

INSTITUTO FEDERAL DE
EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA
RIO GRANDE DO NORTE
Campus Mossoró

DIRETORIA ACADÊMICA
COORDENAÇÃO DO CURSO DE ELETROTÉCNICA

GERADORES E MOTORES DE CORRENTE CONTÍNUA

Disciplina: Máquinas e Acionamentos Elétricos

Prof.: Hélio Henrique

2 – MÁQUINAS DE CORRENTE CONTÍNUA

2.1 - COMPONENTES DA MÁQUINA CC

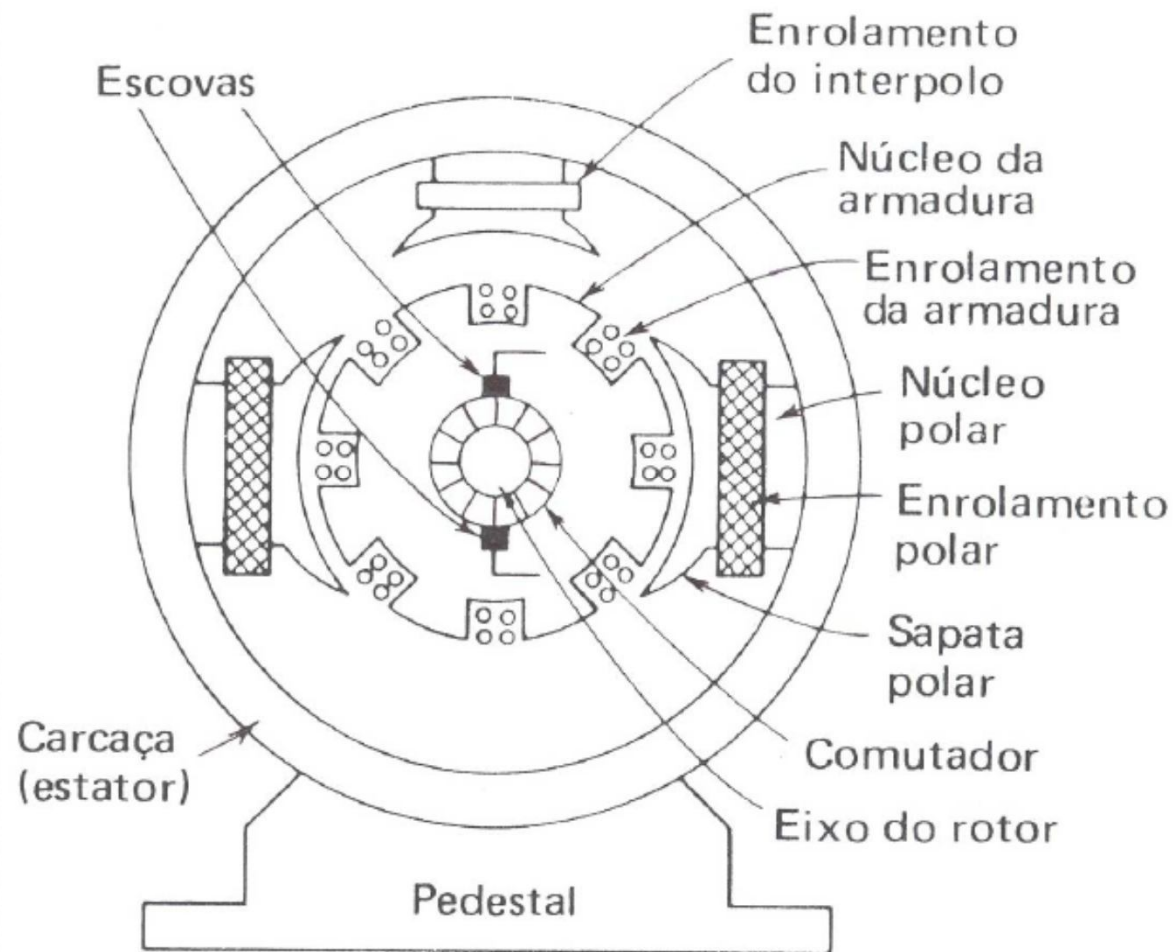


Fig. 2-1 : As partes principais de uma máquina CC.

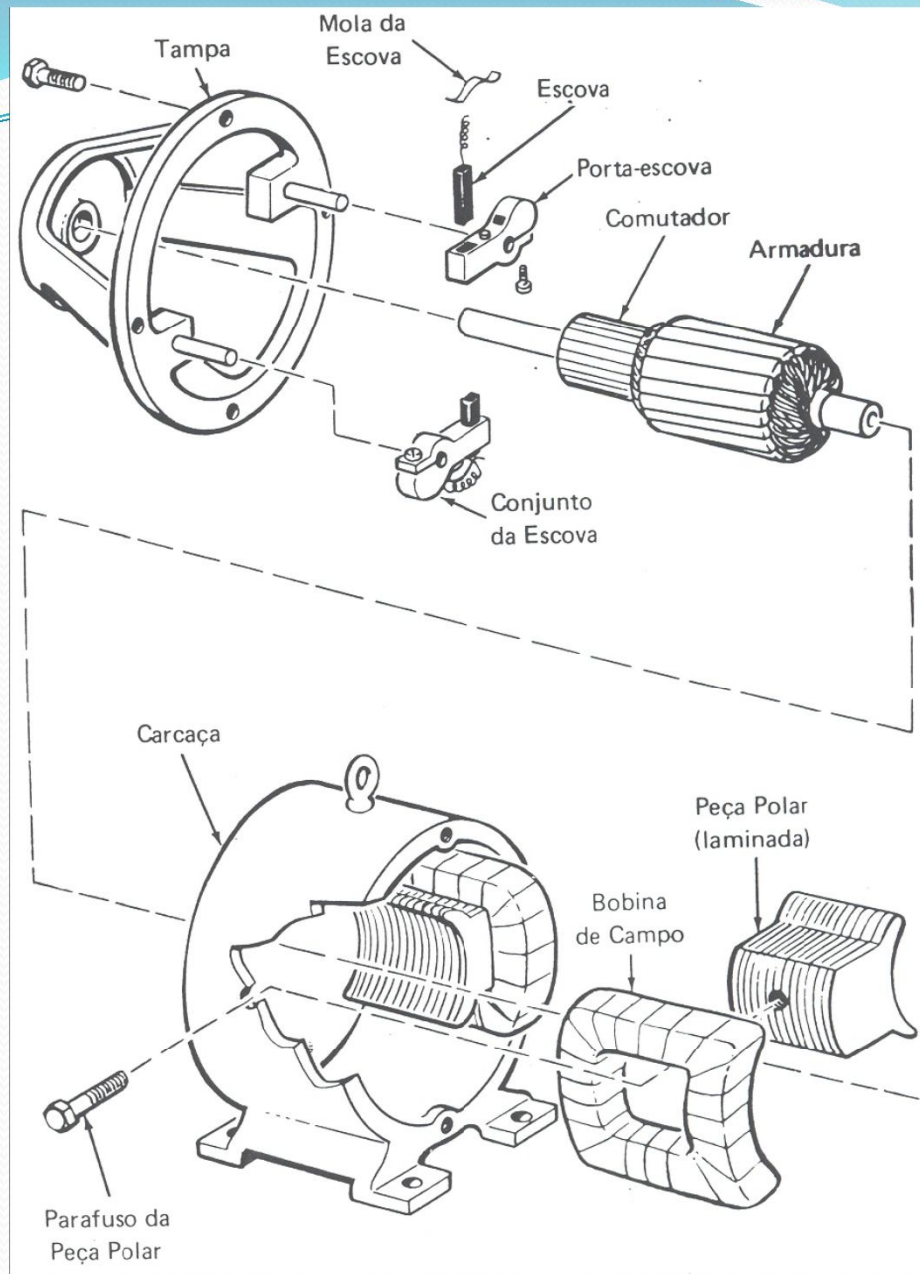


Fig. 2-2 : Vista explodida de uma máquina CC.
IFRN - Campus Mossoró

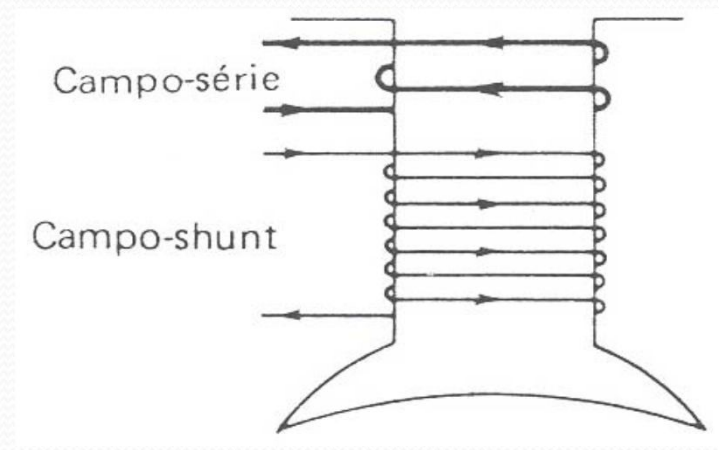
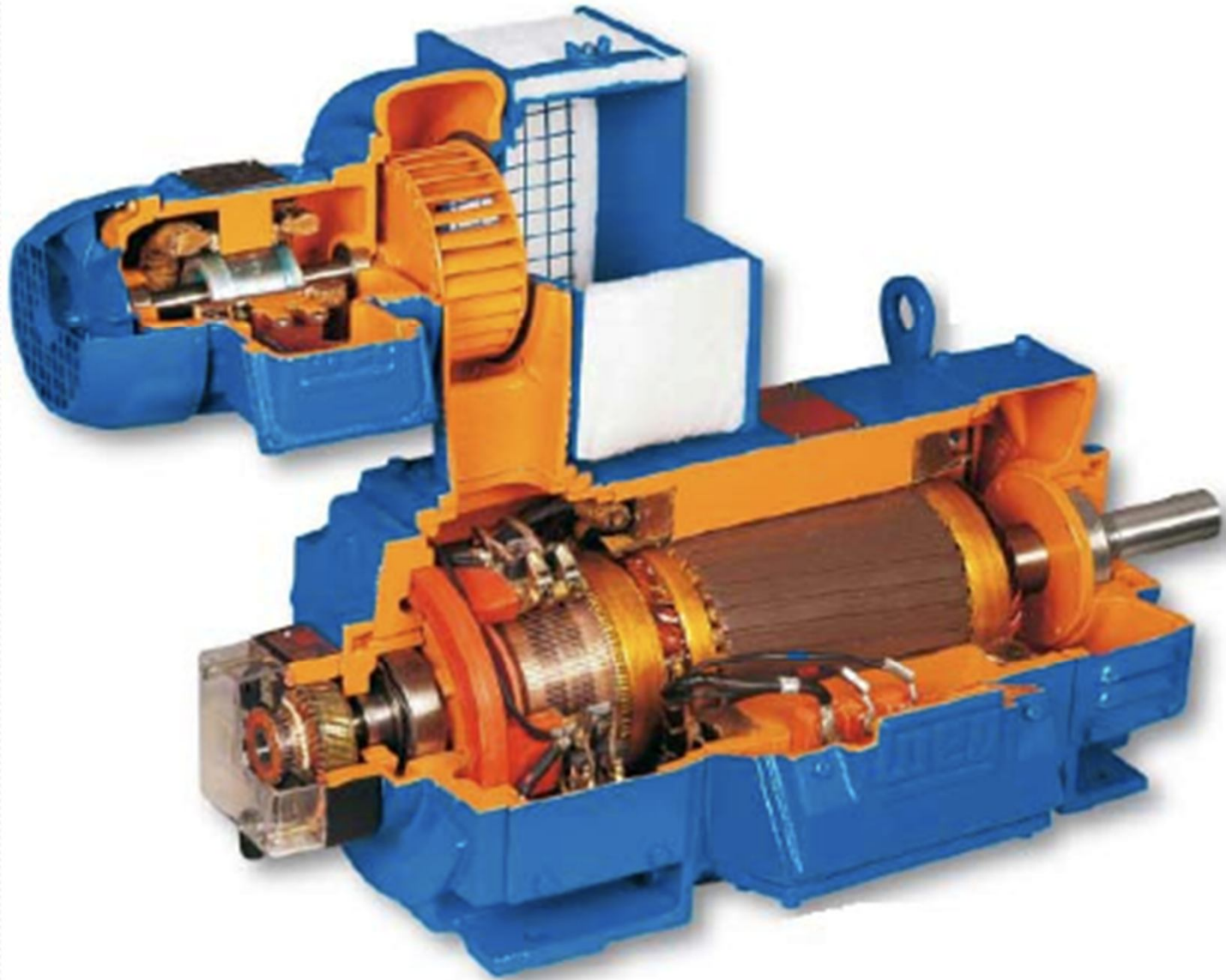


Fig. 2-3 : Enrolamentos de campo-série e campo-shunt.



2.3 – PERDAS E EFICIÊNCIA DE UMA MÁQUINA CC

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.

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

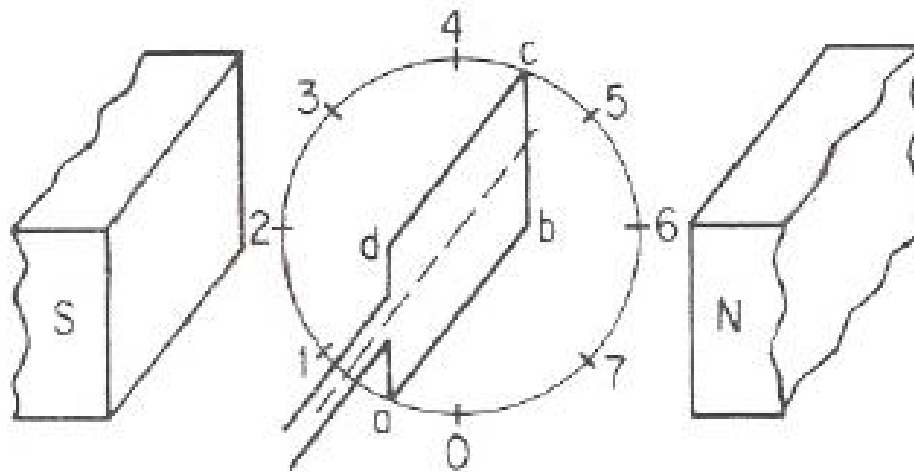
$$Eficiência = \frac{P_{Saída}}{P_{entrada}}$$

$$P_{entrada} = P_{saida} + \sum Perdas$$

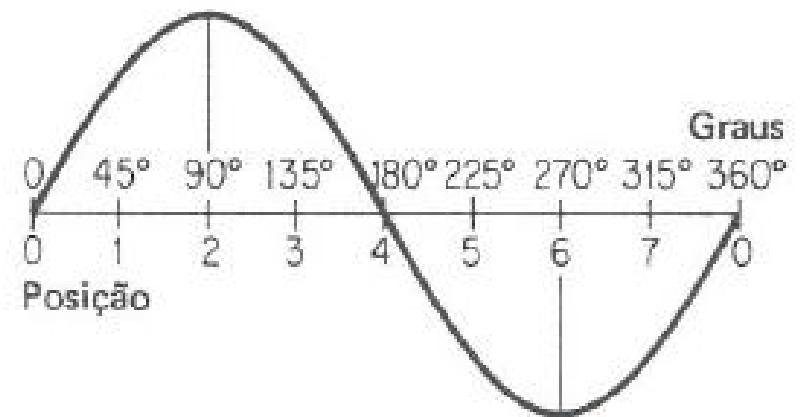
$$\sum Perdas = P_{cu} + \underbrace{P_{mec} + P_{núcleo}}_{P_{rot}}$$

3 – GERADORES DE CORRENTE CONTÍNUA

3.1 – GERADOR CC SIMPLES



(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.

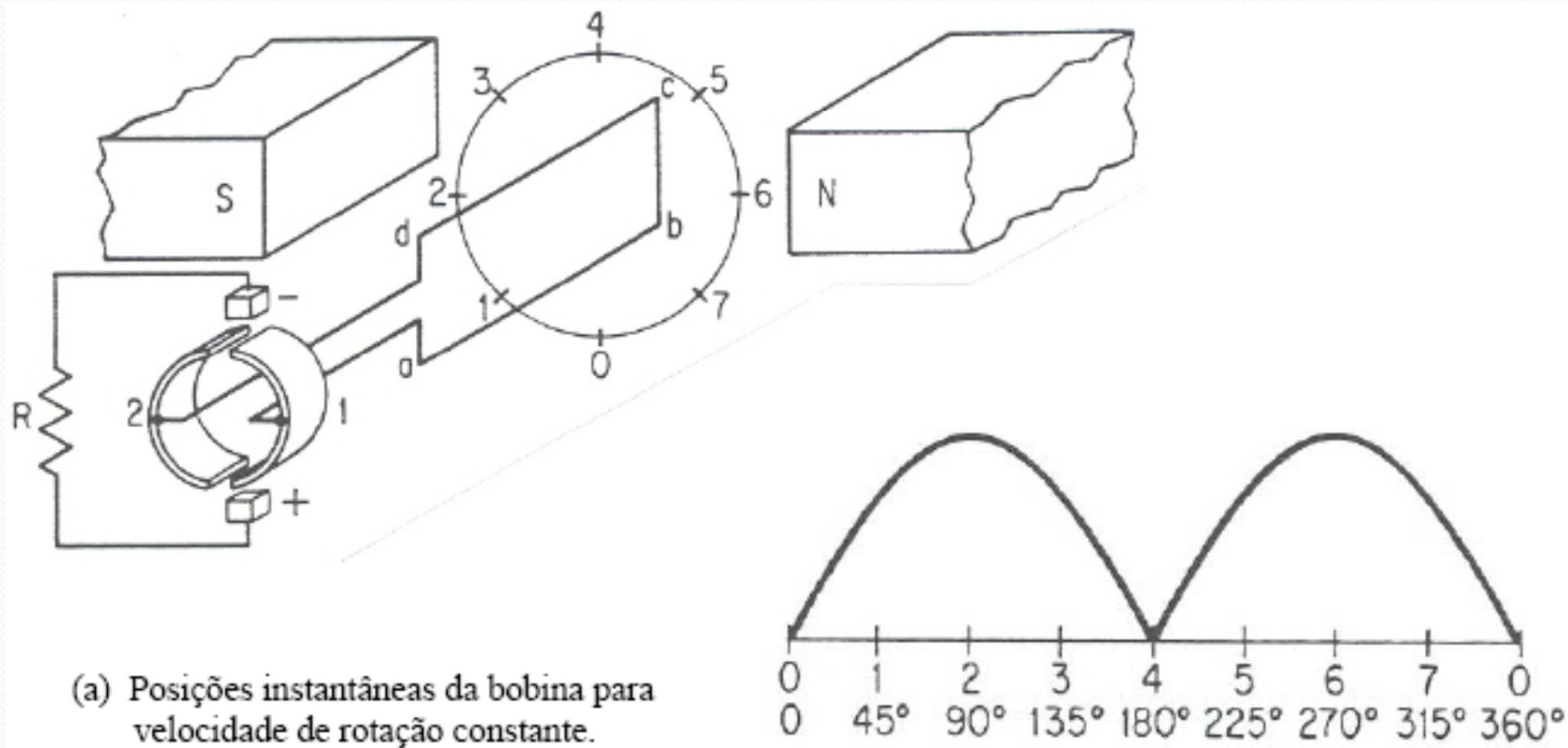
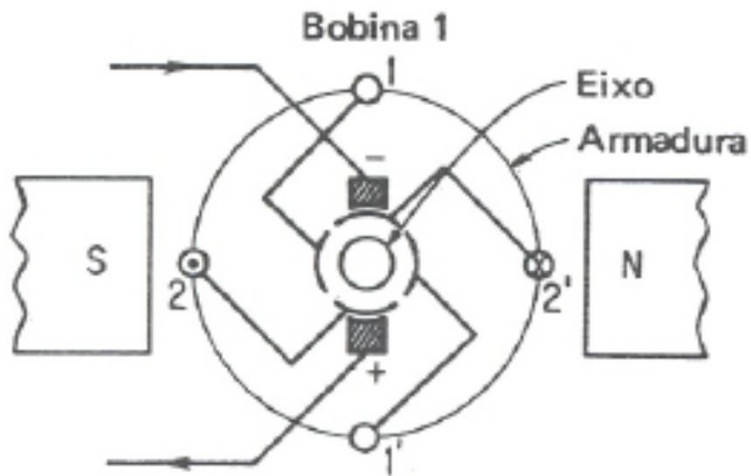
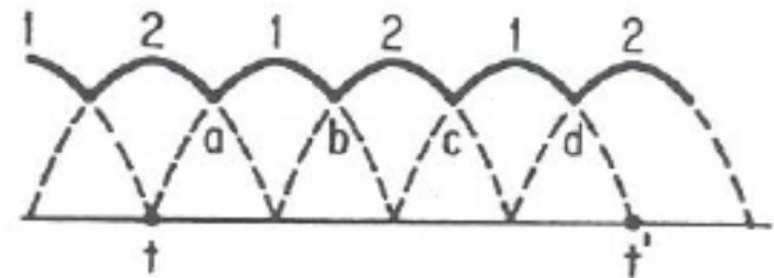


Fig. 3-2 : Gerador bipolar com comutador de dois segmentos.

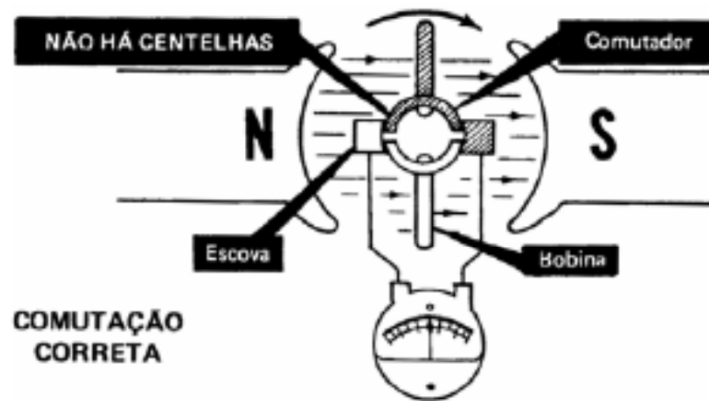


(a) Vista da seção transversal.

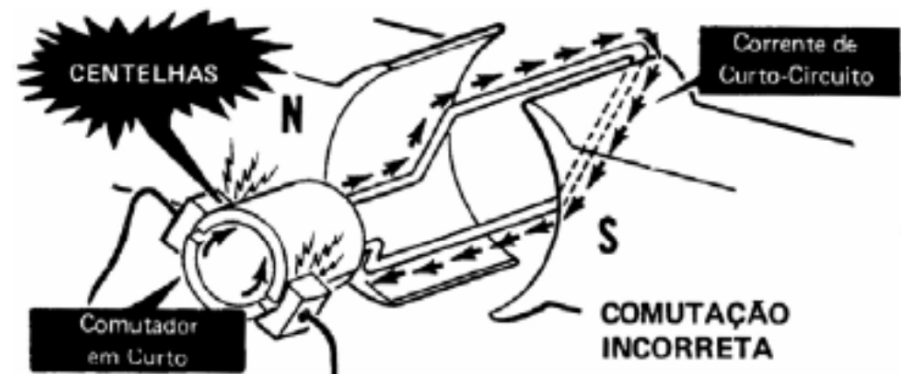


(b) Forma de onda resultante nas escovas.

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



(a) Comutação correta.
(não há centelhas)



(b) Comutação incorreta.
(com centelhamento)

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

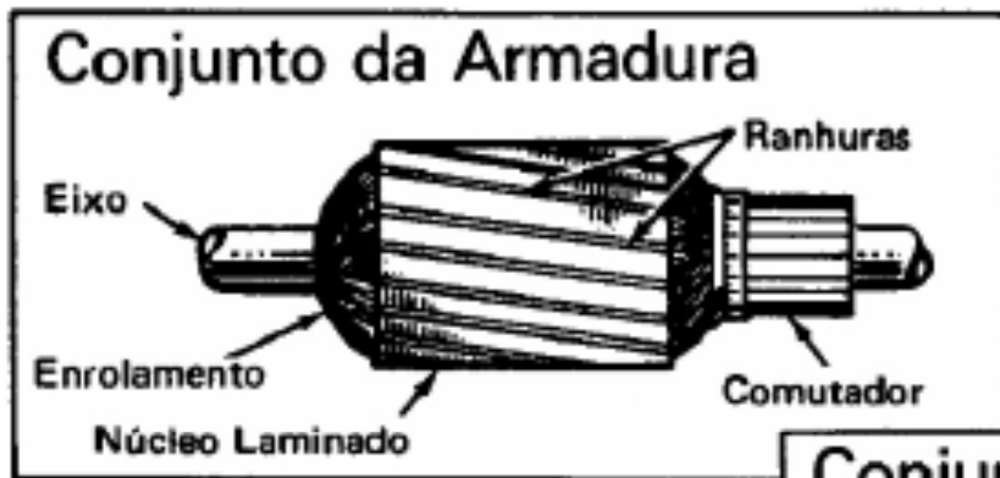


Fig. 3-5 : Detalhes construtivos do conjunto da armadura e do conjunto da escova.

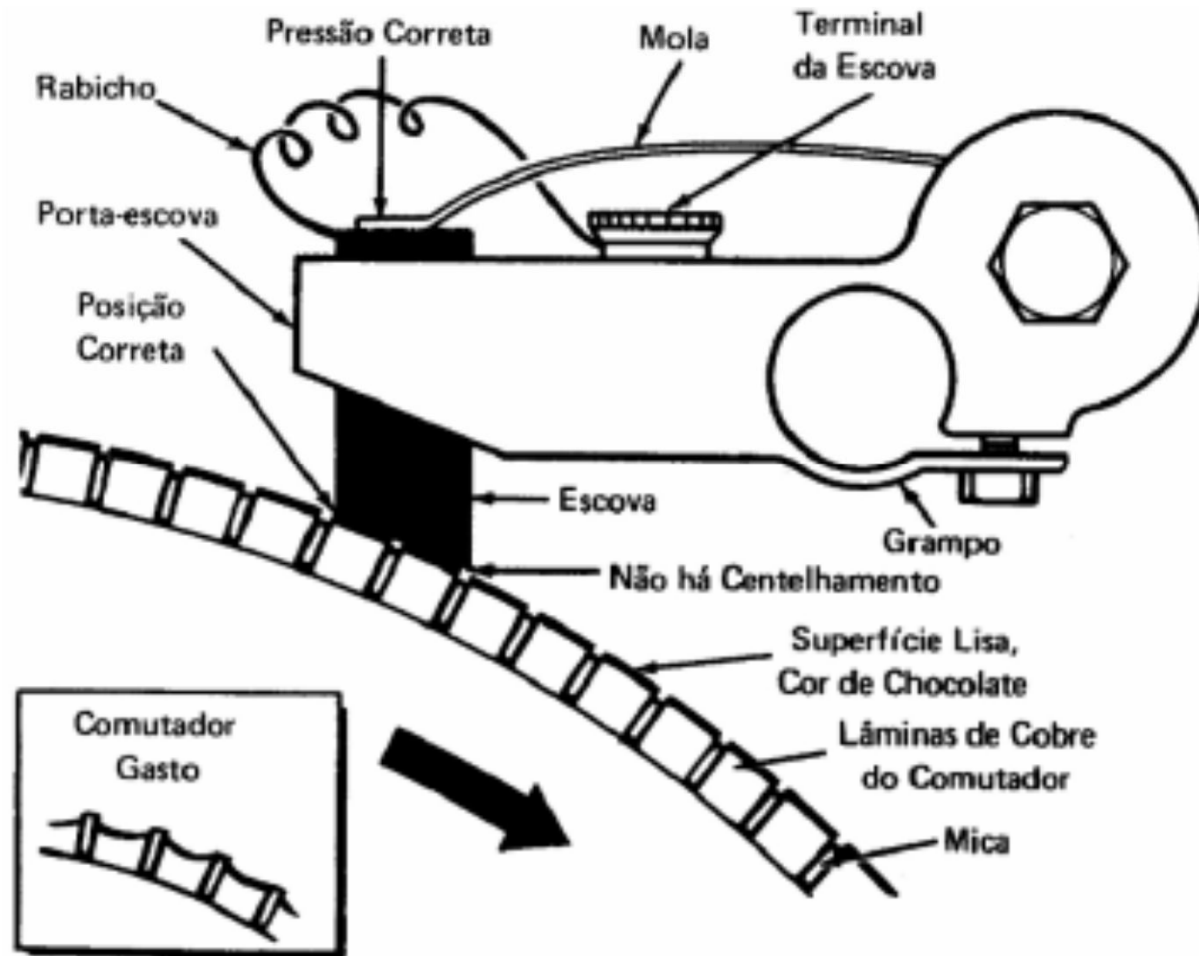


Fig. 3-6 : Detalhes do posicionamento da escova para uma comutação correta.

3.3 – REAÇÃO DA ARMADURA NO GERADOR CC

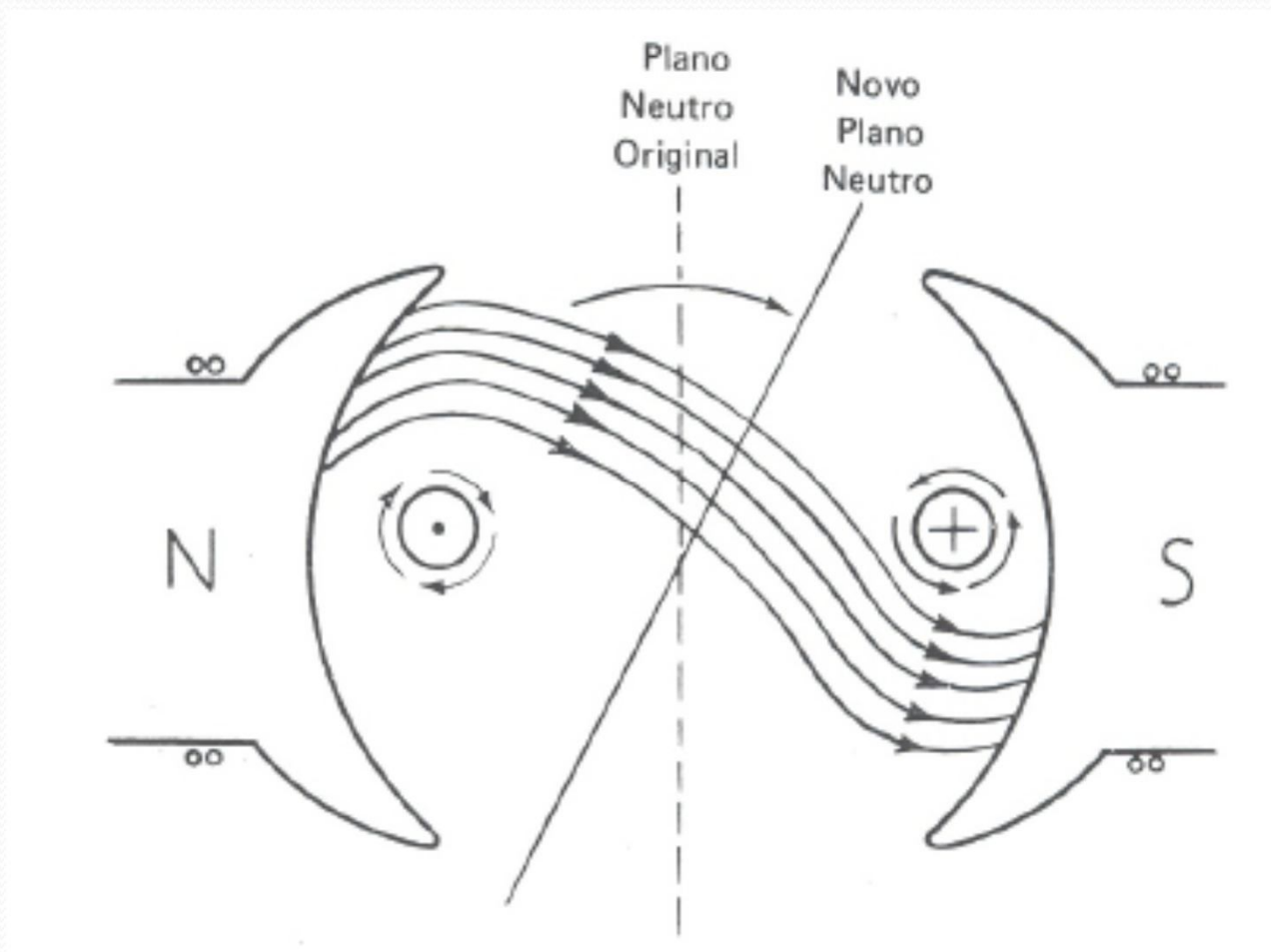


Fig. 3-9 : Reação da armadura deslocando o plano neutro da sua posição original.

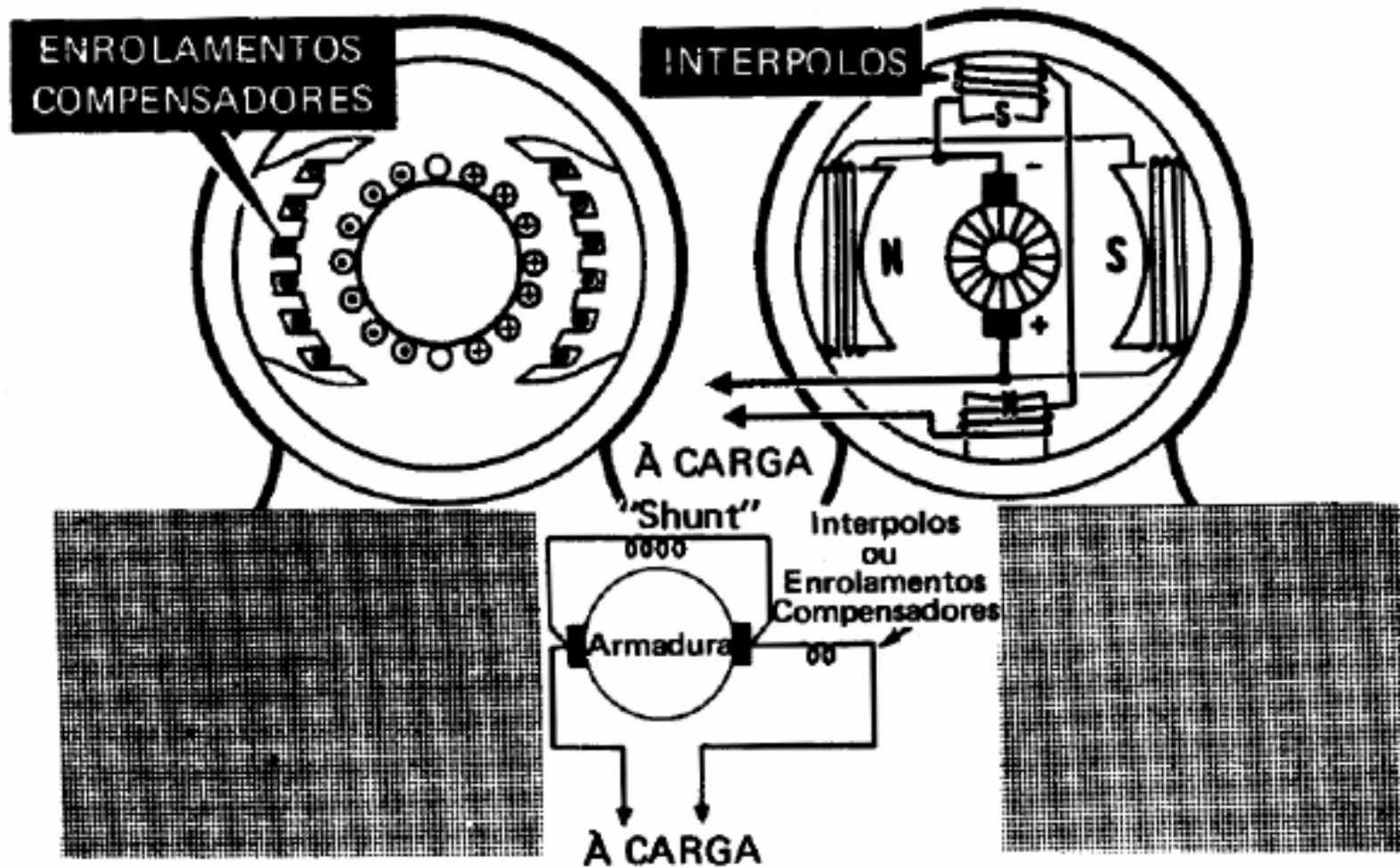


Fig. 3-10 : Enrolamentos compensadores e interpolos usados para minimizar a reação da armadura.

3.4 – EXCITAÇÃO DO CAMPO

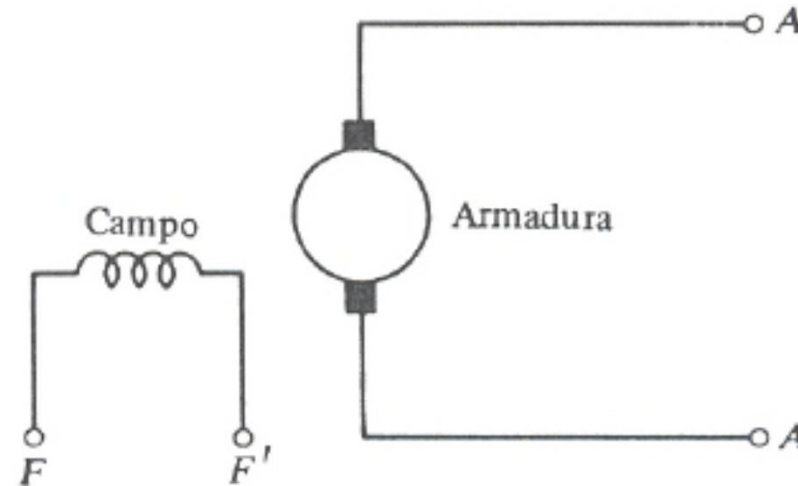
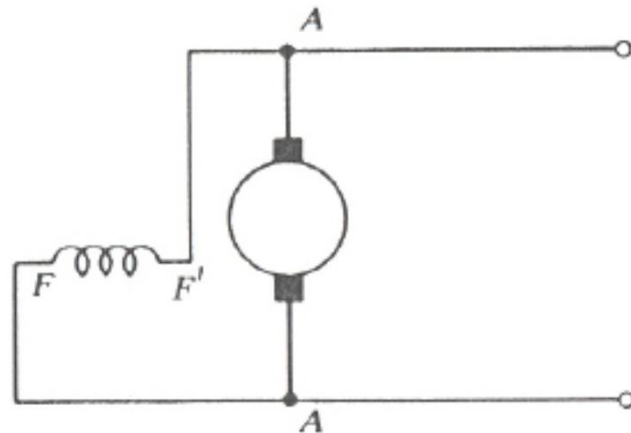
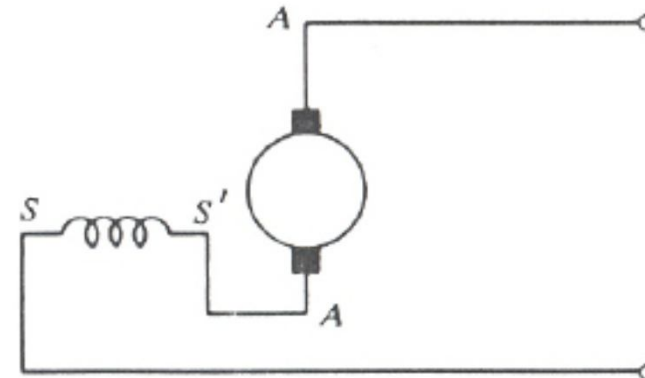


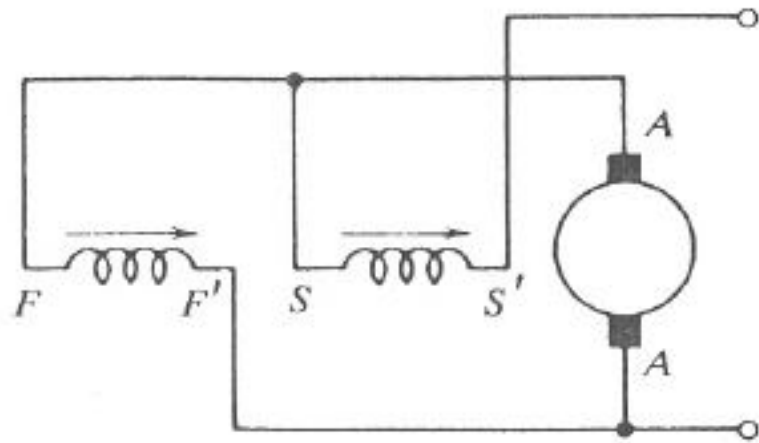
Fig. 3-11 : Diagrama esquemático do circuito de um gerador CC com excitação independente.



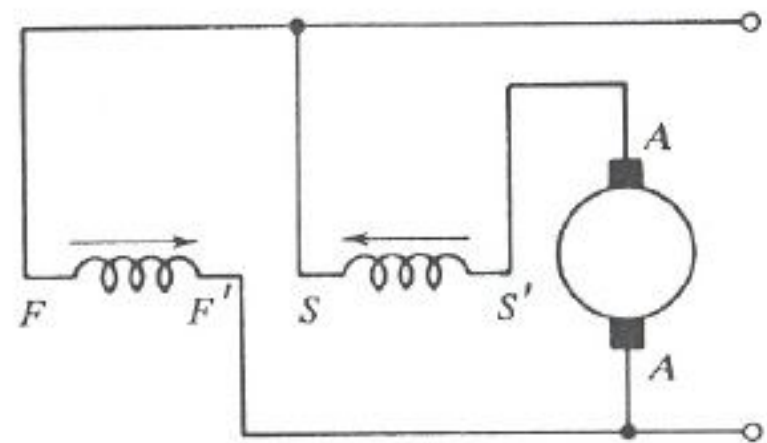
(a) Excitação em derivação.



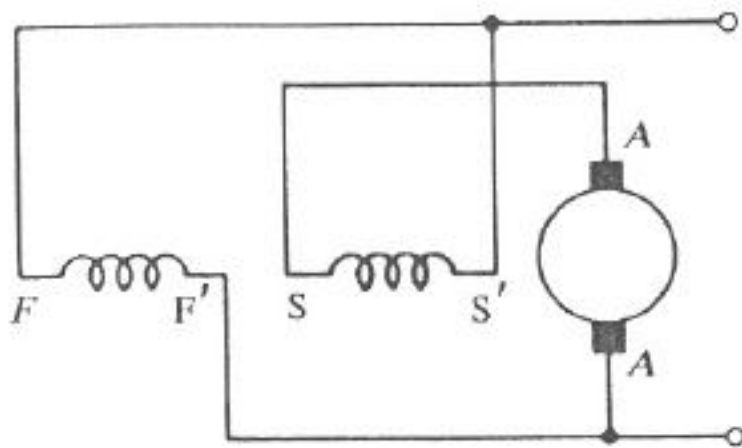
(b) Excitação em série.



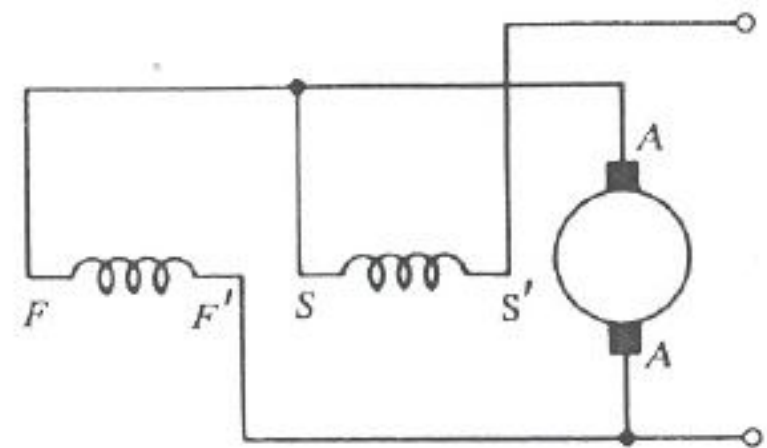
(c) Excitação composta cumulativa (ou aditiva).



(d) Excitação composta diferencial (ou subtrativa).



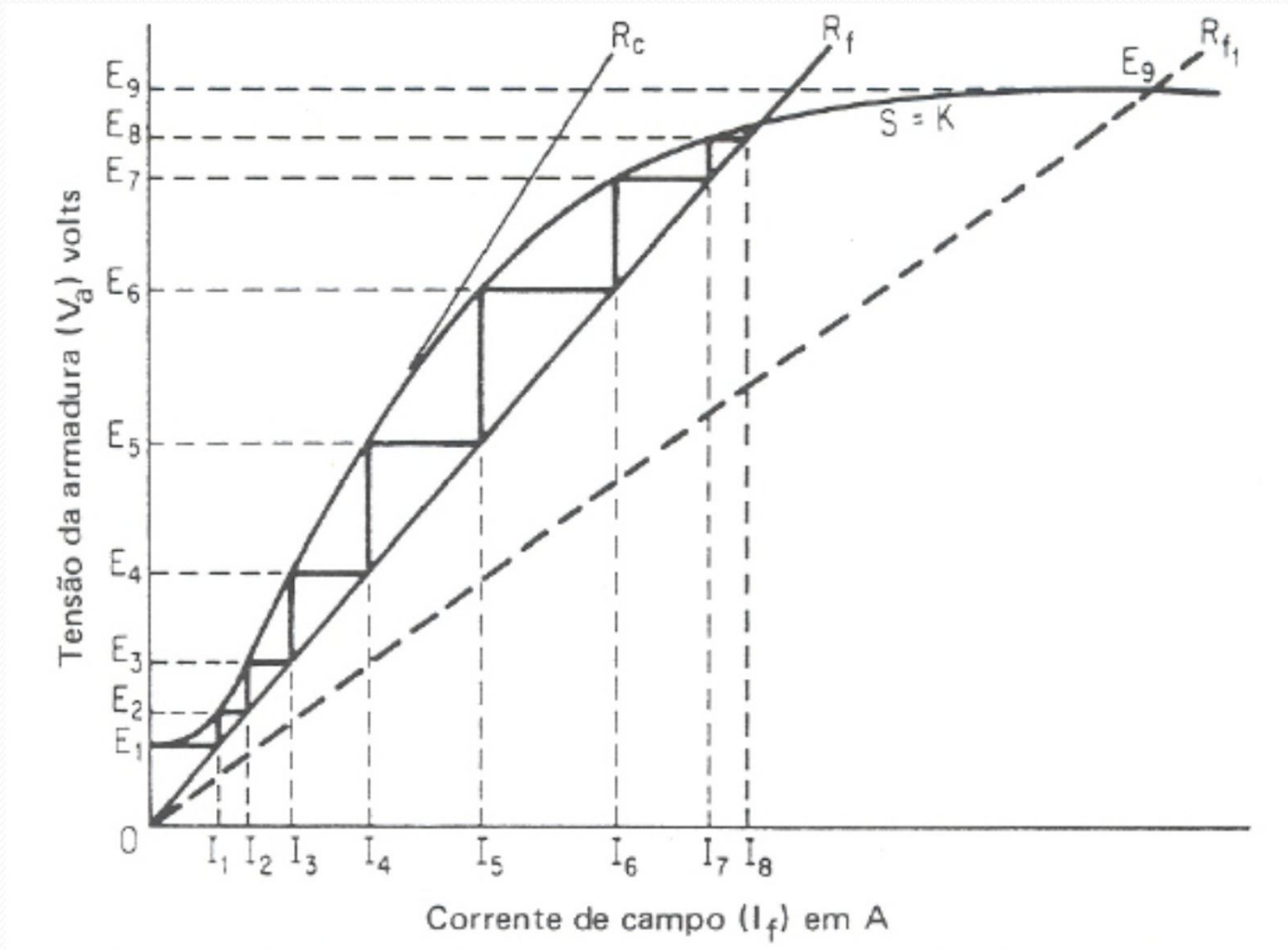
(e) Excitação composta com derivação longa.
(ou excitação composta longa)



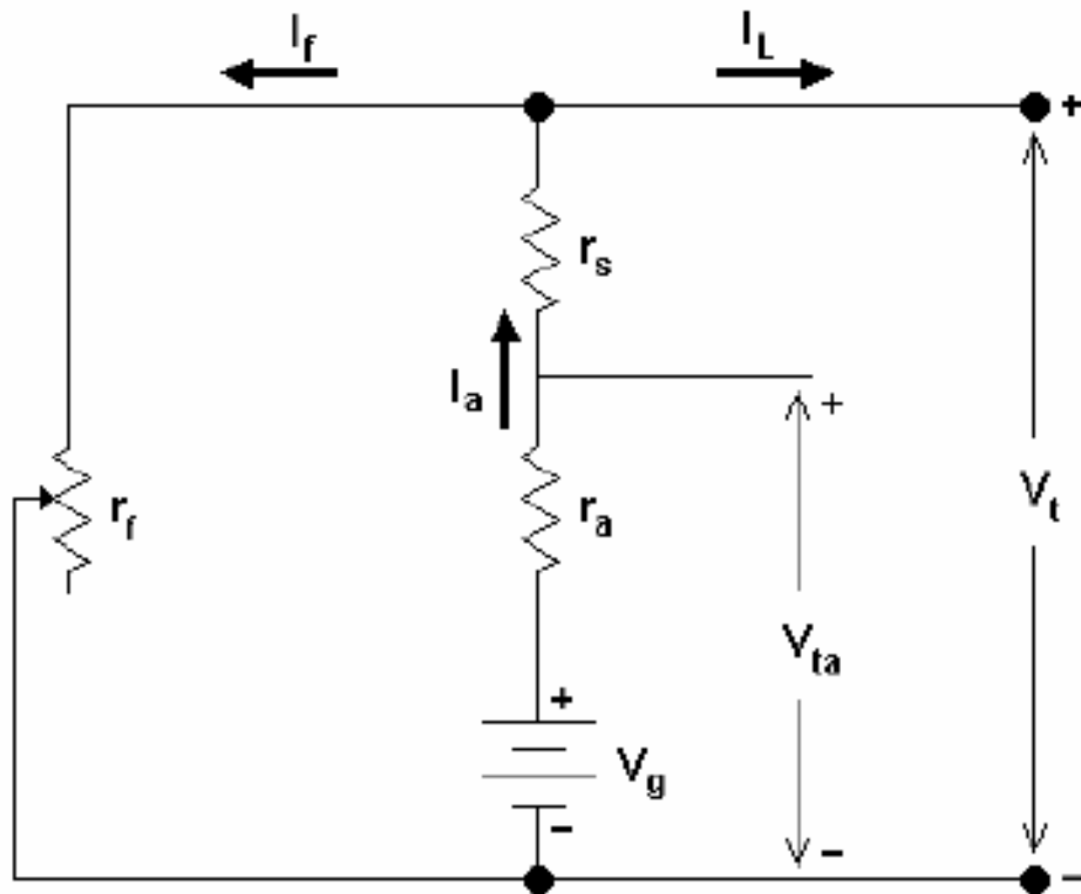
(f) Excitação composta com derivação curta.
(ou excitação composta curta)

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

3.5 – EXCITAÇÃO DE UM GERADOR SHUNT (EM DERIVAÇÃO)



3.6 – CIRCUITO EQUIVALENTE DO GERADOR CC



$$V_{ta} = V_g - r_a \cdot I_a$$

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

$$I_L = I_a - I_f$$

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.

3.7 – EQUAÇÃO DA TENSÃO NO GERADOR CC

$$V_g = \frac{p \cdot Z \cdot \phi \cdot n}{60 \cdot 10^8 \cdot b}$$

Onde:

$$k = \frac{p \cdot Z}{60 \cdot 10^8 \cdot b}$$

Então:

$$V_g = k \cdot \phi \cdot n$$

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.

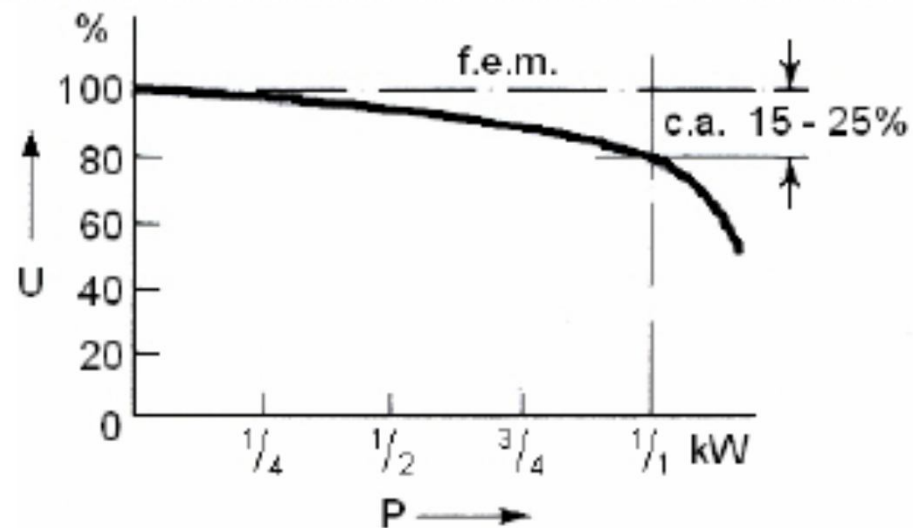
3.8 – REGULAÇÃO DE TENSÃO NOS GERADORES CC

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).

$$RT = \frac{V_{SC} - V_{CM}}{V_{CM}} \times 100\%$$

GERADOR EM DERIVAÇÃO

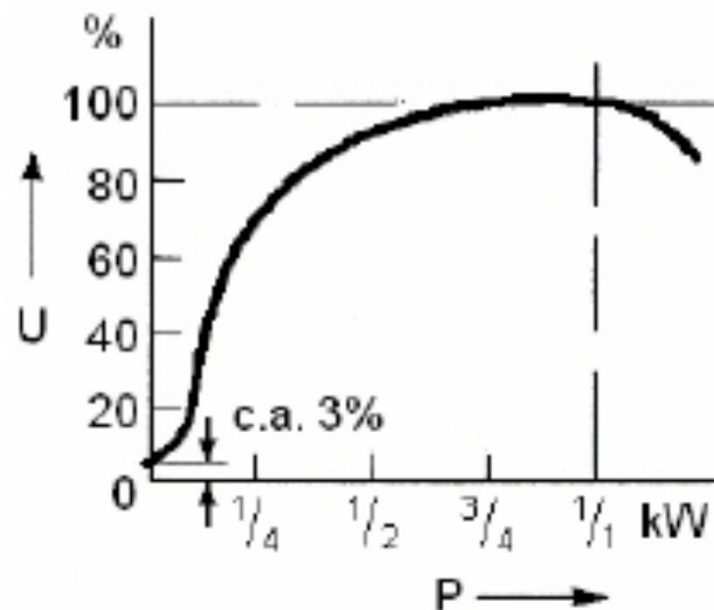
Em vazio se excita com seu magnetismo residual até o valor da *fem* induzida plena. Com aplicação de carga aumenta-se a queda de tensão na armadura ($R_a \cdot I_a$) e a tensão nos terminais cai levemente ($V_t = V_g - R_a \cdot I_a$), enquanto a velocidade e o fluxo magnético permanecem inalterados; 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).



(a) Gerador CC em derivação

GERADOR EM SÉRIE

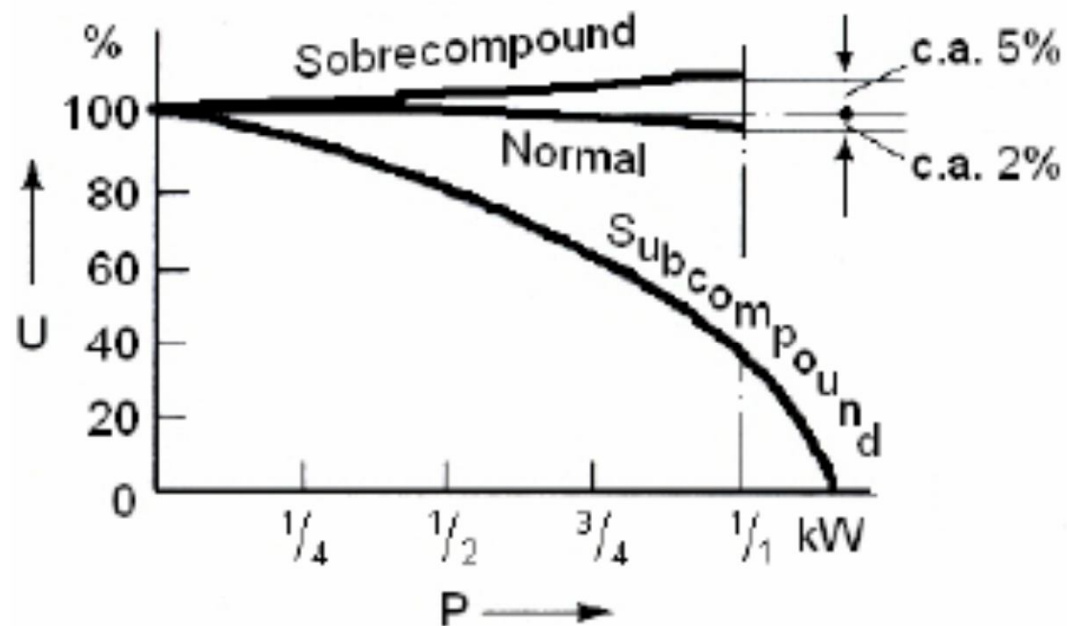
Em vazio não tem capacidade de efetuar sua auto-excitação; entretanto, devido à remanência dos pólos, surge uma pequena tensão induzida nos terminais (cerca de 3%). Nas condições de carga a tensão nos terminais, acompanhando a curva de magnetização do ferro, se eleva até a saturação do núcleo. Como a 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.



(b) Gerador CC em série.

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 ($\pm 2\%$).



(c) Gerador CC Composto

4 – MOTORES DE CORRENTE CONTÍNUA

4.1 – PRINCÍPIO DO MOTOR CC

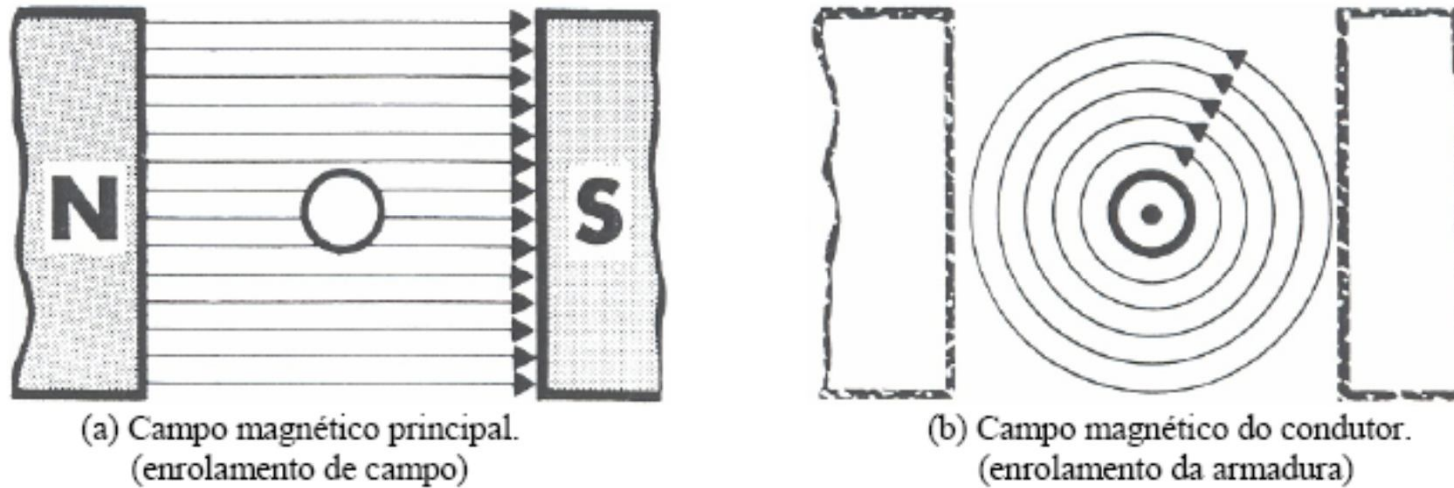


Fig. 4-1 : Campos magnéticos existentes no funcionamento de um motor.

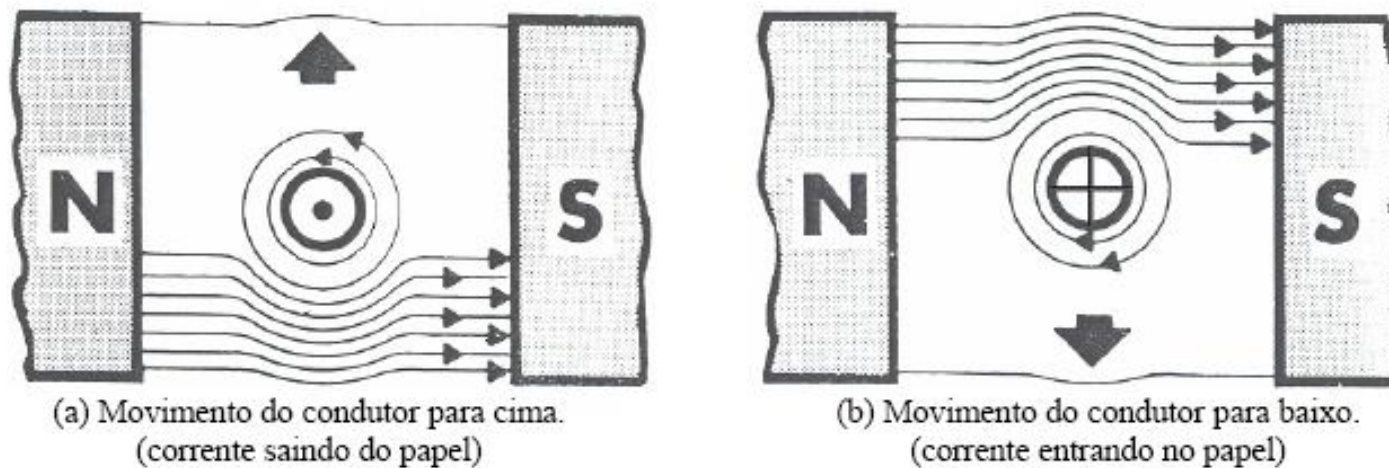
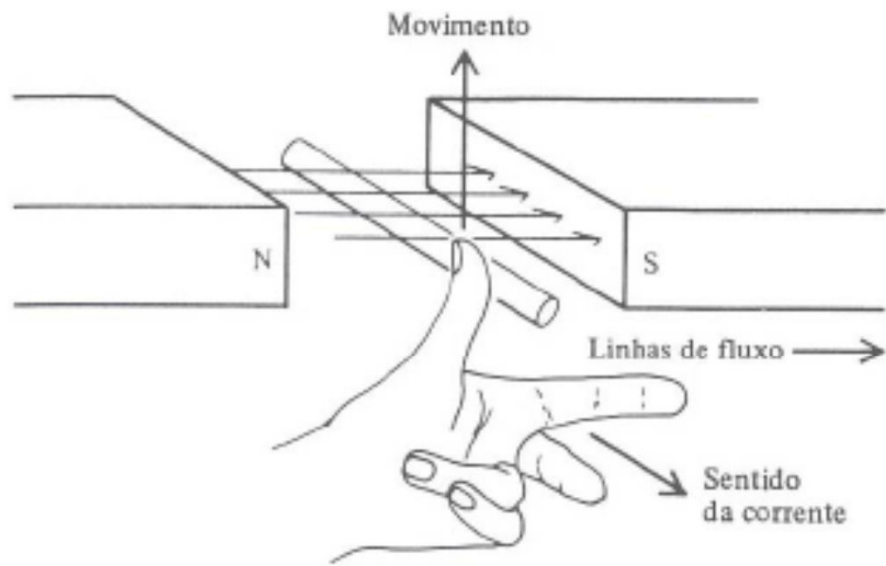
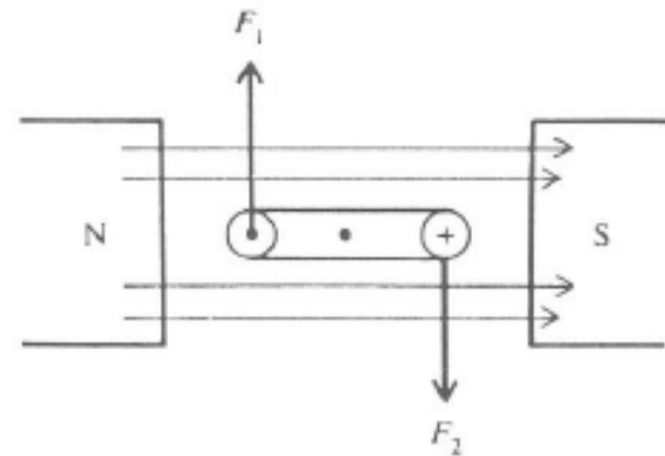


Fig. 4-2 : Interação entre os campos magnéticos principal e do condutor da armadura.

4.2 – SENTIDO DE ROTAÇÃO DA ARMADURA



(a) Somente um condutor.

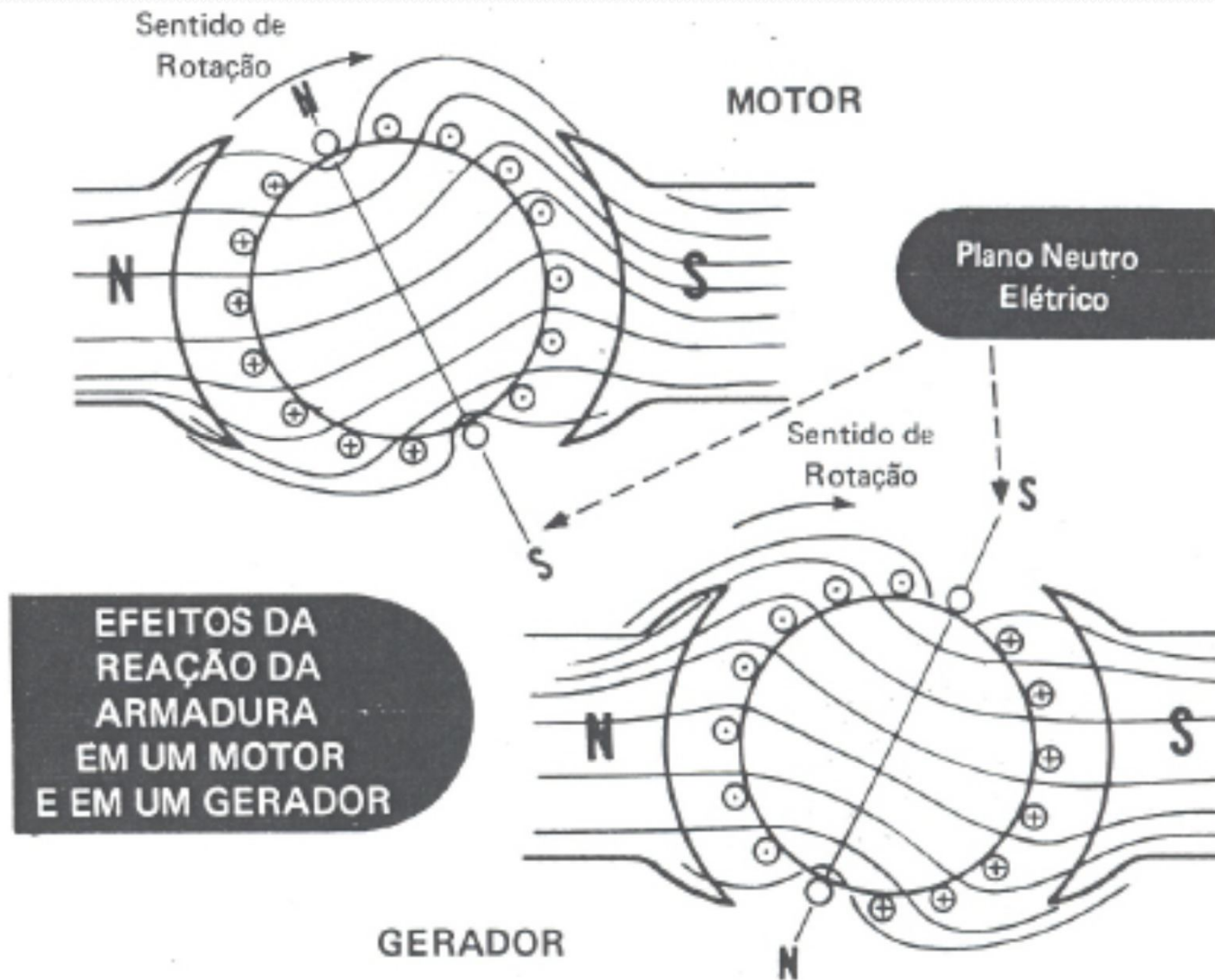


- ⊙ Corrente saindo do condutor
- ⊕ Corrente entrando no condutor

(b) Dois condutores de uma bobina com uma única espira.

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

4.3 – REAÇÃO DA ARMADURA NO MOTOR CC



4.4 – EQUAÇÃO DO TORQUE NO MOTOR CC

$$T = k_t \cdot \Phi \cdot I_a$$

Onde:

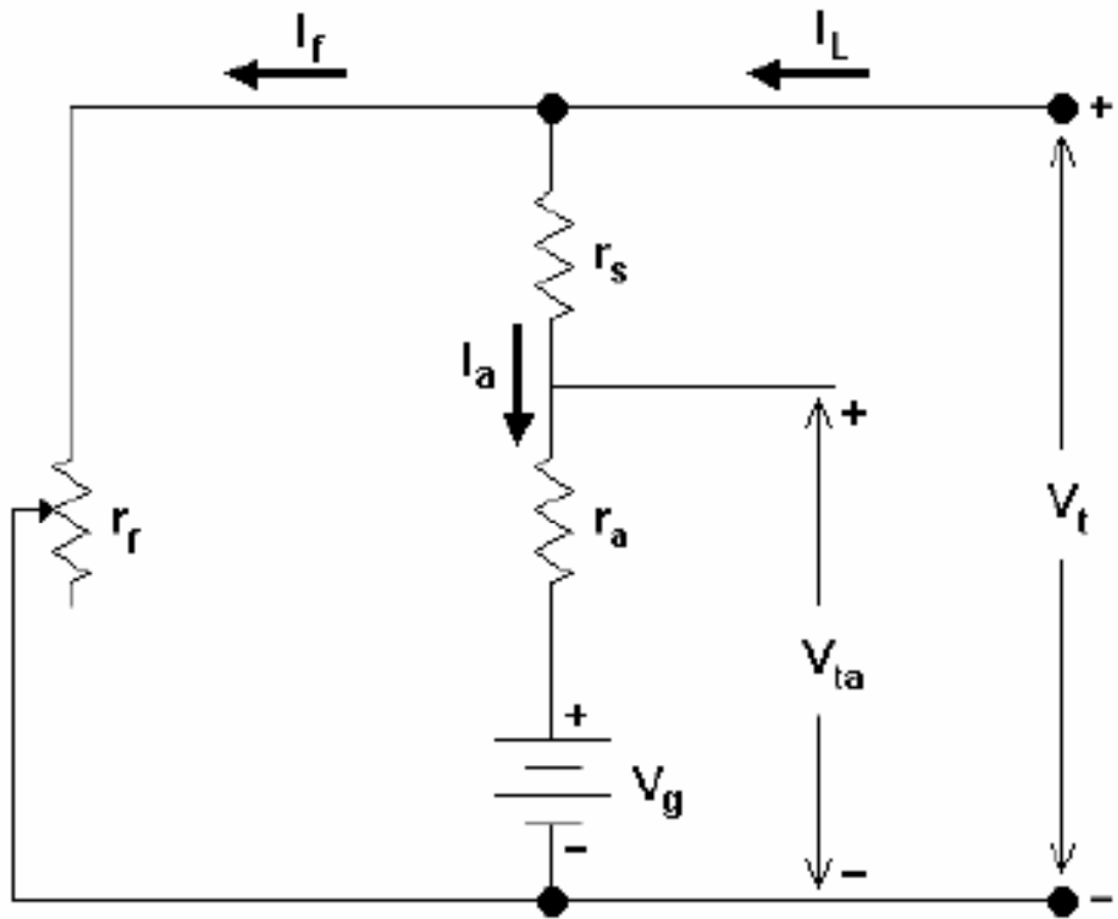
$T \rightarrow$ torque, kgf.m

$k_t \rightarrow$ constante que depende das dimensões físicas da máquina.

$I_a \rightarrow$ corrente da armadura, A.

$\phi \rightarrow$ número total de linhas de fluxo que entra na armadura por um pólo N, Wb.

4.5 – CIRCUITO EQUIVALENTE DO MOTOR CC



$$V_{ta} = V_g + r_a \cdot I_a$$

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

$$I_L = I_a + I_f$$

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

Onde:

V_{ta} → tensão nos terminais da armadura, V.

V_g → tensão gerada na armadura ou força contra-eletromotriz *fcem*, 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 .

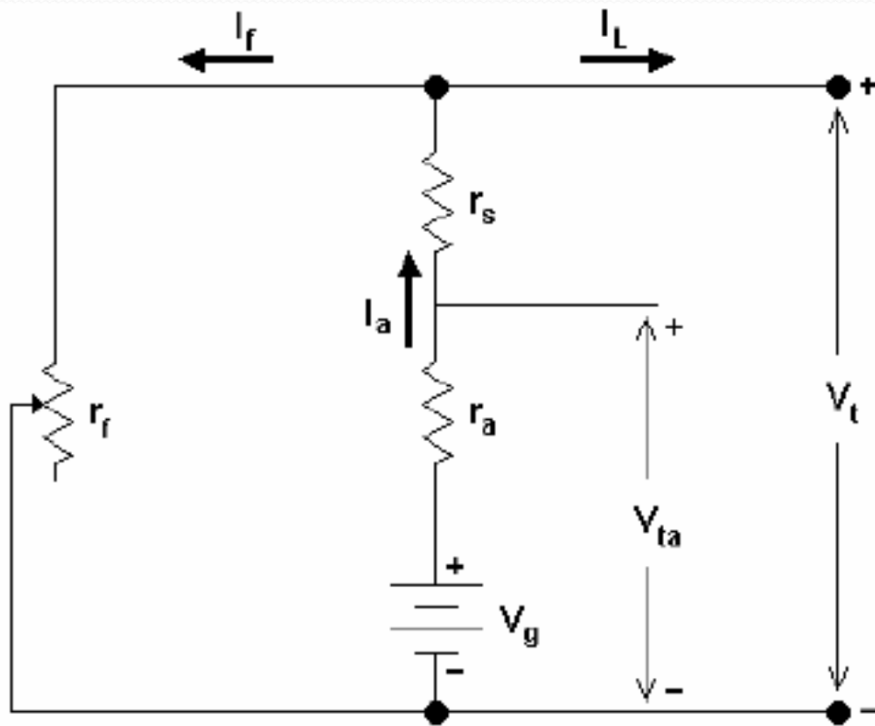
I_a → corrente da armadura, A.

I_s → corrente do campo em série ($I_s=I_a$ ou $I_s=I_L$), A.

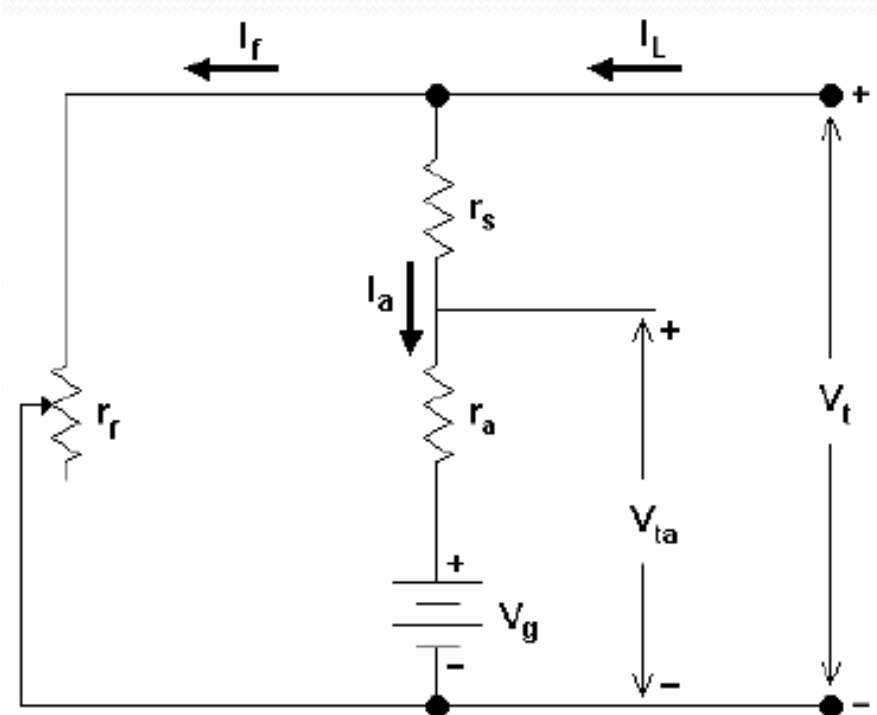
I_f → corrente do campo em derivação, A.

I_L → corrente fornecida pela fonte de alimentação ao motor (ou corrente na linha), A.

COMPARAÇÃO ENTRE CIRCUITOS EQUIVALENTES – *GERADOR versus MOTOR*



GERADOR



MOTOR

Ação Motora

1. O torque eletromagnético produz (ajuda) a rotação.
2. A tensão gerada *fcem* (força contra-eletromotriz) se opõe à corrente da armadura (lei de Lenz).
3. $V_g = V_{ia} - r_a \cdot I_a$

Ação Geradora

1. O torque eletromagnético (desenvolvido no condutor percorrido pela corrente) opõe-se à rotação (lei de Lenz).
2. A tensão gerada *fem* (força eletromotriz) produz (ajuda) a corrente da armadura.
3. $V_g = V_{ia} + r_a \cdot I_a$

4.6 – VELOCIDADE DE UM MOTOR

$$n = \frac{V_g}{k \cdot \Phi}$$

4.7 – REGULAÇÃO DE VELOCIDADE NO MOTOR

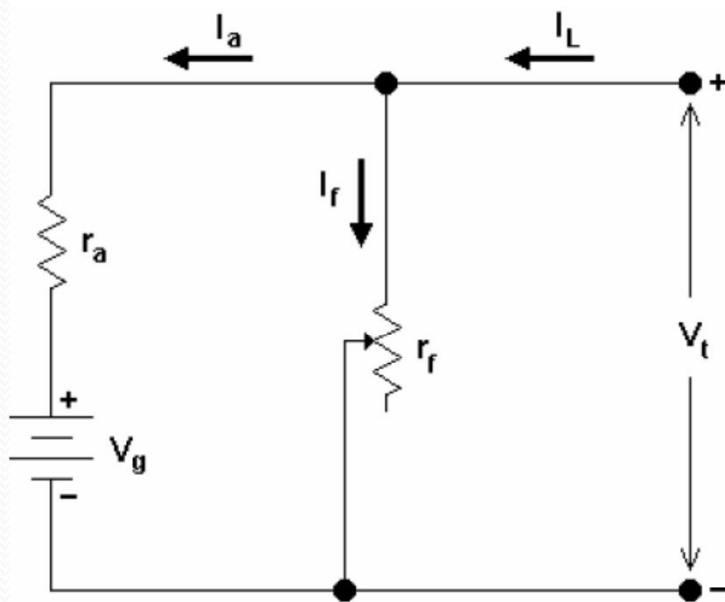
A regulação de velocidade de um motor é definida como: *a variação da velocidade desde a plena carga até a situação de carga nula, expressa em porcentagem da velocidade nominal.*

$$RV = \frac{n_{SC} - n_{CM}}{n_{CM}} \times 100\%$$

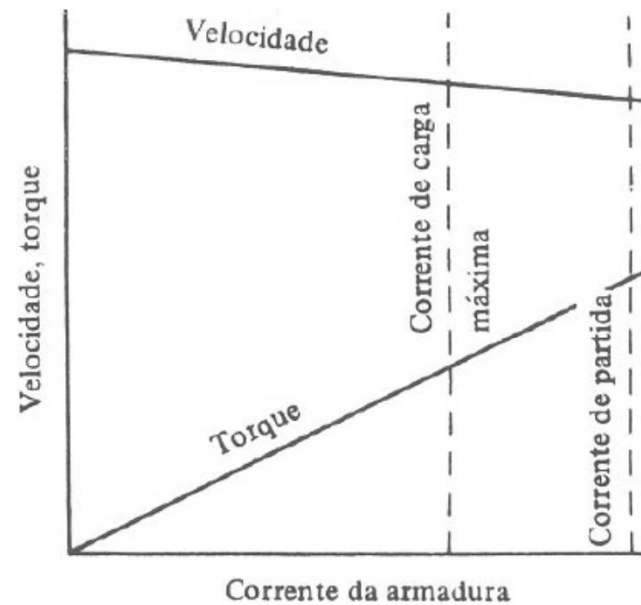
4.8 – TIPOS DE MOTORES CC

4.8.1 – Motor Shunt (Motor em Derivação)

Este é o tipo mais comum de motor CC. O torque aumenta linearmente com o aumento na corrente da armadura, enquanto a velocidade cai ligeiramente à medida que a corrente da armadura aumenta. O ajuste de velocidade é feito inserindo-se uma resistência no campo usando um reostato de campo. 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.



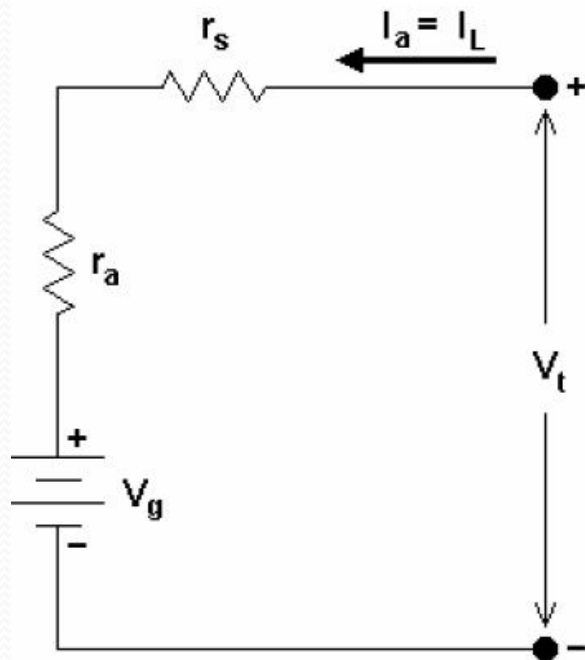
(a) Circuito equivalente.



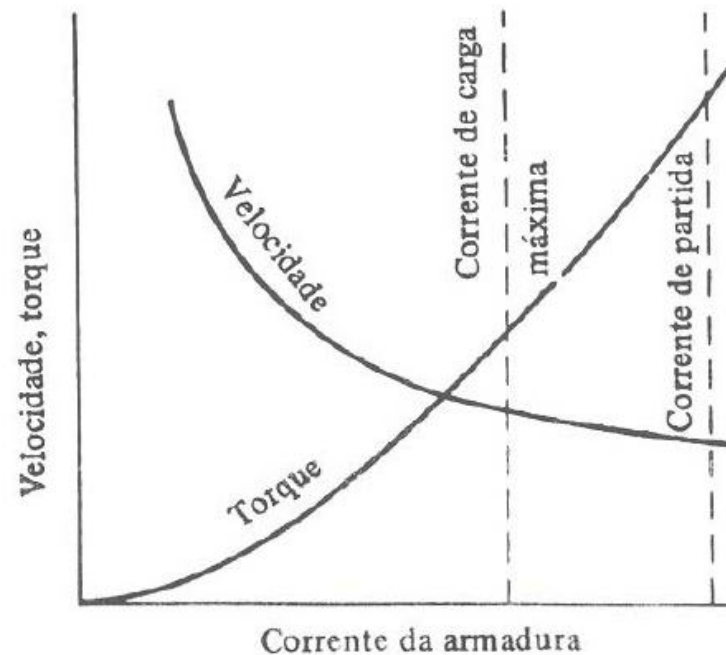
(b) Curvas de *velocidade × carga* e *torque × carga*.

4.8.2 – Motor Série

A velocidade varia de um valor muito alto com uma carga leve até um valor bem baixo com a carga máxima. 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. Sem nenhuma carga, a velocidade de um motor série aumentará ilimitadamente até o motor se destruir.



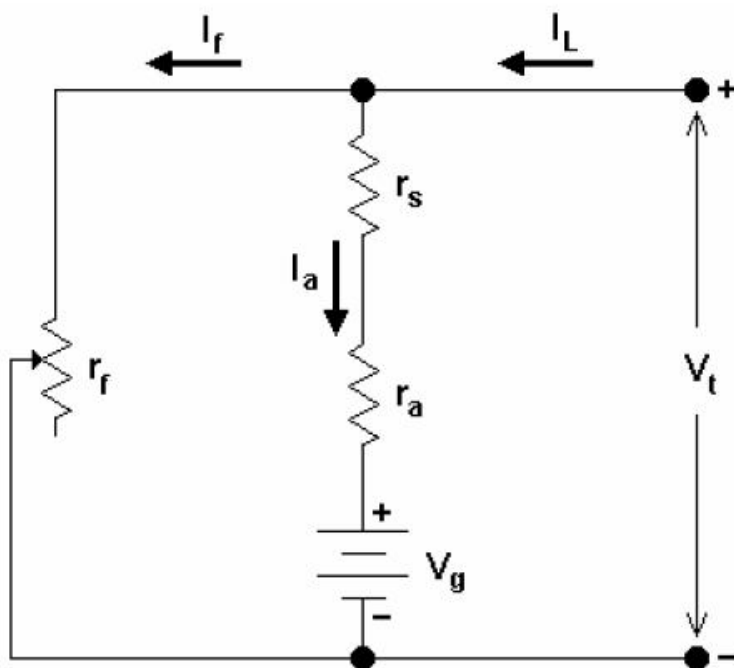
(a) Circuito equivalente.



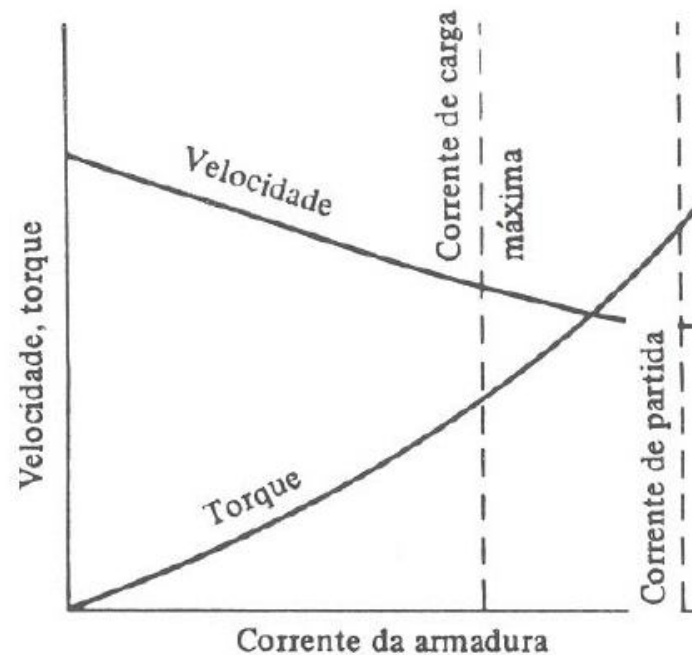
(b) Curvas de *velocidade x carga* e *torque x carga*.

4.8.3 – Motor Composto (Compound)

Este tipo de motor CC associa as características operacionais dos motores shunt e dos motores série. 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.

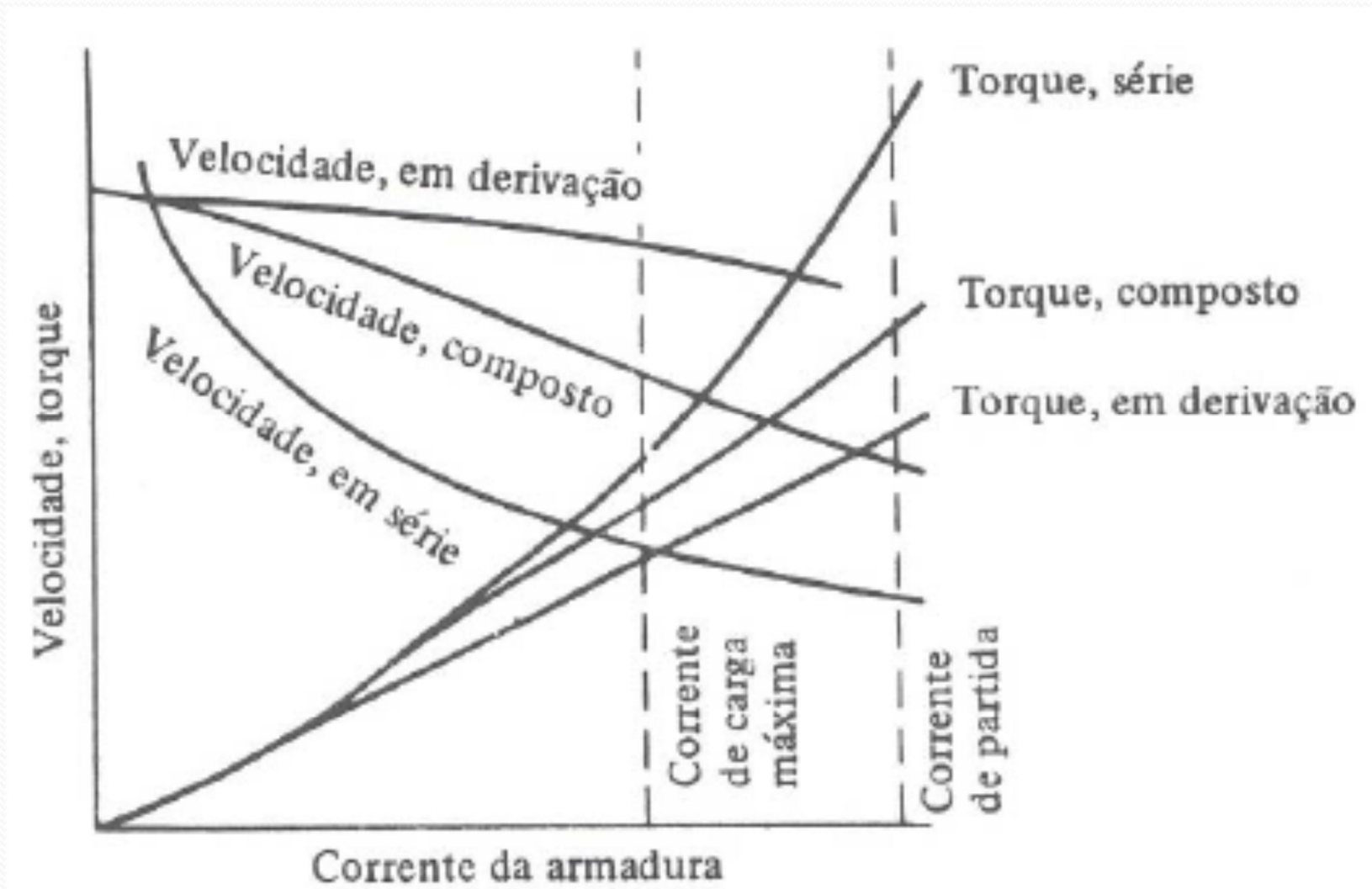


(a) Circuito equivalente.

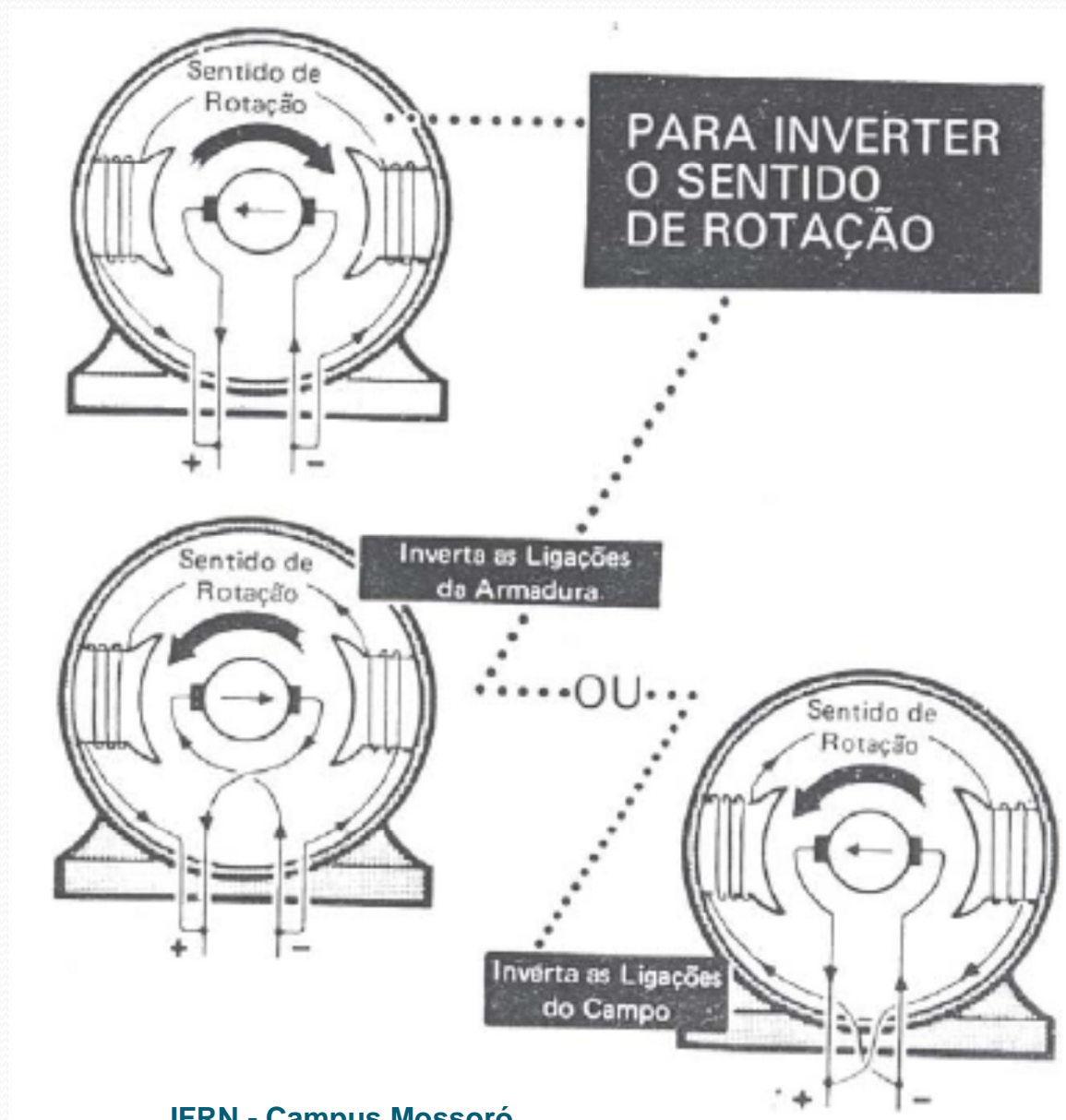


(b) Curvas de *velocidade* \times *carga* e *torque* \times *carga*.

4.8.4 - Comparação entre os motores CC



4.9 – INVERSÃO DO SENTIDO DE ROTAÇÃO DO MOTOR CC



4.10 – REQUISITOS DE PARTIDA DOS MOTORES CC

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.

$$R_p = \frac{V_t}{I_p} - r_a$$

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 .