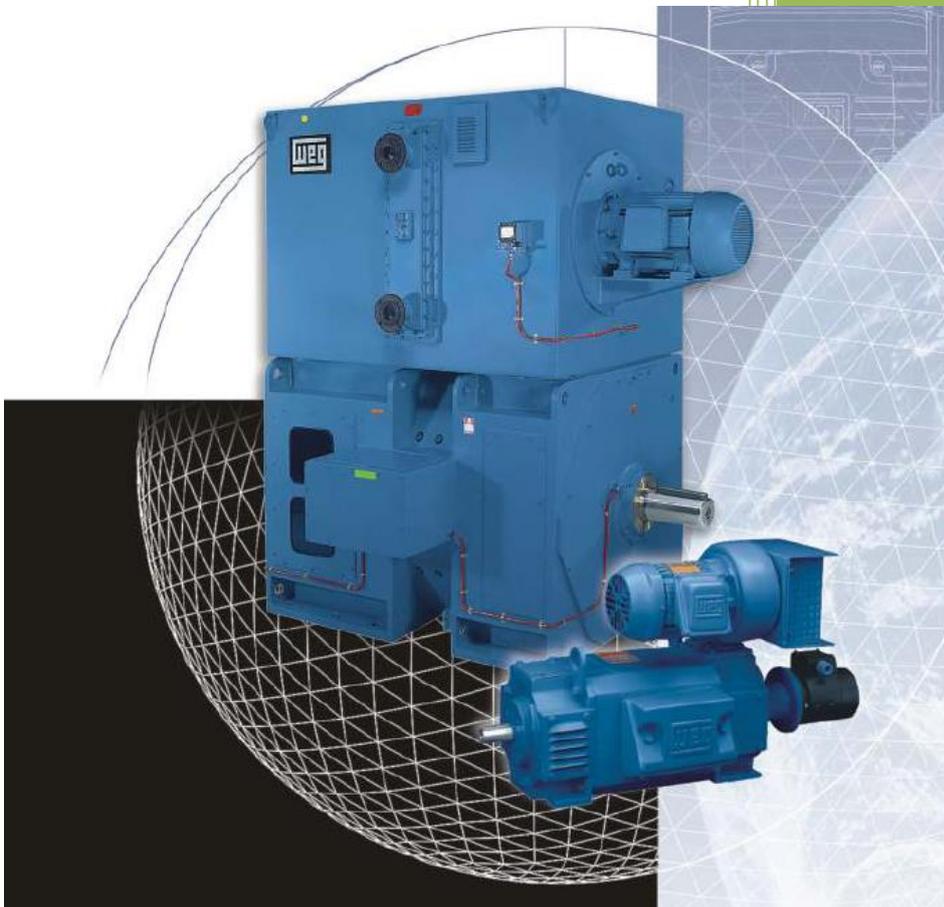


2017

Máquinas Corrente Contínua - Teoria



Elson Luiz da Silva

2017

SUMÁRIO

Introdução	2
1. Princípio de Funcionamento das Máquinas Elétricas	2
1.1. Princípio de Funcionamento Aplicado ao Gerador de Tensão	3
1.2. Princípio de Funcionamento Aplicado ao Motor Elétrico	3
1.3. Princípio de Funcionamento da Máquina de Corrente Contínua	5
2. Reação do Induzido no gerador CC	7
3. Reação do induzido no motor CC	9
4. Pólos de Comutação e de Compensação	10
5. Força Contra-eletromotriz	10
6. Comutação	12
7. Principais Partes Construtivas de uma Máquina CC	14
7.1 Partes Constituintes do Estator	14
7.2 Partes Constituintes do Rotor	15
8. Controle de Velocidade nos Motores CC	15
9. Vantagens e Desvantagens dos Motores CC	18
10. Principais Conexões dos Enrolamentos dos Motores CC	18
10.1 Excitação Independente	19
10.2 Excitação em Derivação	19
10.3 Excitação Série	19
10.4 Excitação Mista	19
11. Rendimento do Motor CC	20
12. Valores Nominais	20
13. Bibliografia	21

Introdução

A máquina CC é um dos 3 tipos básicos de máquinas elétricas (existem ainda máquinas síncronas e máquinas de indução) que tem sido largamente usada na indústria, principalmente quando se necessita de variação de velocidade, uma vez que ela é capaz de fornecer torque adequado numa ampla faixa de velocidade. Apesar de sua utilização estar diminuindo nos últimos anos, porque as máquinas de indução e as máquinas síncronas alimentadas por conversores estáticos permitirem igualmente variação de velocidade, em algumas aplicações as máquinas de corrente contínua continuam sendo muito utilizadas devido a sua alta confiabilidade no que tange a controle de velocidade, torque e potência. Neste manual é feita uma introdução sobre o princípio de funcionamento e principais características da máquina de corrente contínua.

1. Princípio de Funcionamento das Máquinas Elétricas

ATENÇÃO: No desenvolvimento dos estudos deste padrão, utilizamos o sentido convencional da corrente, ou seja, do **POSITIVO** para o **NEGATIVO**.

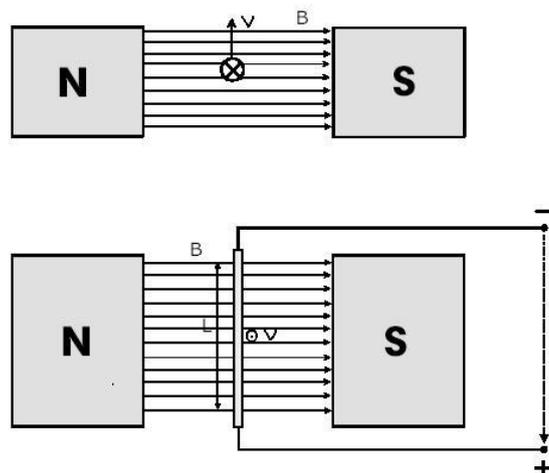


Figura 1 - Princípio de funcionamento das máquinas elétricas

Todas as máquinas elétricas funcionam segundo o princípio da indução eletromagnética, o qual se encontra ilustrado na figura 1. De acordo com este princípio, em todo condutor elétrico que se movimenta com uma dada velocidade dentro de um campo magnético surge uma tensão entre os seus terminais. A tensão obtida por meio deste fenômeno é chamada de tensão induzida, a qual é dada pela seguinte expressão:

$$e = B L v \quad (1)$$

onde:

e - tensão induzida (Volts)

B - indução magnética do campo (Tesla)

L - comprimento do condutor (m)

v - velocidade do campo na direção perpendicular ao campo magnético (m/s)

1.1. Princípio de Funcionamento Aplicado ao Gerador de Tensão

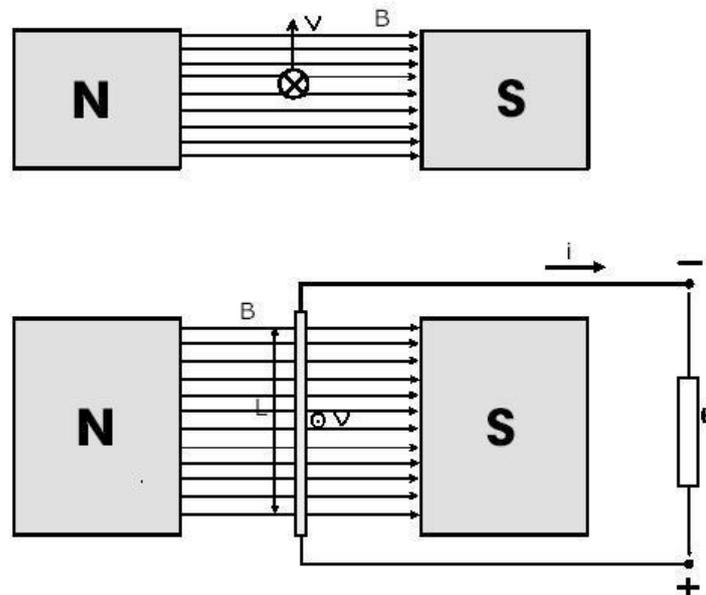


Figura 2 - Princípio de indução aplicado ao gerador de tensão

O condutor analisado anteriormente, quando ligado a uma carga, faz com que circule uma corrente pela mesma, conforme mostra a figura 2. O esquema na figura 2 representa, assim, um gerador elétrico elementar, cujo princípio pode ser resumido da seguinte forma:

- a máquina primária força o condutor a se movimentar no campo magnético exercendo sobre este uma força e transferindo ao mesmo uma determinada energia mecânica;
- O movimento do condutor faz com que uma tensão apareça entre os seus terminais a qual é dada pela equação (1);
- ao ser conectado a uma carga, circula uma corrente no condutor e pela carga. A potência mecânica transferida ao condutor é transferida ao circuito elétrico.

1.2. Princípio de Funcionamento Aplicado ao Motor Elétrico

Também de acordo com o princípio de indução, verifica-se que todo condutor percorrido por corrente e imerso num campo magnético sofre a ação de uma força, a qual é dada pela relação.

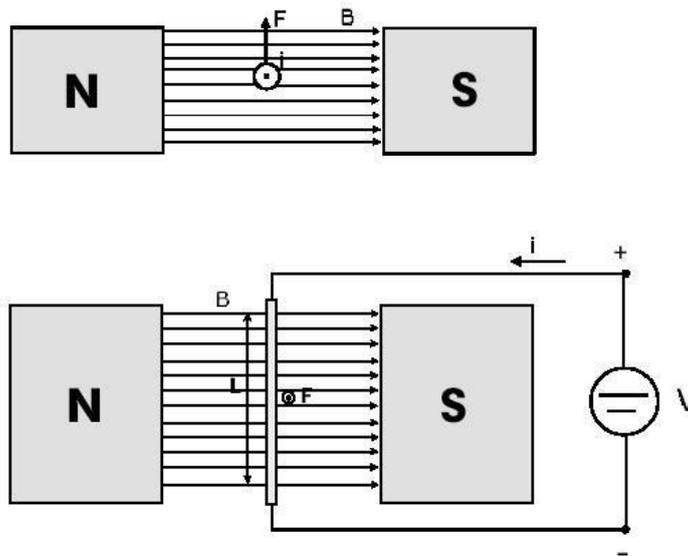


Figura 3 - Princípio de indução aplicado ao motor elétrico

$$\mathbf{F} = \mathbf{B L i} \quad (2)$$

B - indução magnética do campo (Tesla)

L - comprimento do condutor (m)

i - corrente no condutor (A)

F - força sobre o condutor na direção perpendicular ao campo magnético (Newton)

Desta forma, se no arranjo da figura 1 os terminais do condutor forem ligados a uma fonte de tensão de amplitude maior que a tensão gerada, haverá uma corrente circulando no condutor de sentido contrário ao caso anterior. Como o condutor se encontra no campo magnético, pode-se medir uma força F que atua ao longo do condutor, como ilustrado na figura 3.

Manual de Máquinas de Corrente Contínua – Teoria

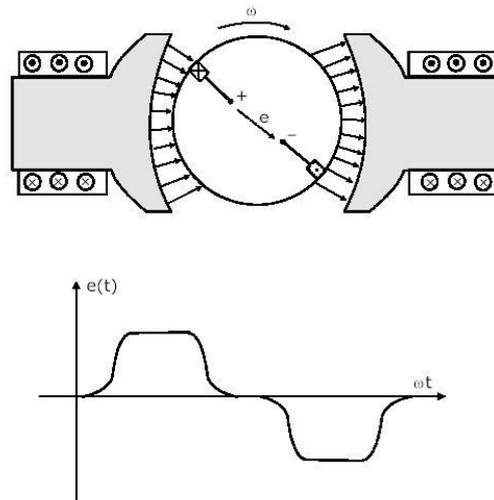


Figura 4 - Tensão induzida numa espira do enrolamento do induzido sem comutador.

1.3. Princípio de Funcionamento da Máquina de Corrente Contínua

Os princípios explicados anteriormente são explorados de uma forma particular nos três tipos básicos de máquinas elétricas (síncronas, de indução e máquina CC).

Na máquina CC o campo magnético é criado por um conjunto de pólos, os quais são dispostos ao longo da periferia da parte externa fixa, chamada de estator (figura 4). Os pólos norte e sul são dispostos de forma alternada. O enrolamento que alimenta os pólos e que gera o campo magnético é chamado de enrolamento de campo. Este enrolamento é alimentado a partir de uma fonte de corrente contínua, produzindo assim um campo magnético constante ao longo do tempo, como ilustra a fig. (4).

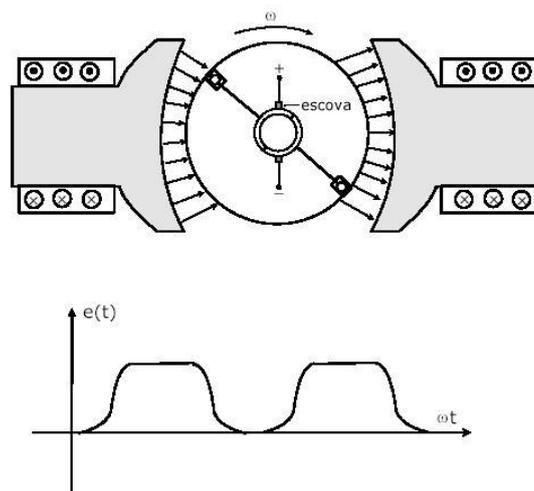


Figura 5 - Tensão induzida numa espira, enrolamento elementar composto de uma espira, rotor provido de um comutador elementar com 2 lâminas.

Os condutores em que a tensão é induzida não são condutores isolados, como ilustrados nas figuras 1, 2 e 3, mas sim espiras, as quais são conectadas umas às outras de forma a formarem um enrolamento fechado (figura 4). Este enrolamento está montado sobre uma estrutura cilíndrica que

Manual de Máquinas de Corrente Contínua – Teoria

gira e por este motivo chamada de rotor. Este enrolamento é chamado de enrolamento da armadura, ou ainda de induzido. Assim, a máquina CC constitui-se de duas partes fundamentais:

- **estator**, onde o enrolamento de campo é alojado;
- **rotor**, onde o enrolamento induzido é alojado.

A forma de funcionamento pode ser mais bem entendida analisando-se inicialmente uma máquina elementar composta de uma espira que gira no campo magnético criado por dois pólos, como ilustrado na figura 4. Como a espira percorre alternadamente um pólo positivo e um negativo (norte e sul) surge nos seus terminais uma tensão do tipo alternada, mostrada na figura 4.

Dado que máquina CC se deseja obter uma tensão do tipo contínua, é necessário que as conexões da espira com o circuito externo na figura 5 sejam invertida a cada meio período de rotação da espira. Isto é feito por meio de um **comutador** mecânico. A figura 5 ilustra o princípio de um comutador elementar, composto de apenas duas lâminas (lamelas), que conectam os terminais da espira ao circuito externo. Este arranjo é obtido da figura 4 acrescentando-se um comutador. A conexão do enrolamento da armadura passa a ser feita por meio de escovas que permanecem fixas sobre o comutador, que gira solidário com a armadura.

Assim, a ação do comutador faz com que a tensão nos terminais possua sempre a mesma polaridade. Usando-se apenas uma espira existe uma variação bastante acentuada na tensão induzida gerada; aumentando-se o número de espiras que giram no campo obtém-se uma tensão mais uniforme. A figura 6 mostra o caso onde existem 2 espiras girando no campo; o comutador possui neste caso 4 lâminas. Verifica-se que a tensão induzida está mais próxima de uma tensão contínua que no caso anterior.

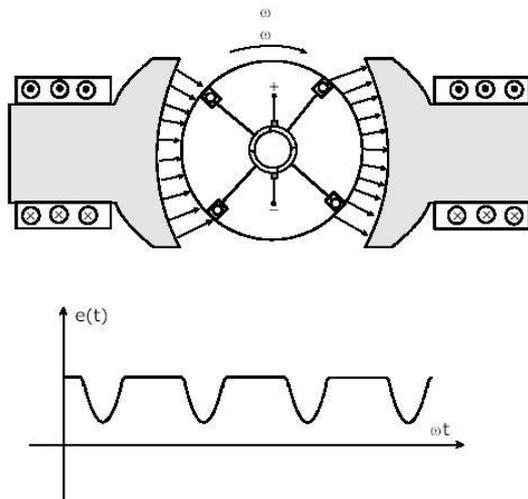


Figura 6 - Tensão induzida numa espira, enrolamento elementar composto de duas espiras, rotor provido de um comutador elementar com 4 lâminas.

Numa máquina real existe um grande número de espiras ligadas em série, de tal forma que a tensão é virtualmente uma tensão contínua. O comutador possui também um número muito grande de lamelas. A figura 7 ilustra o caso em que o número de espiras ligadas em série é bastante grande. O número de lamelas necessárias no comutador também é bastante grande.

As máquinas CC possuem assim, um terceiro componente básico chamado de **comutador**, cuja ação transforma a tensão alternada induzida em uma tensão contínua. O comutador está montado numa das extremidades da armadura e gira solidário com esta.

Manual de Máquinas de Corrente Contínua – Teoria

Sobre o comutador são montadas as escovas que permanecem fixas em relação ao estator. Elas são o elemento de conexão entre o circuito externo e o enrolamento da armadura.

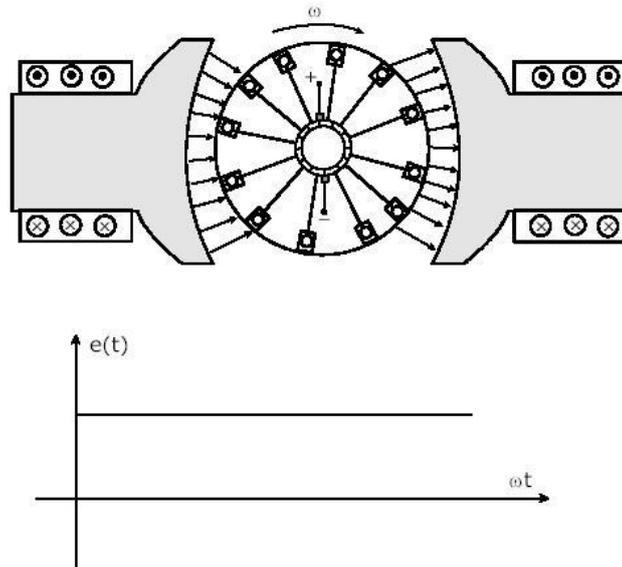
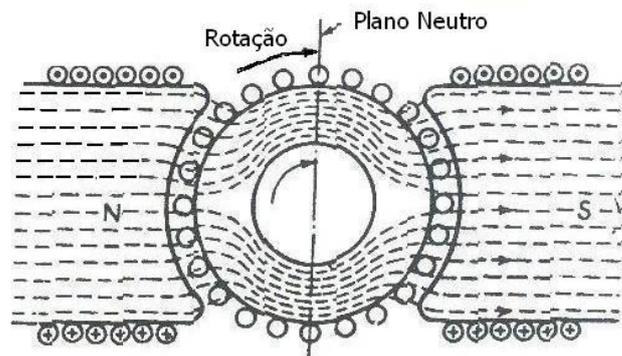


Figura 7 - Tensão resultante induzida em várias espiras em série. O rotor provido de um comutador com diversas lâminas.

2. Reação do Induzido no gerador CC

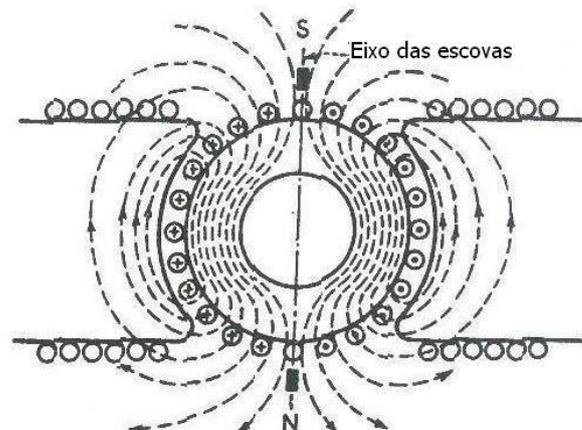
Na figura 8(a) é representado o fluxo que, procedente das massas polares indutoras, corta o induzido de um gerador bipolar quando não circula corrente pelos condutores (bobinas) do induzido. Esse fluxo é devido exclusivamente aos ampères-volta do indutor. Ainda se distribui simetricamente com relação ao eixo polar, isto é, a reta que une os centros dos pólos N e S. O plano neutro, que é perpendicular a direção do fluxo, coincide com o plano de simetria geométrico do sistema.



8(a) Corrente somente nos polos indutores

Na figura 8(b) estamos supondo que não está circulando corrente pelos enrolamentos do indutor, somente pelos condutores do induzido, e com o mesmo sentido que teriam caso o gerador estivesse trabalhando com carga. A corrente circula no mesmo sentido em todos os condutores que ficam na frente de um mesmo pólo e consideramos na figura que a corrente está penetrando no papel no lado esquerdo e saindo no lado direito (O sentido da corrente pode ser determinado pela regra da mão direita, de Fleming).

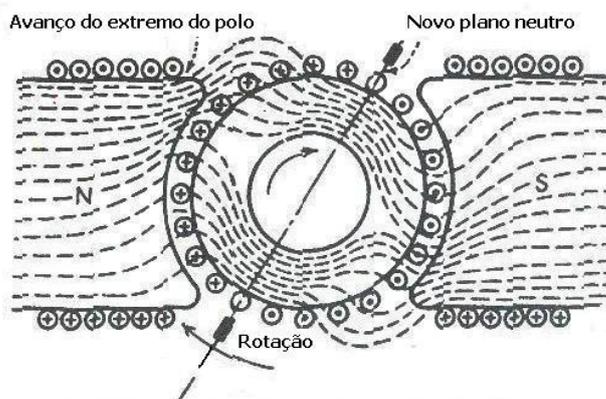
Manual de Máquinas de Corrente Contínua – Teoria



8(b) Corrente somente no induzido

Estes condutores combinam suas f.m.m. (regra do saca-rolha), produzindo um fluxo descendente que atravessa o induzido. A direção desse fluxo é perpendicular ao eixo polar.

A figura 8 (c) representa o resultado que se obtêm quando há atuação simultânea da corrente do indutor e do induzido, o que ocorre quando o gerador está com carga. A força magnetomotriz (f.m.m.) do induzido deforma o campo simétrico do indutor representado na fig. 8(a) concentrando-o na extremidade superior do pólo NORTE e na inferior do pólo SUL. Como o induzido gira no sentido dos ponteiros do relógio, o fluxo se concentra no extremo das “cabeças” das peças polares. Ao contrário, o fluxo se debilita no outro extremo (“cola”) das peças polares.



8(c) Corrente circulando no indutor e no induzido

A passagem da corrente pelo induzido dá origem a um deslocamento do campo na direção de rotação do gerador. ***Deve ficar bem claro que o fluxo não é arrastado pela rotação mecânica do induzido e sim pela interação dos campos gerados.***

Como o plano neutro é perpendicular ao campo resultante, ele também sofreu um deslocamento (avanço) como podemos observar na figura.

3. Reação do induzido no motor CC

Na figura 9(a) representamos o induzido de um motor no qual está circulando corrente. O sentido das correntes nos condutores do induzido corresponde a situação em que eles giram no sentido dos ponteiros de um relógio e que haja um pólo **N** na esquerda. Os ampères-volta do induzido produzem neste uma f.m.m. F_A e o sentido do fluxo correspondente é de baixo para cima e forma um ângulo reto com o eixo dos pólos.

Na figura 9(b) estão desenhados os vetores que representam os valores e sentido da f.m.m. do induzido F_A e a f.m.m. do campo indutor F . A soma vetorial destes dois resulta a força F_o . O fluxo total produzido pela f.m.m. F_o está desviado, como indica a figura 9(c). Observamos que: 1º- o fluxo se concentra no extremo *posterior* do pólo (no sentido do movimento), e 2º- o plano neutro, perpendicular ao campo resultante, experimenta um giro para trás. Portanto em um motor é necessário deslocar as escovas para trás quando aumenta a carga, enquanto que em um gerador é necessário avançá-las. Se não fosse pela f.e.m. de autoindução, o eixo das escovas coincidiria com o plano neutro. Porém, a necessidade de compensar esta f.e.m. de autoindução, obriga a posicionar as escovas atrás do plano neutro quando o motor está com carga, como indica a figura 9(c). Assim, tanto no motor como no gerador é necessário posicionar as escovas fora do plano neutro de carga, a fim de compensar a f.e.m. de autoindução.

O atraso das escovas vem acompanhado de uma ação desmagnetizante do induzido sobre o campo indutor, como indica a figura 9(d), em que F_D é a componente de desmagnetização de F_A e F_C a componente de magnetização transversal. Portanto, quando aumenta a carga de um motor, a reação do induzido tende a aumentar sua velocidade.

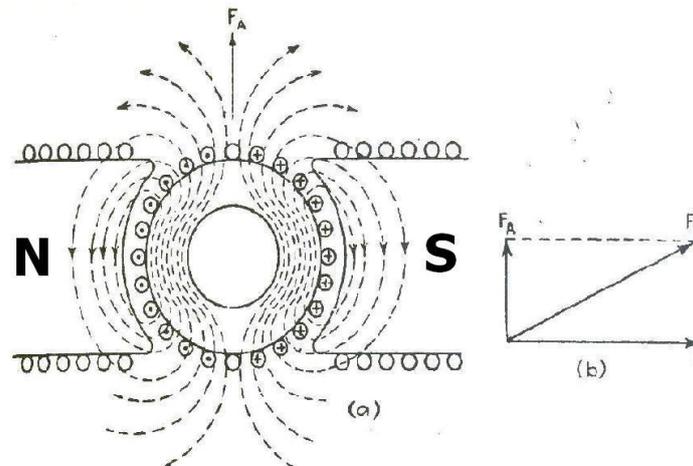


Fig. 9ab – Reação do induzido num motor

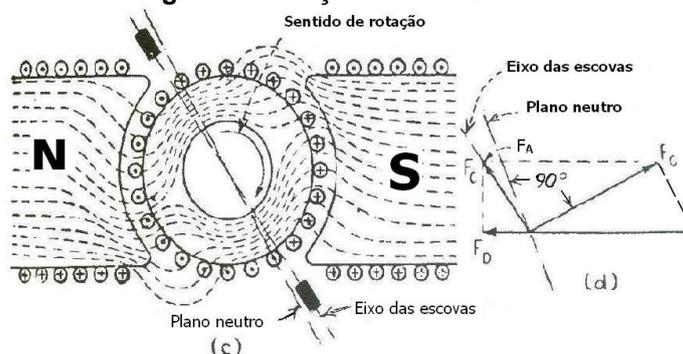


Fig. 9cd – Reação do induzido num motor

4. Pólos de Comutação e de Compensação

Para neutralizar os efeitos da reação do induzido e gerar um fluxo de comutação correto *unicamente na zona neutra* são utilizados os POLOS DE COMUTAÇÃO ou INTERPOLOS. Com estes pólos é possível reduzir o entreferro e, portanto, a relação entre os ampères-espira do campo e do induzido, assim como obter uma comutação satisfatória. O aumento da reação do induzido, entretanto, produz uma grande distorção do fluxo sob os pólos, com os problemas daí decorrentes.

Em geradores e motores grandes, como os utilizados em laminadores, que estão sujeitos a variações bruscas de carga continuamente, as fortes reações do induzido tendem a produzir instabilidades e intensos faiscamentos nas escovas. Assim é conveniente neutralizar as f.m.m. do induzido em toda a sapata polar.

Como as f.m.m. que produzem o fluxo do induzido estão situadas nos mesmos locais que as que produzem o fluxo principal, é possível, sem afetar o fluxo principal, neutralizar as f.m.m. do induzido com outra f.m.m. oposta.

Para que seja eficaz, esta f.m.m. de compensação dever ser, em todos os pontos, igual em intensidade e de sentido oposto a do induzido, o que se consegue mediante a instalação de enrolamentos de compensação colocados em ranhuras situadas na frente dos pólos.

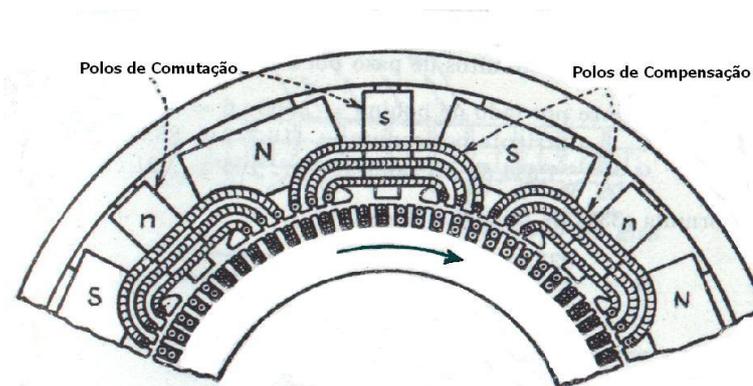


Fig. 10 – Enrolamentos para compensar a reação do induzido

Em cada um desses condutores passa uma corrente com sentido oposto ao da correspondente corrente do condutor do induzido. Como os enrolamentos de compensação - assim como os interpoles - estão ligados em série com o induzido, a corrente que circula por eles é de mesma intensidade, os ampères-espira dos enrolamentos de compensação é igual aos ampères-espira do induzido colocado a sua frente, de modo que a f.m.m. frente a cada pólo fique praticamente compensada.

5. Força Contra eletromotriz

A resistência do induzido de um motor de 10 CV de 110 volts é em torno de 0,05 ohms. Se este induzido for ligado diretamente a uma rede CC de 110 volts, a corrente, segundo a Lei de Ohm, teria a seguinte intensidade:

$$I = 110 / 0,05 = 2200 \text{ ampères}$$

Manual de Máquinas de Corrente Contínua – Teoria

Este valor não é somente excessivo como ilógico, especialmente se consideramos que a corrente nominal desse motor é de aproximadamente 90 A. Quando um motor está operando, a intensidade de corrente que circula pelo induzido não é, evidentemente, determinada somente por sua resistência ôhmica.

O induzido de um motor, em muitos aspectos, é muito semelhante ao de um gerador. Os condutores situados na sua superfície, além de conduzir uma corrente e desenvolver um par motor, cortam um fluxo magnético, assim é forçoso que induzam uma f.e.m.

Examinemos a figura 11, que representa um condutor do induzido de um motor, movimentando-se para baixo na frente de um pólo NORTE. Para que o movimento seja para baixo é necessário que o sentido da corrente no condutor seja da esquerda para a direita.

Se aplicarmos a regra da mão direita (gerador) para determinar o sentido da f.e.m. induzida neste condutor pelo seu movimento descendente, verificamos que ela é da direita para a esquerda, ou seja, OPONDO-SE A CORRENTE APLICADA NO CONDUTOR.

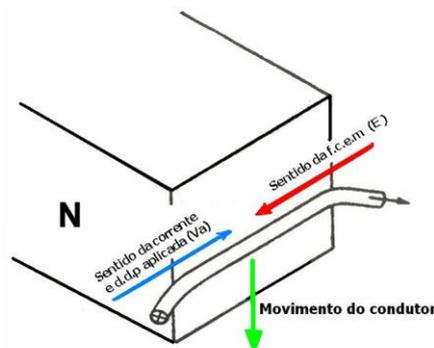


Fig. 11 – Relação entre o sentido da corrente e F.E.M.

A F.E.M. induzida em qualquer condutor do induzido de um motor tem sentido oposto ao da corrente aplicada, ou seja, se opõe que a corrente penetre no motor. Esta f.e.m. induzida recebe o nome de força contra eletromotriz (f.c.e.m.). Como se opõe a corrente, se opõe igualmente a tensão da linha.

Portanto a f.e.m. que aplicada no induzido do motor é a diferença entre a tensão da linha e a f.c.e.m.. Se V é a tensão da linha e E a F.C.E.M., a tensão que atua no circuito é

$$V - E$$

A intensidade da corrente no induzido é dada pela Lei de Ohm e é

$$I_a = \frac{V - E}{R_a}$$

onde R_a é a resistência do induzido. Esta equação pode ser escrita desta forma:

$$E = V - I_a.R_a$$

Exemplo: Determinar a f.c.e.m. em um motor de 10 CV cuja tensão entre os terminais é de 110volts e cujo induzido absorve 90A. A resistência do induzido é de 0,05 ohms.

$$E = 110 - 90.0,05 = 110 - 4,5 = 105,5 \text{ volts.}$$

6. Comutação

Vimos que a F.E.M. induzida em uma única espira é de corrente alternada. Para que essa corrente tenha sempre o mesmo sentido no circuito externo, sendo assim corrente contínua, é necessário ter um comutador que realize a comutação.

No breve intervalo que a bobina fica em curto-circuito através da escova, a corrente é invertida passando do máximo valor positivo de sua intensidade ao máximo negativo, ou vice-versa. A figura 12 apresenta a inversão da corrente em uma bobina do induzido quando se aproxima e quando se afasta da escova. Supondo-se que realizamos uma comutação ideal; a corrente, ao abandonar o coletor, se distribui uniformemente na escova. Em consequência, em cada bobina, a intensidade da corrente varia e inverte desde um máximo positivo a um máximo negativo de uma maneira uniforme, denominamos, então, que houve uma comutação retilínea.

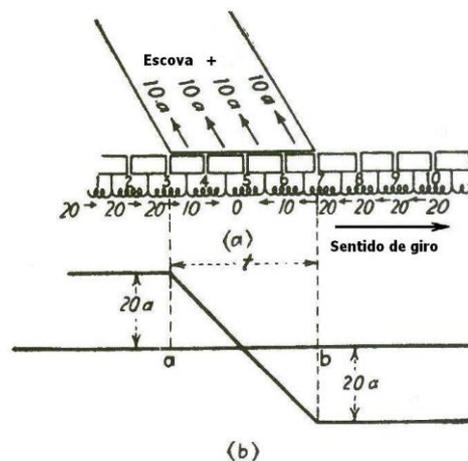


Fig. 12 – Corrente nas espiras em comutação (condições ideais)

Com uma carga de 20 ampères em cada circuito de passo de corrente pelo induzido, abandonam o induzido 40 ampères por escova.

Nas posições 1, 2, 3, passam por cada espira 20 A e, portanto, por uma espira qualquer em suas posições sucessivas, passarão 20 ampères. Como a escova cobre 4 lâminas do comutador e a distribuição da corrente é uniforme, deve circulara por ela 10 ampères procedente de cada lâmina.

A comutação compreende de duas partes:

1. Inversão da corrente em qualquer bobina desde o máximo valor positivo de sua intensidade a um valor igual, porém negativo. Esta inversão dever ser realizada em um tempo muito reduzido, necessário para que a lâmina passe sob a escova, ou seja, aquele que a escova põe a bobina em curto-circuito.
2. As correntes procedentes dos circuitos de passo do induzido se unem na escova e devem ser direcionadas ao circuito externo.

A comutação ideal, na prática, é obtida só de forma aproximada. Existem duas causas que se opõem a sua completa realização.

Observamos que quando a bobina está nas posições 4, 5, 6, a escova a põe em curto-circuito. Se uma f.e.m. é induzida na bobina em ditas posições, circulará uma corrente intensa, já que a

Manual de Máquinas de Corrente Contínua – Teoria

resistência do circuito é muito pequena nestas condições, pois se reduz simplesmente a da bobina, mais a do contato da escova que represente a maior parte da resistência total.

A figura 13 representa uma corrente, supostamente de 5 de 15 ampères, que circulam pelas bobinas 4 e 5, devido as f.e.m. induzidas nas mesmas enquanto a escova as põe em curto-circuito.

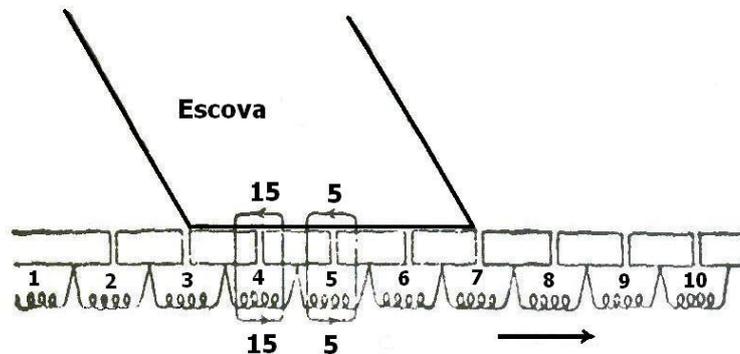


Fig. 13 – Correntes de curto-circuito entre as escovas

Se as correntes locais de curto-circuito da figura 13 se superpõe com as da figura 12, a corrente se distribui por si mesma sobre a escova de maneira que se representa na figura 14. Há 45 ampères que entram na escova e 5 ampères que a abandonam. Portanto, a escova deve dar passagem a 50 ampères em lugar de 40 ampères, e em uma lâmina há 20 ampères, ou seja o dobro da corrente que corresponderia a das condições ideais da figura 12. Isto tende a produzir um aquecimento indevido e faíscas na borda posterior da escova.

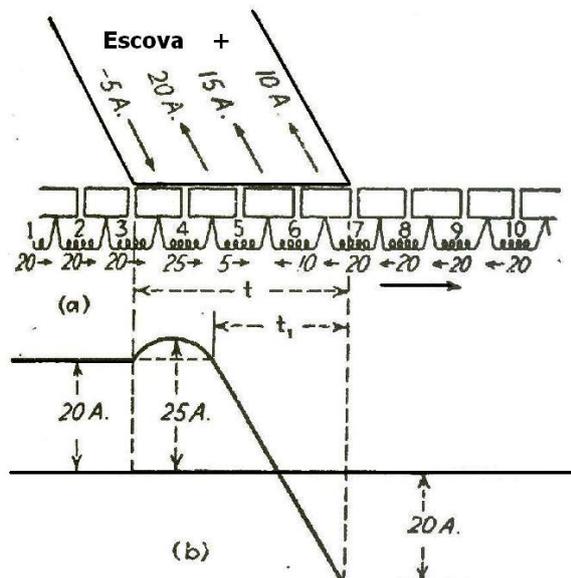


Fig. 14 – Inversão de corrente em uma bobina quando as escovas estão muito fora da linha neutra

A figura 14(b) representa a maneira como varia a corrente na bobina nestas novas condições. Em lugar de diminuir uniformemente a partir dos 20 A, se eleva até 25 A antes de iniciar a inversão. Devemos observar que o tempo que dura a inversão desde +20 a -20 ampères foi reduzido de t a t_1 , ficando mais difícil a comutação. A curva da figura 14 corresponde ao caso em que a escova ficou posicionada muito atrasada com relação ao plano neutro, e se induz f.e.m. nas bobinas submetidas a comutação. Se as escovas estão demasiadamente avançadas com relação ao plano neutro, o faiscamento ocorre na entrada das escovas.

7. Principais Partes Construtivas de uma Máquina CC

A seguir é feita uma descrição breve das principais partes construtivas de uma máquina CC, as quais são mostradas esquematicamente na figura 15.

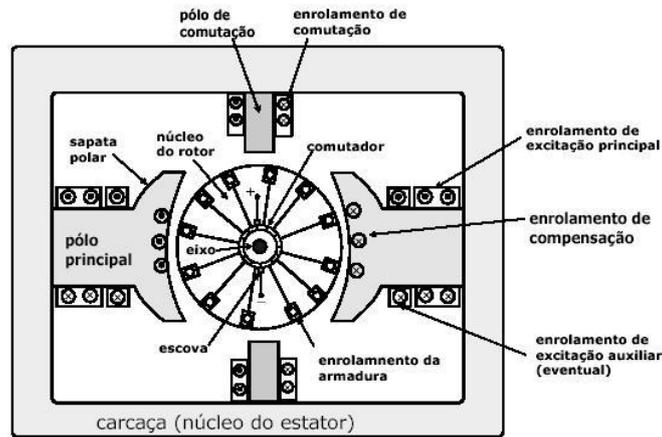


Fig. 15 – Partes principais de uma Máquina CC

7.1 Partes Constituintes do Estator

- **Carcaça** : é a estrutura que suporta todas as demais partes. Também tem por função conduzir o fluxo magnético de um pólo ao outro.
- **Pólos de Excitação Principal** : constitui um núcleo magnético formado por um conjunto de chapas laminadas. Têm por função produzir o fluxo magnético. As suas extremidades são mais largas e constituem as sapatas polares.
- **Enrolamento Principal de Campo** : o enrolamento principal de campo é bobinado sobre o pólo de excitação principal. É alimentada em corrente contínua e estabelece assim um campo magnético contínuo no tempo.
- **Enrolamento Auxiliar de Campo (Eventual)** : igualmente alojado sobre o pólo principal. À semelhança do enrolamento de compensação, tem por função compensar a reação da armadura reforçando o campo principal.
- **Pólos de Comutação** : são alojados na região entre os pólos e constituídos por um conjunto de chapas laminadas justapostas.
- **Enrolamentos de Comutação (Interpolos)** : são ligados em série com a armadura. Têm por função compensar o efeito da reação da armadura na região de comutação reduzindo o centelhamento. Sua instalação evita o deslocamento da linha neutra quando houver alteração na carga da máquina,

Manual de Máquinas de Corrente Contínua – Teoria

- **Enrolamento de Compensação** : são alojados em ranhuras na superfície das sapatas dos pólos de excitação. São ligados em série com a armadura da máquina. Têm por finalidade, igualmente, de eliminar os efeitos da reação da armadura, mas em toda a periferia do rotor e não somente na região transversal. Evita o aparecimento de faíscas provocadas por uma diferença de potencial entre espiras devido a distribuição não uniforme da indução no entreferro. É mais comum em máquina de alta potência, devido ao custo adicional de fabricação e dos materiais.
- **Conjunto Porta-Escovas e Escovas**: o porta escovas é a estrutura mecânica que aloja as escovas. É montado de tal forma que possa ser girado para um perfeito ajuste da comutação da máquina. As escovas são constituídas de material condutor e deslizam sobre o comutador quando este gira; elas são pressionadas por molas contra a superfície do comutador. As escovas também conectam o circuito externo da máquina com o enrolamento da armadura.

7.2 Partes Constituintes do Rotor

- **Núcleo Magnético**: é constituído de um pacote de chapas de aço magnético laminadas, com ranhuras axiais para alojar o enrolamento da armadura.
- **Enrolamento da Armadura**: é composto de um grande número de espiras em série ligadas ao comutador. O giro da armadura faz com que seja induzida uma tensão neste enrolamento.
- **Comutador**: é constituído de lâminas de cobre (lamelas) isoladas umas das outras por meio de lâminas de mica (material isolante). Tem por função transformar a tensão alternada induzida numa tensão contínua.
- **Eixo**: é o elemento que transmite a potência mecânica desenvolvida pelo motor a uma carga a ele acoplada.

8. Controle de Velocidade nos Motores CC

O modelo do circuito elétrico do motor CC é ilustrado na Fig. 16.

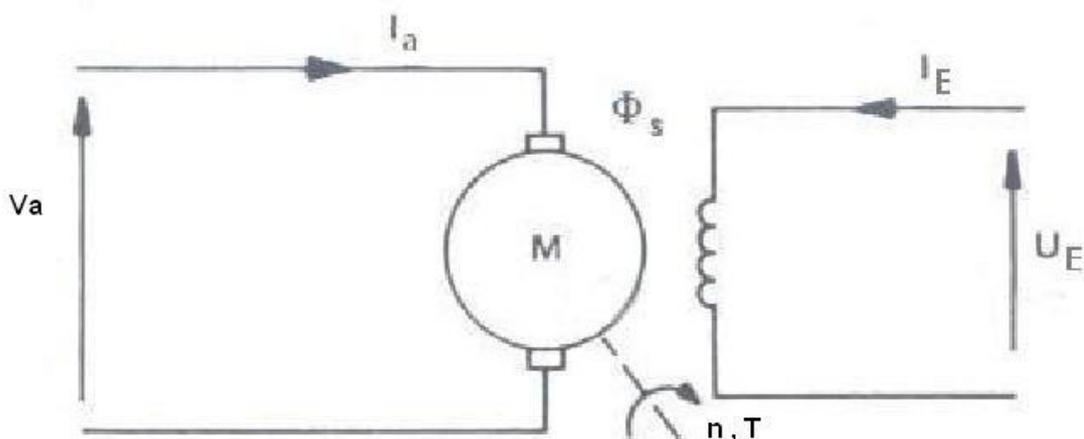


Fig. 16 – Modelo do circuito elétrico do motor CC

A Lei de Kirchhoff aplicada ao circuito de armadura resulta em:

$$V_a = R_a \cdot I_a + E \quad (1)$$

Onde: V_a = Tensão da armadura
 R_a = Resistência da armadura (não ilustrada na Fig.16)
 I_a = Corrente da armadura
 E = Força Eletromotriz da armadura

A força eletromotriz é proporcional ao fluxo e a velocidade do rotor, ou seja:

$$E = k_1 \cdot \phi \cdot n \quad (2)$$

Combinando as equações (1) e (2), a expressão para a velocidade do motor CC é dada por:

$$n = k_1 \frac{V_a - R_a \cdot I_a}{\phi} \quad (3)$$

Onde: n = velocidade
 k_1 = constante
 ϕ = fluxo magnético no entreferro

Admitindo-se que a queda de tensão na armadura é pequena, ou seja $R_a \cdot I_a \cong 0$, a expressão (1) se reduz a:

$$n = k_1 \frac{V_a}{\phi} \quad (4)$$

Portanto, a velocidade é diretamente proporcional à tensão da armadura e inversamente proporcional ao fluxo do entreferro.

O controle de velocidade até a velocidade nominal é feito através da variação da tensão de armadura do motor, mantendo-se o fluxo constante.

Velocidades superiores à nominal podem ser conseguidas pela diminuição do fluxo, mantendo-se a tensão de armadura.

Sabendo que o fluxo é proporcional à corrente de campo, ou seja:

$$\phi = k_2 \cdot I_E \quad (5)$$

Onde: k_2 = constante
 I_E = corrente de campo

Manual de Máquinas de Corrente Contínua – Teoria

Tais velocidades são atingidas através da diminuição da corrente de campo, mantendo-se a tensão de armadura constante.

O conjugado (torque) do motor é dado por:

$$T = k_3 \cdot I_a \cdot \phi \quad (6)$$

Onde: T = conjugado eletromagnético do motor

k_3 = constante

O controle de velocidade, até à rotação nominal é feito através da variação da tensão da armadura, mantendo-se o fluxo constante. Dessa forma, observando-se a equação (6) a corrente de armadura se eleva transitoriamente, de forma apreciável, de modo a produzir o conjugado total requerido pela carga, mais o conjugado necessário para a aceleração.

O conjugado acelerador incrementa a velocidade da máquina e, de acordo com a equação (2), a força eletromotriz induzida no motor também aumenta. Dessa forma, segundo a equação (1), a corrente transitória cai até um ponto de equilíbrio, que corresponde à manutenção do torque exigido pela carga. Esse ponto de equilíbrio é definido pelo valor da tensão de armadura aplicado e pela queda de tensão na resistência de armadura, como mostra a equação (1). Se o conjugado requerido pela carga for constante, o motor tenderá a supri-lo, sempre absorvendo uma corrente de armadura também praticamente constante. Somente durante as acelerações provocadas pelo aumento da tensão, que transitoriamente a corrente se eleva para provocar a aceleração da máquina, retornando após isso, ao seu valor original. Portanto, em regime, o motor CC opera a corrente de armadura essencialmente constante também. O nível dessa corrente é determinado pela carga no eixo. Assim, no modo de variação pela tensão de armadura, até a rotação nominal, o motor tem a disponibilidade de acionar a carga exercendo um torque constante em qualquer rotação de regime estabelecida, como mostra a Fig. 17. Esse torque pode ser qualquer, até o limite do valor nominal, que corresponde a uma corrente de armadura nominal, definida por aspectos térmicos de dimensionamento do motor.

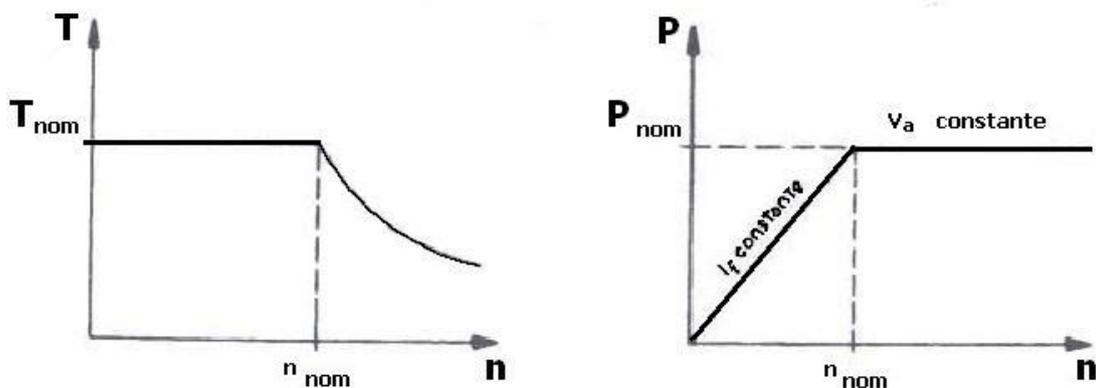


Fig. 17 – Curvas Torque x Rotação e Potência x Rotação

O controle da velocidade após a rotação nominal é feito variando-se o fluxo e mantendo a tensão de armadura constante. Pela equação (2), para se aumentar a velocidade, deve-se reduzir o

Manual de Máquinas de Corrente Contínua – Teoria

fluxo, existindo entre ambos, uma relação hiperbólica. Como o conjugado é proporcional ao fluxo, ele comporta-se como mostrado na Fig. 17.

9. Vantagens e Desvantagens dos Motores CC

Vantagens:

- Flexibilidade (vários tipos de excitação)
- Relativa simplicidade dos modernos conversores CA/CC
- Desejáveis para altos conjugados e ampla variação de velocidade
- Facilidade em controlar a velocidade
- Alto torque a baixas rotações

Desvantagens:

- Maiores e mais caros que os motores de indução, para uma mesma potência
- Maior necessidade de manutenção (devido aos comutadores). Arcos e faíscas devido à comutação de corrente por elemento mecânico (não pode ser aplicado em ambientes perigosos)
- Tensão entre lâminas não pode exceder 20V, não podendo ser alimentados com tensão superior a 1000V, enquanto que motores de corrente alternada podem ter milhares de volts aplicados aos seus terminais.
- Necessidade de medidas especiais de partida, mesmo em máquinas pequenas.

10. Principais Conexões dos Enrolamentos dos Motores CC

As características de potência, velocidade e torque da máquina CC estão intimamente ligadas à forma de conexão dos enrolamentos de campo e armadura. Assim, para cada aplicação específica deve-se conectar a máquina de uma certa forma. As três conexões básicas de uma máquina CC são apresentadas e discutidas abaixo.

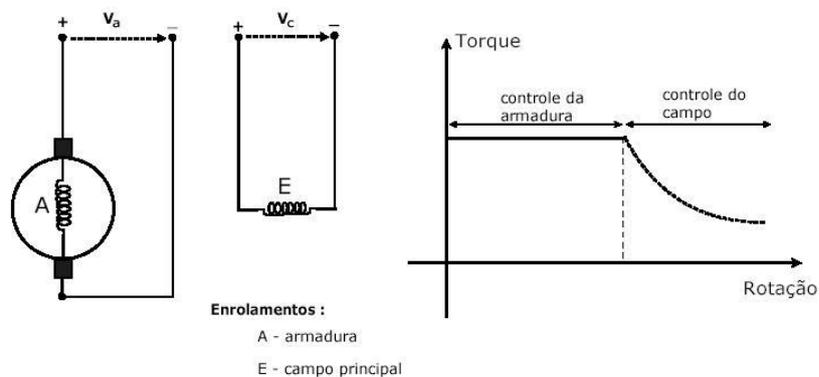


Figura 18 - Esquema de conexão para excitação independente

10.1 Excitação Independente

Neste tipo de conexão tanto o enrolamento da armadura como o do estator são ligados à fontes de tensão independentes uma da outra. A figura 18 ilustra este caso, sendo que somente os enrolamentos da armadura e de excitação são mostrados. Neste tipo de conexão a velocidade da máquina pode ser ajustada tanto pelo ajuste da tensão da armadura como pela tensão de campo. A característica torque versus velocidade é igualmente ilustrada na figura 18. Esta conexão é utilizada no acionamento de laminadores, bombas, compressores, tornos, bobinadeiras, máquinas têxteis, etc...

10.2 Excitação em Derivação

Este é um caso particular em que o enrolamento de campo é ligado em paralelo com a tensão de armadura, ou seja, $V_a = V_c$. A característica de torque versus velocidade é semelhante àquela do motor com excitação independente, mostrada na figura 18.

10.3 Excitação Série

Neste tipo de conexão o enrolamento de campo é ligado em série com a armadura, sendo ambos percorridos pela mesma corrente. A rotação pode ser controlada por meio da tensão da armadura. A máquina adquire um alto torque de partida, o qual diminui com a rotação. Esta característica é muito interessante para aplicação em guindastes, tração elétrica, etc... Deve-se notar que o motor não deve trabalhar com cargas muito leves, uma vez que a rotação do mesmo tende a aumentar muito, podendo destruir o motor. A figura 19 ilustra esta conexão.

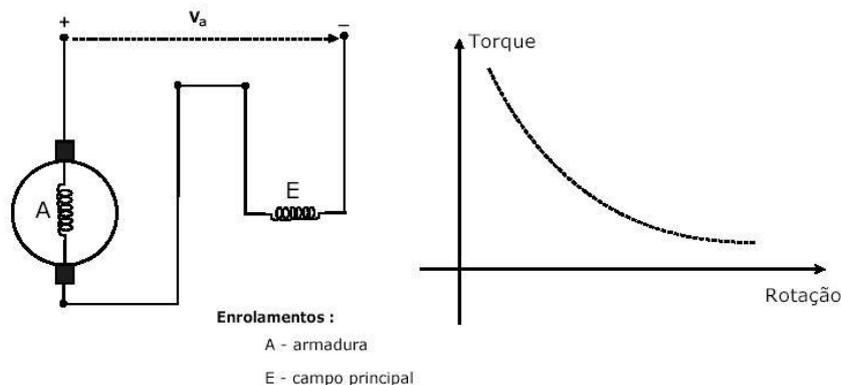


Figura 19 - Esquema de conexão para excitação série

10.4 Excitação Mista

Muitas vezes se deseja um motor com característica intermediária entre a do motor com excitação independente e a do motor com excitação série. Para este fim utiliza-se a excitação mista (também chamada de excitação composta). Neste caso o enrolamento auxiliar de campo é ligado em série com a armadura e o enrolamento principal é ligado à uma fonte independente, conforme ilustrado pela figura 20. A característica de torque obtida se situa entre a curva dos dois casos anteriores. Esta conexão é utilizada quando se espera variações bruscas da carga acionada. A rotação pode ser controlada tanto pela tensão da armadura como pela tensão de campo.

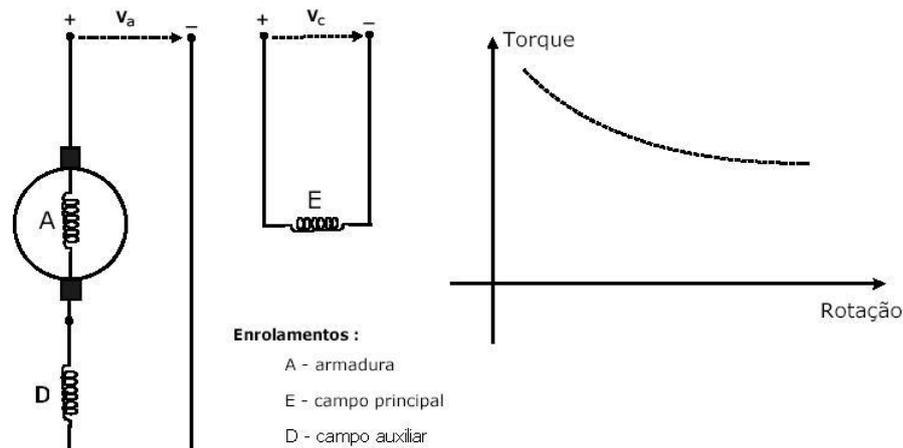


Figura 20 - Esquema de conexão para excitação mista (composta)

11. Rendimento do Motor CC

O rendimento é definido como a relação em percentual entre a potência útil convertida no eixo (potência mecânica) dividido pela potência absorvida pela máquina (potência elétrica de entrada). A diferença entre ambas as quantidades se constituem nas perdas que ocorrem na máquina.

η - rendimento em percentual

P_m - potência mecânica (útil) no eixo

P_e - potência elétrica de entrada

As perdas que se verificam nas máquinas elétricas são de diversas origens, elas geram calor e podem ser resumidas nas seguintes:

- **perdas mecânicas**, devida aos atritos mecânicos nas partes girantes;
- **perdas joule**, é o calor gerado nos diversos enrolamentos devido à resistência elétrica dos mesmos;
- **perdas no ferro**, são de dois tipos : perdas por histerese e perdas por correntes parasitas.

Como as perdas dependem da condição de carga e da rotação elas não são constantes durante a operação da máquina. Desta forma o rendimento não se mantém igualmente constante. O rendimento de uma máquina de corrente contínua atinge o máximo em torno dos valores nominais para o qual foi projetada.

12. Valores Nominais

São os valores que definem os valores permitidos de operação da máquina sem que a mesma sofra prejuízos permanentes. Elas são definidas pelo fabricante, podendo também serem

Manual de Máquinas de Corrente Contínua – Teoria

previamente especificadas pelo usuário. Em todas as máquinas são munidas de uma placa de identificação, onde os dados nominais são gravados. Os principais valores nominais da máquina CC são as seguintes:

- **Potência nominal**, é a máxima potência obtível da máquina em operação contínua. A máquina não deve operar por longos períodos com potência maior que esta.
- **Rotação nominal**, é a rotação de trabalho da máquina. Caso a máquina se destina a trabalhar com velocidade variável, existe uma velocidade mínima e máxima.
- **Tensão nominal de armadura**, define a tensão de operação normal da máquina, não sendo possível operar com tensão superior a esta. Operação com tensão reduzida é possível, desde que a potência nominal seja reduzida na mesma proporção.
- **Corrente nominal de armadura**, define a tensão de operação normal da máquina, não sendo possível operar por longos períodos com corrente superior a esta. Operação com corrente reduzida é possível, desde que a potência nominal seja reduzida na mesma proporção.
- **Tensão nominal de campo**, é a tensão de alimentação do enrolamento de campo.
- **Corrente nominal de campo**, é a corrente de alimentação do enrolamento de campo. O campo não deve trabalhar com longos períodos com corrente maior que esta.

13. Bibliografia

- **Chester Dawes – Corrente Contínua**
- **Alfonso Martignoni – Máquinas Elétricas de CC**
- **Alfredo Lübcke – Apostila Máquinas CC - AFP**
- **Luis Alberto Pereira – Apostila Máquinas CC – PUC-RS**
- **Universidade Oviedo – Máquinas Elétricas CC**
- **WEG – Características e Especificação de Motores CC**
- **Siemens – Curso Maquinas CC**