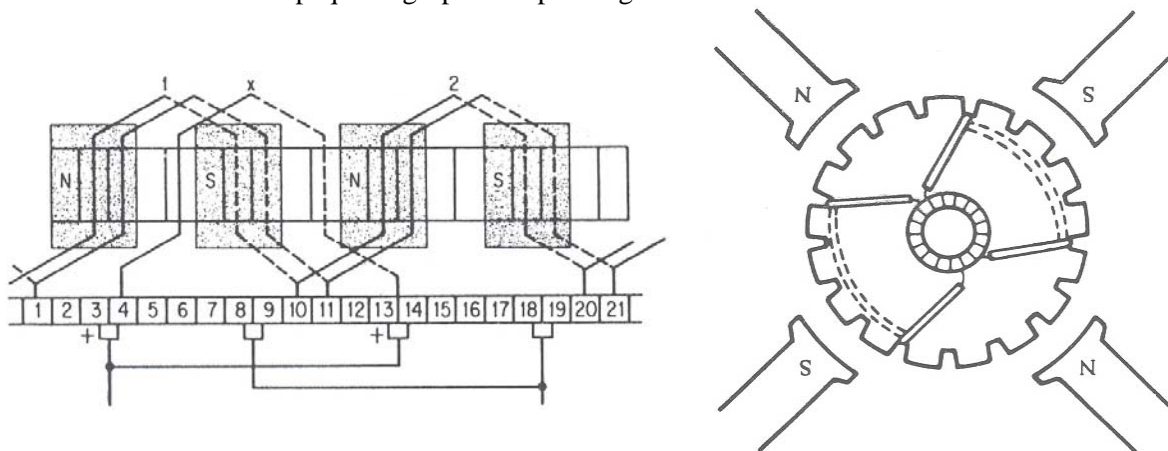


Fig. 3-8 : Enrolamento ondulado de máquina CC.

Comparando os dois tipos de enrolamentos da armadura das máquinas CC, podemos concluir que:

- O enrolamento imbricado é utilizado em máquinas CC com altas correntes e baixa tensão; e
- O enrolamento ondulado é recomendado para aplicação em máquinas CC de alta tensão e baixa corrente, em que a máquina opera com elevadas velocidades.

3.3 – REAÇÃO DA ARMADURA NO GERADOR CC

Considere o funcionamento de um gerador CC simples de dois pólos. Na Fig. 3-9, a armadura aparece em forma simplificada, com a seção transversal da bobina representada por pequenos círculos. Quando a armadura gira no sentido horário, a corrente no lado esquerdo da bobina sai da página, e no lado direito entra na página. Também está representado o campo magnético produzido em torno de cada lado da bobina. Agora existem dois campos: o campo principal e o campo em redor de cada lado da bobina. A Fig. 3-9, mostra como o campo da armadura distorce o campo principal e como o plano neutro é deslocado no sentido da rotação.

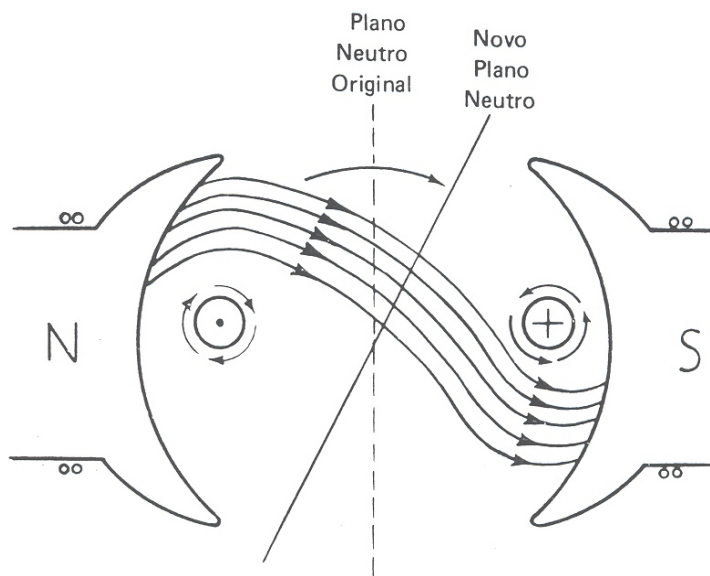


Fig. 3-9 : Reação da armadura deslocando o plano neutro da sua posição original.

Entretanto, as escovas devem pôr a bobina em curto *quando ela estiver no plano neutro*. Se as escovas forem mantidas no plano neutro original, elas colocarão em curto bobinas com tensão induzida diferente de *zero*. Conseqüentemente, haverá centelhamento entre as escovas e o comutador. Para evitar isto, as escovas devem ser deslocadas para o novo plano neutro. O efeito da armadura ao deslocar o plano neutro é chamado de *reação da armadura*.

A principal conseqüência da reação da armadura é o centelhamento provocado nas escovas durante a comutação. A reação da armadura pode ser corrigida, também, com a utilização de interpólos ou enrolamentos compensadores (Fig. 3-10). Estes enrolamentos ficam ligados em série com a armadura e, portanto, respondem de acordo com as variações da carga.

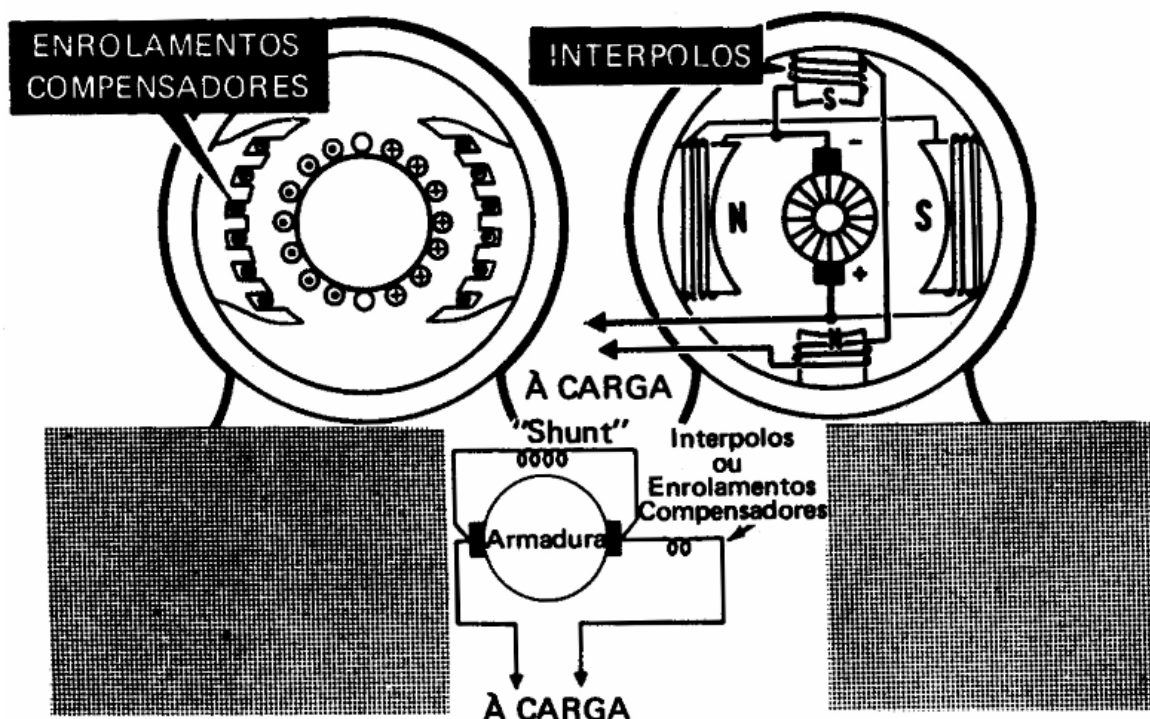


Fig. 3-10 : Enrolamentos compensadores e interpólos usados para minimizar a reação da armadura.

3.4 – EXCITAÇÃO DO CAMPO

Os geradores CC recebem seus nomes de acordo com o tipo de excitação de campo utilizado. Quando o campo do gerador é fornecido ou “excitado” por uma fonte CC independente (separada), como por exemplo, uma bateria, ele é chamado de gerador de *excitação independente* (Fig. 3-11). Quando o gerador fornece a sua própria excitação, ele é chamado de gerador *auto-excitado*. Se o seu campo estiver ligado em paralelo com a armadura, ele é chamado de gerador *shunt* ou *em derivação* (Fig. 3-12(a)). Quando o campo está em série com a armadura, o gerador é chamado de gerador *série* (Fig. 3-12(b)). Se forem usados os dois campos, shunt e série, o gerador é chamado de gerador *composto*. Os geradores compostos podem ser ligados em *derivação curta* (Fig. 3-12(c)) com o campo-shunt em paralelo somente com a armadura, ou formando uma *derivação longa* (Fig. 3-12(d)), com o campo-shunt em paralelo com a armadura e com o campo-série. Num gerador composto, o *campo-shunt predomina* e é o mais forte dos dois. Quando a *fmm* do campo-série *auxilia* a *fmm* do campo-shunt, o gerador é denominado de *composto cumulativo (ou aditivo)*. Quando a *fmm* do campo-série *se opõe* à *fmm* do campo-shunt, o gerador é denominado de *composto diferencial (ou subtrativo)*.

Os reostatos de campo são resistências ajustáveis colocadas nos circuitos de campo para variar o fluxo do campo e, portanto a *fem* gerada pelo gerador. No campo-shunt o controle do fluxo magnético (através do controle da corrente) é realizado com um reostato colocado em série com o enrolamento de campo-shunt, já no campo-série o reostato deve ser colocado no circuito em paralelo com o enrolamento de campo-série.

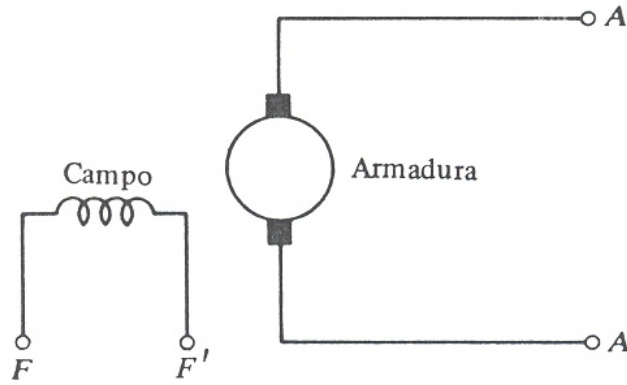
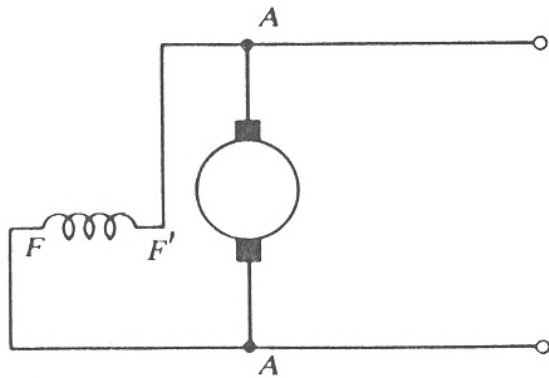
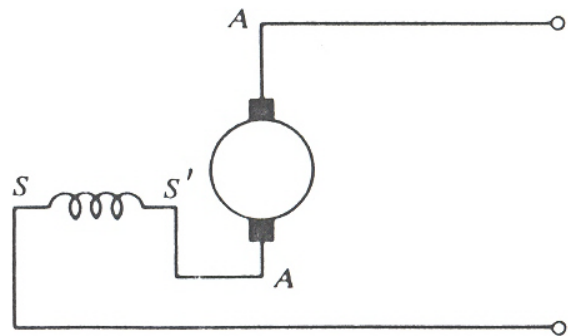


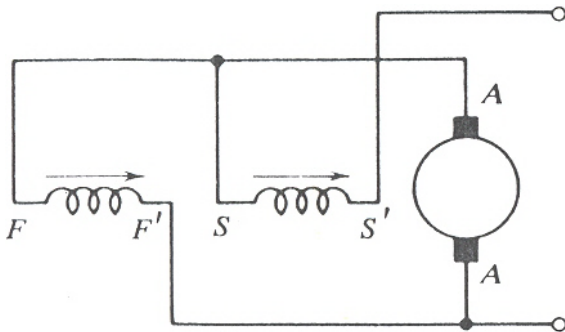
Fig. 3-11 : Diagrama esquemático do circuito de um gerador CC com excitação independente.



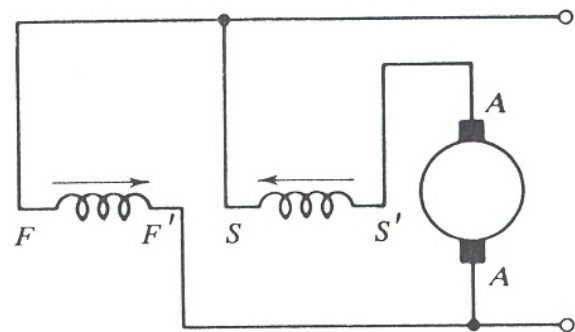
(a) Excitação em derivação.



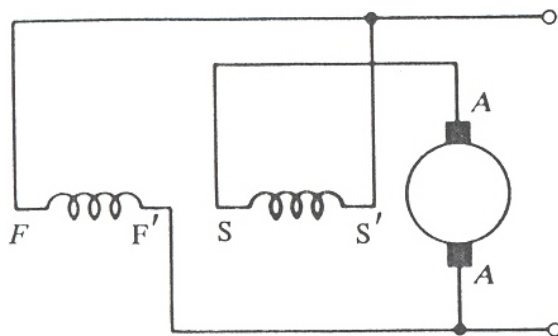
(b) Excitação em série.



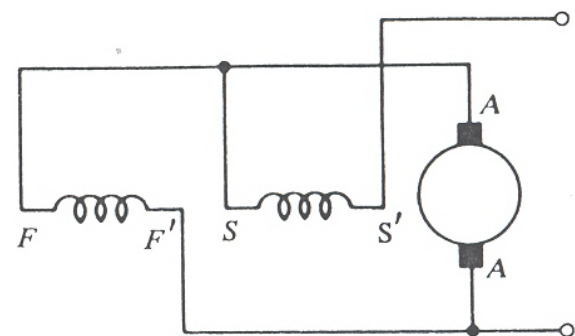
(c) Excitação composta cumulativa (ou aditiva).



(d) Excitação composta diferencial (ou subtrativa).



(e) Excitação composta com derivação longa.
(ou excitação composta longa)



(f) Excitação composta com derivação curta.
(ou excitação composta curta)

Fig. 3-12 : Diagramas esquemáticos dos circuitos de geradores CC auto-excitados.

OBSERVAÇÃO: Nas figuras 3-11 e 3-12(a) até (f), as letras *A-A* correspondem aos terminais do enrolamento da armadura, *F-F'* correspondem aos terminais do enrolamento do campo em derivação (ou shunt) e *S-S'* correspondem aos terminais do enrolamento do campo em série.

No gerador CC tipo shunt, a excitação é produzida por um enrolamento de campo conectado através de toda (ou quase toda) a tensão de linha produzida entre as escovas da armadura; logo como o enrolamento do campo-shunt deve suportar quase toda a tensão gerada pela armadura, ele é construído com *muitas espiras de fio fino* (Fig. 2-3). No gerador CC tipo série, a excitação é produzida por um enrolamento de campo ligado em série com a armadura, de modo que o fluxo produzido é função da corrente da armadura e da carga; logo como o enrolamento do campo-série deve suportar toda a corrente da armadura (ou corrente da carga), ele é construído com *poucas espiras de fio grosso* (Fig. 2-3).

A regulação de tensão de um *gerador série* é muito pobre. Mas não pode ser negada a capacidade do campo-série de produzir magnetização adicional útil em resposta ao incremento de carga. Esta característica útil do campo-série, combinada com a característica de tensão relativamente constante do *gerador shunt*, conduziu ao *gerador composto* que é muito mais usado do que os outros tipos de geradores CC, porque pode ser projetado de modo a oferecer uma ampla variedade de características.

3.5 – AUTO-EXCITAÇÃO DE UM GERADOR SHUNT (EM DERIVAÇÃO)

Como o gerador shunt auto-excitado está suprindo uma corrente relativamente pequena (em proporção à sua corrente nominal) para excitar seu próprio circuito de campo, pode-se supor que a queda de tensão interna $r_a \cdot I_a$ é desprezível, e que o valor de V_{ta} (tensão nos terminais da armadura) é igual ao valor de V_g (tensão gerada na armadura). Logo, é possível representar a reta associada à resistência de campo ($V_f \times I_f$) e a curva de magnetização da máquina ($V_g \times I_f$) em um eixo comum. Esta representação é vista na Fig. 3-13.

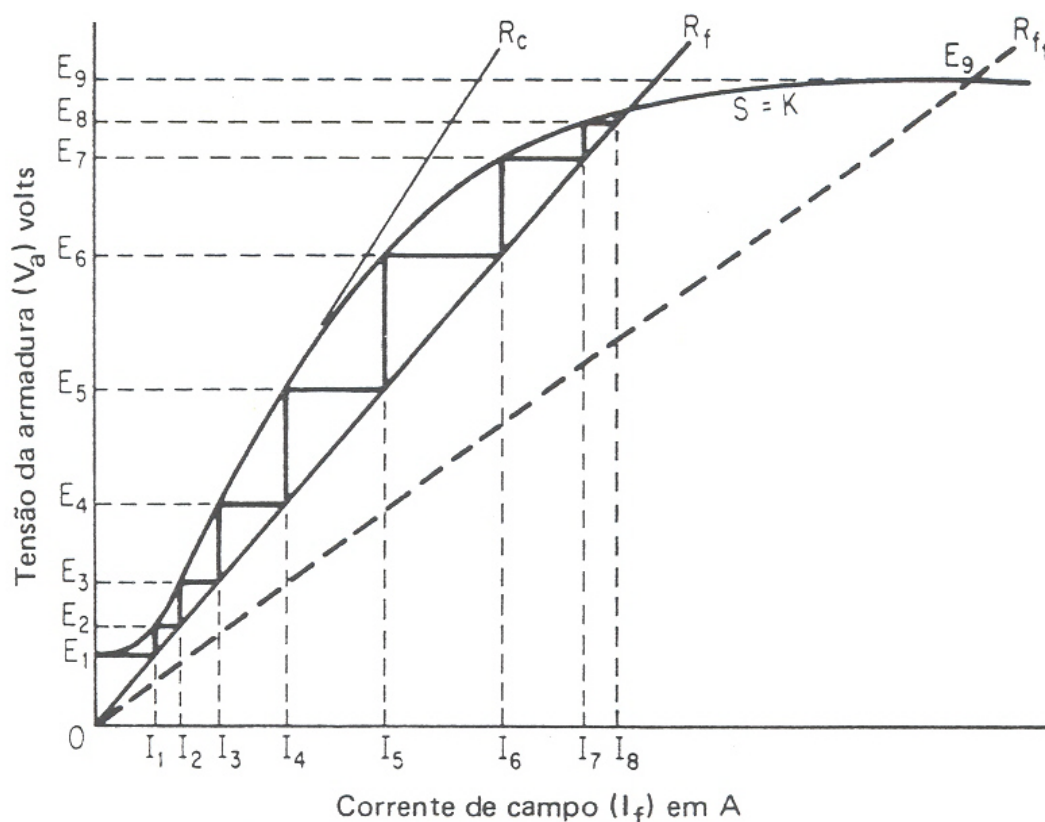


Fig. 3-13 : Escorvamento de um gerador shunt auto-excitado.

Nas Figs. 3-12(a) e 3-13, como o circuito de campo é ligado diretamente aos terminais da armadura, a ordenada (valores do eixo y) da reta da resistência de campo, R_f , é a tensão nos terminais da armadura, V_{ta} . A maneira pela qual o gerador shunt auto-excitado excita seu próprio campo e adquire uma tensão CC nos terminais da sua armadura é descrita com referência à Fig. 3-13 nos seguintes passos:

1. Suponha que o gerador parte do repouso, ou seja, a máquina primária tem velocidade nula. Apesar do magnetismo residual, a *fem* gerada, V_g , é zero.
2. À medida que a máquina primária faz girar a armadura, e a velocidade se aproxima do valor nominal, a tensão induzida devido ao magnetismo residual ($V_g = k \cdot \phi \cdot n$) e a velocidade (n) aumentam.
3. Na velocidade nominal, a tensão na armadura devido ao magnetismo residual é pequena, E_1 , como se vê na Fig. 3-13. Mas esta tensão também está aplicada no circuito de campo, cuja resistência é R_f . Assim, a corrente que flui no circuito de campo, I_1 , é também pequena.
4. Quando I_1 flui no circuito de campo do gerador da Fig. 3-12(a), resulta um aumento na *fmm* (devido a $N_f I_1$), que auxilia o magnetismo residual, aumentando a *fem* induzida para E_2 , como se mostra na Fig. 3-13.
5. A tensão E_2 é agora aplicada na resistência de campo, provocando a circulação de uma corrente I_2 maior no circuito de campo. $N_f I_2$ é uma *fmm* incrementada que produz uma tensão gerada E_3 .
6. E_3 produz I_3 no circuito de campo, que gera E_4 . Mas E_4 provoca a circulação de I_4 no campo, que produz E_5 ; e assim por diante, até alcançarmos E_8 que é o máximo valor.
7. O processo continua até o ponto em que a reta da resistência de campo corta a curva de magnetização na Fig. 3-13. Aqui o processo pára. A tensão induzida produzida, quando aplicada no circuito de campo, produz um fluxo de corrente que, por sua vez, produz uma *fem* induzida de mesma magnitude, E_8 , como se mostra na figura.

3.6 – CIRCUITO EQUIVALENTE DO GERADOR CC

As relações entre tensão e corrente em um circuito equivalente de um gerador CC (Fig. 3-14) são, de acordo com a lei de Ohm e as leis de Kirchhoff:

$$V_{ta} = V_g - r_a \cdot I_a \quad (3.1)$$

$$V_t = V_g - (r_a + r_s) \cdot I_a \quad (3.2)$$

$$I_L = I_a - I_f \quad (3.3)$$

- onde:
- V_{ta} → tensão nos terminais da armadura, V.
 - V_g → tensão gerada na armadura ou força eletromotriz *fem*, V.
 - V_t → tensão nos terminais do gerador, V.
 - r_a → resistência do circuito da armadura (incluindo a resistência de contato nas escovas), Ω .
 - r_s → resistência do campo em série, Ω .
 - r_f → resistência do campo em derivação, Ω .
 - I_a → corrente da armadura, A.
 - I_s → corrente do campo em série ($I_s = I_a$ ou $I_s = I_L$), A.
 - I_f → corrente do campo em derivação, A.
 - I_L → corrente da carga (ou corrente na linha), A.

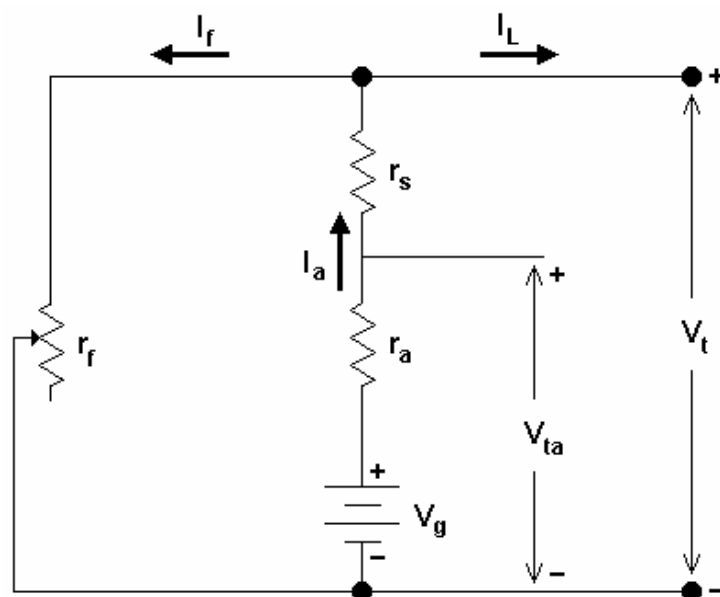


Fig. 3-14 : Circuito equivalente de um gerador CC (excitação composta com derivação longa).

3.7 – EQUAÇÃO DA TENSÃO NO GERADOR CC

A tensão média V_g gerada por um gerador pode ser calculada através da fórmula:

$$V_g = \frac{p \cdot Z \cdot \phi \cdot n}{60 \cdot b \times 10^8} \quad (3.4)$$

- onde:
- V_g → tensão média gerada por um gerador CC, V.
 - p → número de pólos.
 - Z → número total de condutores da armadura.
 - ϕ → fluxo por pólo, Wb.
 - n → velocidade da armadura (ou rotor), rpm.
 - b → número de caminhos paralelos através da armadura, dependendo do tipo de enrolamento da armadura.

Para qualquer gerador, todos os fatores da Eq. (3.4) são fixos, exceto ϕ e n . Portanto, a Eq. (3.4) pode ser simplificada assumindo a forma:

$$V_g = k \cdot \phi \cdot n \quad (3.5)$$

onde: $k = \frac{p \cdot Z}{60 \cdot b \times 10^8}$.

A Eq. (3.5) revela que o valor de uma *fem* induzida em qualquer circuito é proporcional à razão com que o fluxo está sendo interceptado. Assim, se ϕ duplicar e n permanecer o mesmo, o valor de V_g também é duplicado. Analogamente, se n dobrar de valor, permanecendo ϕ constante, V_g também dobra.

3.8 – REGULAÇÃO DE TENSÃO NOS GERADORES CC

A *regulação de tensão* de um gerador é a diferença entre a tensão nos terminais sem carga (SC) e com carga máxima (CM), e é expressa como uma porcentagem do valor da tensão nos terminais com carga máxima (carga nominal ou plena carga).

$$RT_{(\%)} = \frac{V_{SC} - V_{CM}}{V_{CM}} \times 100\% \quad (3.6)$$

Uma regulação com baixa porcentagem, característica de circuitos de iluminação, significa que a tensão nos terminais do gerador é praticamente a mesma com carga máxima ou quando está sem carga (em vazio).

GERADOR EM DERIVAÇÃO: Em vazio se excita com seu magnetismo residual até o valor da *fem* induzida plena. Com aplicação de carga aumenta-se a queda de tensão na armadura ($R_a I_a$) e a tensão nos terminais cai levemente ($V_t = V_g - R_a I_a$), enquanto a velocidade e o fluxo magnético permanecem inalterados; com isto porém, ocorre uma redução na corrente de campo. Menor excitação e maior influência da reação da armadura enfraquecem o campo magnético, diminuindo a *fem* induzida o que provoca uma redução da tensão nos terminais com o aumento da carga (15 a 25%, a plena carga).

GERADOR EM SÉRIE: Em vazio não tem capacidade de efetuar sua auto-excitação; entretanto, devido à remanência dos pólos, surge uma pequena tensão induzida nos terminais (cerca de 3%). Nas condições de carga a tensão nos terminais, acompanhando a curva de magnetização do ferro, se eleva até a saturação do núcleo. Como a corrente de carga também é a corrente de campo, a tensão nos terminais varia acentuadamente com a carga, tornando-se praticamente constante, próximo da saturação do núcleo.

GERADOR COMPOSTO: Tem um comportamento semelhante ao gerador em derivação. Com excitação no mesmo sentido, o campo série fortalece o campo em derivação; o campo série pode ser dimensionado de tal forma que o aumento da carga provoque um acréscimo no fluxo magnético, compensando assim a queda de tensão. Neste tipo, “composto normal”, a tensão nos terminais fica sendo independente da carga ($\pm 2\%$).

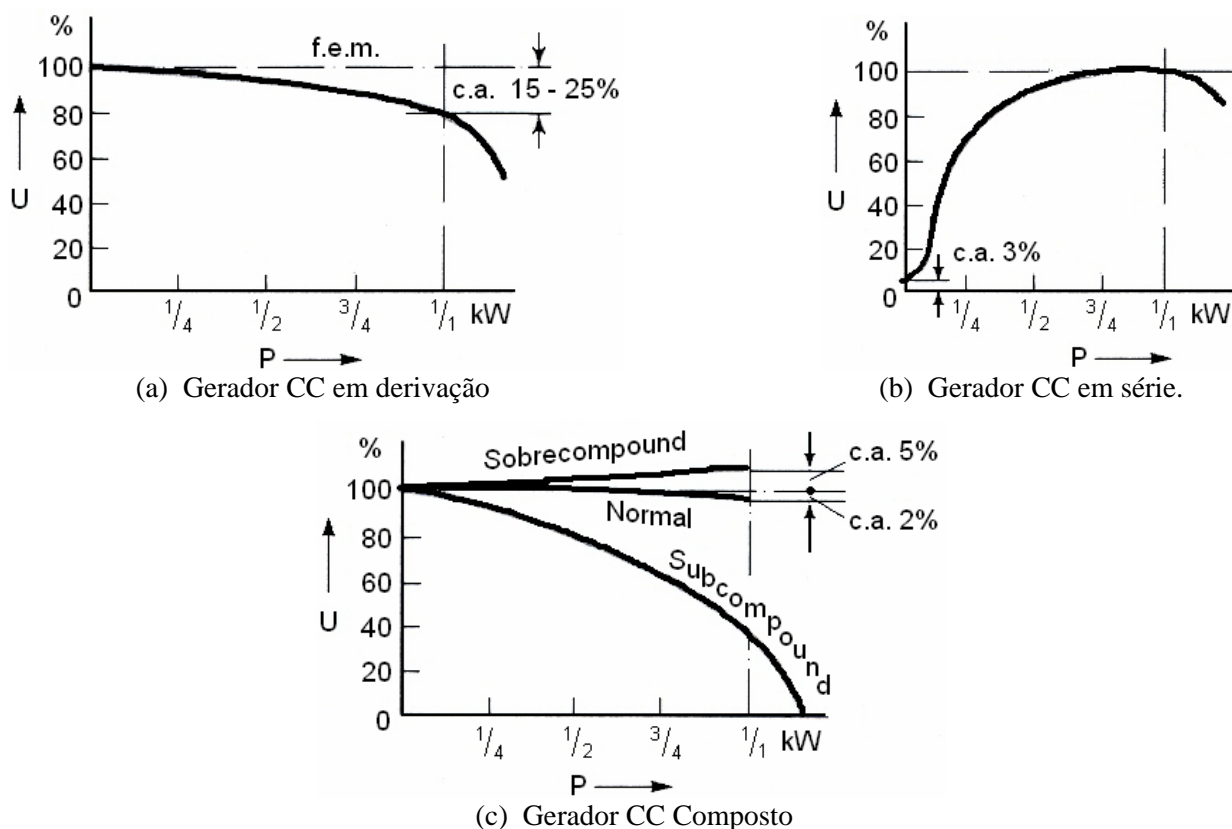


Fig. 3-15 : Comportamento dos geradores CC, tensão nos terminais em função da carga.

EXEMPLO 3.1: Na Fig. 3-16, uma armadura com 22 bobinas é ligada a um comutador com 22 segmentos (enrolamento imbricado simples). Há duas escovas. A escova + faz o curto-circuito na bobina 11 da armadura, enquanto a escova - faz o curto-circuito na bobina 22 da armadura. Não há tensão induzida em nenhuma dessas duas bobinas. Os dois grupos de bobinas, de 1 a 10 e de 12 a 21, estão ligados em paralelo através das escovas, porque a tensão nos dois grupos de bobinas tem a mesma polaridade. As escovas ligam também a tensão gerada ao circuito de carga externo. Ao mesmo tempo em que a escova põe em curto-circuito uma bobina da armadura, ela recebe a tensão e a corrente induzidas nas outras bobinas da armadura, porque uma extremidade de duas bobinas diferentes está ligada ao mesmo segmento do comutador (exemplo: bobina 21 e bobina 22).

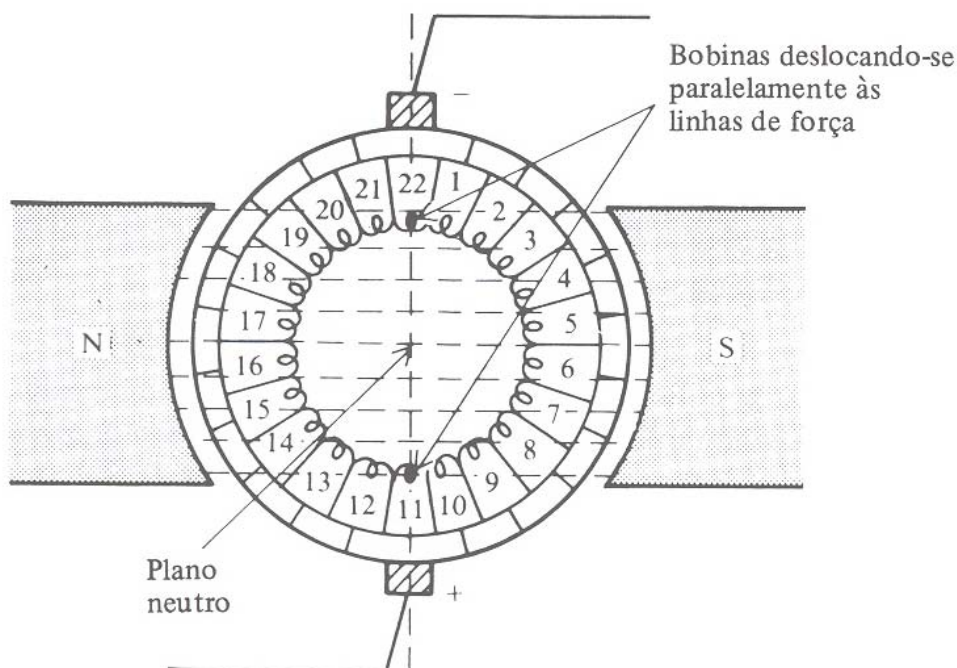


Fig. 3-16 : Ação comutadora da escova numa armadura com enrolamento imbricado simples.

EXEMPLO 3.2: Um gerador CC tem uma especificação de 100 kVA e 250 V. O que significa essa especificação?

RESPOSTA: Esse gerador pode liberar continuamente 100 kVA de potência a uma carga externa. A tensão nos terminais do gerador é de 250 V quando ele está fornecendo a corrente especificada para a carga nominal (ou plena carga).

EXEMPLO 3.3: O gerador do exemplo 3.2 e da Fig. 3-14, possui uma resistência de armadura (incluindo as escovas) de $0,025 \Omega$, e uma resistência de campo em série de $0,005 \Omega$. Ele é mantido em 1.200 rotações por minuto (rpm) através de um motor de velocidade constante. Calcule a tensão gerada na armadura.

RESPOSTA: Da Eq. (3.2):

$$V_g = V_t + (r_a + r_s) \cdot I_a$$

$$V_g = 250 + 400 \cdot (0,025 + 0,005) = 250 + 12 = 262 \text{ V}$$

4 – MOTORES DE CORRENTE CONTÍNUA

4.1 – PRINCÍPIO DO MOTOR CC

Embora a construção mecânica de motores e geradores CC seja muito parecida, as suas funções são bastante diferentes. A função de um gerador é gerar uma tensão quando os condutores se deslocam através de um campo magnético, enquanto um motor serve para produzir um esforço para a rotação, ou *torque*, para produzir rotação mecânica.

Como você sabe, há um campo magnético em torno de um condutor que conduz corrente elétrica. Quando este condutor é colocado em outro campo magnético, os dois campos interagem.

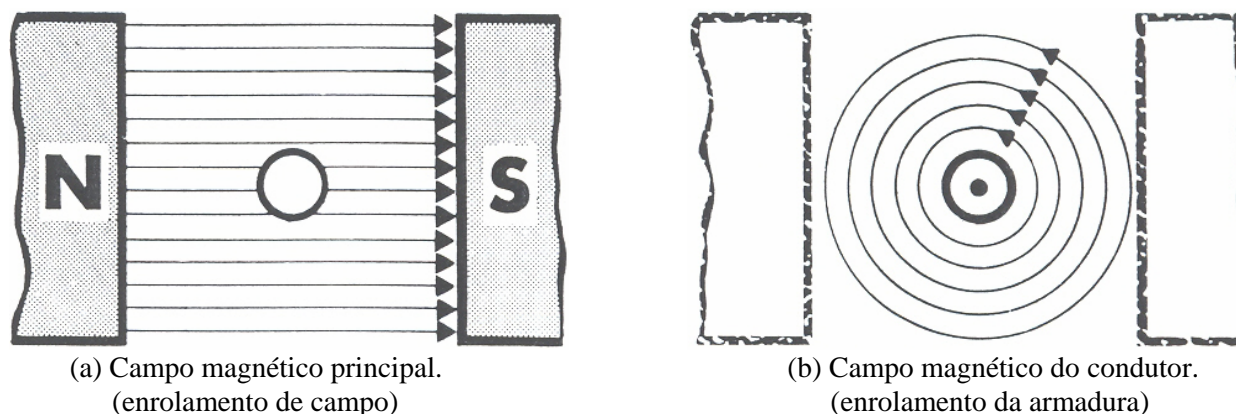


Fig. 4-1 : Campos magnéticos existentes no funcionamento de um motor.

Como os campos magnéticos nunca se cruzam, as linhas dos dois campos se acumulam em um lado e se anulam mutuamente no outro lado, produzindo, respectivamente, campos fortes e fracos.

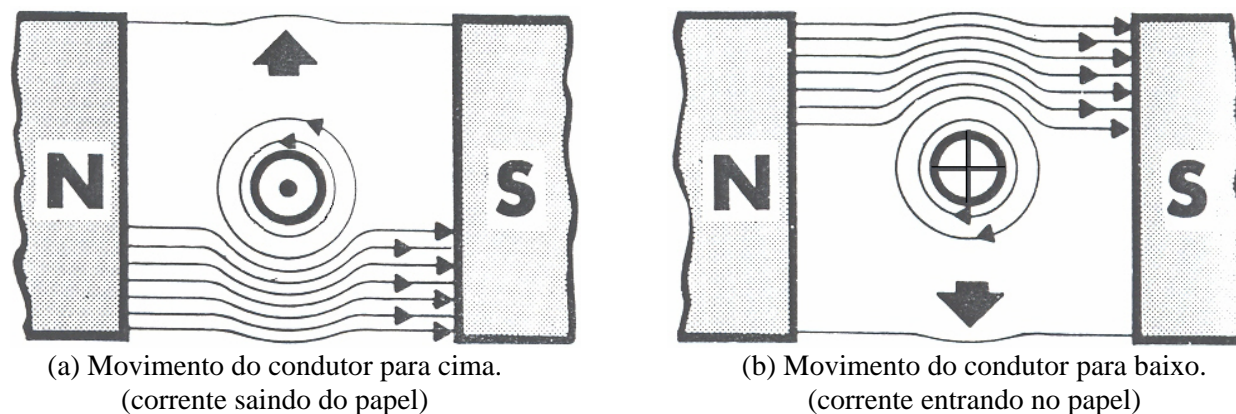


Fig. 4-2 : Interação entre os campos magnéticos principal e do condutor da armadura.

Lembre-se de que as linhas de fluxo com o mesmo sentido tendem a se repelir. Assim, as linhas sob o condutor mostrado acima, ao se repelirem, tendem a deslocar o condutor para cima ou, quando o sentido da corrente no condutor é invertido, a deslocá-lo para baixo. O movimento do condutor faz com que ele corte as linhas do campo magnético principal. Deste modo, aparece uma *fem* no condutor, a qual, de acordo com a lei de Lenz, tende a se opor ao movimento que a produziu. Isto significa que a *fem* induzida terá polaridade oposta à da tensão aplicada externamente ao motor; por este motivo é conhecida como força contra-eletromotriz *fcem*.

As relações eletromecânicas fundamentais, que distinguem a máquina operando como gerador da máquina operando como motor, podem ser resumidas como se segue:

<i>Ação Motora</i>	<i>Ação Geradora</i>
1. O torque eletromagnético produz (ajuda) a rotação.	1. O torque eletromagnético (desenvolvido no condutor percorrido pela corrente) opõe-se à rotação (lei de Lenz).
2. A tensão gerada f_{cem} (força contra-eletromotriz) se opõe à corrente da armadura (lei de Lenz).	2. A tensão gerada f_{em} (força eletromotriz) produz (ajuda) a corrente da armadura.
3. $V_g = V_{ta} - r_a \cdot I_a$	3. $V_g = V_{ta} + r_a \cdot I_a$

4.2 – SENTIDO DE ROTAÇÃO DA ARMADURA

Usa-se a *regra da mão esquerda* para determinar o sentido de rotação dos condutores da armadura (ou rotor). A regra da mão esquerda para os motores é a seguinte: com o polegar, o indicador e o médio da mão esquerda perpendiculares entre si, aponte o indicador no sentido das linhas de fluxo do campo magnético e o dedo médio no sentido da corrente que passa pelo condutor; o polegar indicará o sentido em que o condutor tende a se deslocar (Fig. 4-3(a)). Numa bobina retangular formada por uma única espira paralela a um campo magnético (Fig. 4-3(b)), o sentido da corrente no condutor da esquerda é para fora do papel, enquanto no condutor do lado direito é para dentro do papel. Portanto, o condutor da esquerda tende a se deslocar para cima com uma força F_1 , e o condutor do lado direito tende a se deslocar para baixo com uma força igual F_2 . As duas forças agem de modo a produzir um torque que faz a bobina girar no sentido horário. Um motor constituído por uma única bobina (Fig. 4-3(b)) é impraticável, porque ele tem centros mortos e o torque produzido é pulsante. Obtêm-se bons resultados quando se usa um grande número de bobinas, como no caso de um motor de quatro pólos (Fig. 4-4). À medida que a armadura gira e os condutores se afastam de um pólo passando pelo plano neutro (*zona neutra*), a corrente muda de sentido nos condutores em virtude da ação do comutador. Assim, os condutores sob um determinado pólo conduzem a corrente no mesmo sentido em todos os instantes.

A necessidade de comutação para *reverter* a corrente num condutor à medida que se move sob um pólo de polaridade *oposta* é tão fundamental para um motor de CC quanto para um gerador de CC. Finalmente, como nenhum torque *útil* (tangencial à armadura) é produzido por condutores que se encontram na região interpolar, pouco torque é perdido pelos condutores que estão em comutação.

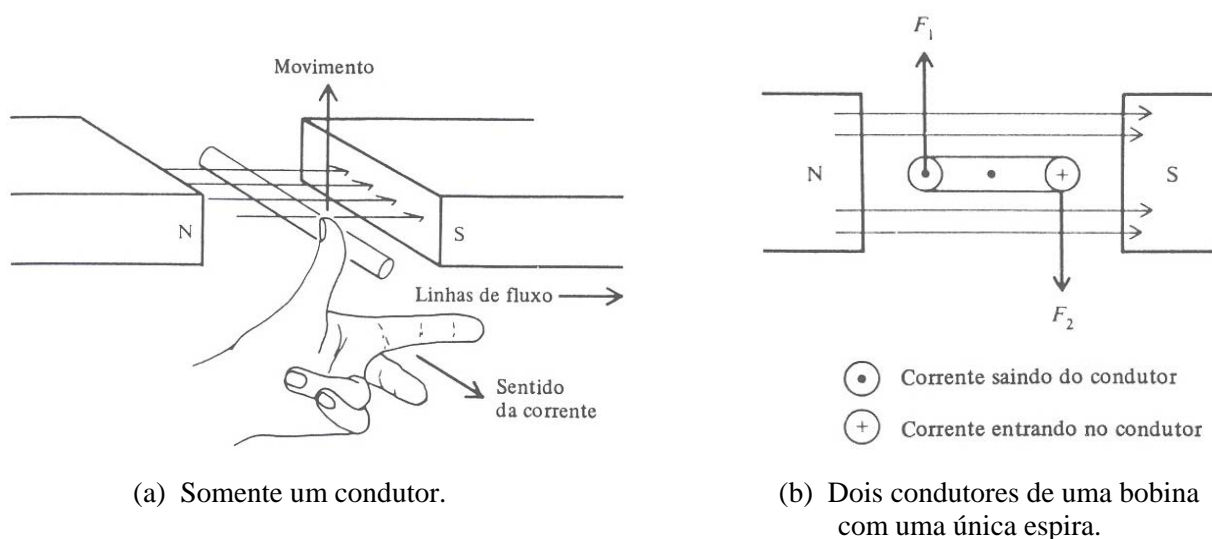


Fig. 4-3 : Aplicação da regra da mão esquerda para os motores elétricos.

Um dispositivo mnemônico conveniente é imaginar um Grupo Motor-Gerador que tenha o motor à esquerda e o gerador à direita. Assim, a regra da mão esquerda é usada para o motor e a regra da mão direita para o gerador. A expressão “Grupo Motor-Gerador” é comumente usada e não será facilmente esquecida. Estas regras pressupõem o sentido convencional da corrente.

ATENÇÃO: Se a opção for trabalhar com o sentido do fluxo dos elétrons (sentido real da corrente), todas as regras da mão esquerda e da mão direita devem ser invertidas.

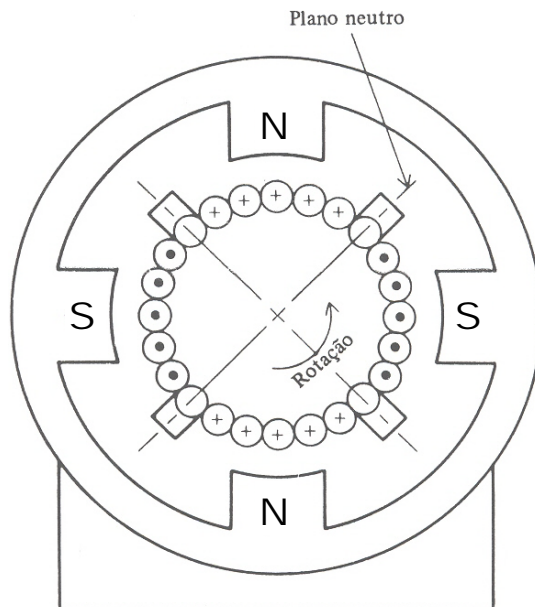


Fig. 4-4 : Sentido da corrente na armadura de um motor de quatro pólos com o sentido anti-horário.

4.3 – REAÇÃO DA ARMADURA NO MOTOR CC

Como existe corrente nos condutores da armadura do motor, há um campo magnético em torno da armadura. O campo da armadura distorce o campo principal, isto é, o motor apresenta uma *reação da armadura*, tal como acontece no gerador. Entretanto, o sentido da distorção causada pela reação da armadura no motor é oposto ao que se observa no gerador. No motor, a reação da armadura desloca o plano neutro de comutação no *sentido contrário* ao sentido de rotação.

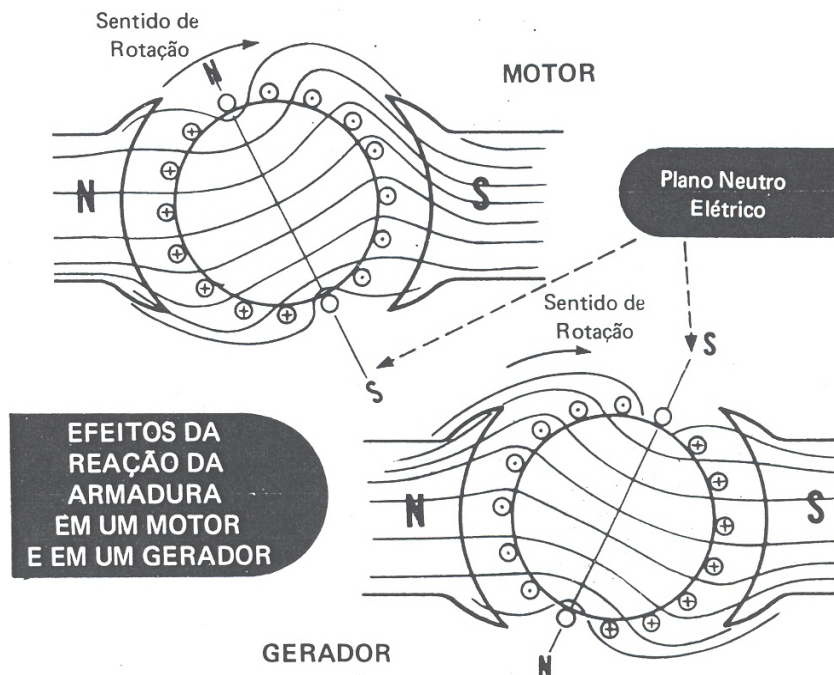


Fig. 4-5 : Reação da armadura e plano neutro elétrico nas máquinas de corrente contínua.

Para compensar o efeito da reação da armadura em um motor, as escovas devem ser deslocadas para trás, até que o centelhamento seja mínimo. Neste ponto, a bobina curto-circuitada pelas escovas está no plano neutro e não há *fem* induzida nela. A reação da armadura pode ser corrigida por meio de enrolamentos compensadores e interpólos (Fig. 2-1), de modo que o plano neutro fique sempre exatamente no meio do espaço entre os pólos principais da máquina. Assim, as escovas não precisam ser movidas depois de corretamente ajustadas.

4.4 – EQUAÇÃO DO TORQUE NO MOTOR CC

O torque T produzido por um motor é proporcional à intensidade do campo magnético e à corrente que circula pelos condutores da armadura.

$$T = k_t \cdot \phi \cdot I_a \quad (4.1)$$

onde: T → torque, m.kg.
 k_t → constante que depende das dimensões físicas da máquina.
 I_a → corrente da armadura, A.
 ϕ → número total de linhas de fluxo que entra na armadura por um pólo N, Wb.

4.5 – CIRCUITO EQUIVALENTE DO MOTOR CC

As relações entre a tensão e a corrente em um circuito equivalente de um motor CC (Fig. 4-6) são as seguintes:

$$V_{ta} = V_g + r_a \cdot I_a \quad (4.2)$$

$$V_t = V_g + (r_a + r_s) \cdot I_a \quad (4.3)$$

$$I_L = I_a + I_f \quad (4.4)$$

onde: V_{ta} → tensão nos terminais da armadura, V.
 V_g → tensão gerada na armadura ou força contra-eletromotriz *fem*, V.
 V_t → tensão nos terminais do motor, V.
 r_a → resistência do circuito da armadura (incluindo a resistência de contato nas escovas), Ω .
 r_s → resistência do campo em série, Ω .
 r_f → resistência do campo em derivação, Ω .
 I_a → corrente da armadura, A.
 I_s → corrente do campo em série ($I_s = I_a$ ou $I_s = I_L$), A.
 I_f → corrente do campo em derivação, A.
 I_L → corrente fornecida pela fonte de alimentação ao motor (ou corrente na linha), A.

Uma comparação entre o circuito equivalente do gerador (Fig. 3-14) e o circuito equivalente do motor (Fig. 4-6), mostra que a única diferença está no sentido da corrente na armadura e na linha.

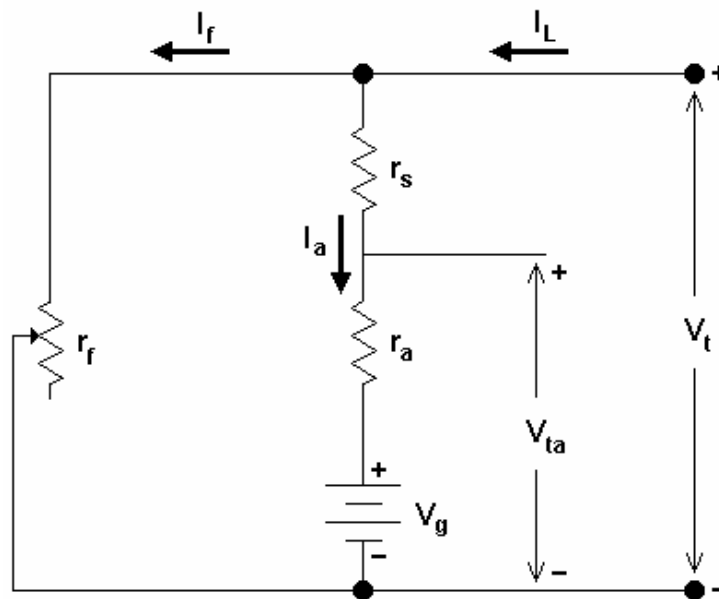


Fig. 4-6 : Circuito equivalente de um motor CC (motor composto).

A *fcem* de um motor, V_g , é gerada pela ação dos condutores da armadura ao interceptar as linhas de fluxo magnético. Se em um motor shunt a Eq. (4.3) for multiplicada por I_a (e $r_s=0$),

$$V_t \cdot I_a = V_g \cdot I_a + r_a \cdot I_a^2 \quad (4.5)$$

$V_t \cdot I_a$ é a potência fornecida à armadura do motor; $r_a \cdot I_a^2$ é a potência dissipada na forma de calor pela corrente da armadura; e $V_g \cdot I_a$ é a potência produzida pela armadura. Mas esta potência produzida pela armadura não representa uma potência útil de saída, pois uma parte dela precisa ser gasta para suprir as perdas mecânicas ou rotacionais do motor. A especificação de saída do motor é igual à entrada ($V_t \cdot I_L$) menos as perdas por aquecimento ($r \cdot I^2$) e as perdas rotacionais. As unidades mais usuais para a saída de um motor são:

1. *cv* de *cavalo-vapor*: $cv = \frac{Watts}{736} \Rightarrow Watts = 736 \times cv \quad (4.6)$

2. *HP* diretamente do inglês “horse-power”: $HP = \frac{Watts}{746} \Rightarrow Watts = 746 \times HP \quad (4.7)$

4.6 – VELOCIDADE DE UM MOTOR

A velocidade é dada pelo número de rotações do eixo com relação ao tempo e é expressa em unidades de rotações por minuto (rpm). Uma redução no campo magnético do motor provoca um acréscimo na sua velocidade e um aumento no campo provoca uma diminuição na velocidade do motor.

Tais afirmações podem ser comprovadas com uma simples manipulação da Eq. (3.5), resultando em:

$$n = \frac{V_g}{k \cdot \phi} \quad (4.8)$$

Pelo fato de a velocidade do motor variar com a excitação do campo, costuma-se empregar uma forma conveniente de se controlar a velocidade variando o fluxo do campo através do ajuste da resistência no circuito do enrolamento de campo.

4.7 – REGULAÇÃO DE VELOCIDADE NO MOTOR

A regulação de velocidade de um motor é definida como: *a variação da velocidade desde a plena carga até a situação de carga nula, expressa em porcentagem da velocidade nominal.*

Se um motor puder manter uma velocidade praticamente constante para diferentes cargas, diz-se que o motor apresenta uma boa regulação de velocidade.

A *regulação de velocidade* de um motor é a diferença entre a velocidade do motor sem carga (n_{SC}) e a velocidade do motor com carga máxima (n_{CM}), e é expressa como uma porcentagem do valor da velocidade do motor com carga máxima (ou velocidade nominal).

$$RV_{(\%)} = \frac{n_{SC} - n_{CM}}{n_{CM}} \times 100\% \quad (4.9)$$

4.8 – TIPOS DE MOTORES CC

4.8.1 – Motor Shunt (Motor em Derivação)

Este é o tipo mais comum de motor CC. Ele é ligado da mesma forma que o gerador shunt ou gerador em derivação (Fig. 4-7(a)). Suas curvas características de *velocidade × carga* e *torque × carga* (Fig. 4-7(b)) mostram que o torque aumenta linearmente com o aumento na corrente da armadura, enquanto a velocidade cai ligeiramente à medida que a corrente da armadura aumenta. A velocidade básica é a velocidade com carga máxima. O ajuste de velocidade é feito inserindo-se uma resistência no campo usando um reostato de campo. Numa posição do reostato, a velocidade do motor, permanece praticamente constante para todas as cargas. Os acionadores ou dispositivos de partida usados com os motores CC limitam a corrente de partida da armadura em 125 a 200 por cento da corrente de carga máxima (nominal). Deve-se tomar cuidado para não se abrir o circuito do campo de um motor em derivação que está rodando sem carga, porque a velocidade do motor aumenta descontroladamente até o motor queimar.

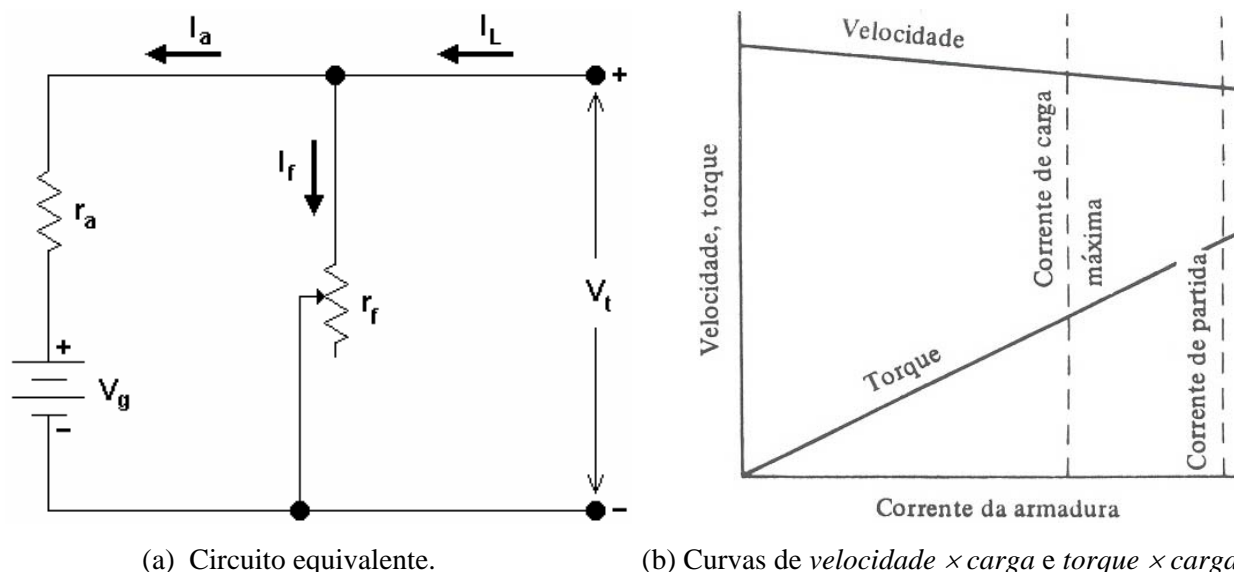
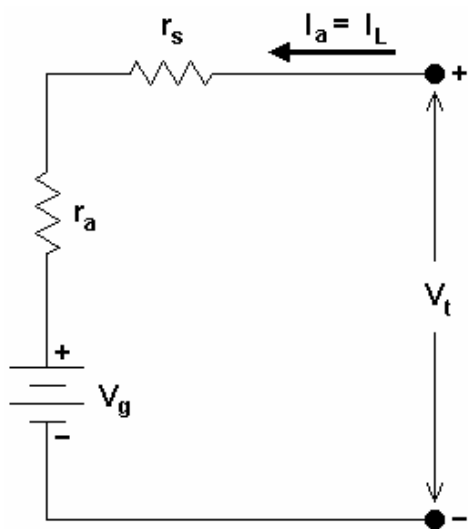


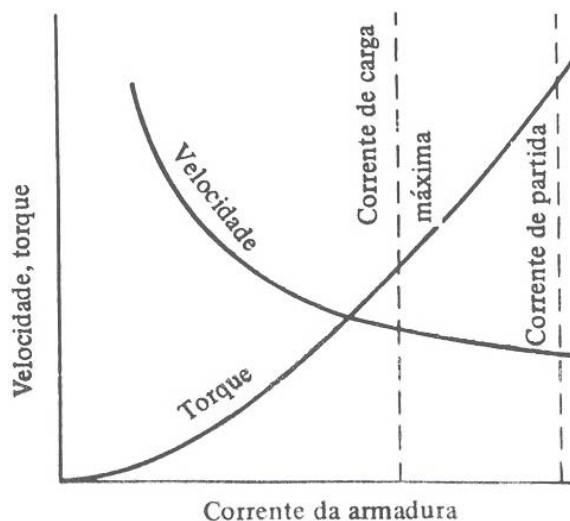
Fig. 4-7 : Características de um motor shunt (em derivação) típico.

4.8.2 – Motor Série

O campo deste tipo de motor é ligado em série com a armadura (Fig. 4-8(a)). A velocidade varia de um valor muito alto com uma carga leve até um valor bem baixo com a carga máxima (Fig. 4-8(b)). O motor série é conveniente quando parte com cargas pesadas ligadas a ele (guindastes e guinchos), porque com altas correntes na armadura ele produz um torque elevado e funciona em baixa rotação (Fig. 4-8(b)). Sem nenhuma carga, a velocidade de um motor série aumentará ilimitadamente até o motor se destruir. Entretanto, os grandes motores série são geralmente ligados diretamente à carga e não através de correias ou polias.



(a) Circuito equivalente.

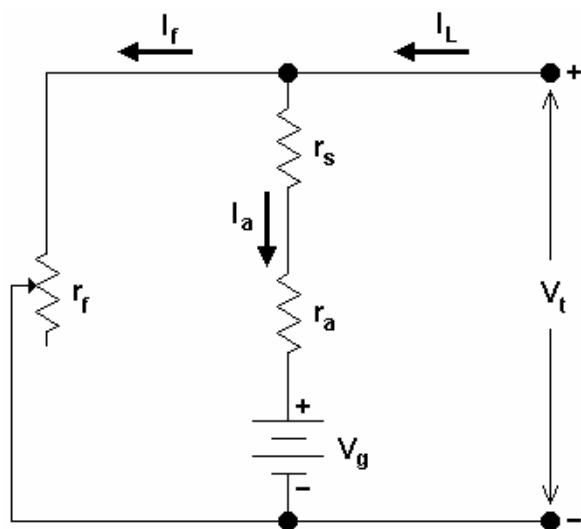


(b) Curvas de *velocidade × carga* e *torque × carga*.

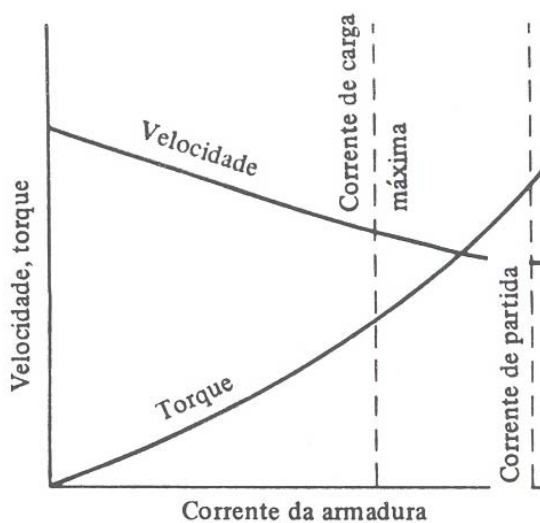
Fig. 4-8 : Características de um motor série típico.

4.8.3 – Motor Composto (Compound)

Este tipo de motor CC associa as características operacionais dos motores shunt e dos motores série (Fig. 4-9(b)). O motor composto funciona com segurança sem carga. À medida que se adicionam as cargas, a sua velocidade diminui, e o torque é maior se comparado com o do motor shunt (Fig. 4-10).



(a) Circuito equivalente.



(b) Curvas de *velocidade × carga* e *torque × carga*.

Fig. 4-9 : Características de um motor composto típico.

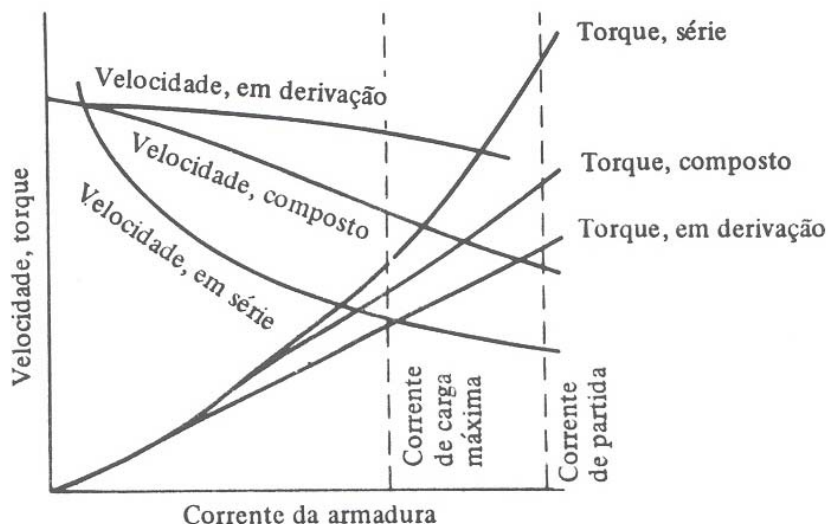


Fig. 4-10 : Comparação entre as características de motores CC shunt, série e composto.

4.9 – INVERSÃO DO SENTIDO DE ROTAÇÃO DO MOTOR CC

O sentido de rotação de um motor depende do sentido do campo magnético e do sentido da corrente na armadura. Quando o condutor é colocado em um campo magnético, ele é submetido a uma força resultante da combinação do seu campo magnético com o campo magnético principal. Esta força causa a rotação da armadura em um certo sentido. Se for invertido o sentido do campo ou o sentido da corrente na armadura, a rotação do motor também será invertida. Entretanto, se os dois forem invertidos ao mesmo tempo, o motor continuará a girar no mesmo sentido. Em geral os motores são instalados para funcionar com sentido de rotação constante. No entanto, há ocasiões em que é necessário trocar o sentido de rotação. Lembre-se de que você deve trocar as ligações do campo *OU* da armadura, porém *não os dois* ao mesmo tempo. Nas máquinas grandes, os fabricantes comumente proporcionam um meio fácil para inverter as ligações do campo.

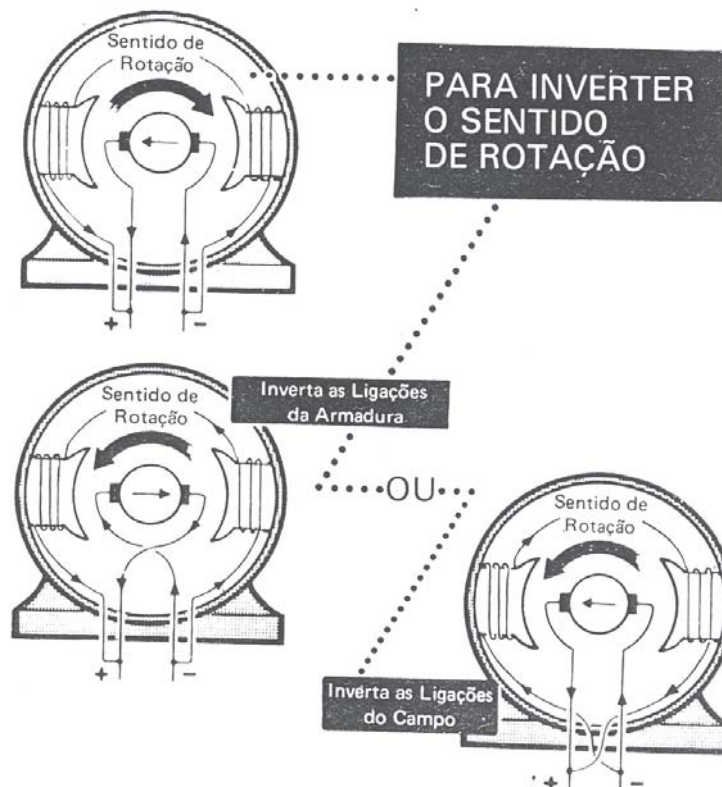


Fig. 4-11 : Ligações para inversão do sentido de rotação do motor CC.

4.10 – RELAÇÃO ENTRE VELOCIDADE E TORQUE

Durante o funcionamento do motor CC, a força contra-eletromotriz V_g apresenta um valor maior quando a velocidade n do motor aumenta. No entanto, a corrente da armadura I_a diminui com o aumento da f_{cem} (na alta velocidade), produzindo um torque T cada vez menor. Logo, ficam estabelecidas as seguintes relações: $n \uparrow \Rightarrow V_g \uparrow \Rightarrow I_a \downarrow \Rightarrow T \downarrow$ ou $n \downarrow \Rightarrow V_g \downarrow \Rightarrow I_a \uparrow \Rightarrow T \uparrow$.

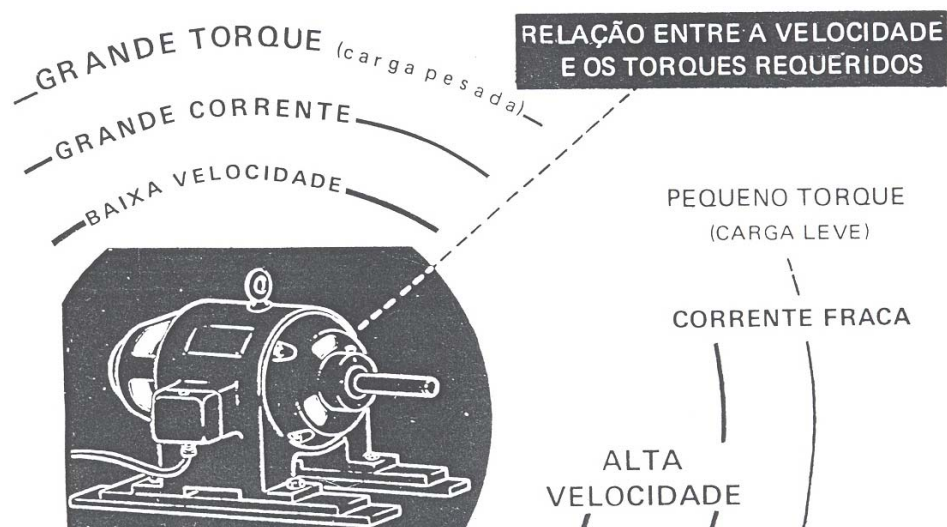


Fig. 4-12 : Relação entre o torque, a corrente e a velocidade do motor.

4.11 – REQUISITOS DE PARTIDA DOS MOTORES CC

Há duas exigências durante a partida dos motores:

1. Tanto o motor quanto os condutores das linhas de alimentação devem estar protegidos contra um fluxo excessivo de corrente durante o período da partida, colocando-se uma resistência externa em série com o circuito da armadura.
2. O torque de partida no motor deve ser o maior possível para fazer o motor atingir a sua velocidade máxima (nominal) no menor tempo possível.

O valor da resistência de partida necessária para limitar a corrente de partida da armadura até o valor desejado é:

$$R_p = \frac{V_t}{I_p} - r_a \quad (4.10)$$

onde: R_p → resistência de partida, Ω .
 V_t → tensão nos terminais do motor, V.
 I_p → corrente de partida desejada na armadura, A.
 r_a → resistência da armadura, Ω .

EXEMPLO 4.1: Um motor shunt alimentado por uma linha de 240 V, tem uma corrente de armadura de 75 A. Se a resistência do circuito de campo for de 100 Ω , qual será a corrente do campo, a corrente na linha e a potência de entrada no motor?

RESPOSTA:

$$I_f = \frac{V_t}{r_f} = \frac{240}{100} = 2,4 \text{ A}$$

$$I_L = I_f + I_a = 2,4 + 75 = 77,4 \text{ A}$$

$$P_{ENTRADA} = V_t \cdot I_L = 240 \cdot (77,4) = 18.576 \text{ W} = 18,6 \text{ kW}$$

BIBLIOGRAFIA

- [1] ELETRICIDADE BÁSICA.
Van Valkenburgh, Nooger & Neville, Inc.
Ao Livro Técnico S/A – Edição Revista – Vol. 5.
The Brolet Press, New York.

- [2] MÁQUINAS ELÉTRICAS E TRANSFORMADORES.
Irving L. Kosow, Ph. D.
Editora Globo – 8ª Edição.

- [3] ELETRICIDADE BÁSICA.
Milton Gussow
Makron Books – 2ª Edição Revisada e Ampliada.
Coleção Schaum.

- [4] CARACTERÍSTICAS E ESPECIFICAÇÕES DE MOTORES
DE CORRENTE CONTÍNUA E CONVERSORES CA/CC.
Apostila do Curso DT – 3.
WEG Indústrias S.A. – Máquinas.

- [5] MANUAL DE INSTALAÇÃO E MANUTENÇÃO DE MOTORES
DE CORRENTE CONTÍNUA.
Manual do Fabricante.
WEG Indústrias S.A. – Máquinas.

- [6] MÁQUINAS ELÉTRICAS DE CORRENTE CONTÍNUA.
Alfonso Martignoni.
Editora Globo – Edição 1987.

- [7] MÁQUINAS ELÉTRICAS.
S. A. Nasar
Makron Books.
Coleção Schaum.