# TE 146 Conversão de Energia I

## Capitulo 5 – Maquinas CC;

# 1. Introdução

- Um **motor de corrente contínua** converte energia elétrica em energia mecânica, como qualquer motor, mas tem uma característica que o individualiza:
  - Deve ser alimentado com **tensão contínua**. Essa tensão contínua pode provir de pilhas e baterias, no caso de pequenos motores, ou de uma rede alternada após retificação, no caso de motores maiores.
- São conhecidos por seu controle preciso de velocidade e por seu ajuste fino;
- Largamente utilizados em aplicações que exigem tais características

- Grande incremento nos últimos anos, graças à eletrônica de potência;
- Fontes estáticas de corrente contínua com tiristores confiáveis, de baixo custo e manutenção simples, substituíram os grupos conversores rotativos;
- Com isso, motores de corrente contínua passaram a constituir alternativa mais atrativa em uma série de aplicações.

- Melhor opção em inúmeras aplicações, tais como:
  - Máquinas de papel;
  - Bobinadeiras e desbobinadeiras;
  - Laminadores;
  - Máquinas de impressão;
  - Extrusoras;
  - Prensas;
  - Elevadores;
  - Movimentação e elevação de cargas;
  - Moinhos de rolos;
  - Indústria de borracha;
  - Mesa de testes de motores;

- **Motor de CC:**
- a variação de velocidade :
- variação da tensão de armadura, resistência de armadura e/ou;
- variação do fluxo de magnetização, estator;

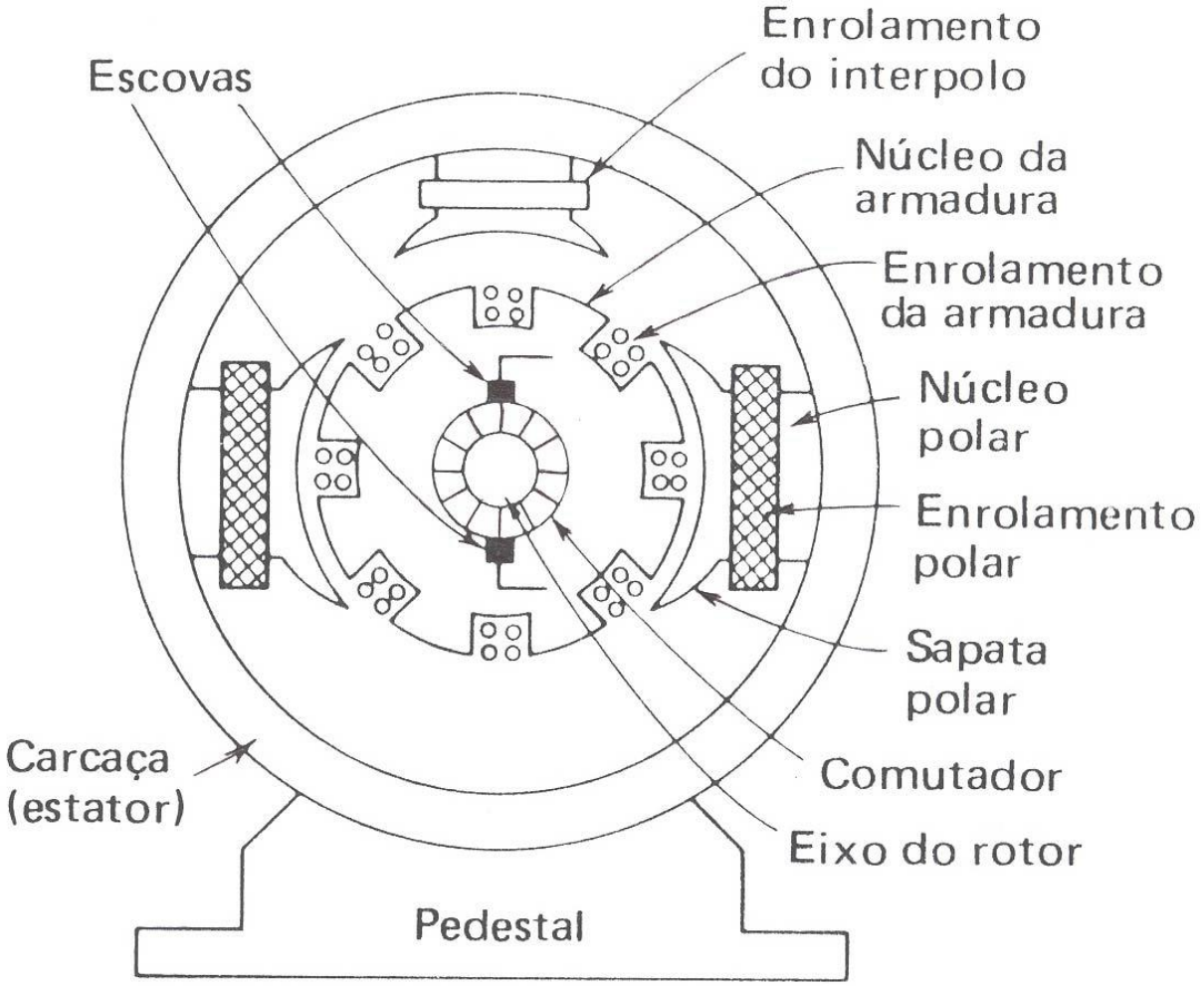
- **Vantagens**
  - ✓ alta precisão.
  - ✓ sincronismo.
  - ✓ torque controlável.
  - ✓ variação.
  - frenagem regenerativa.
- **Desvantagens**
  - ✓ preço; manutenção.
  - ✓ impossibilidade em área de risco.
  - ✓ dimensão e peso.
  - ✓ F.P. variável.

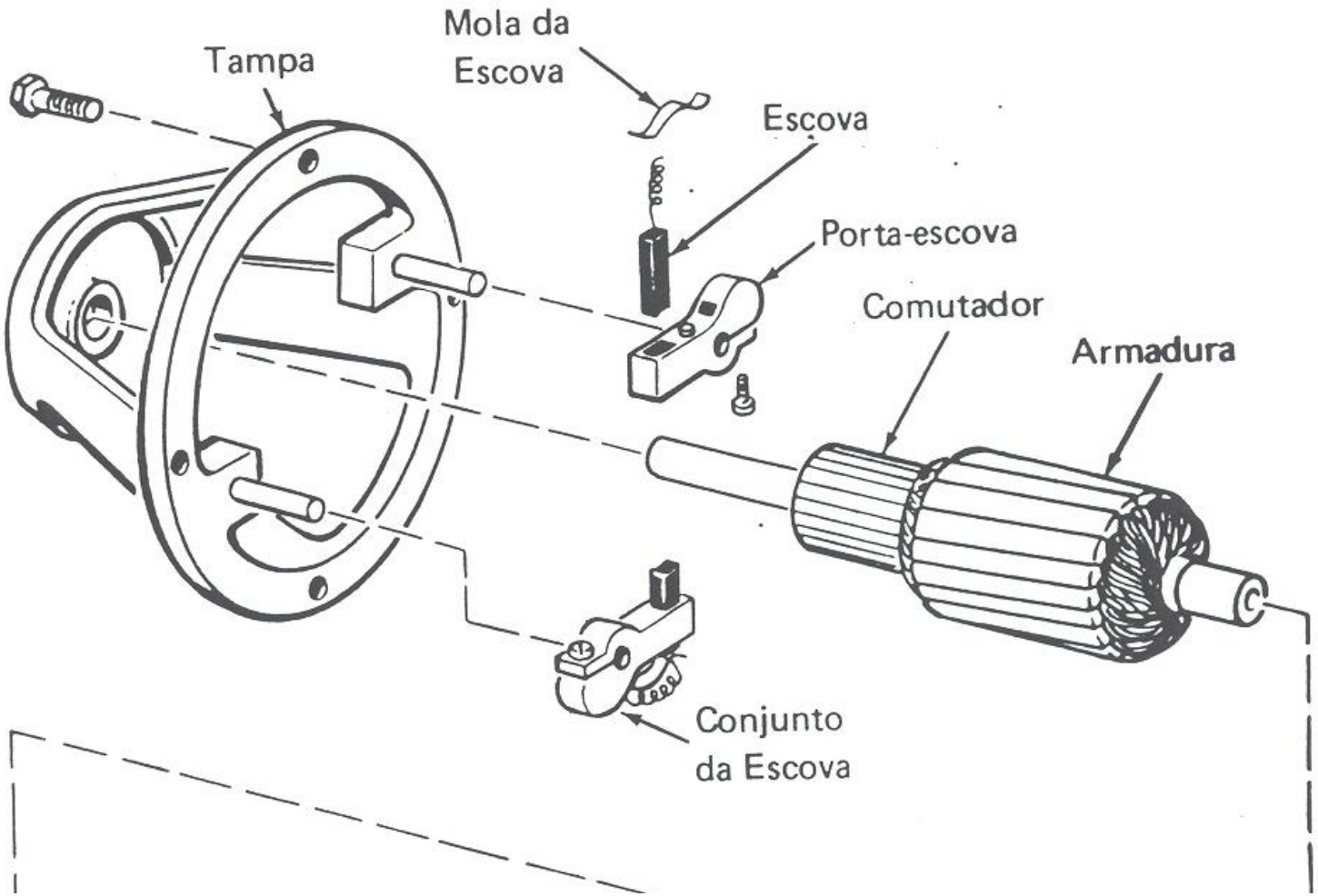
- **Frenagem por injeção de CC (DC injection breaking)**

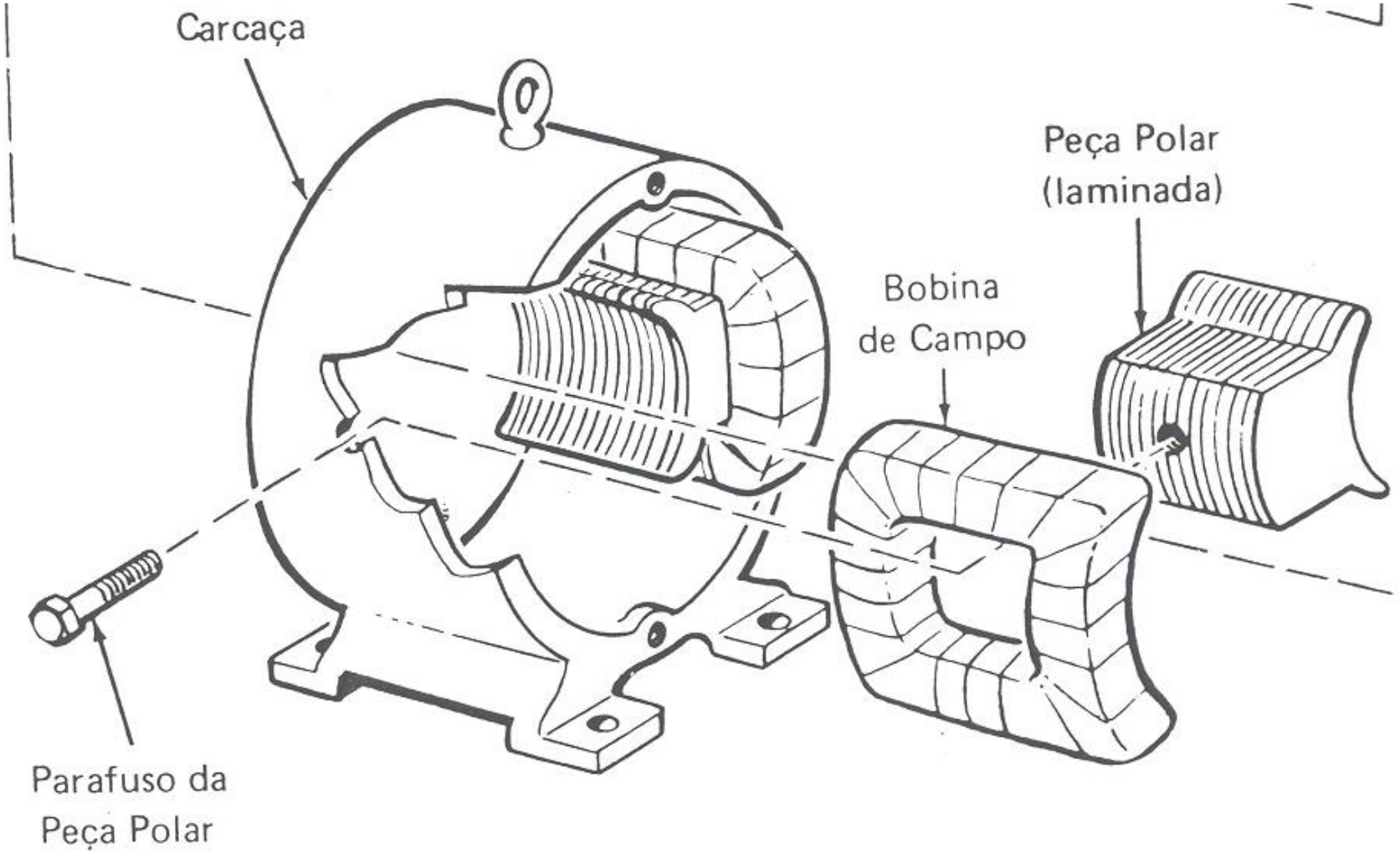
Através da injeção de corrente contínua no estator do motor CC com corrente circulando pela armadura, um campo magnético fixo é criado. Este se opõe ao movimento do eixo, que por sua vez tende a diminuir a sua rotação. Este procedimento resulta em calor, que é então dissipado pelo próprio motor.

- **Frenagem regenerativa**
- A Frenagem Regenerativa ocorre em veículos elétricos ou híbridos;
- Já estando em movimento, para o carro parar, ou seja, o motor retornar ao repouso, é preciso frenar o eixo;
- No momento da frenagem, parte da energia entregue - que agora se encontra na forma de energia mecânica - ou é convertida em calor ou se transforma novamente em eletricidade e é devolvida para o inversor;
- A energia elétrica gerada durante a frenagem é armazenada nas baterias dos veículos elétricos;
- Também contribui para a redução do consumo de combustível, no caso dos automóveis híbridos, além disso proporciona redução do desgaste das lonas ou discos de freios, por freiar o veículo via campo eletromagnético (sem atrito), resultando em maior durabilidade para essas partes do sistema de freios.

# 2. Componentes de uma Máquina CC




Mola da
Escova
Tampa
Escova
Porta-escova
Comutador
Armadura
Conjunto
da Escova


Carcaça
Peça Polar
(laminada)
Bobina
de Campo
Parafuso da
Peça Polar

Os principais componentes de um motor de corrente contínua (motor CC, por simplicidade) são descritos como segue:

Domínios Magnéticos

- Rotor (Armadura)

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.

- Comutador

Dispositivo mecânico (tubo de cobre axialmente segmentado) no qual estão conectados os terminais das espiras da armadura, e cujo papel é inverter sistematicamente o sentido da corrente contínua que circula na armadura

- Escovas

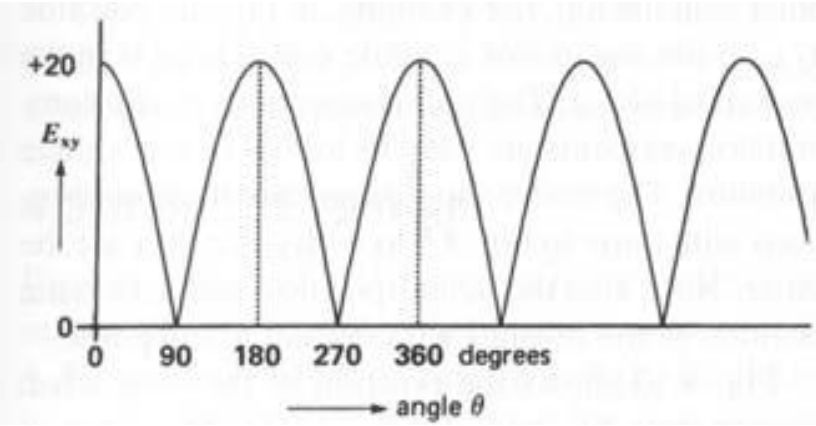
São conectores de grafita fixos, montados sobre molas que permitem que eles deslizem (ou "escovem") sobre o comutador no eixo da armadura. Assim, as escovas servem de contato entre os enrolamentos da armadura e a carga externa (no caso do gerador). As escovas estão sempre instantaneamente conectadas a um segmento do comutador e em contato com uma bobina localizada na zona interpolar .

- Estator (Campo)

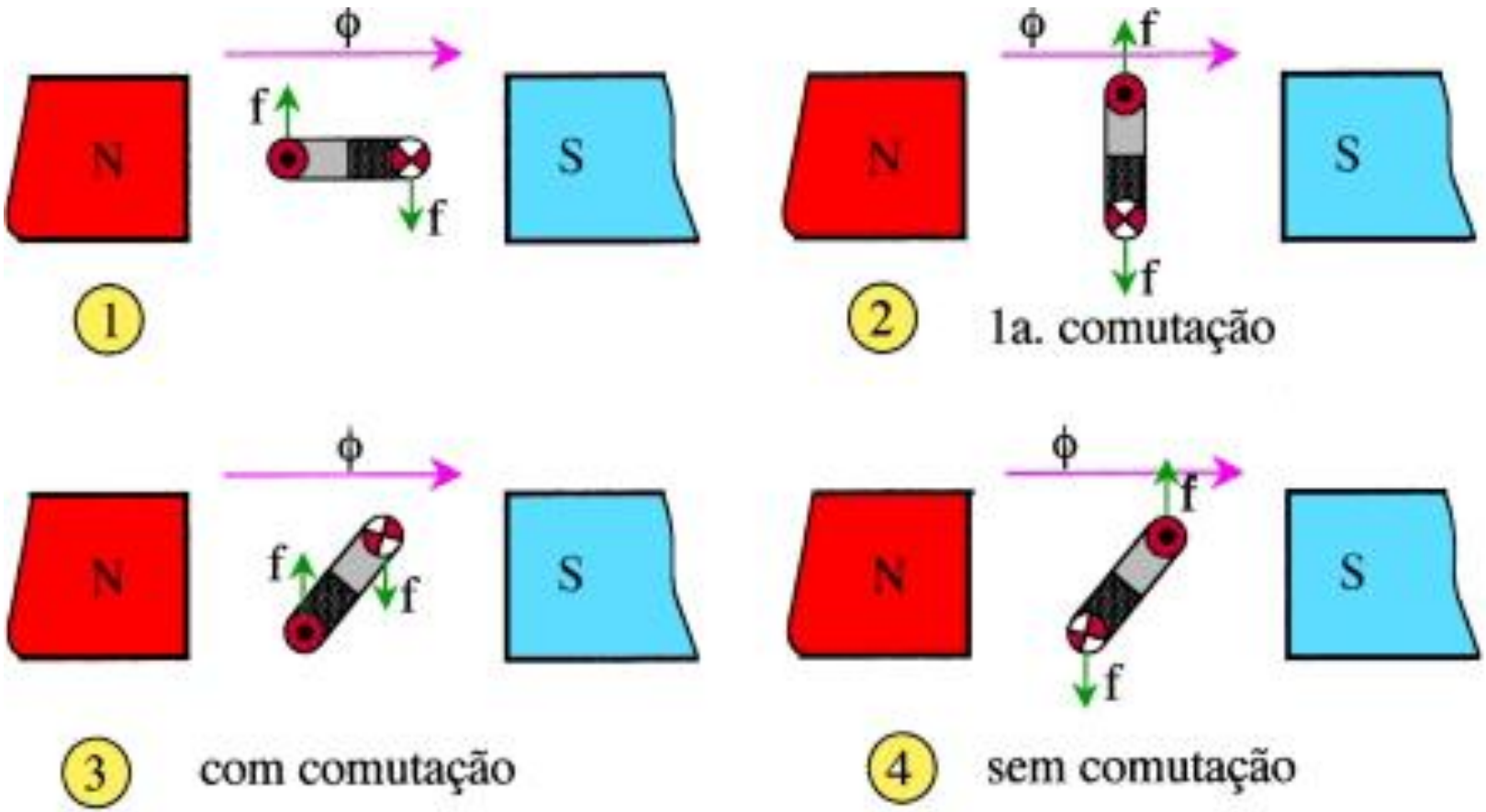
Contém um enrolamento que é alimentado diretamente por uma fonte de tensão contínua; no caso de pequenos motores, o estator pode ser um simples imã permanente;

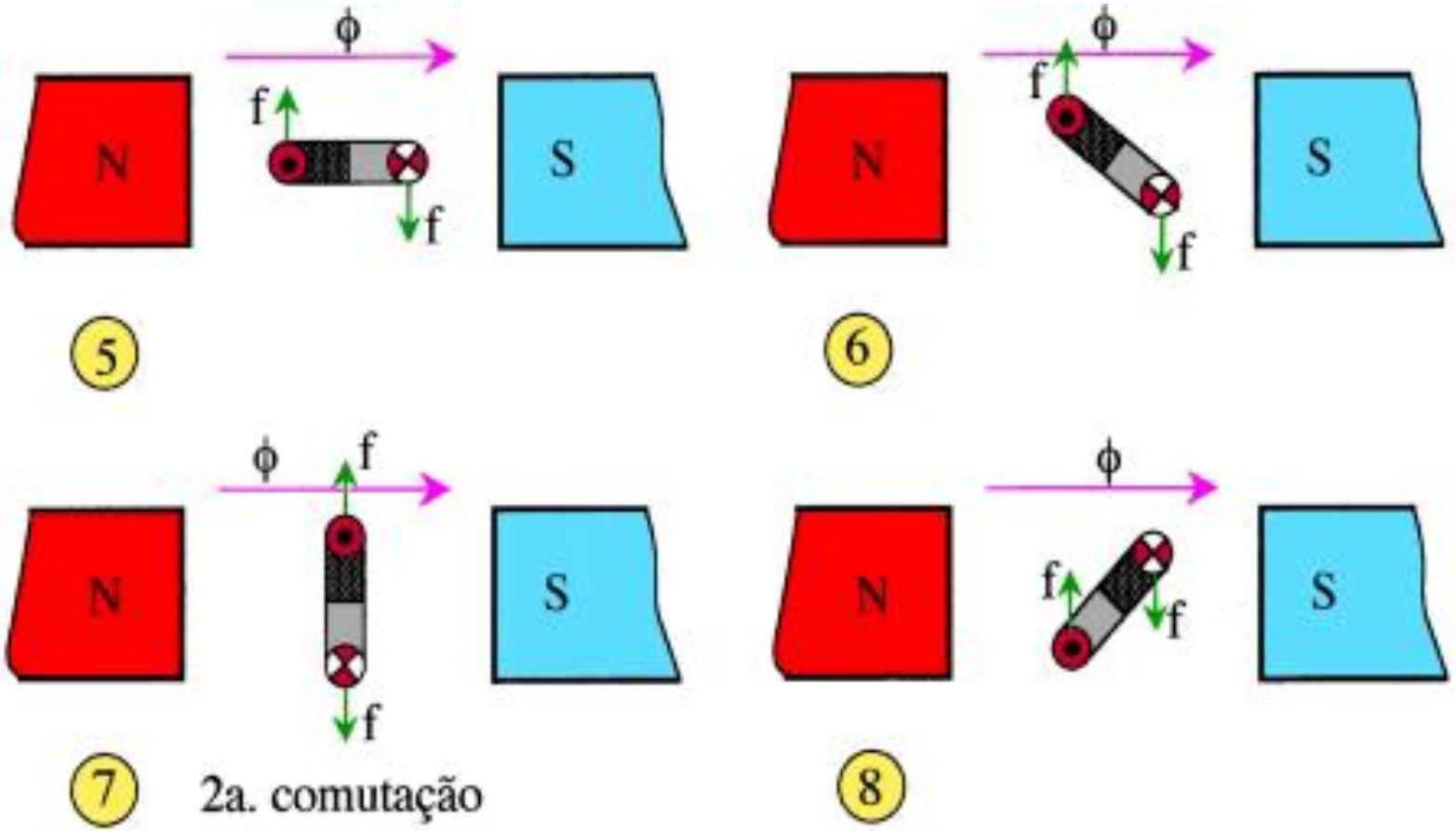
# 3. Princípio de Funcionamento

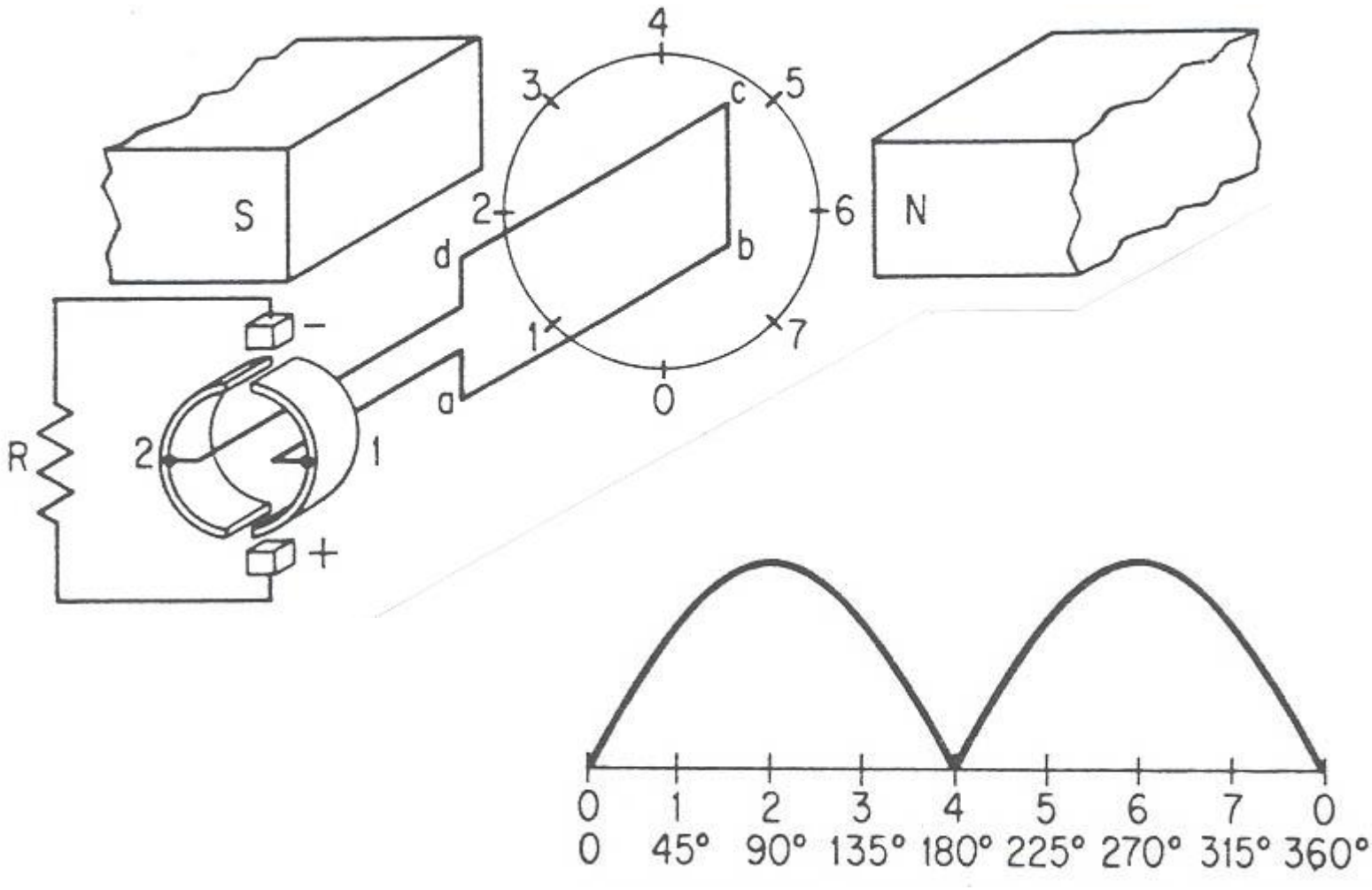
- O comutador no contato com as escovas transforma a tensão alternada em uma unidirecional e pulsante;
- O comutador age como um retificador mecânico;

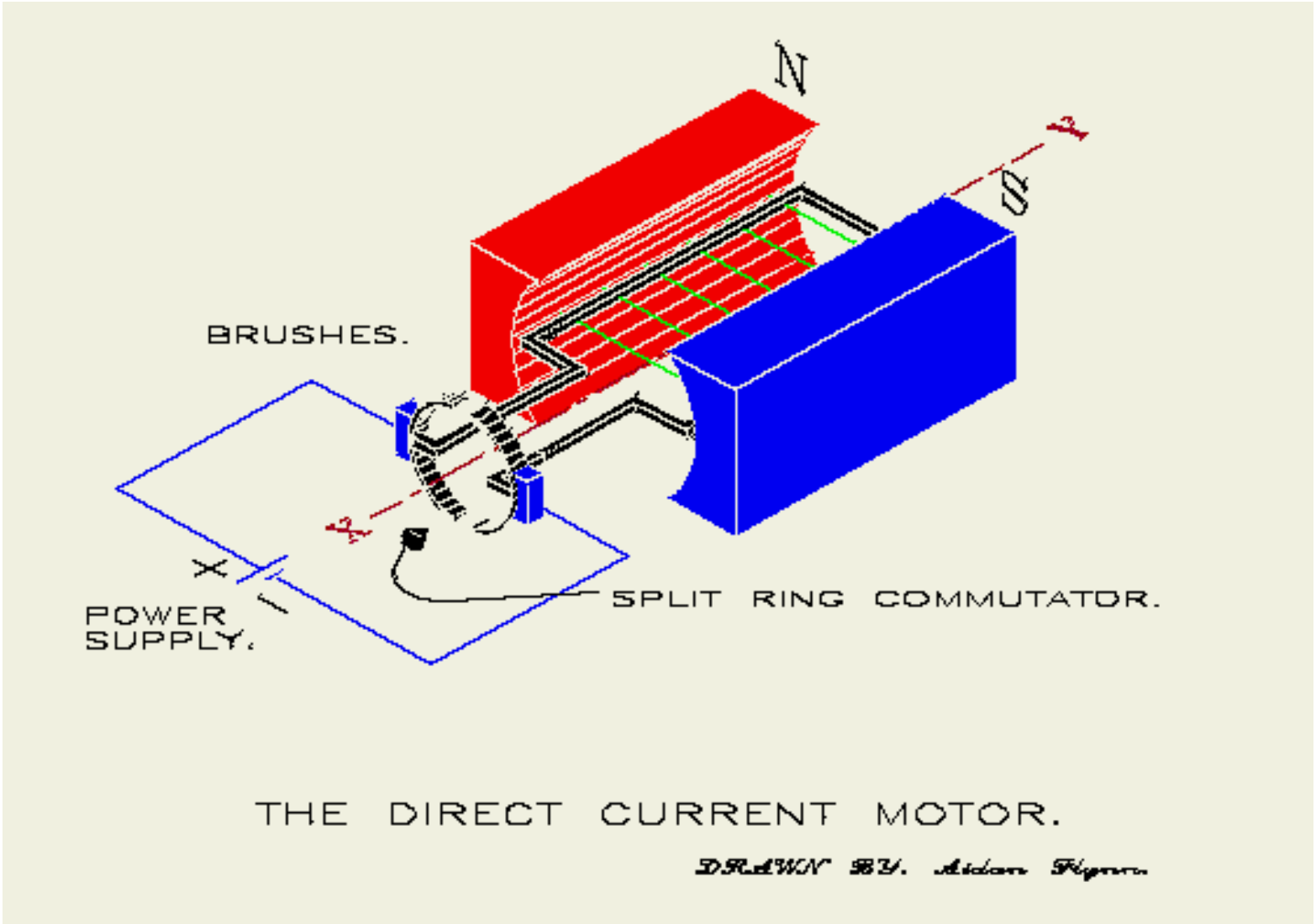



Tensão entre escovas

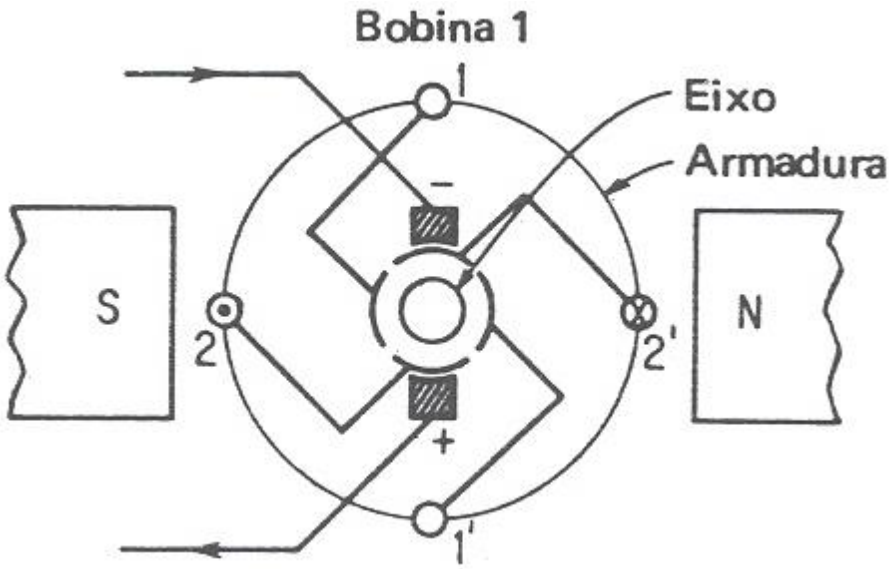

ϕ
f
f
N
S
1
ϕ
f
f
N
S
2
1a. comutação
ϕ
f
f
N
S
3
com comutação
ϕ
f
f
N
S
4
sem comutação

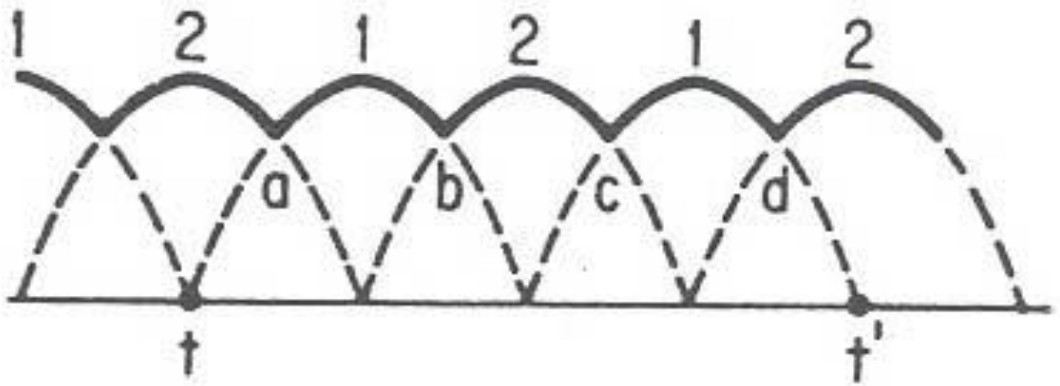

ϕ
f
f
N
S
5
ϕ
f
f
N
S
6
ϕ
f
f
N
S
7
2a. comutação
ϕ
f
f
N
S
8


S
N
R
a
b
c
d
1
2
3
4
5
6
7
0
+
−
0 1 2 3 4 5 6 7 0
0 45° 90° 135° 180° 225° 270° 315° 360°

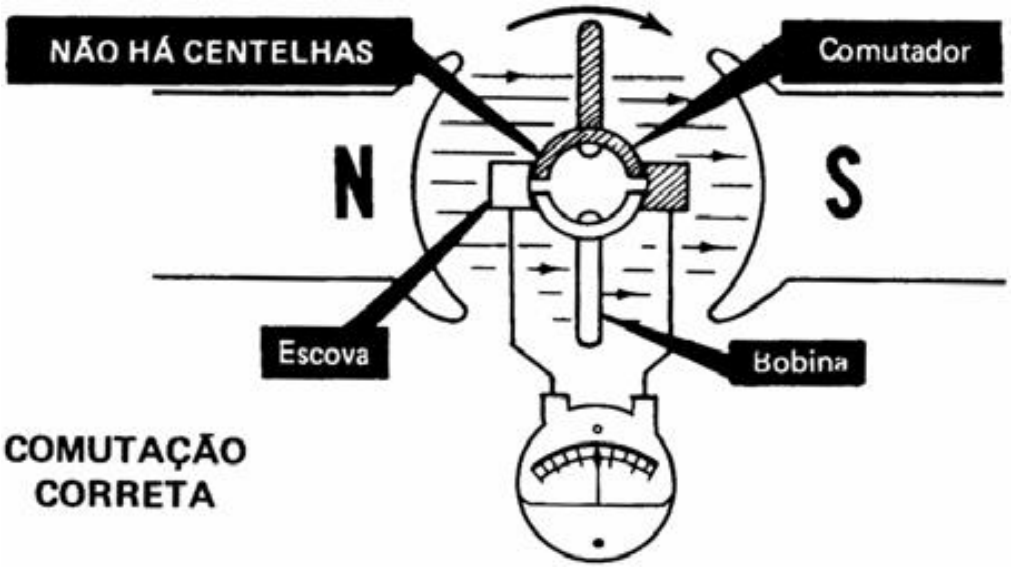

N
S
BRUSHES.
X
Y
POWER
SUPPLY.
SPLIT RING COMMUTATOR.
THE DIRECT CURRENT MOTOR.
DRAWN BY. Aidan Flynn.

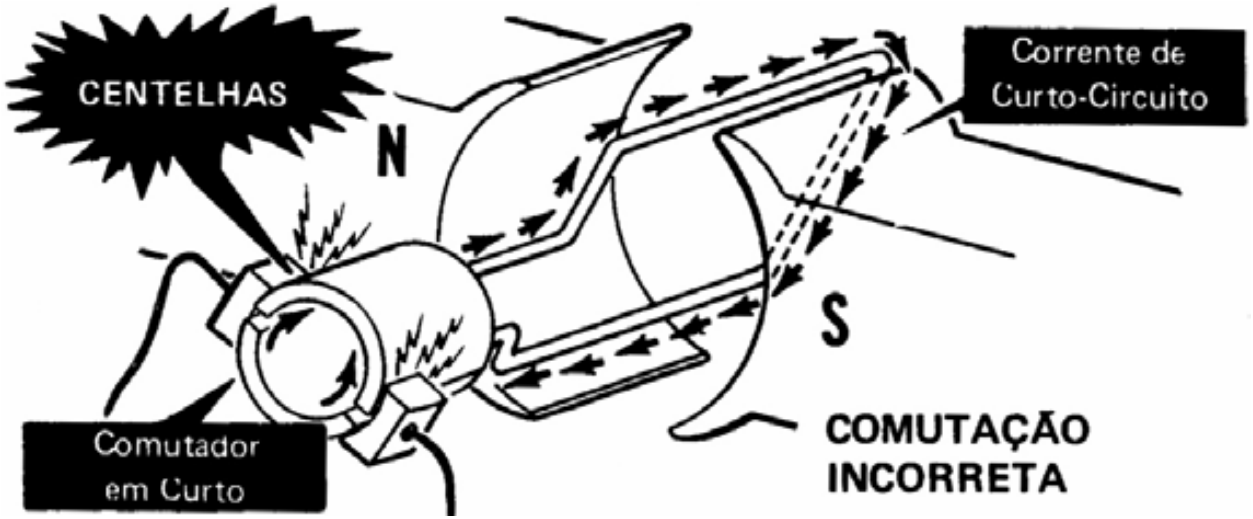
- A *fem* de saída pode ser tornada menos pulsativa pelo uso de um grande número de bobinas ou segmentos do comutador;
- Com apenas duas escovas e quatro segmentos, há agora quatro comutações mostradas como *a*, *b*, *c* e *d*, num ciclo de rotação completo (tempo de *t* a *t'*). Logo, a *fem* resultante é menos pulsante.


Bobina 1
1
Eixo
Armadura
–
S
2
2'
N
+
1'

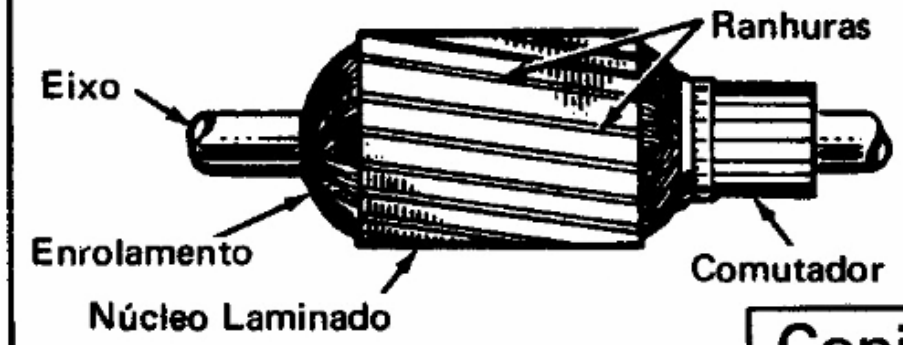

1
2
1
2
1
2
a
b
c
d
t
t'

- Em um gerador, a área onde nenhuma tensão pode ser induzida numa espira da armadura é chamada de *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 centelhamento 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 centelhamento nas escovas. Esta corrente de curto-circuito pode danificar seriamente tanto as bobinas quanto o comutador.

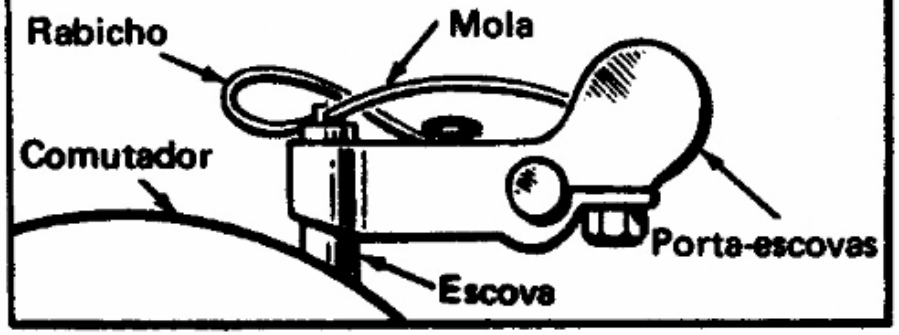

NÃO HÁ CENTELHAS
Comutador
N
S
Escova
Bobina
COMUTAÇÃO
CORRETA

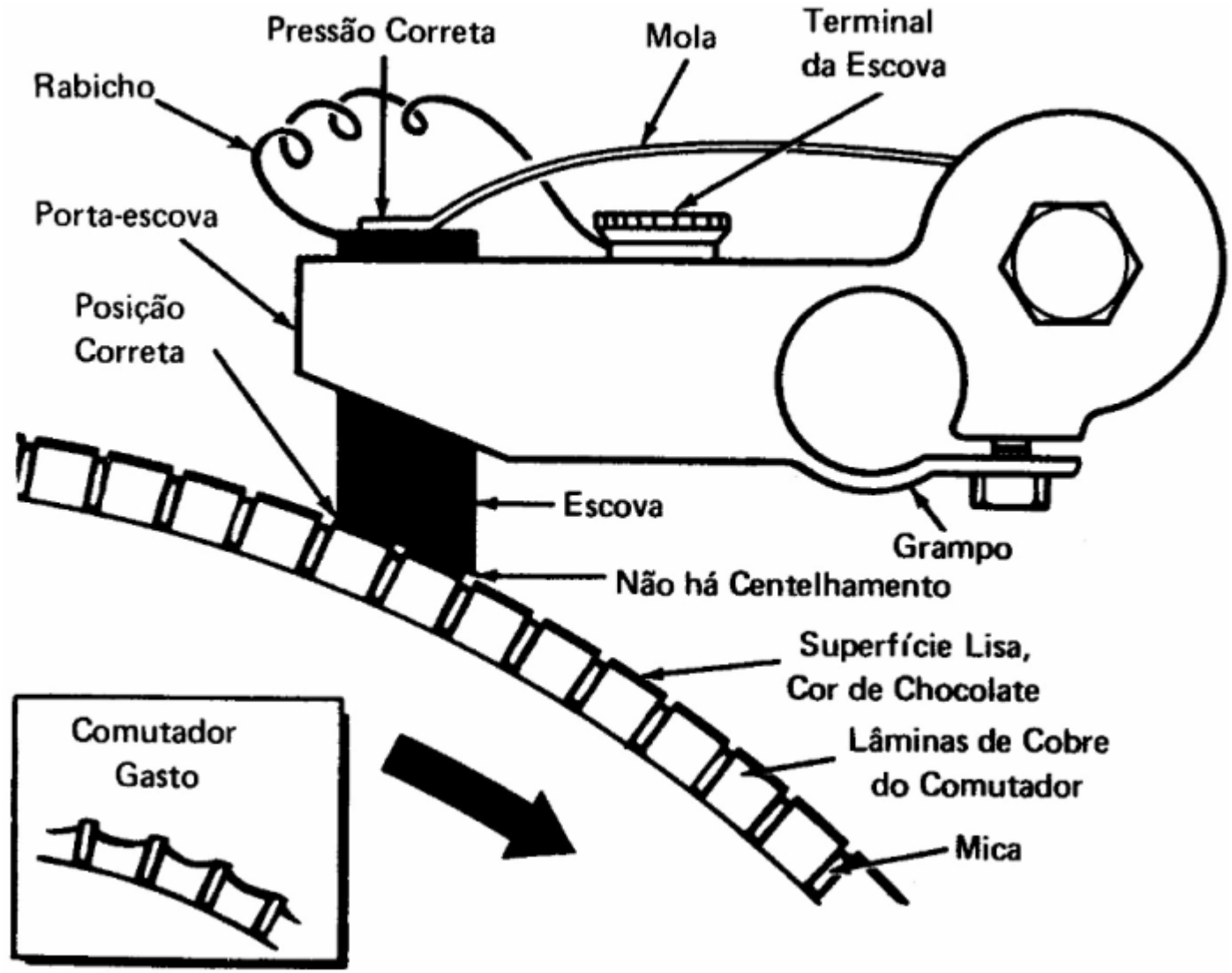

CENTELHAS
N
Corrente de
Curto-Circuito
S
Comutador
em Curto
COMUTAÇÃO
INCORRETA

## Conjunto da Armadura




## Conjunto da Escova



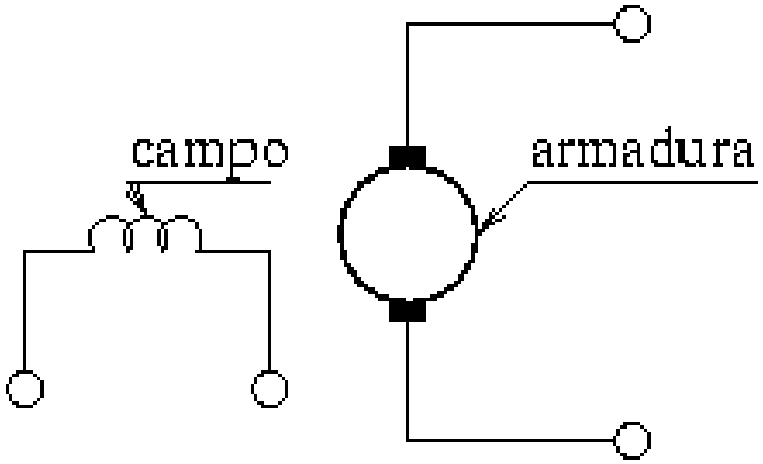

Pressão Correta
Mola
Terminal
da Escova
Rabicho
Porta-escova
Posição
Correta
Escova
Grampo
Não há Centelhamento
Superfície Lisa,
Cor de Chocolate
Lâminas de Cobre
do Comutador
Mica
Comutador
Gasto

# 4. Tipos de Máquinas CC

- Há três tipos básicos de Máquinas CC:
  - Enrolamentos independentes
  - Enrolamentos em série;
  - Enrolamentos em paralelo ou SHUNT; e
  - Enrolamentos  mistos ou compostos.
- Diferem amplamente no método pelo qual seu campo e as bobinas do rotor estão ligados.

# Independente

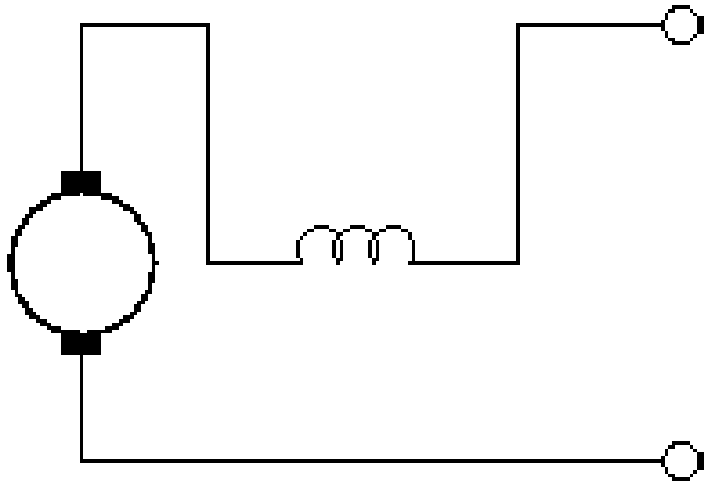
- Máquina c.c. com excitação separada (independente), o enrolamento de campo tem fonte c.c. própria.




(a) excitação separada

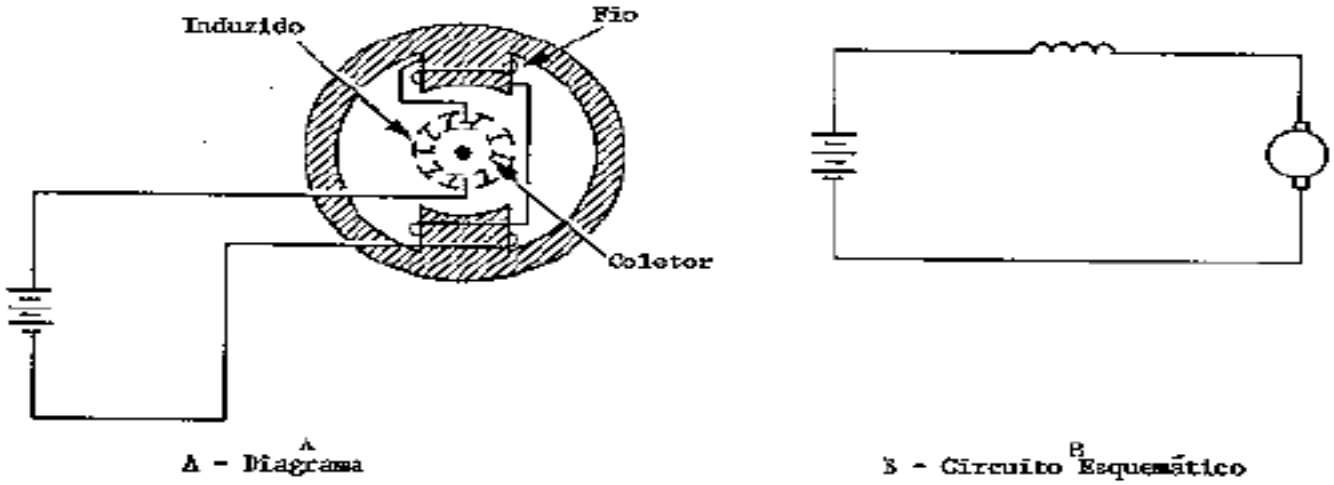
# Série

- Máquina c.c. com excitação série, o enrolamento de campo está conectado em série com o enrolamento do rotor.



(b) excitação série

- Os enrolamentos do campo, que consistem de algumas espiras de fio grosso, são ligados em série com o enrolamento do rotor.

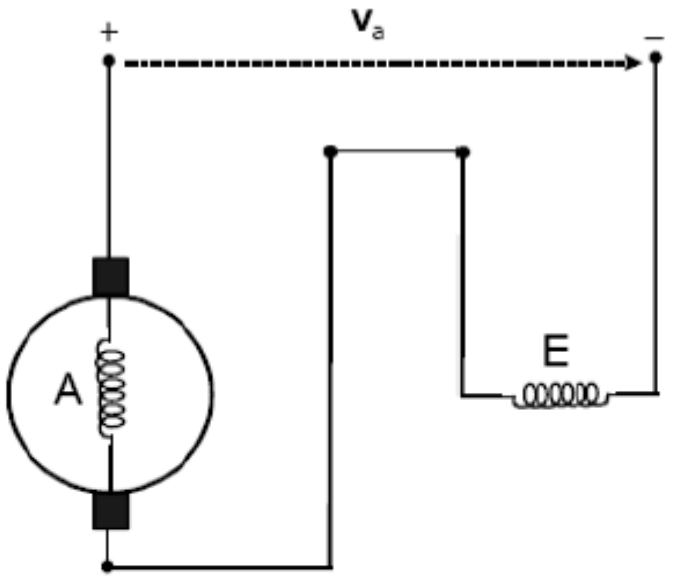


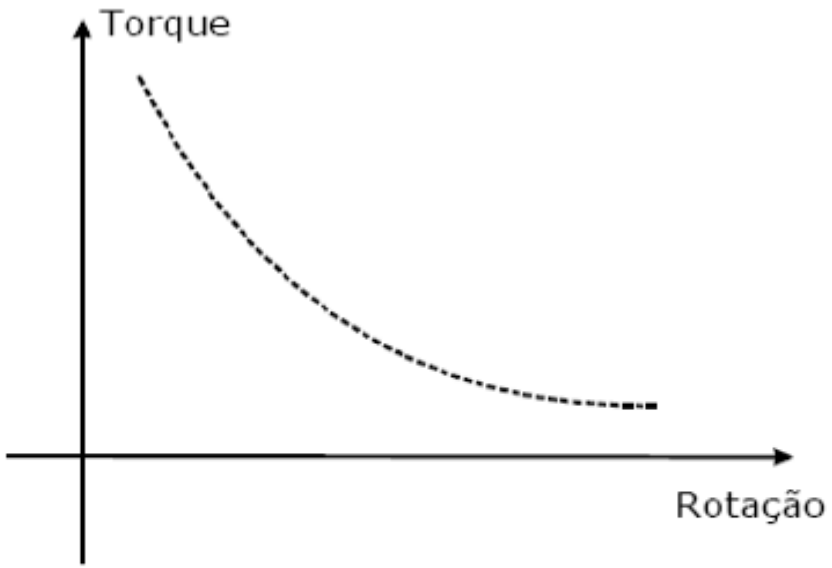

- Qualquer aumento na corrente, favorece o magnetismo do campo e do rotor.
- Devido à baixa resistência nos enrolamentos, o motor enrolado em série é capaz de consumir uma grande corrente na partida.

- A corrente inicial, passando através dos enrolamentos do campo e do rotor, produz um torque inicial elevado, que é a principal vantagem do motor em série.
- A velocidade de um motor em série depende da carga.
- Qualquer mudança na carga é acompanhada por uma mudança substancial na velocidade.
- Funcionará em alta velocidade quando ele possuir uma carga leve e em baixa velocidade com uma carga pesada.

- Se a carga for retirada completamente, o motor poderá operar com tão alta velocidade que trará graves problemas mecânicos para o rotor

- Eles são mais frequentemente usados em aviões como motor de partida e para recolher ou baixar os trens de pouso, flapes da capota e os flapes da asa.




**Enrolamentos :**

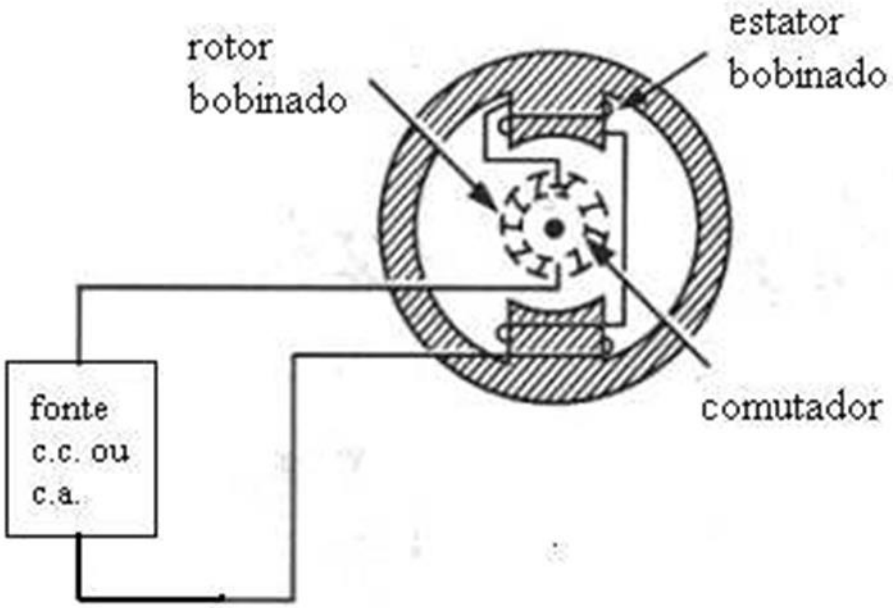
A - armadura

E - campo principal

*Esquema de conexão para excitação série*

# Motor Série x Motor Universal

- O motor com excitação série possibilita o seu funcionamento tanto com corrente contínua como com corrente alternada, sendo denominado MOTOR UNIVERSAL.



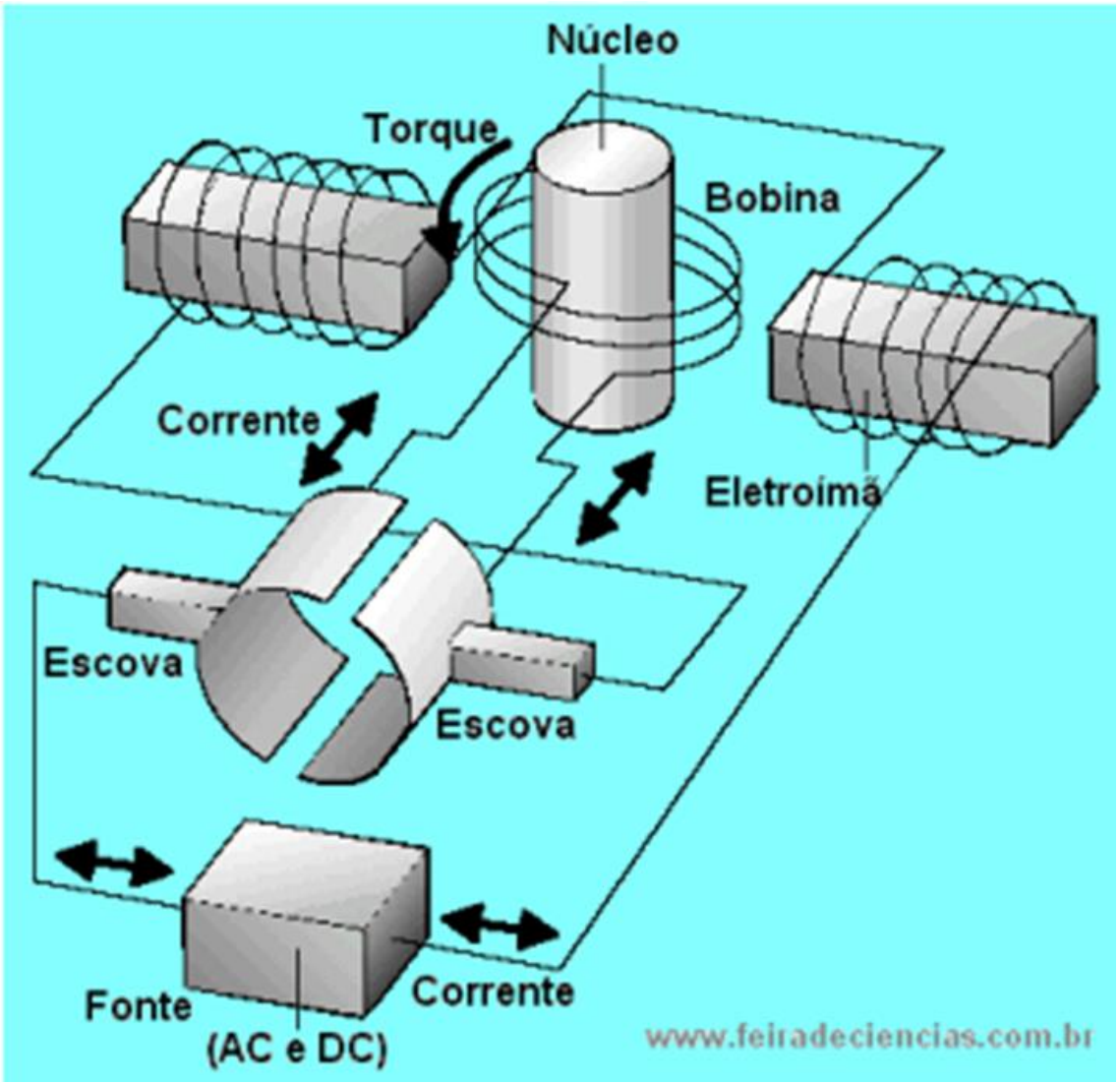
- QUAL A IMPORTÂNCIA DA BOBINA DO ROTOR ESTAR CONECTADA EM SÉRIE COM A BOBINA DO ESTATOR?

- MOTOR UNIVERSAL
  - Seu princípio de funcionamento é o mesmo já descrito para o motor c.c.,
  - Quando se inverte a polaridade da tensão na fonte (fonte c.a.), invertem-se simultaneamente a polaridade do campo magnético no estator e o sentido da corrente no rotor
    - continuando a ser produzido torque no mesmo sentido.

- CARACTERÍSTICAS OPERACIONAIS

  - Em um motor c.c., quando o rotor está em movimento, ocorre o fenômeno da indução de uma força eletromotriz (f.e.m.) devido ao movimento das espiras do rotor em uma região com campo magnético gerado pela corrente que circula no enrolamento de campo (Lei de Faraday).

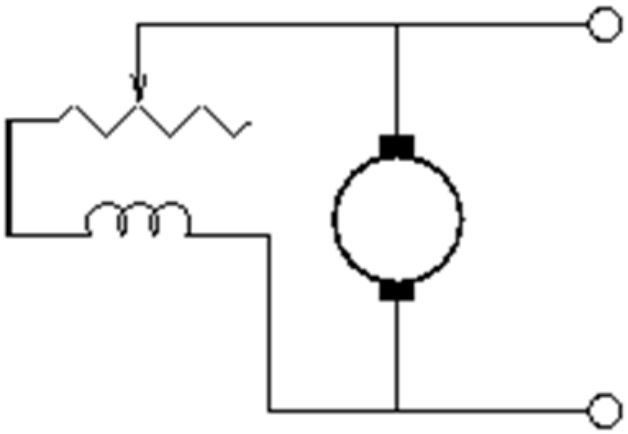
  - E lembrando da Lei de Lenz, essa f.e.m. (Eg) tem polaridade oposta à da tensão aplicada (Vt) nos terminais da bobina do rotor através da fonte c.c. externa, sendo por este motivo denominada força contra-eletromotriz (f.c.e.m).


Núcleo
Torque
Bobina
Corrente
Eletroímã
Escova
Escova
Fonte
(AC e DC)
Corrente
www.feiradeciencias.com.br

- A diferença entre motor universal e motor DC é que se você alimentar o motor universal com fonte DC, ele não inverterá o sentido de rotação;
- Se você inverter a polaridade da fonte (como acontece com o motor DC), continuará a girar sempre no mesmo sentido;
- Para inverter o sentido de rotação de um motor universal deverá inverter as ligações nos eletroímãs do estator para inverter seus polos;
- Motores universais são usados, por exemplo, em batedeiras elétricas, aspiradores de pó, etc;
- Em tais motores, com o tempo de uso, haverá desgastes nas escovas de carvão e deverão ser substituídas periodicamente, dependendo do uso.

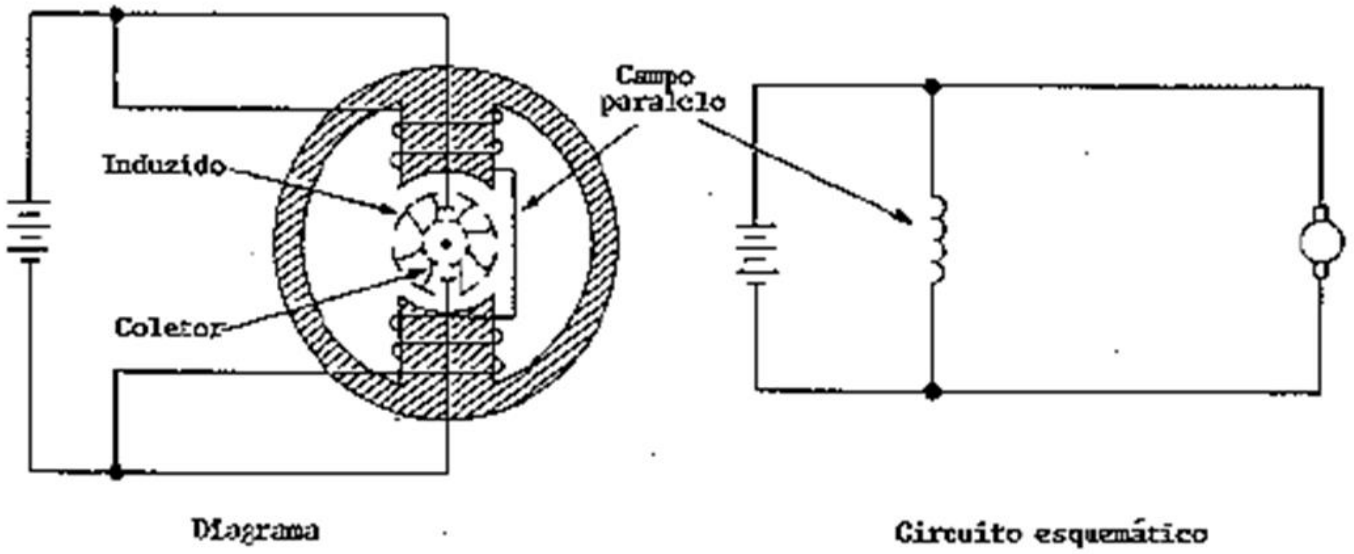
# Paralelo (Shunt)

- Máquina c.c. com excitação shunt (paralela), o enrolamento de campo está conectado em paralelo com o enrolamento do rotor.



(c) excitação ***shunt***

- O enrolamento do campo é ligado em paralelo, também chamado derivação, com o enrolamento do rotor.

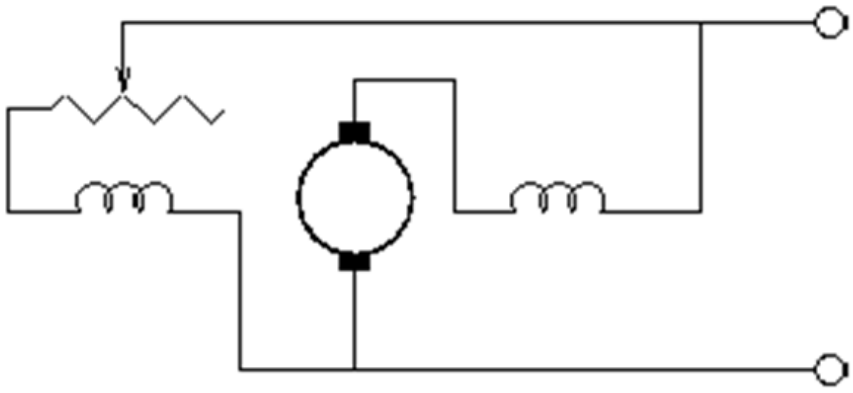



- A resistência do enrolamento do campo é alta
  - O enrolamento do campo é ligado diretamente em paralelo com a fonte de alimentação,
  - A corrente através do campo é constante.

- A corrente do campo não varia com a velocidade do motor como no motor em série
  - portanto, o torque do motor em paralelo variará somente com a corrente através do rotor.
- O TORQUE desenvolvido NA PARTIDA É MENOR QUE O DO MOTOR EM SÉRIE do mesmo tamanho
- A velocidade do motor em paralelo varia muito pouco com variações da carga
- Quando toda a carga é retirada, ele adquire uma velocidade um pouco maior do que a velocidade com carga.
- É adequado para ser usado quando:
  - a velocidade constante for desejada, e
  - quando um torque inicial alto não for necessário.

# Mista ou composta

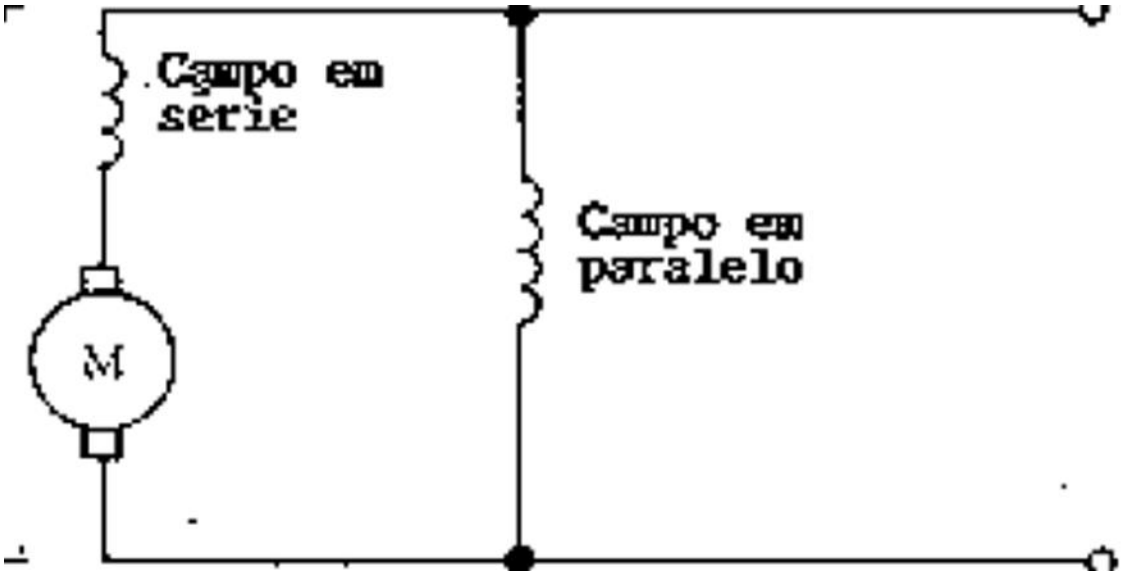
- Máquina c.c. com excitação mista (composta), neste caso, no estator há duas bobinas, uma em série e outra em paralelo com a bobina do rotor.

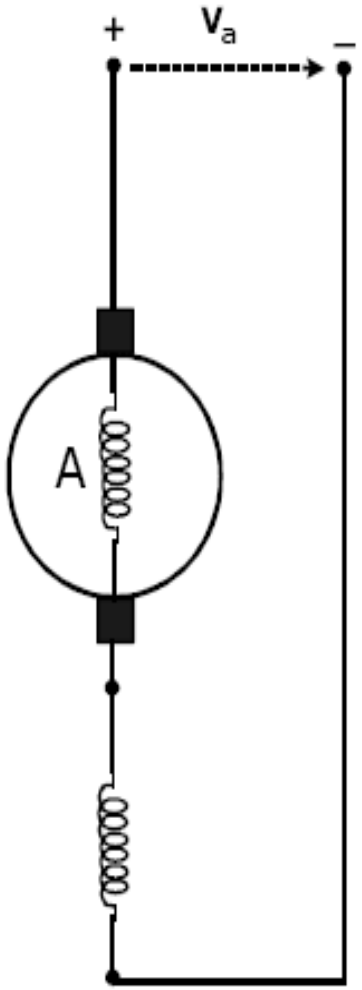


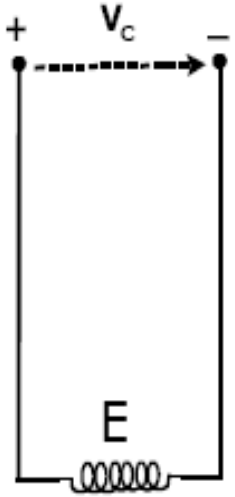
(d) excitação mista

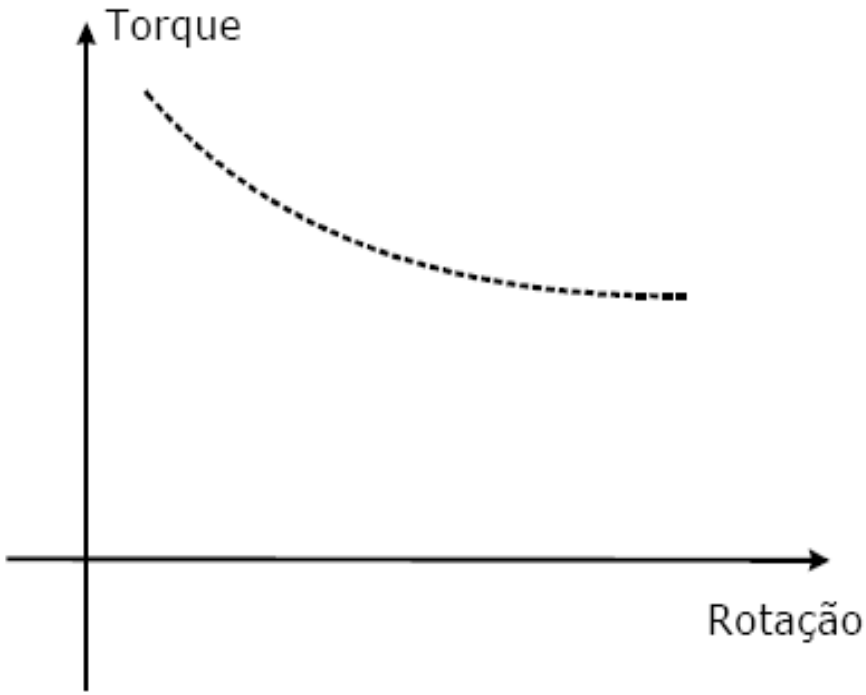
- O motor misto é uma combinação dos motores em série e em paralelo.

- Há dois enrolamentos no campo:
  - Um enrolamento em paralelo; e
  - Um enrolamento em série.






**Enrolamentos :**

A - armadura

E - campo principal

- O enrolamento em paralelo é composto de muitas espiras de fio fino, e também ligado com o enrolamento do rotor;
- O enrolamento em série consiste em poucas espiras de fio grosso e também está ligado em série com o enrolamento do rotor;
- Devido ao campo em série, o motor misto possui um torque inicial maior do que no motor em paralelo e menor do que no motor em série;
- A VARIAÇÃO DA VELOCIDADE com a carga é menor do que num motor em série e maior do que num motor em paralelo.

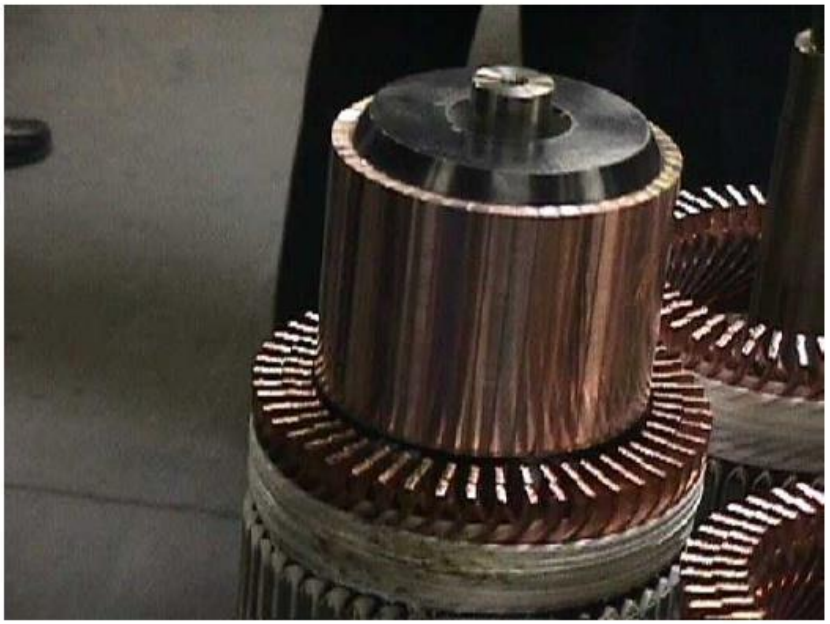
- O motor misto é usado sempre onde as características combinadas dos motores em série e em paralelo são desejadas
- Eles são também usados quando um torque inicial for necessário, havendo restrição ao uso de um motor em série
- No motor misto, um aumento na carga cria um aumento na corrente e uma redução no fluxo total neste tipo de motor
- Estas duas características tendem a se autocompensar, e o resultado é uma velocidade praticamente constante.
- como um aumento na carga diminui a força do campo, a característica da velocidade torna-se instável.

- Raramente este tipo de motor é usado nos sistemas de aeronaves

- Estes motores são usados em acionamento de máquinas, que estão sujeitas a mudanças repentinas na carga.

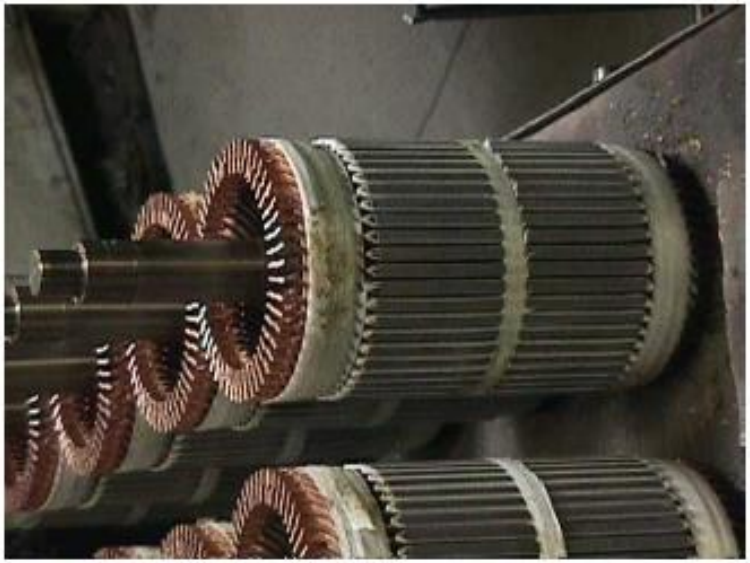
# 5. Aspectos Construtivos

Barras do comutador

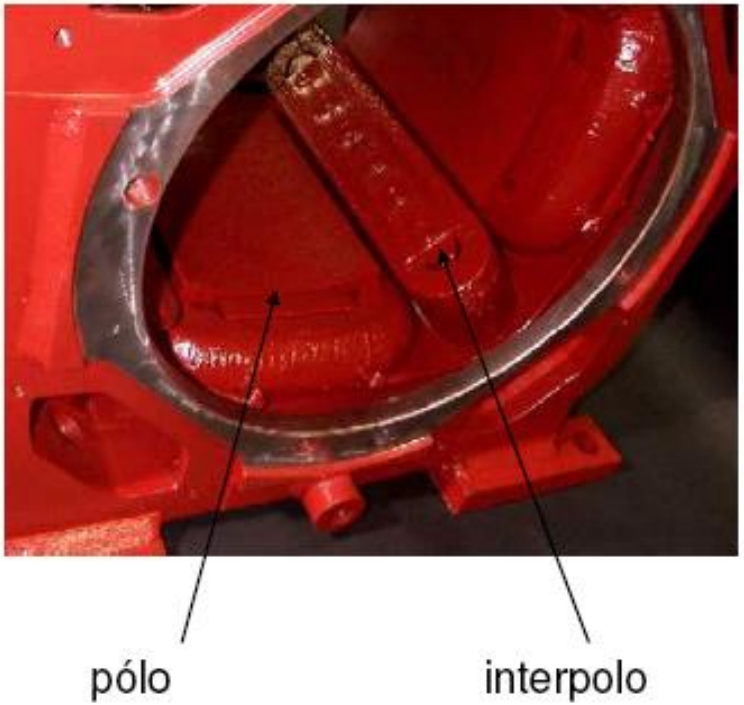


Escovas

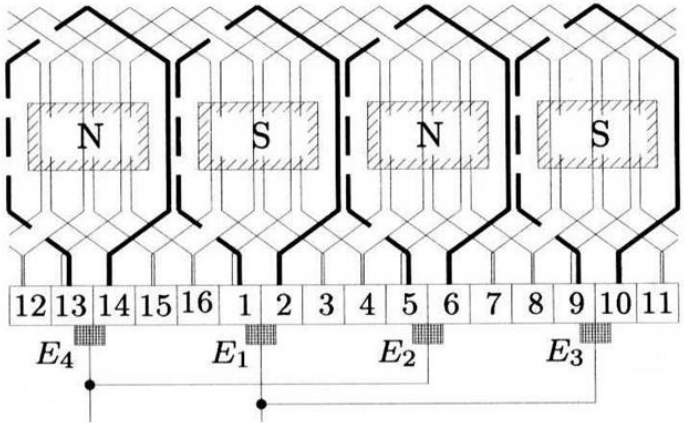
Armadura (Rotor)



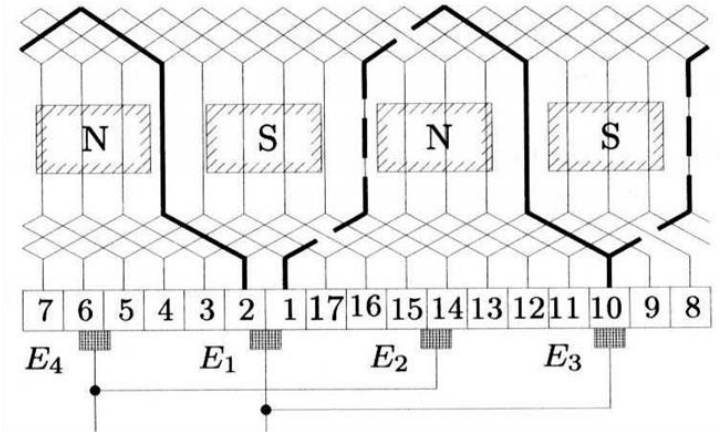
Campo (Estator)



- As bobinas da armadura ligadas em série formam grupos paralelos entre as escovas. A forma com que essas bobinas são ligadas às barras definem dois tipos básicos de enrolamentos: o imbricado e o ondulado.




Enrolamento imbricado de 4 polos

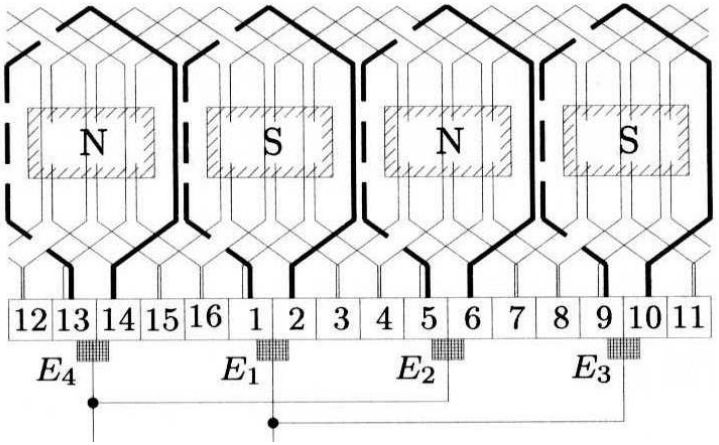



Enrolamento ondulado de 4 polos

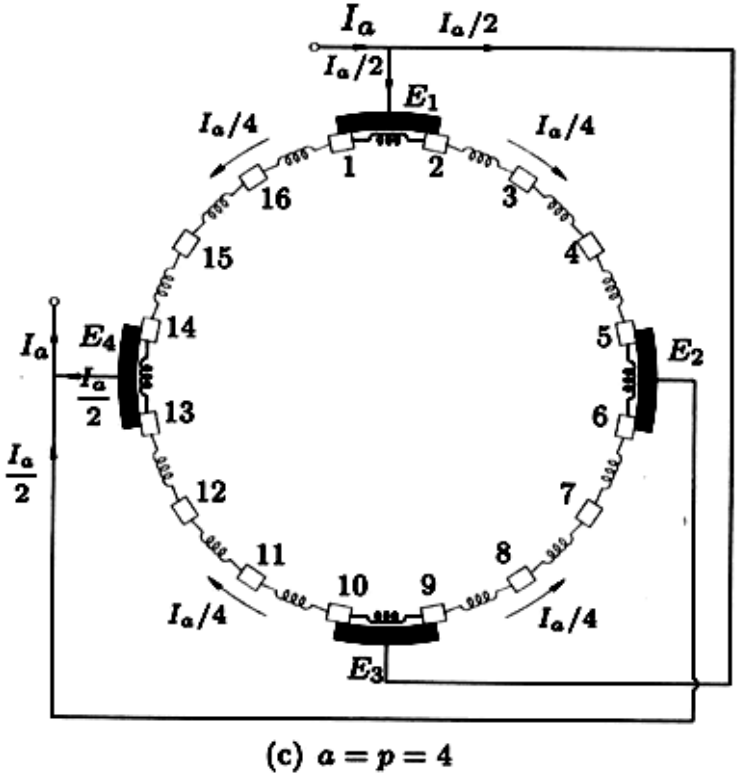
O enrolamento imbricado tem os terminais de sua bobina ligados a barras vizinhas, enquanto no enrolamento ondulado os terminais de suas bobinas estão ligados a barras deslocadas entre si de 360º elétricos.

Ambos os enrolamentos acima apresentam multiplicidade um (m = 1).

- O valor de “a” representa por quantos caminhos diferente (paralelos) a corrente de armadura vai circular.
- Para o enrolamento imbricado abaixo, com 4 polos a corrente terá 4 caminhos.

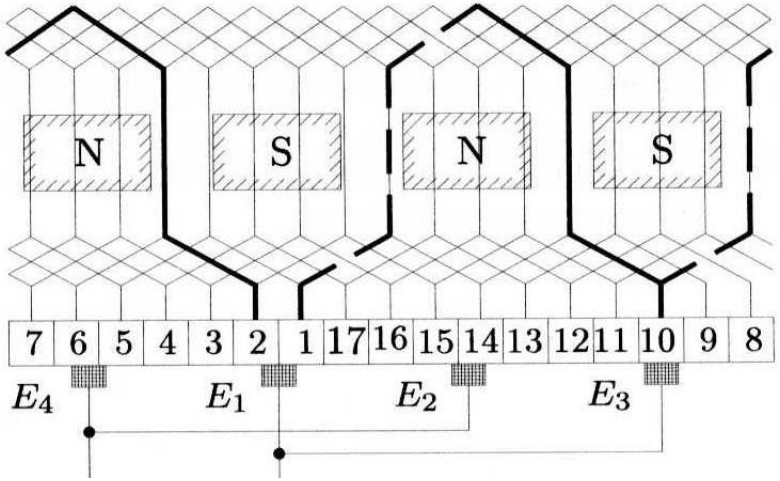



$$a = m \cdot p$$

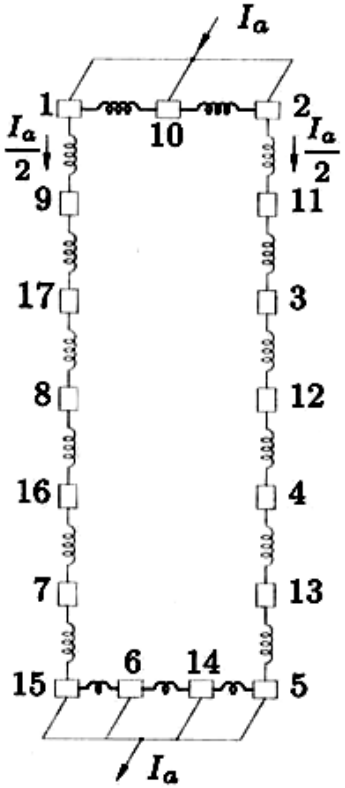



(c) $a = p = 4$

- Para o enrolamento ondulado abaixo a corrente de armadura terá dois caminhos para circular.

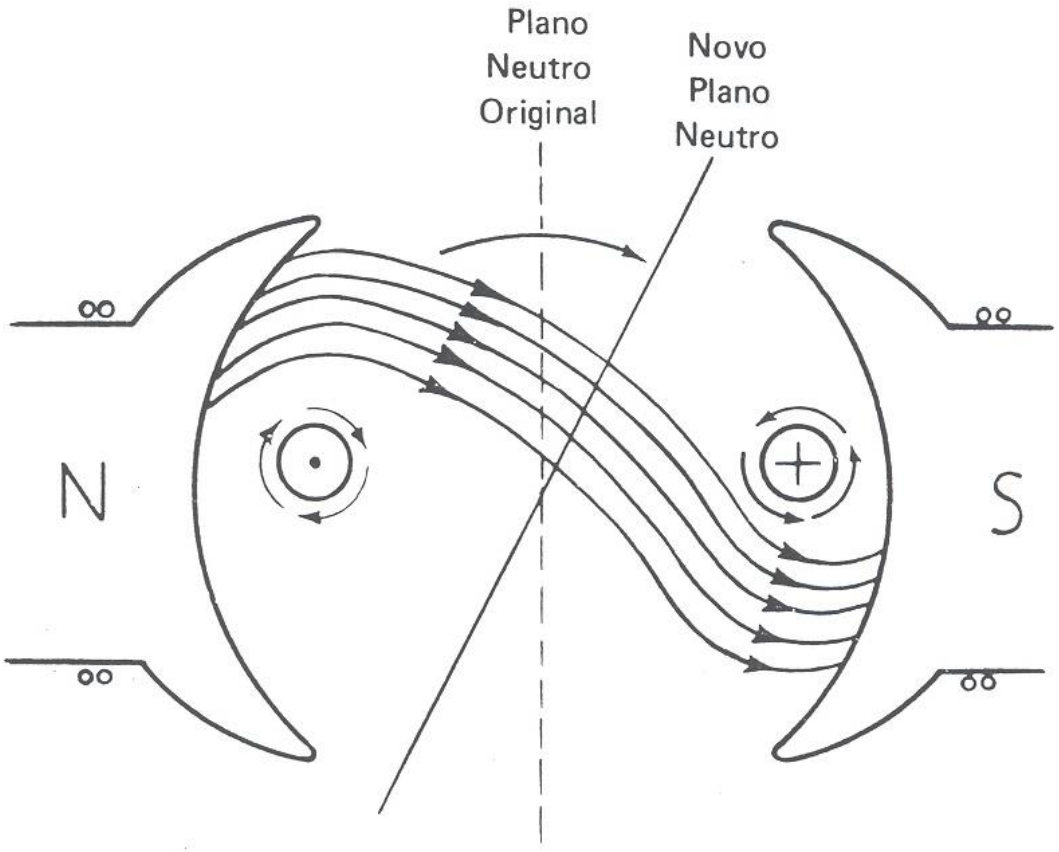



$$a = 2 \cdot m$$




(d) $a = 2$paralelos

# 5. Reação da armadura no gerador CC

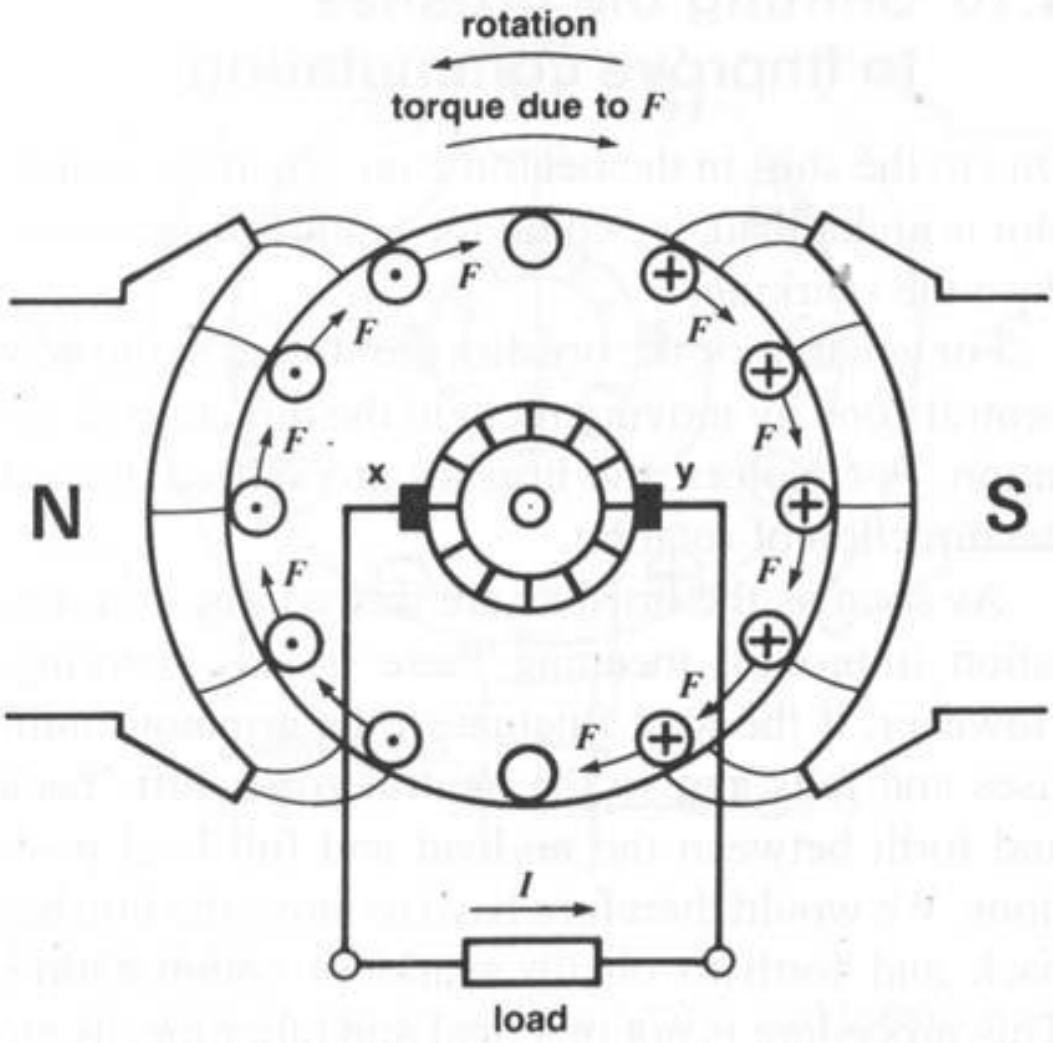


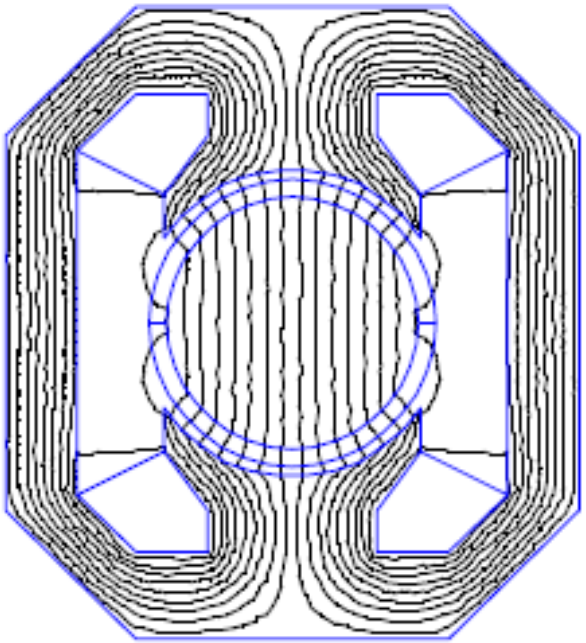
- Quando a armadura gira no sentido horário, a corrente no lado esquerdo da bobina sai da página, e no lado direito entra na página. Também está representado o campo magnético produzido em torno de cada lado da bobina. Agora existem dois campos: o campo principal e o campo em redor de cada lado da bobina. A figura, mostra como o campo da armadura distorce o campo principal e como o plano neutro é deslocado no sentido da rotação.

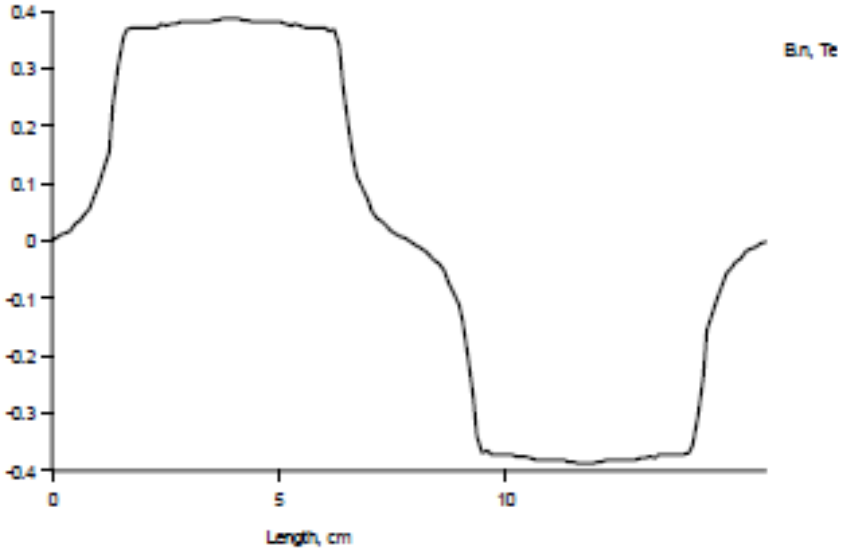
- Entretanto, as escovas devem pôr a bobina em curto quando ela estiver no plano neutro. Se as escovas forem mantidas no plano neutro original, elas colocarão em curto bobinas com tensão induzida diferente de zero. Consequentemente, haverá centelhamento entre as escovas e o comutador.
- Para evitar isto, 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 consequência 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 interpolos ou enrolamentos compensadores..

# 6. Ação Geradora

- Corrente fornecida pelo gerador é produzida pelo movimento dos condutores no campo magnético;
- Ao mesmo tempo aparece nos condutores uma força (Lorentz) que produz um torque se opondo ao movimento de rotação do gerador;
- Manter o gerador funcionando faz necessário um torque no eixo da máquina que se oponha ao torque eletromagnético.


rotation
torque due to F
F
F
F
F
F
F
F
F
F
F
x
y
N
S
I
load



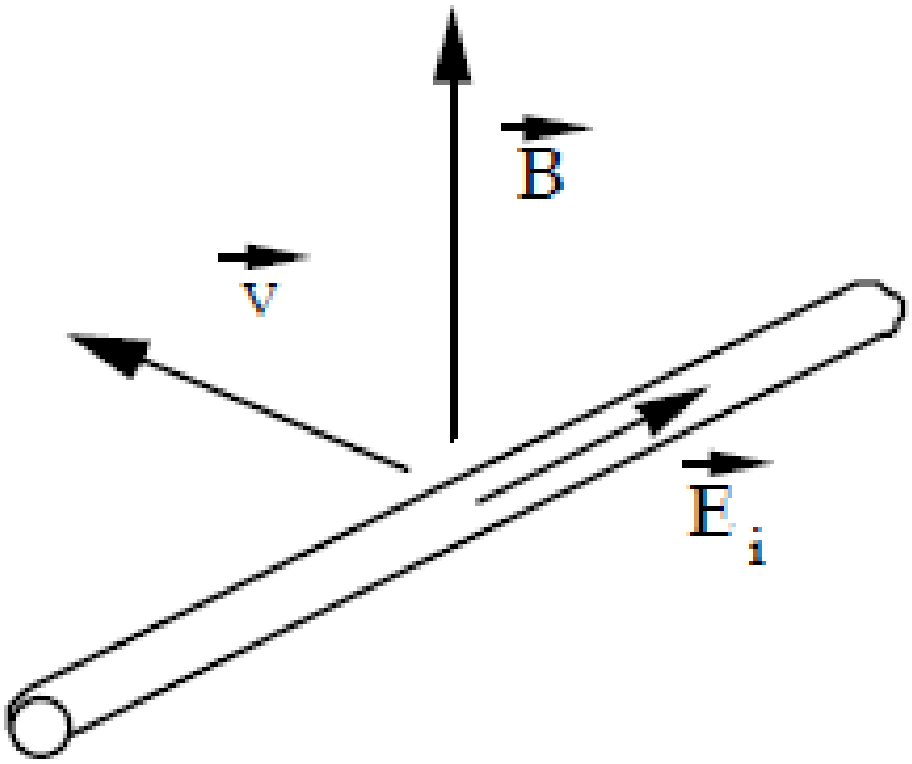

0.4
0.3
0.2
0.1
0
-0.1
-0.2
-0.3
-0.4
0
5
10
Length, cm
Bn, Te

# Força Eletromotriz Induzida

- Recordando
  - **Campo elétrico induzido num condutor**
    - Considere-se um condutor de comprimento L que se desloca à velocidade *v* num campo de indução magnético *B* suposto uniforme e constante no tempo.
    - O campo elétrico induzido em cada ponto desse condutor será:

$$E_i = v \,.\, B$$

e será máximo quando v e B forem perpendiculares


B
v
E
i

- A força eletromotriz induzida no condutor será neste caso:

$$E = \mathrm{BLv}$$

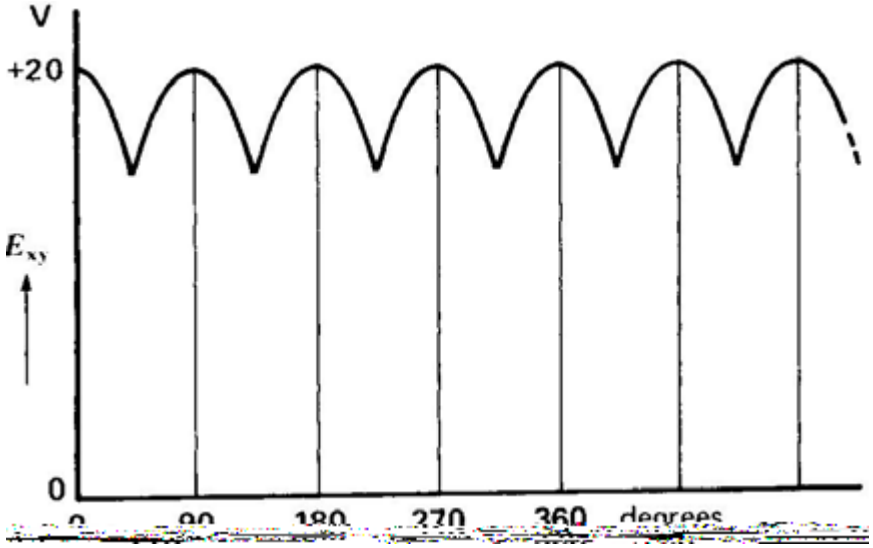
e será positiva ou negativa consoante os sentidos de *v*, *B* e o sentido considerado positivo para a força eletromotriz. Esta força eletromotriz depende da geometria (de L e do ângulo entre v e B), do valor do campo de indução magnética B e da velocidade v.

- A relação entre velocidade angular elétrica ($w_e$) e mecânica ($w_m$) é função do número de polos

$$w_e = \frac{p}{2} . w_m$$

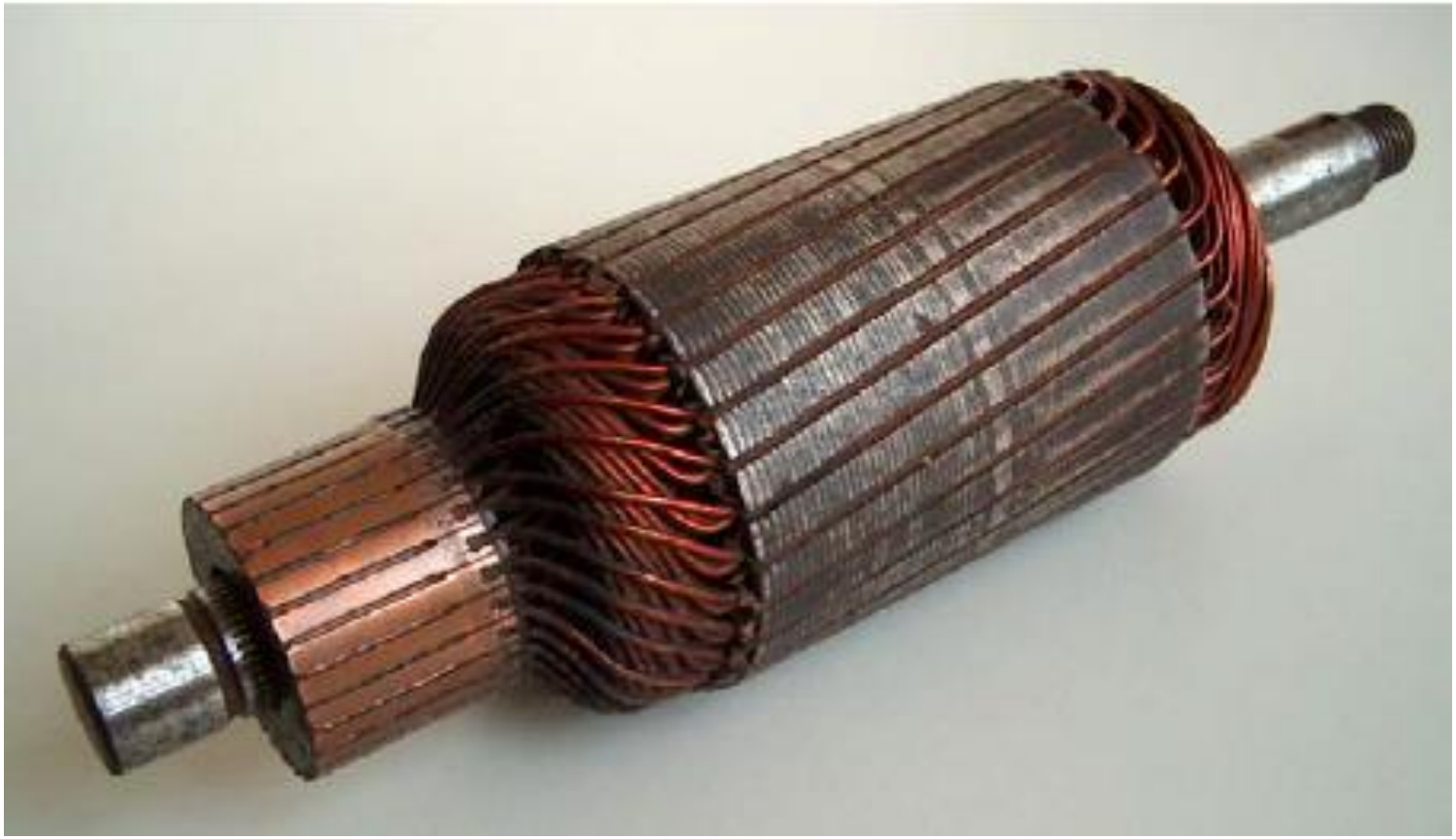
# Força Eletromotriz Induzida no Gerador CC

- A força eletromotriz induzida nos condutores se manifestará como uma diferença de potencial entre as escovas cujo valor médio será proporcional à velocidade de rotação e ao fluxo polar.



- Agrupando os elementos relacionados as características construtivas da máquina CC, chegamos na seguinte equação:

$$E_a = \frac{p \cdot Z_a}{2 \cdot \pi \cdot a} \cdot \phi_{pico} \cdot w_m = \frac{p \cdot Z_a}{60 \cdot a} \cdot \phi_{pico} \cdot n$$



Exercicio 1:

Calcule a tensão induzida no enrolamento da armadura de uma máquina de cc, 4 pólos, enrolamento imbricado, tendo 728 condutores ativos e girando a 1800 rpm. O fluxo por pólo é 30mWb. Multiplicidade igual a 1.

Exercício 2

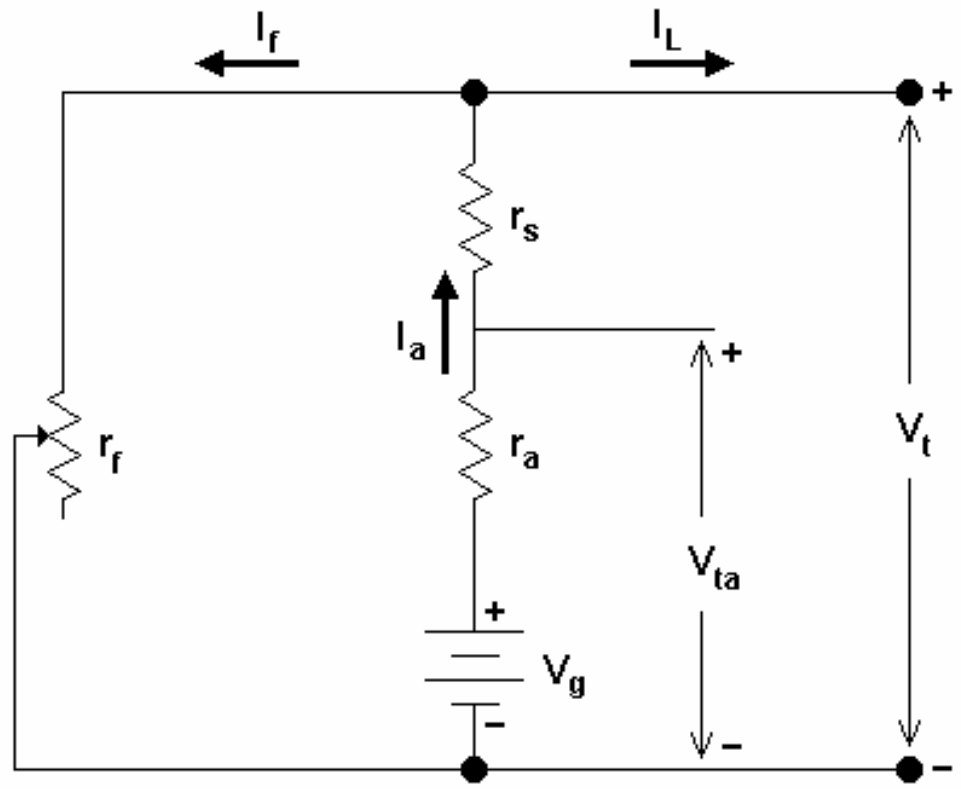
Uma máquina de cc, 4 pólos, enrolamento ondulado, tendo 728 condutores ativos e girando a 1800 rpm. O fluxo por pólo é 30mWb. Qual a tensão induzida na armadura da máquina apresentada acima, se o seu enrolamento fosse ondulado. Multiplicidade igual a 1.

# CIRCUITO EQUIVALENTE DO GERADOR CC

$$V_{ta} = V_g - r_a . I_a$$

$$V_t = V_g - (r_a + r_s) . I_a$$

$$I_a = I_L + I_f$$



- 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 gerador, V;
- $I_a$ → Corrente da armadura;
- e $r_a$, $r_s$, $r_f$, $I_s$, $I_f$ e $I_L$ representam as grandezas definidas no circuito equivalente do gerador.

## Exercício 1

- Um gerador-shunt, 250 V, 150 kW, possui uma resistência de campo de 50 ohms e uma resistência de armadura de 0,05 ohm. Calcule:

a) A corrente de plena carga;
b) A corrente de campo;
c) A corrente de armadura;
d) A tensão gerada na situação de plena carga.

## Exercício 2

- Supondo a excitação de campo constante, calcule a tensão a vazio de um gerador com excitação independente, cuja tensão da armadura é 150 V numa velocidade de 1.800 rpm, quando:
  a) A velocidade é aumentada para 2.000 rpm;
  b) A velocidade é reduzida para 1.600 rpm.

## Exercício 3

- Um gerador-série CC, 10 kW, 250 V, tem uma queda de tensão nas escovas de 2 V, uma resistência de armadura de 0,1 ohms e de campo-série de 0,05 ohm. Quando entrega corrente nominal na velocidade nominal, calcule:
  a) Corrente da armadura;
  b) Tensão gerada na armadura.

# Balanço energético de geradores CC

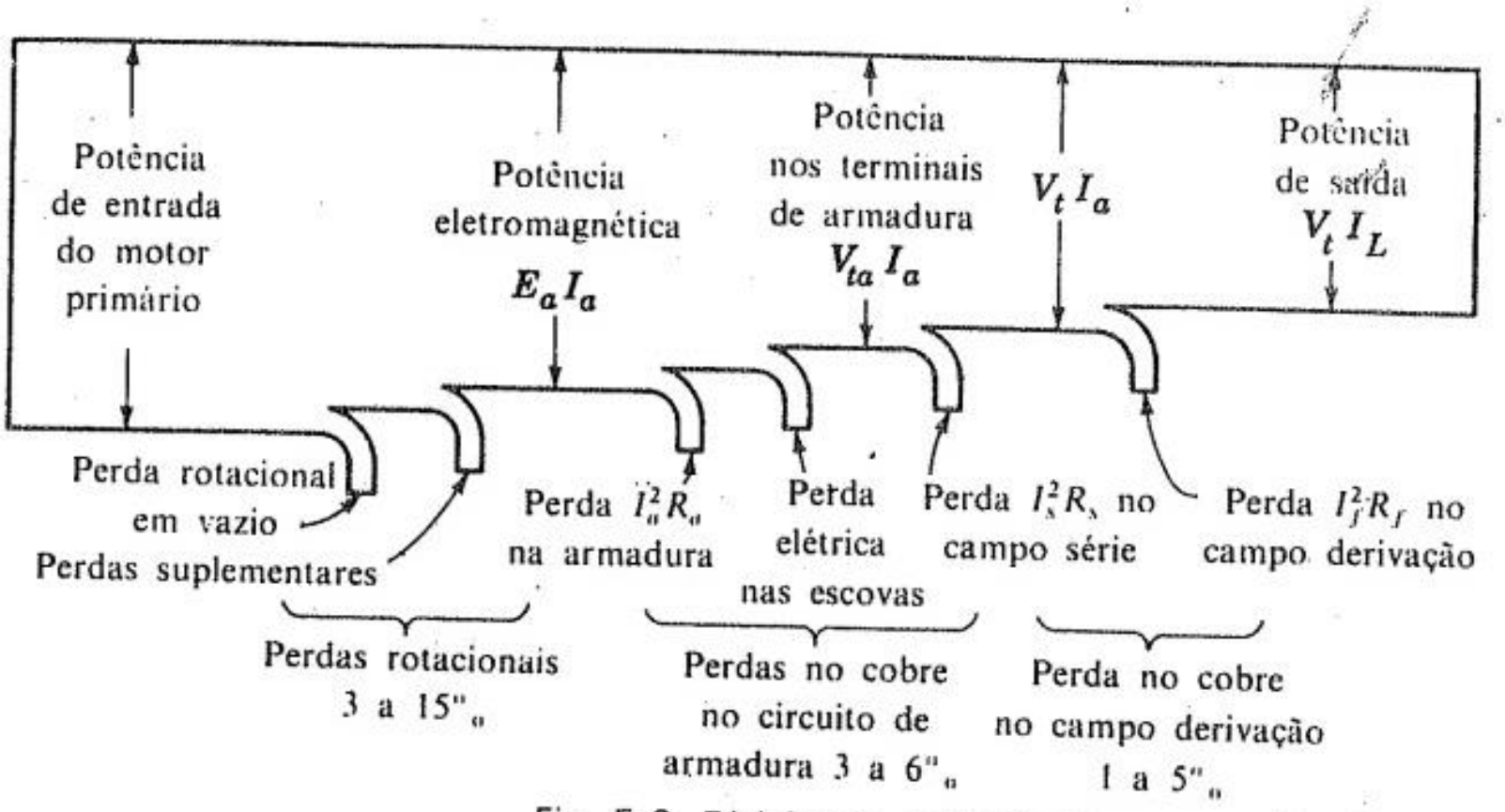
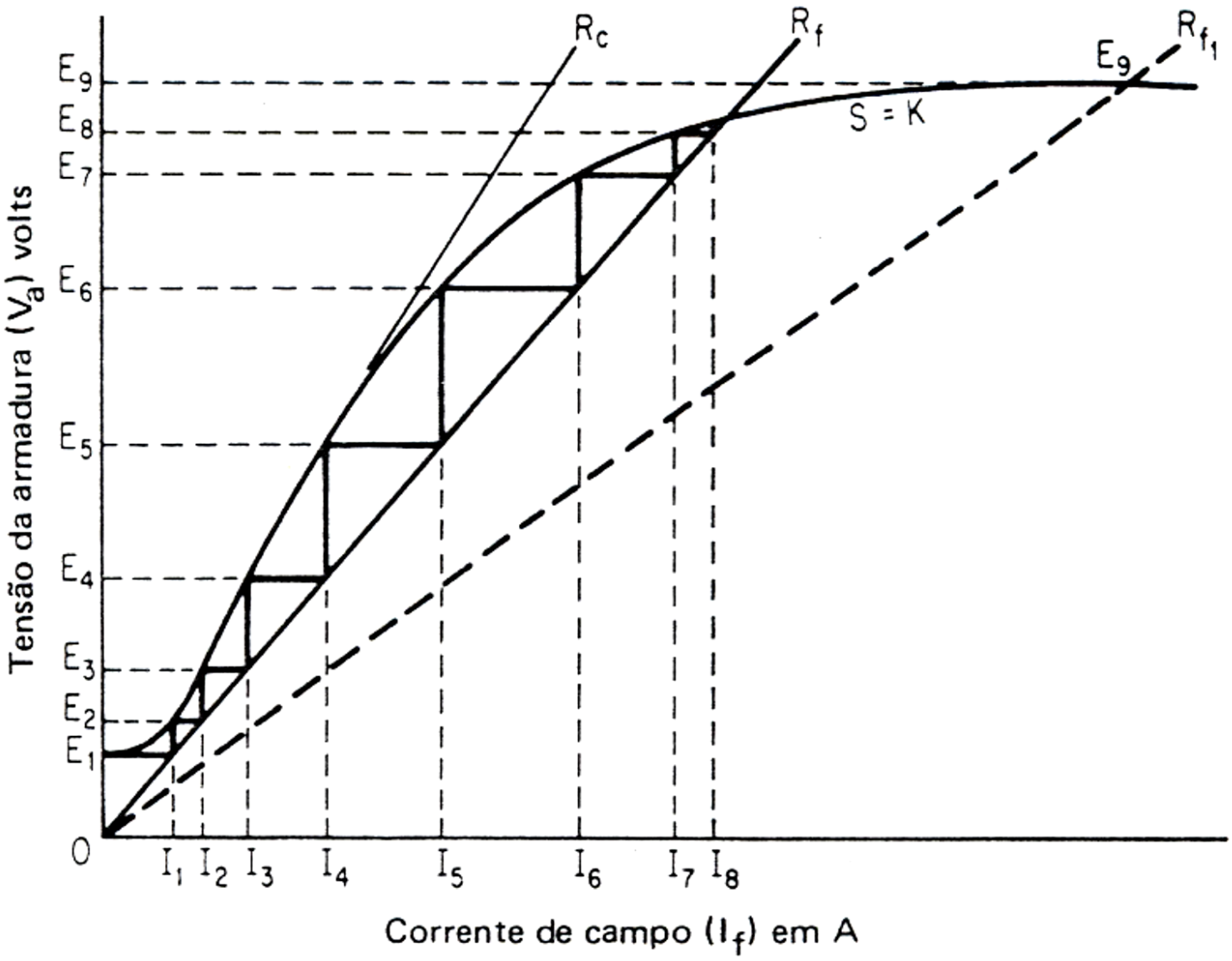



Fig. 5-8. Divisão de potência em um gerador de c.c.

# 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 figura.

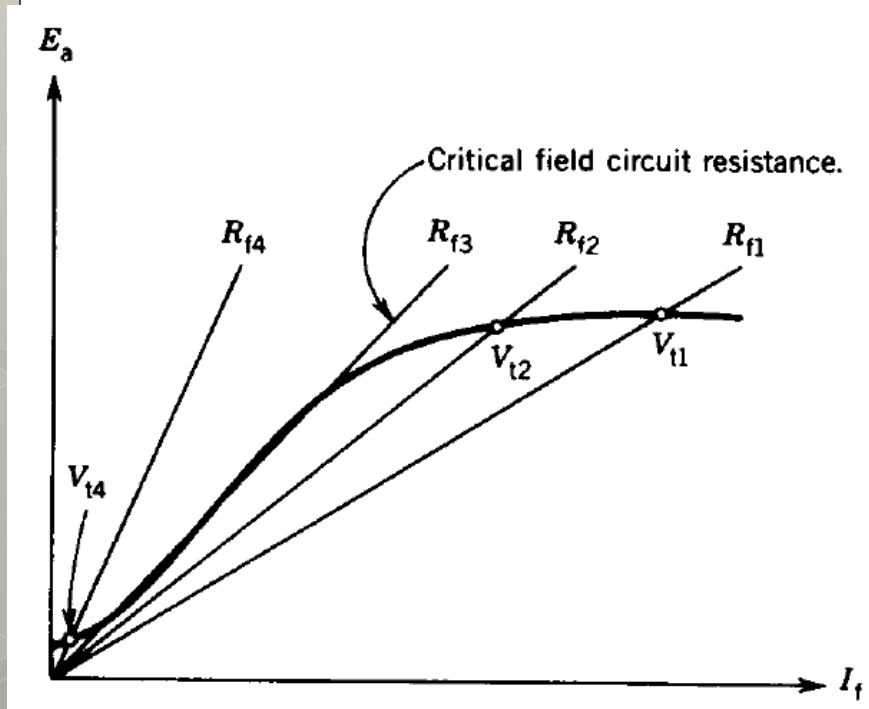

Rc
Rf
Rf1
E9
S = K
E8
E7
E6
E5
E4
E3
E2
E1
O
I1 I2 I3 I4 I5 I6 I7 I8
Tensão da armadura (Va) volts
Corrente de campo (If) em A

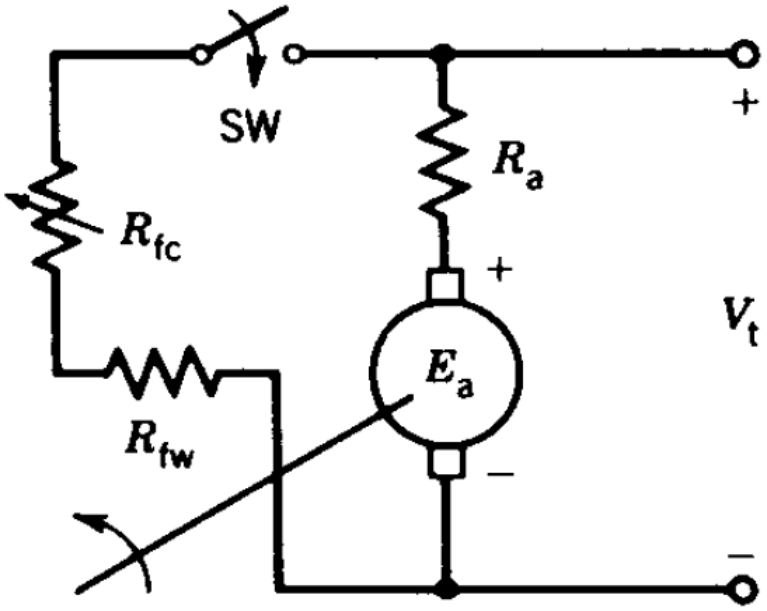
- Na figura, como o circuito de campo é ligado diretamente aos terminais da armadura, a ordenada (valores do eixo y) da reta da resistência de campo, $R_f$, é a tensão nos terminais da armadura, $V_{ta}$;
- A maneira pela qual o gerador shunt auto-excitado excita seu próprio campo e adquire uma tensão CC nos terminais da sua armadura é descrita com referência à figura 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, $E_1$. 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, resulta um aumento na *fmm* (devido a $N_f \cdot I_1$), que auxilia o magnetismo residual, aumentando a *fem* induzida para $E_2$;

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. $N_f \cdot I_2$ 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 figura. Aqui o processo para. 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.

Comportamento da tensão induzida no gerador com a variação da resistência em série com o enrolamento de campo.



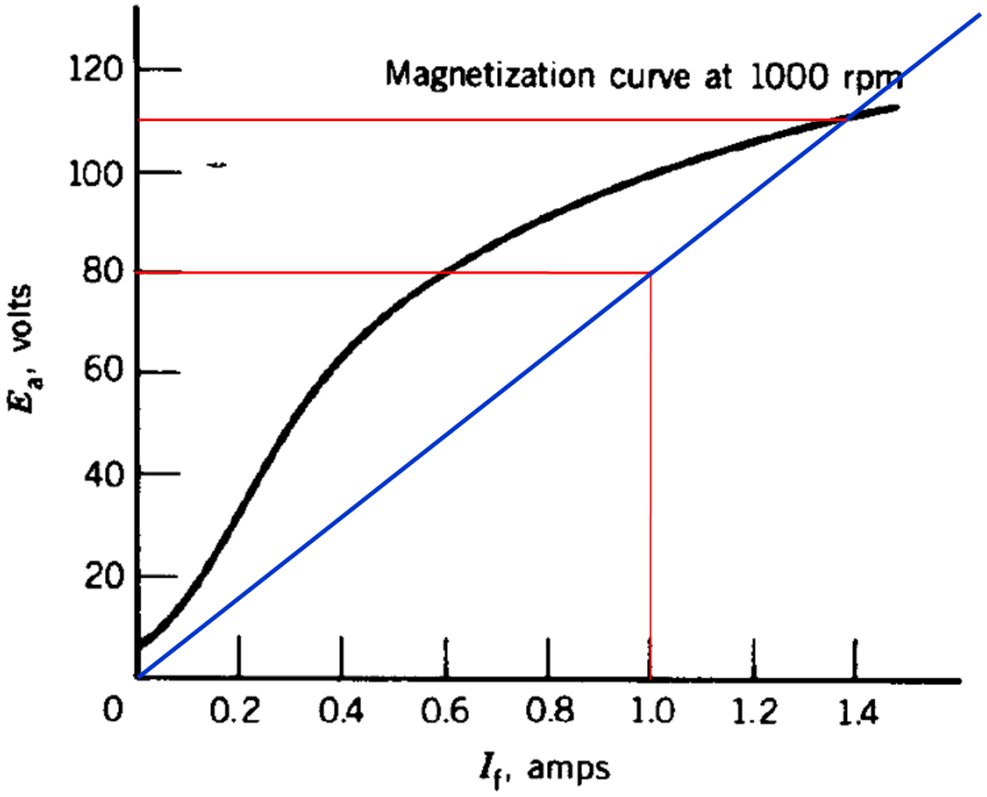
# Exercício 4

Um gerador CC com resistência de armadura Ra = 0,1 [Ω], a resistência do enrolamento de campo Rfw = 80 [Ω], e Nf = 1200 espiras por pólo. Quando operando em 1000 [rpm] (as características de magnetização para 1000 [rpm] é apresentada abaixo), determine:

Para o gerador operando sem carga, determine:

a) Determine o máximo valor da tensão gerada; (Vt = 110 [V])
b) b) Determine o valor da resistência de campo requerida para gerar a tensão terminal de 100 [V]. (Rfc = 20 [Ω])
c) c) Determine o valor da resistência de campo critica. (Rfc = 90 [Ω])

# Exercício 4


Magnetization curve at 1000 rpm
120
100
80
60
40
20
0
0.2
0.4
0.6
0.8
1.0
1.2
1.4
$E_a$, volts
$I_f$, amps

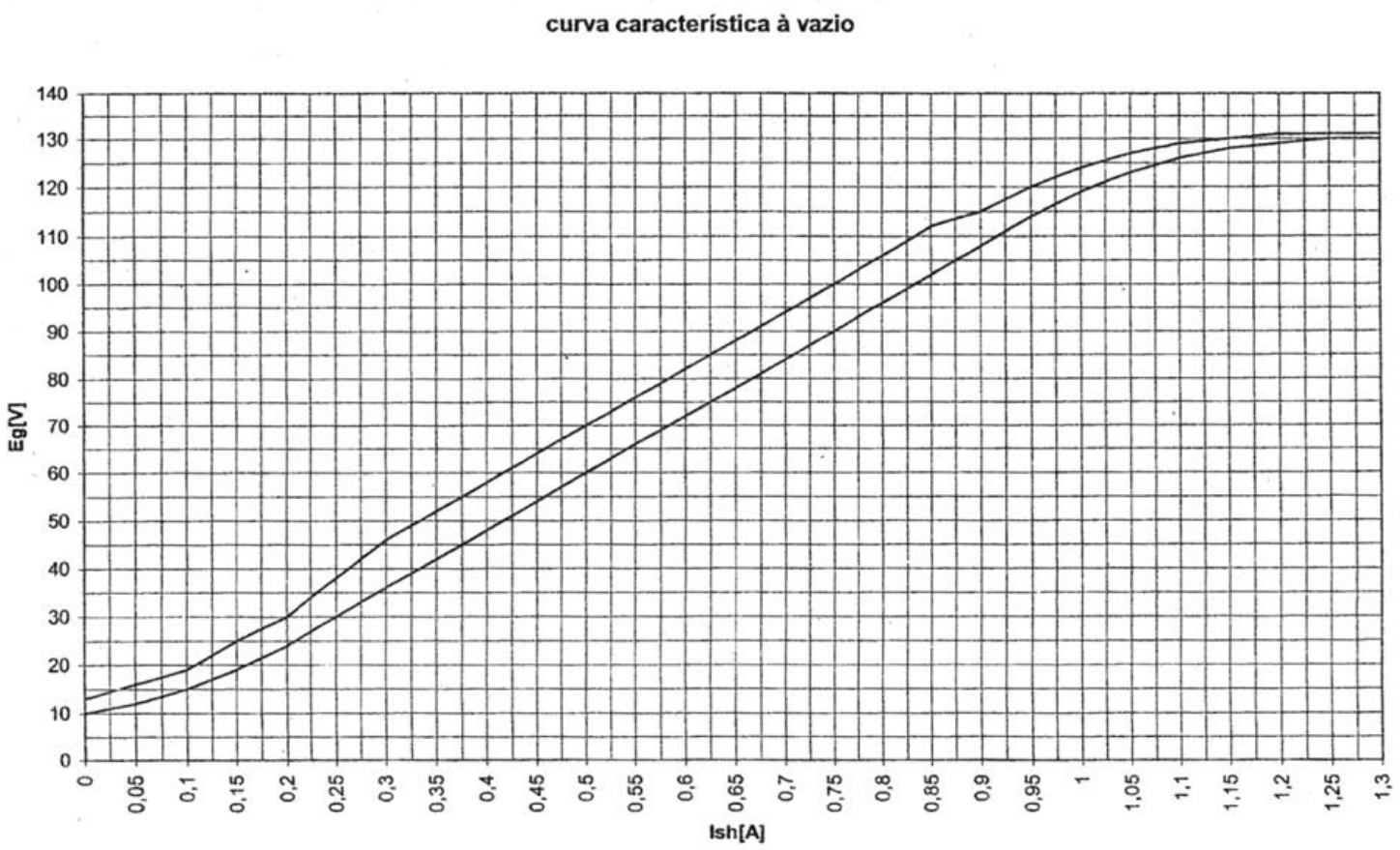
## Exercício 5

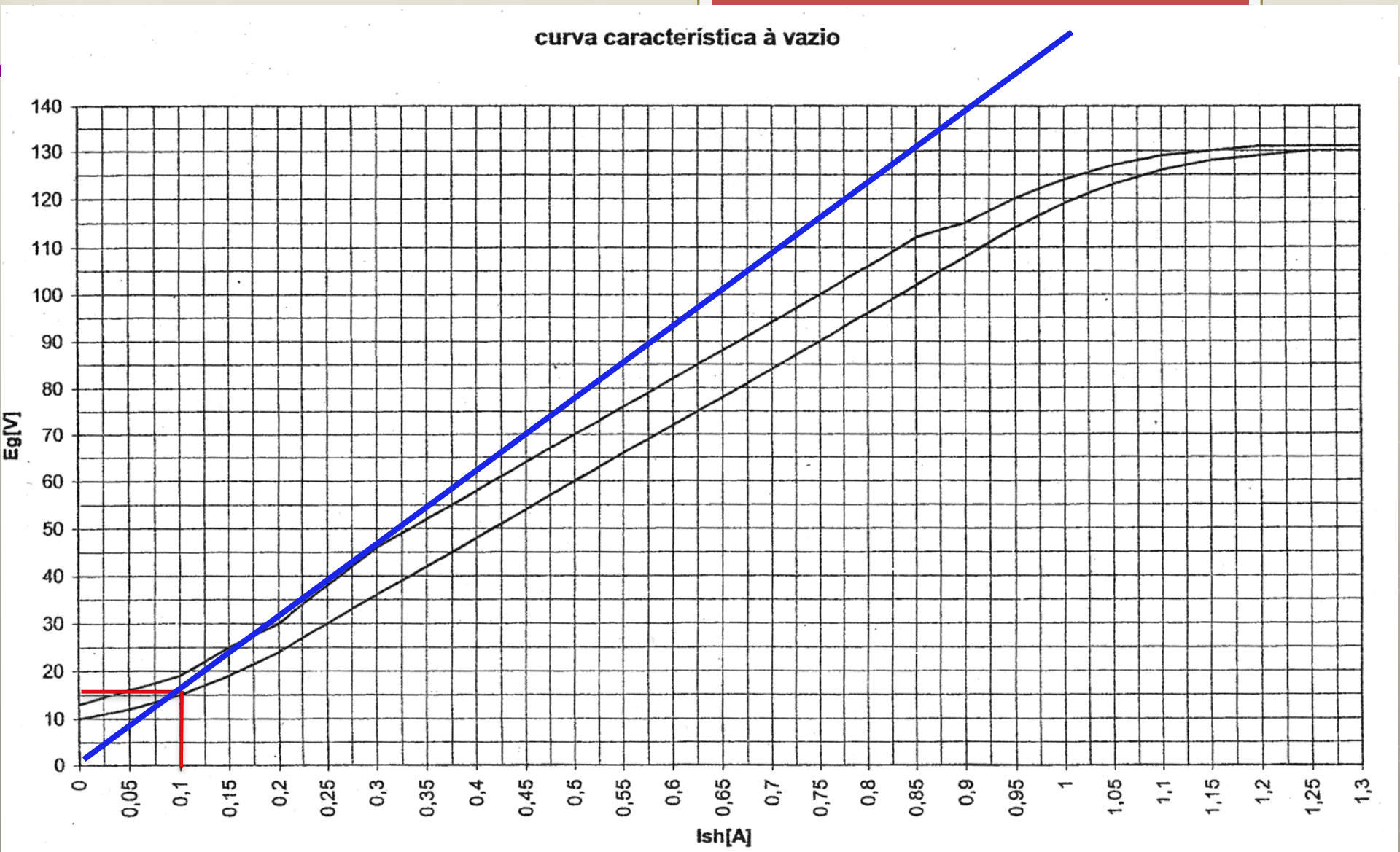
Um gerador shunt CC tem tensão a vazio igual a 130 [V]. A corrente máxima admissível no circuito de campo é de 1,3 [A]. Os dados da máquina são:

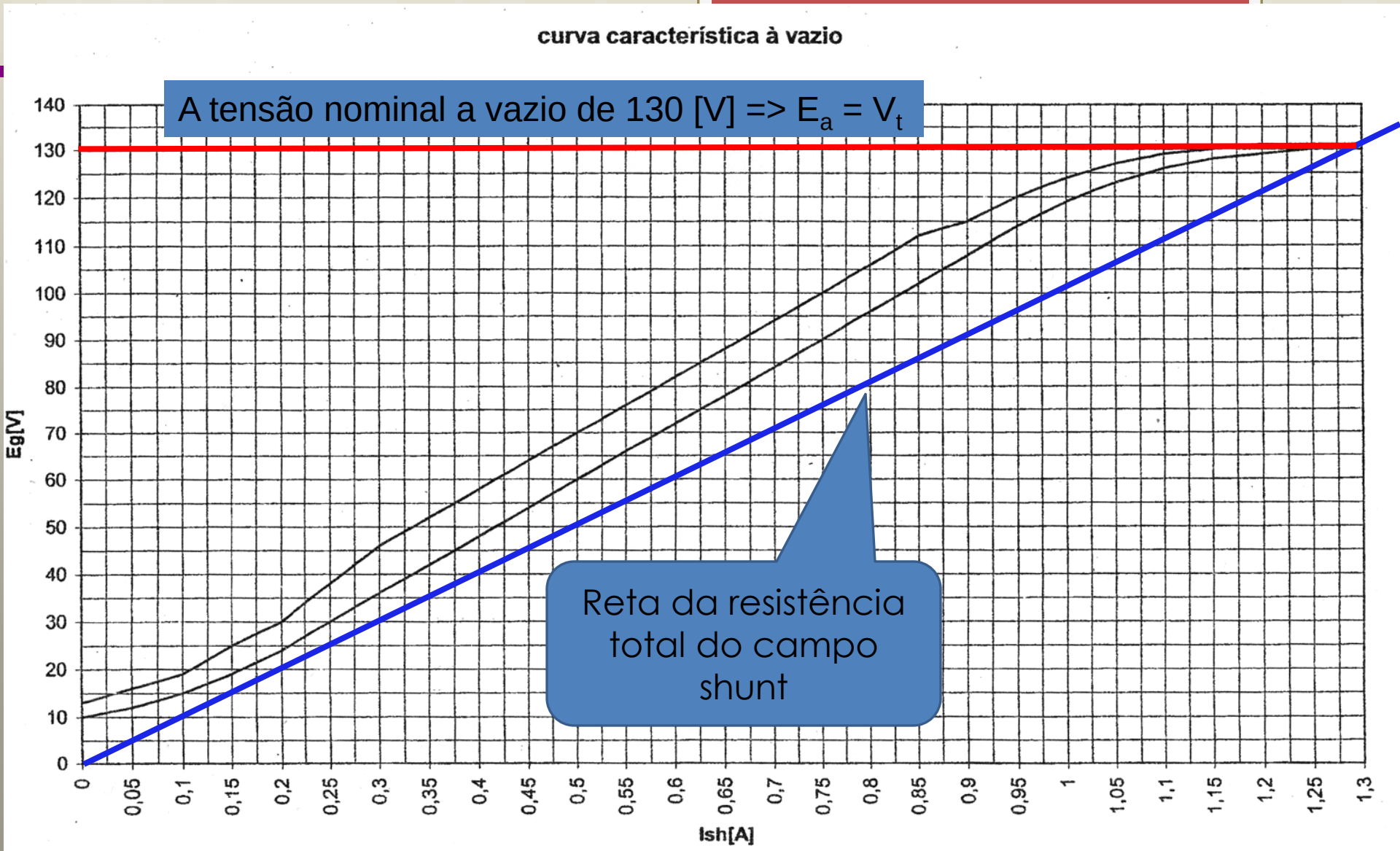
Ra = 0,6 [Ω]; RSH = 10 [Ω]. A carga admite uma tensão mínima de 100 [V]. Pergunta-se:

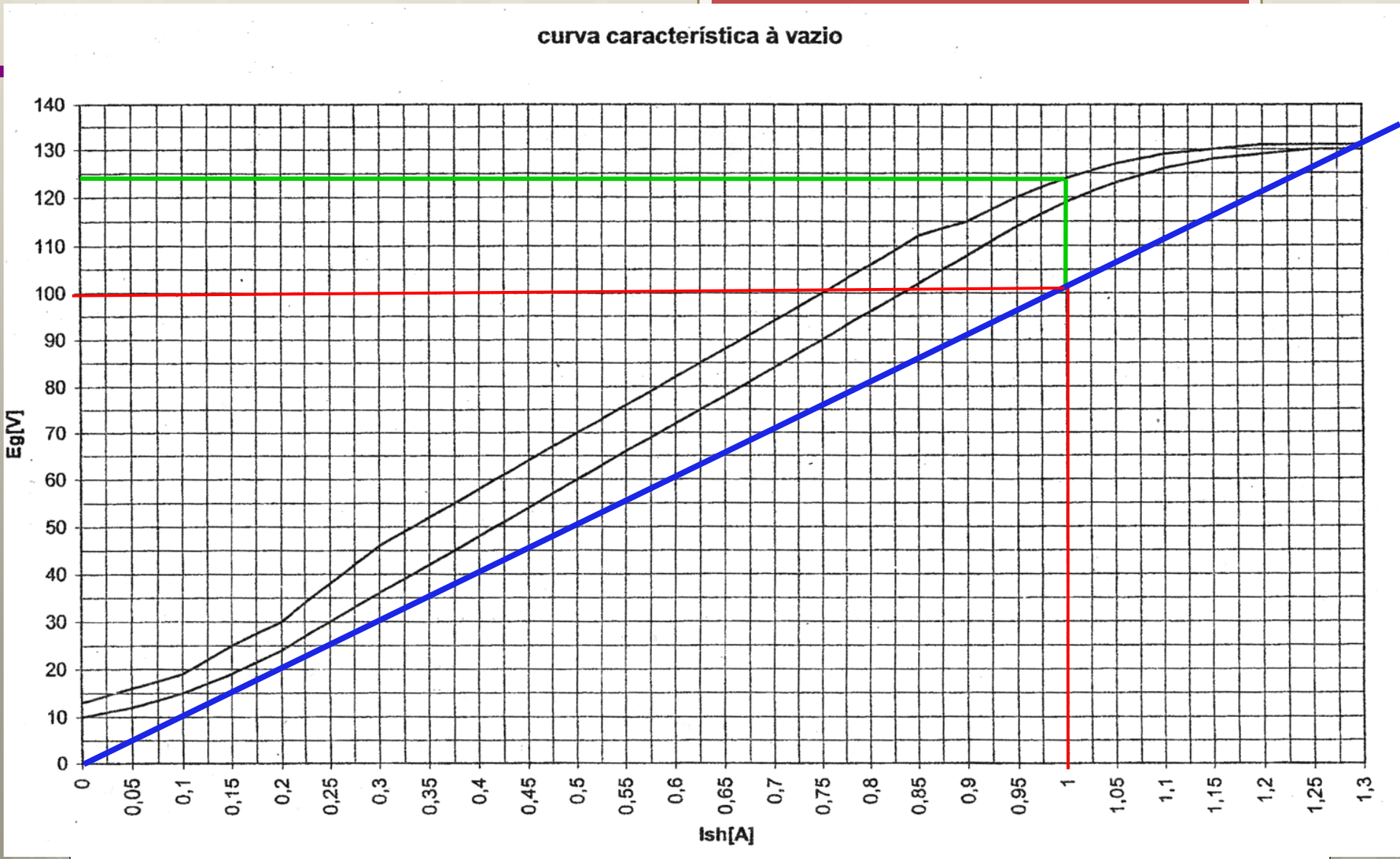
a) Na auto-excitação, ao fecharmos o circuito de campo a tensão atingiu 15 [V]. Qual o valor do reostato de campo?
b) Para a tensão terminal de 100 [V], qual a potência entregue a carga ?
c) Para a tensão terminal de 100 [V], mas com o reostato ajustado de forma a fornecer a corrente de campo máxima, qual será a potência entregue a carga?
d) Um gerador que entrou em operação com carga, teve sua tensão crescente até se estabilizar em 100 [V]. Nessa condição qual é a potência entregue na carga?
e) Qual o valor da corrente de carga para a condição operativa de curto-circuito da máquina?
f) Qual o valor do reostato de campo para a condição à vazio?

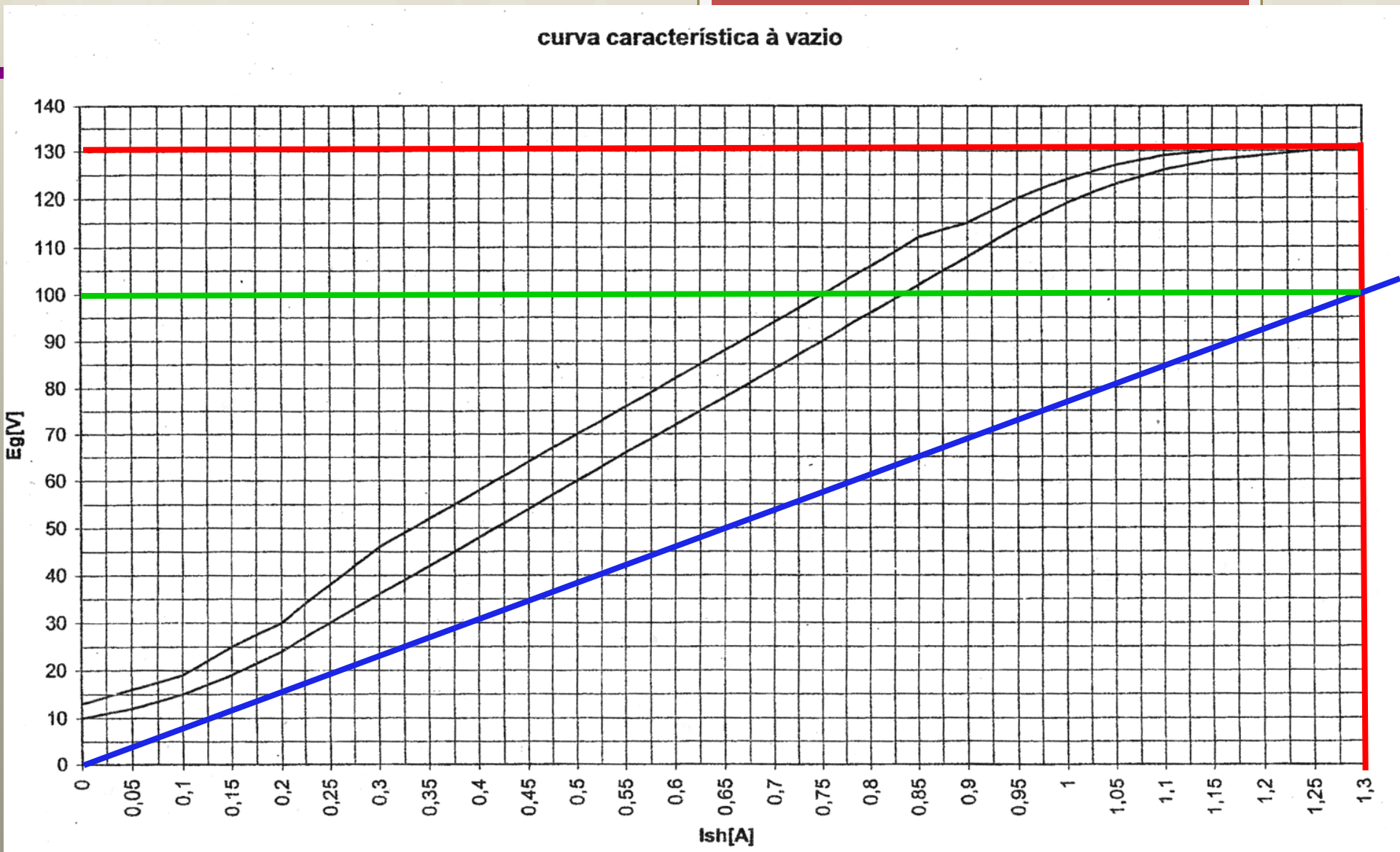
# Exercício 5

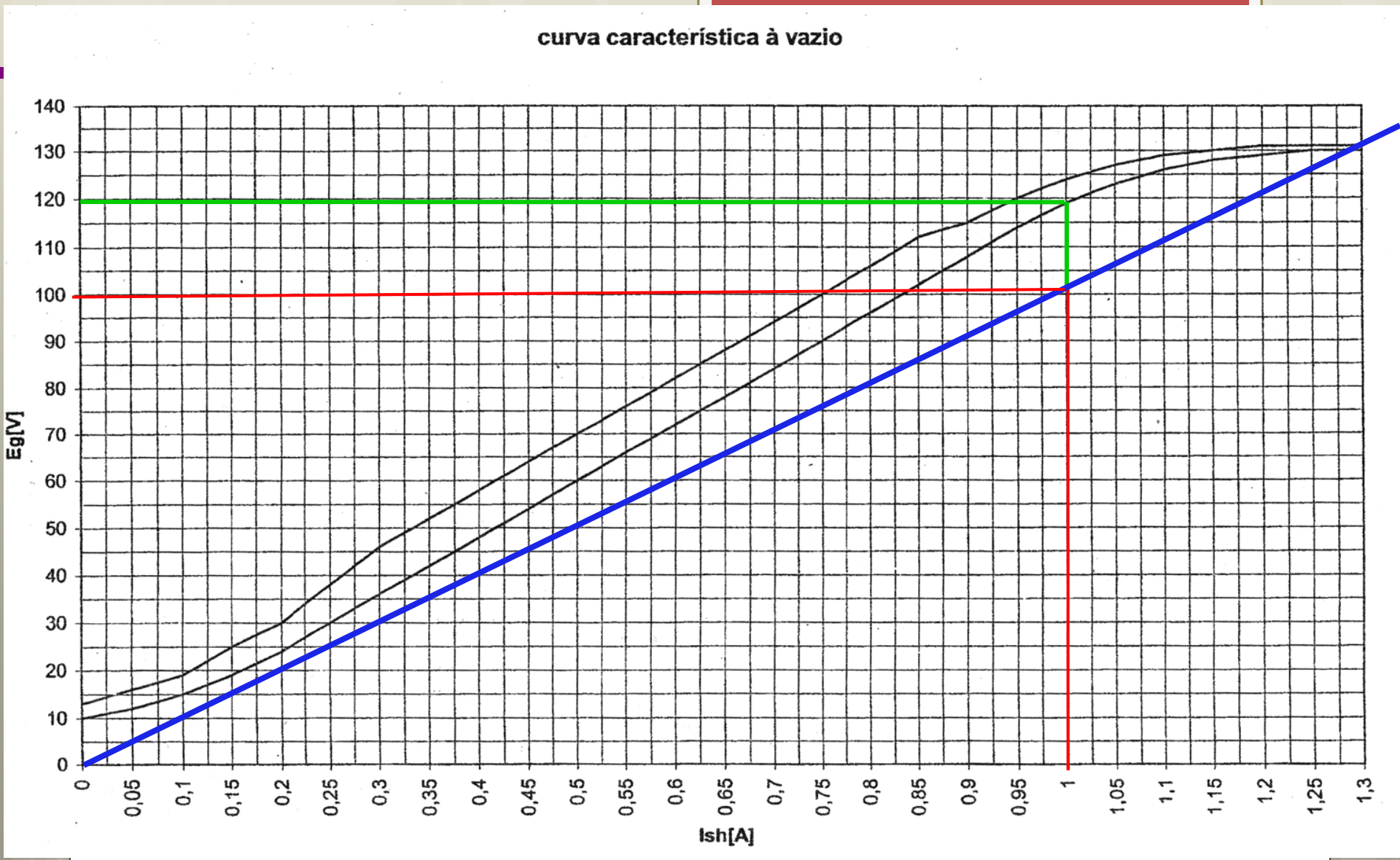

curva característica à vazio
Eg[V]
140
130
120
110
100
90
80
70
60
50
40
30
20
10
0
0
0,05
0,1
0,15
0,2
0,25
0,3
0,35
0,4
0,45
0,5
0,55
0,6
0,65
0,7
0,75
0,8
0,85
0,9
0,95
1
1,05
1,1
1,15
1,2
1,25
1,3
Ish[A]

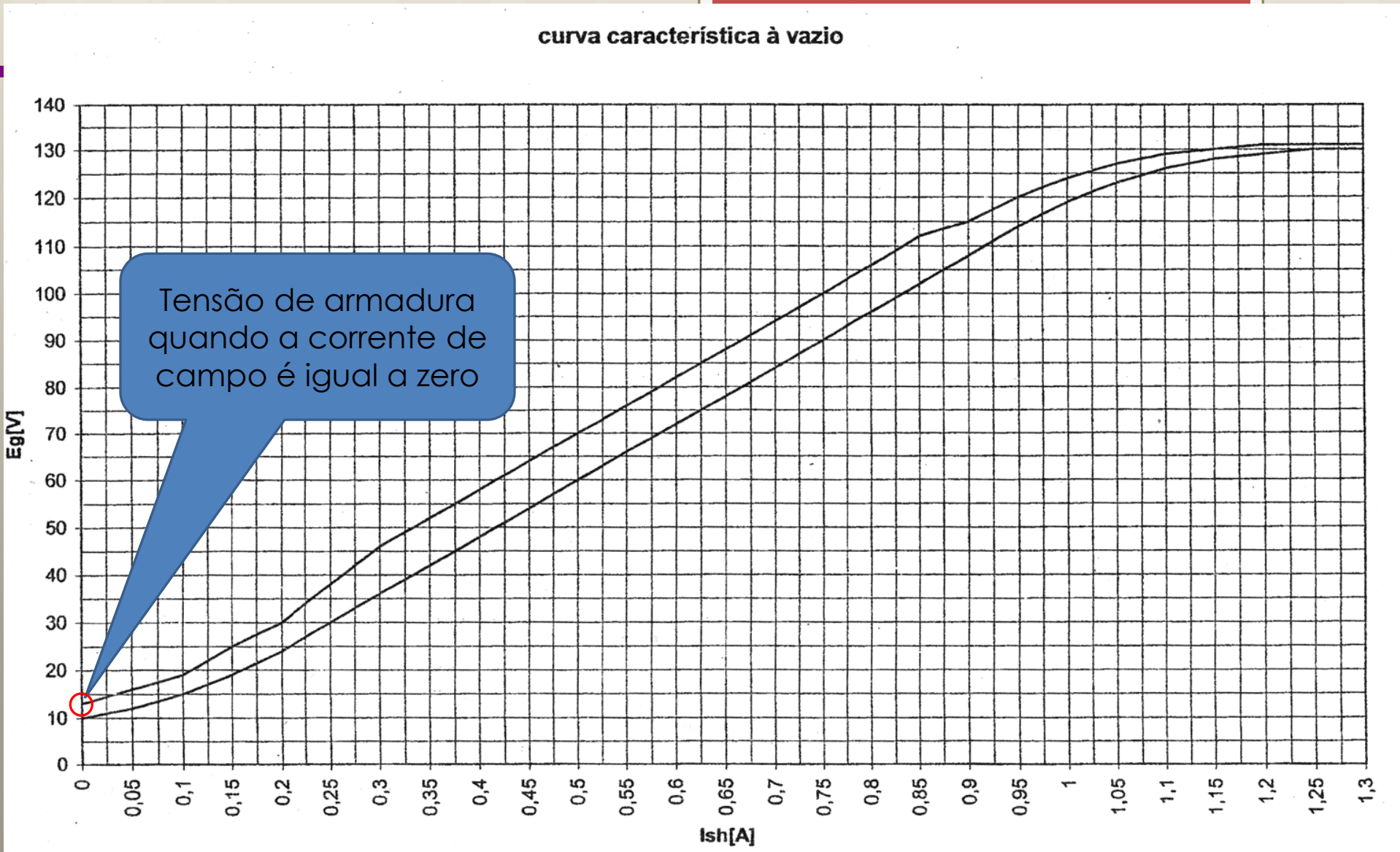

curva característica à vazio
Eg[V]
Ish[A]
140
130
120
110
100
90
80
70
60
50
40
30
20
10
0
0
0,05
0,1
0,15
0,2
0,25
0,3
0,35
0,4
0,45
0,5
0,55
0,6
0,65
0,7
0,75
0,8
0,85
0,9
0,95
1
1,05
1,1
1,15
1,2
1,25
1,3

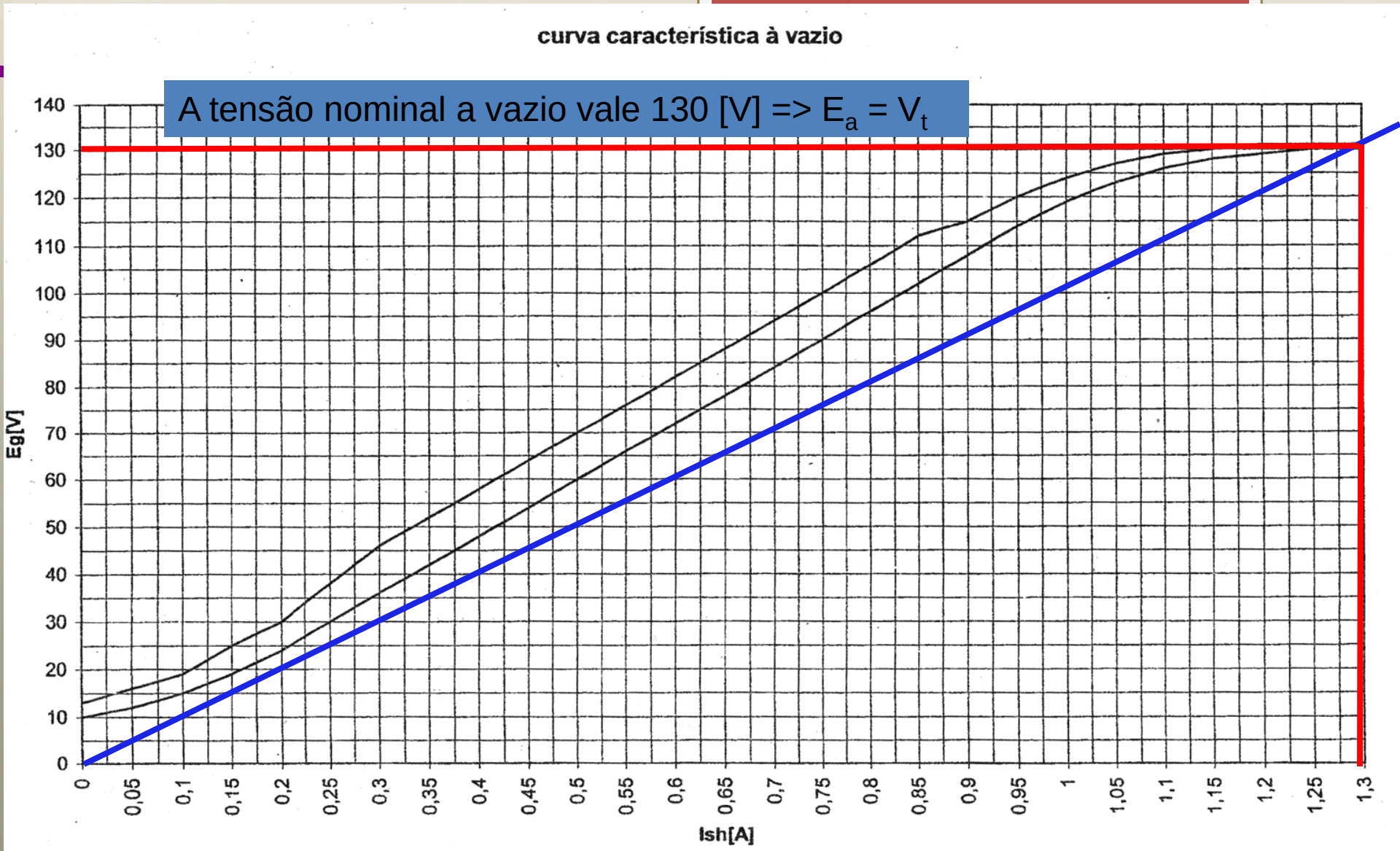

curva característica à vazio
A tensão nominal a vazio de 130 [V] => $E_a = V_t$
Reta da resistência total do campo shunt
Eg[V]
Ish[A]
0
10
20
30
40
50
60
70
80
90
100
110
120
130
140
0
0,05
0,1
0,15
0,2
0,25
0,3
0,35
0,4
0,45
0,5
0,55
0,6
0,65
0,7
0,75
0,8
0,85
0,9
0,95
1
1,05
1,1
1,15
1,2
1,25
1,3


curva característica à vazio
Eg[V]
Ish[A]
140
130
120
110
100
90
80
70
60
50
40
30
20
10
0
0
0,05
0,1
0,15
0,2
0,25
0,3
0,35
0,4
0,45
0,5
0,55
0,6
0,65
0,7
0,75
0,8
0,85
0,9
0,95
1
1,05
1,1
1,15
1,2
1,25
1,3


curva característica à vazio
Eg[V]
140
130
120
110
100
90
80
70
60
50
40
30
20
10
0
0
0,05
0,1
0,15
0,2
0,25
0,3
0,35
0,4
0,45
0,5
0,55
0,6
0,65
0,7
0,75
0,8
0,85
0,9
0,95
1
1,05
1,1
1,15
1,2
1,25
1,3
Ish[A]


curva característica à vazio
Eg[V]
Ish[A]
0
10
20
30
40
50
60
70
80
90
100
110
120
130
140
0
0,05
0,1
0,15
0,2
0,25
0,3
0,35
0,4
0,45
0,5
0,55
0,6
0,65
0,7
0,75
0,8
0,85
0,9
0,95
1
1,05
1,1
1,15
1,2
1,25
1,3

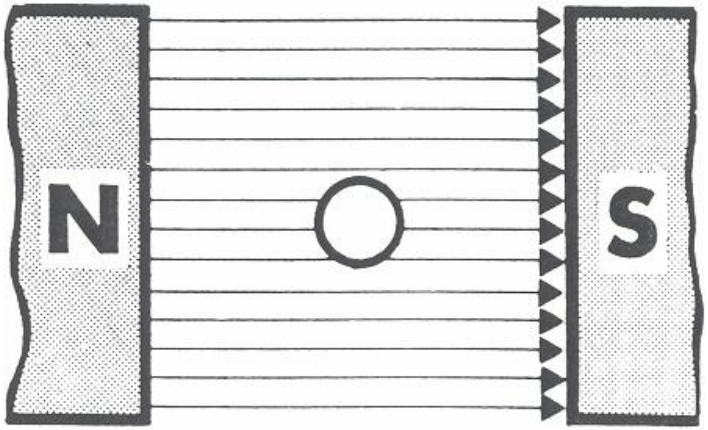

curva característica à vazio
Tensão de armadura quando a corrente de campo é igual a zero
Eg[V]
Ish[A]
140
130
120
110
100
90
80
70
60
50
40
30
20
10
0
0
0,05
0,1
0,15
0,2
0,25
0,3
0,35
0,4
0,45
0,5
0,55
0,6
0,65
0,7
0,75
0,8
0,85
0,9
0,95
1
1,05
1,1
1,15
1,2
1,25
1,3

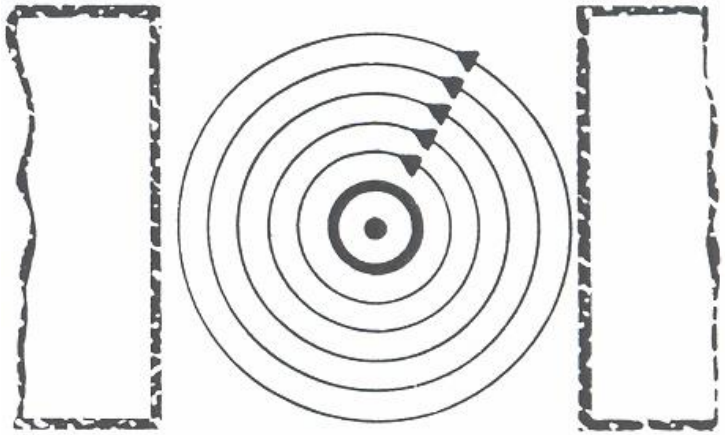

curva característica à vazio
A tensão nominal a vazio vale 130 [V] => $E_a = V_t$
Eg[V]
140
130
120
110
100
90
80
70
60
50
40
30
20
10
0
0
0,05
0,1
0,15
0,2
0,25
0,3
0,35
0,4
0,45
0,5
0,55
0,6
0,65
0,7
0,75
0,8
0,85
0,9
0,95
1
1,05
1,1
1,15
1,2
1,25
1,3
Ish[A]

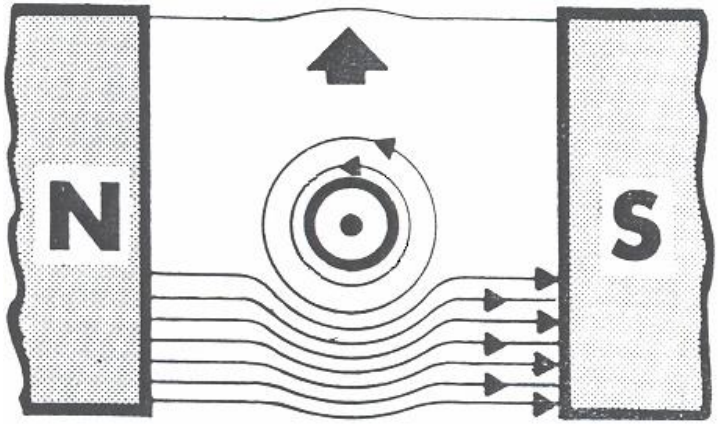
# 7. Ação Motora

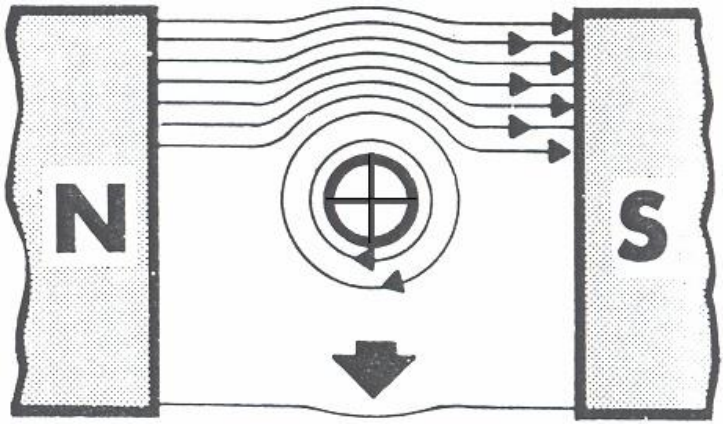
- A função de um motor é produzir torque eletromagnético que desenvolve uma rotação mecânica no rotor;
- A presença dos condutores no campo polar uniforme, provoca uma distorção do campo. Esta interação tende a mover o condutor no sentido da região de maior densidade de fluxo para a de menor densidade;
- A força depende do campo polar e da corrente de armadura.

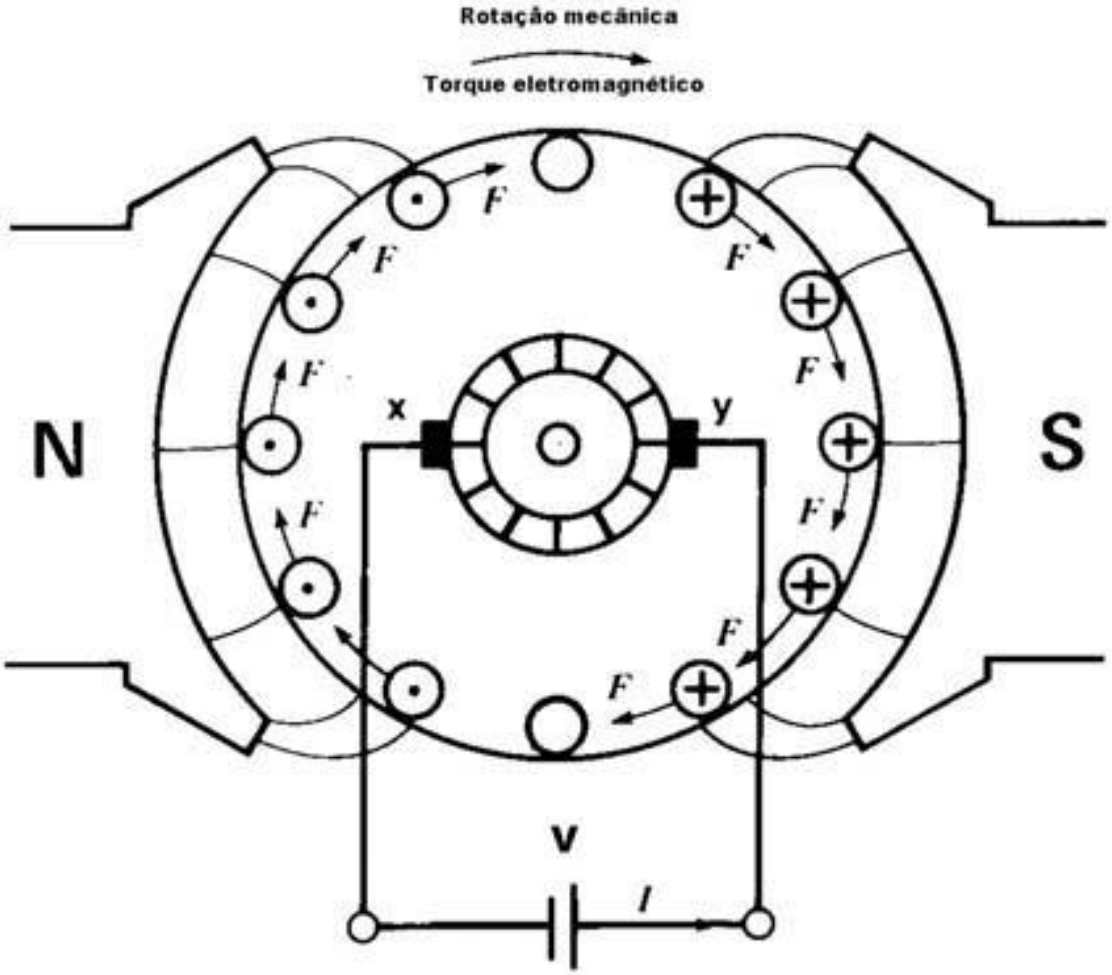
- Princípio de do Motor CC



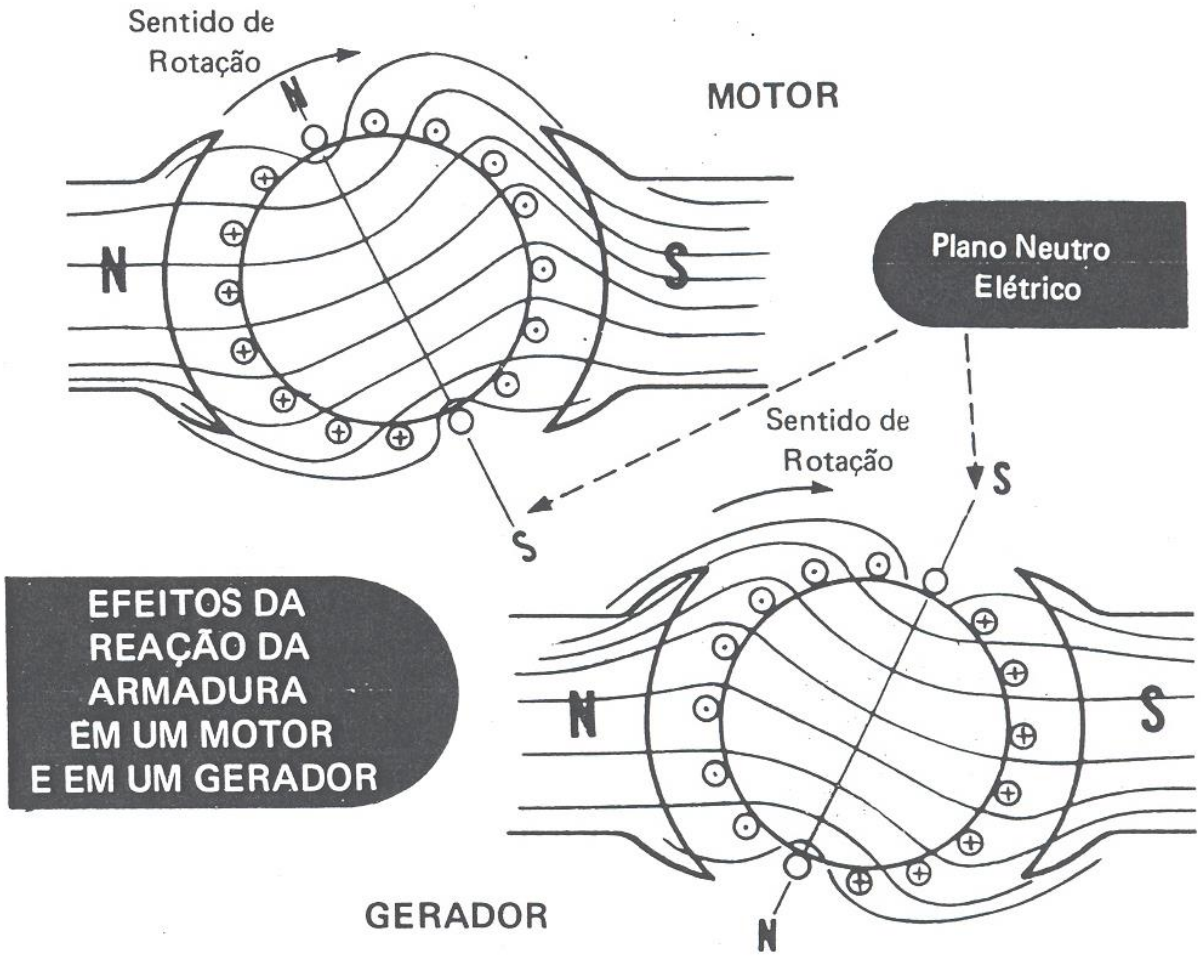






Rotação mecânica
Torque eletromagnético
N
S
x
y
F
v
I

- Reação da Armadura em Motores



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

| Ação Motora | Ação Geradora |
|---|---|
| O torque eletromagnético produz (ajuda) a rotação. | O torque eletromagnético (desenvolvido no condutor percorrido pela corrente) opõe-se à rotação (lei de Lenz). |
| A tensão gerada *fcem* (força contra-eletromotriz) se opõe à corrente da armadura (lei de Lenz). | A tensão gerada *fem* (força eletromotriz) produz (ajuda) a corrente da armadura. |
| $V_g = V_{ta} - r_a . I_a$ | $V_g = V_{ta} + r_a . I_a$ |

# Força Contra-Eletromotriz Induzida

- Devido ao movimento de rotação da armadura uma fem será produzida nos mesmos condutores responsáveis pela ação motora, devido ao corte das linhas de fluxo do campo no entreferro.
- Esta força contra-eletromotriz se oporá à tensão de alimentação, e será proporcional à velocidade de rotação e ao fluxo no entreferro:

$$V_g = K\varphi\omega \rightarrow \mathrm{K} = \frac{\mathrm{p.Z_a}}{\mathrm{60a}}$$

A corrente de armadura será:

$$I_a = \frac{V_t - V_g}{r_a}$$

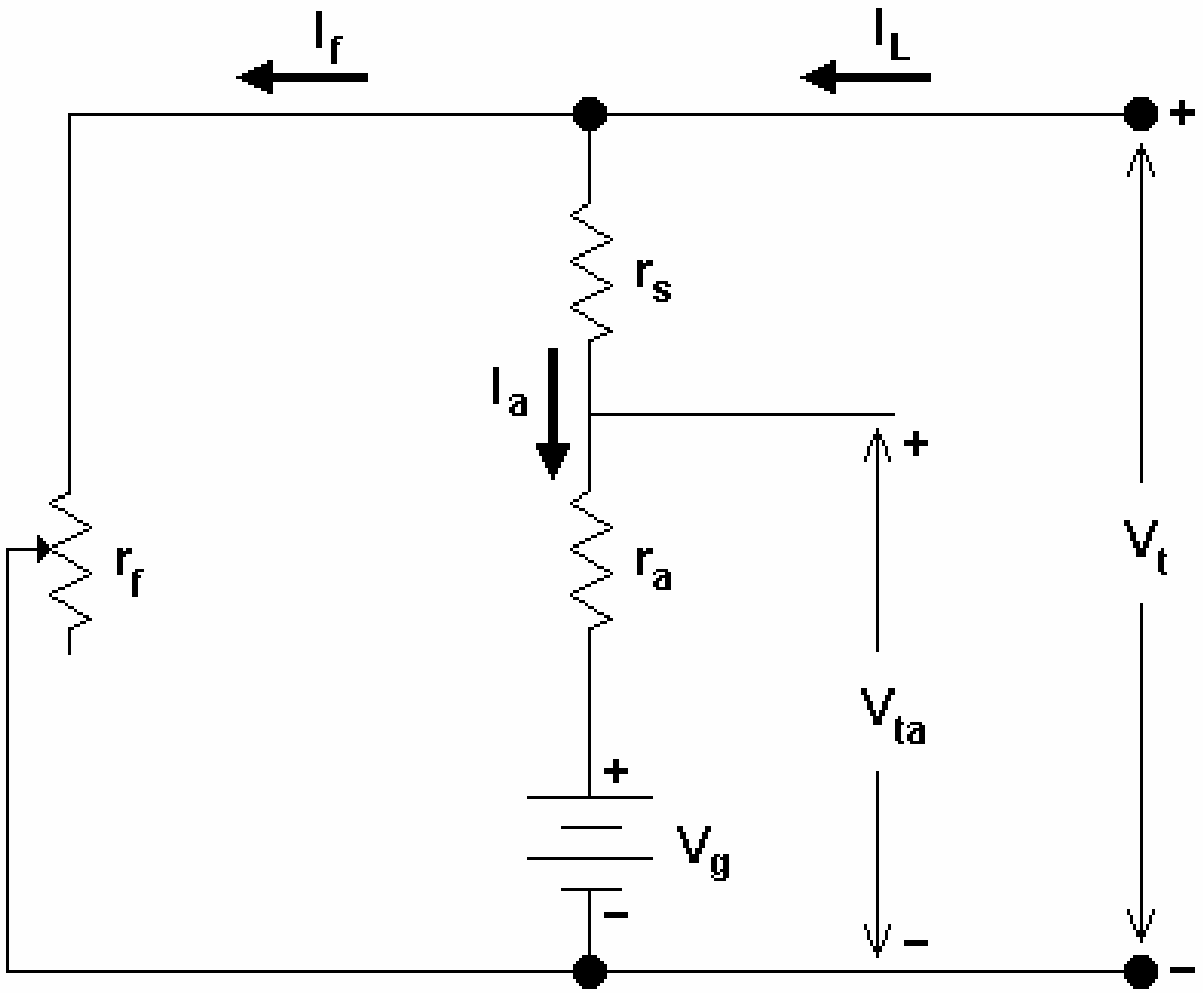
# CIRCUITO EQUIVALENTE DO MOTOR CC

- As relações entre a tensão e a corrente em um circuito equivalente de um motor CC são as seguintes:

$$V_{ta} = V_g + r_a . I_a$$

$$V_t = V_g + (r_a + r_s) . I_a$$

$$I_L = I_a + I_f$$


$I_f$
$I_L$
+
$r_s$
$I_a$
+
$r_f$
$r_a$
$V_t$
$V_{ta}$
+
$V_g$
–
–

- 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 (nominal) do motor, V;
  - $I_a$ → Corrente da armadura;
  - e $r_a$, $r_s$, $r_f$, $I_s$, $I_f$ e $I_L$ representam as grandezas definidas no circuito equivalente do motor.

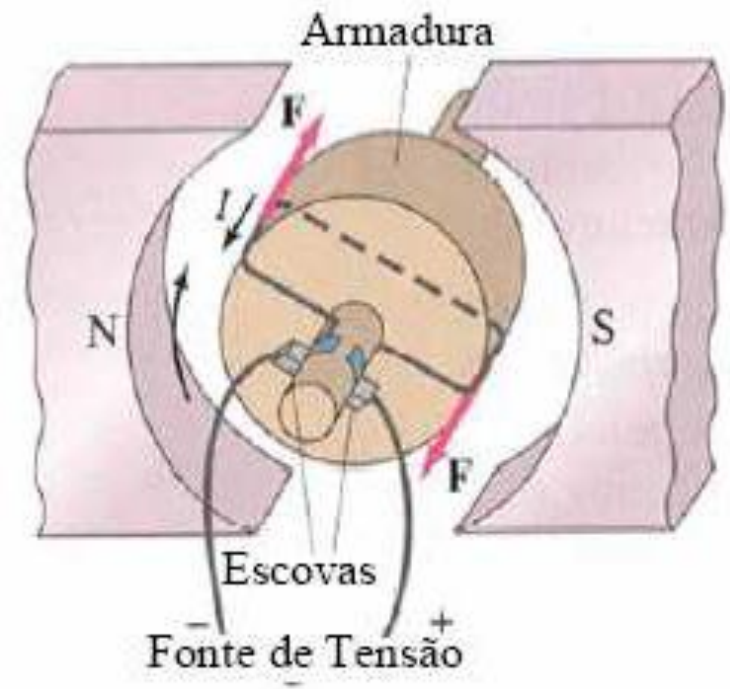
# Torque Eletromagnético

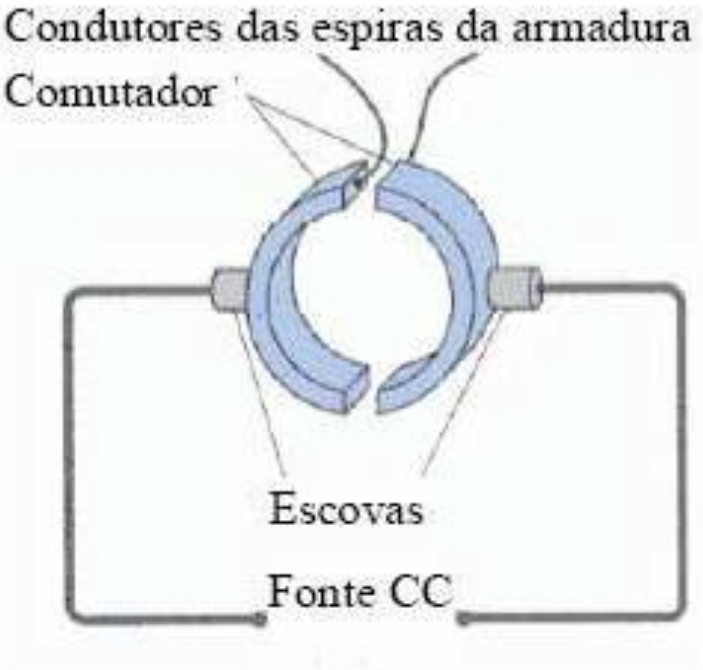
**Recordando:**

- O torque total para uma bobina de N espiras percorrida por corrente e girando em um campo magnético é dado por:

$$\tau = N.B.I.A.sen\gamma$$

- onde:
  - τ - torque de giro [N.m];
  - N – número de espiras;
  - B – densidade de campo magnético [T];
  - I – corrente elétrica na(s) espira(s) [A];
  - A – área das espiras (a x b) [m²];
  - γ - ângulo da normal (perpendicular) à face da espira com a direção das linhas de campo [° ou rad].


Armadura
F
I
N
S
F
Escovas
Fonte de Tensão
–
+


Condutores das espiras da armadura
Comutador
Escovas
Fonte CC

## Torque Eletromagnético

- Lembrando que
- A potência entregue ao motor pela fonte cc será:

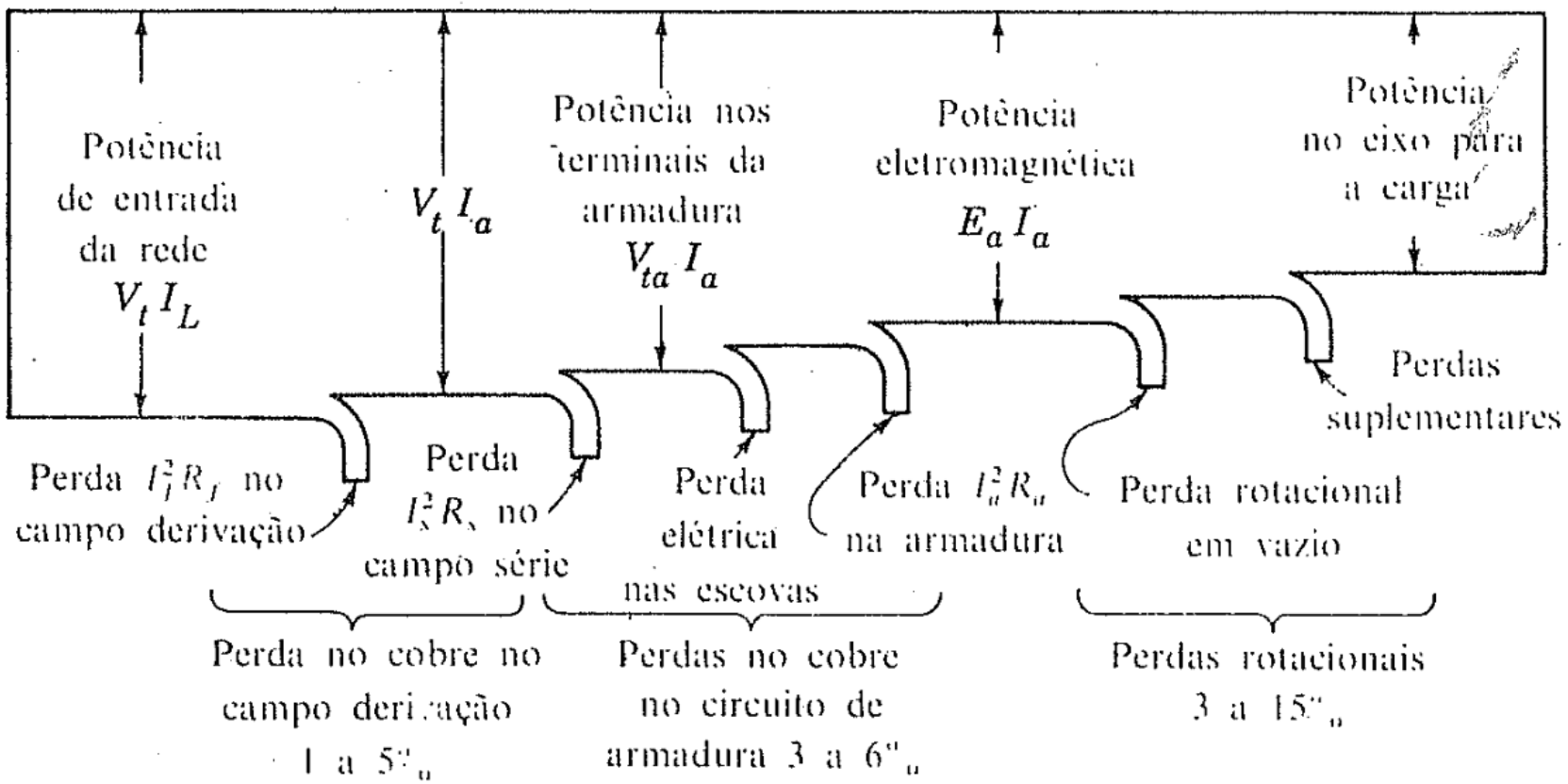
$$V_T . I_a - r_a . {I_a}^2 = V_g . I_a$$

- A potência disponível será :

$$P = V_g I_a = T\omega \rightarrow T = \frac{V_g . I_a}{\omega} \rightarrow \omega = \frac{2\pi N}{60}$$

$$T = K\varphi \, I_a$$

$$K = \frac{p . Z_a}{2 . \pi . a}$$


Potência de entrada da rede $V_t I_L$
$V_t I_a$
Potência nos terminais da armadura $V_{ta} I_a$
Potência eletromagnética $E_a I_a$
Potência no eixo para a carga
Perdas suplementares
Perda $I_f^2 R_f$ no campo derivação
Perda $I_s^2 R_s$ no campo série
Perda elétrica nas escovas
Perda $I_a^2 R_a$ na armadura
Perda rotacional em vazio
Perda no cobre no campo derivação 1 a 5%
Perdas no cobre no circuito de armadura 3 a 6%
Perdas rotacionais 3 a 15%

## Exercício 6

- Um motor em derivação de 20 HP, 230 V e 1.150 rpm, quatro polos, quatro percursos de armadura paralelos e 882 condutores de armadura, tem uma resistência do circuito de armadura total de 0,188 ohm. Na saída nominal, o motor solicita uma corrente da armadura de 73 A e uma corrente de campo de 1,6 A. Calcule:
  a) Torque eletromagnético;
  b) O fluxo por polo;
  c) As perdas rotacionais;
  d) O rendimento;
  e) A carga no eixo.

# 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).

$$N = \mathrm{V}_g \mathrm{K}\varphi$$

- Pode-se controlar a velocidade variando o fluxo do campo, a resistência de armadura e a tensão de alimentação da armadura.

# Determinação da velocidade para várias condições de carga

- As condições de velocidade e carga estão relacionadas através da equação da tensão na armadura induzida:

$$N = \mathrm{V}_g \mathrm{K}\varphi$$

- Com fluxo constante para qualquer condição de carga, a nova velocidade se relaciona com a velocidade inicial por:

$$\mathrm{N}_2 = \mathrm{N}_1 \frac{\mathrm{V}_{g2}}{\mathrm{V}_{g1}}$$

# Determinação da velocidade para várias condições de carga

- A Regulação de velocidade(RV), é um importante indicador de desempenho.

$$RV = \frac{Velocidade\ em\ vazio\ - Velocidade\ a\ plena\ carga}{Velocidade\ a\ plena\ carga}\ 100\%$$

## Exercício 5

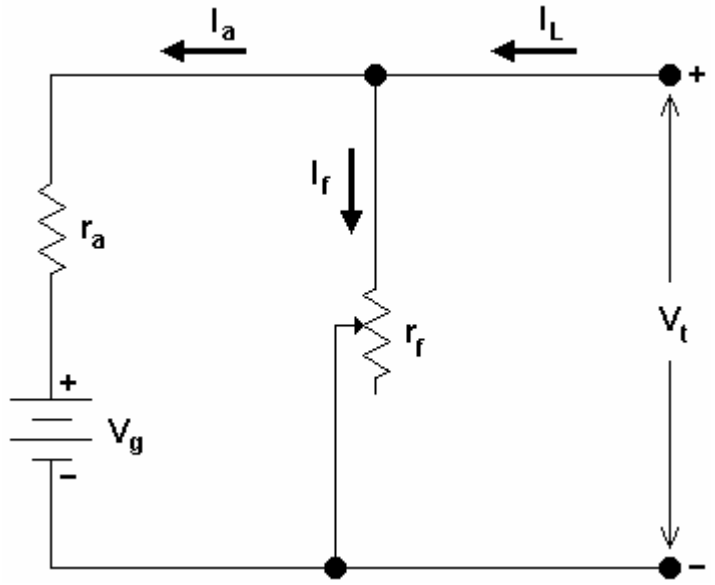
- Um motor em derivação de 20 HP, 230 V e 1.150 rpm, tem uma resistência do circuito de armadura total de 0,188 ohm. Na saída nominal, o motor solicita uma corrente da rede de 74,6 A e uma corrente de campo de 1,6 A.
  a) Calcule a velocidade quando a corrente da rede de entrada for 38,1 A;
  b) Qual a velocidade a vazio se $I_L$ = 1,9 A?
  c) Determine a regulação de velocidade.

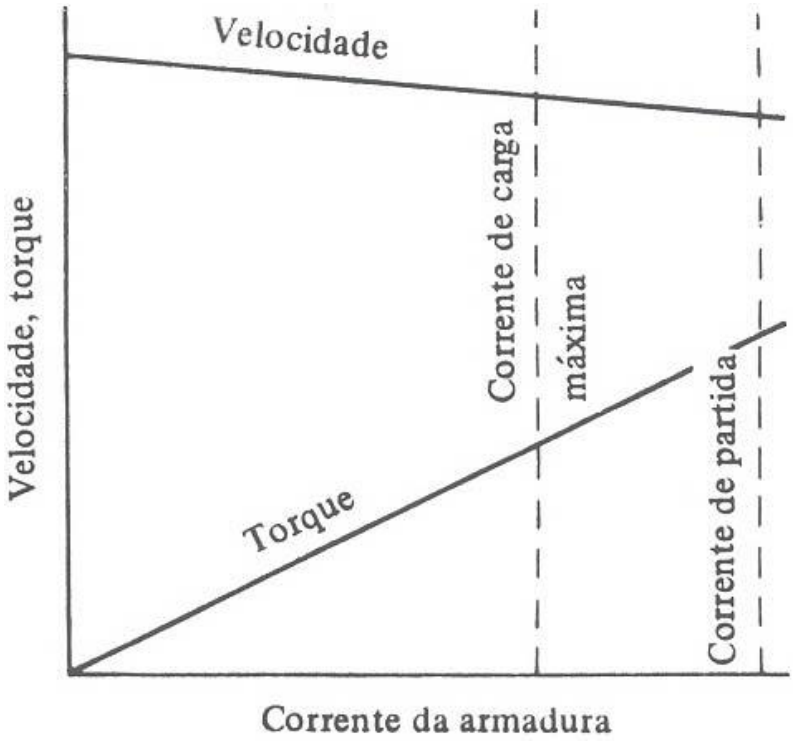
## Exercício 6

- Um motor CC em derivação, 120 V, possuindo uma resistência do circuito de armadura de 0,2 ohms e uma resistência de 60 ohms no circuito de campo, absorve da rede uma corrente de 40 A a plena carga. A queda de tensão nas escovas na situação nominal é de 3 V, a velocidade a plena carga é 1.800 rpm. Calcule:
  a) A velocidade numa situação de meia carga;
  b) A velocidade numa sobrecarga de 125%.

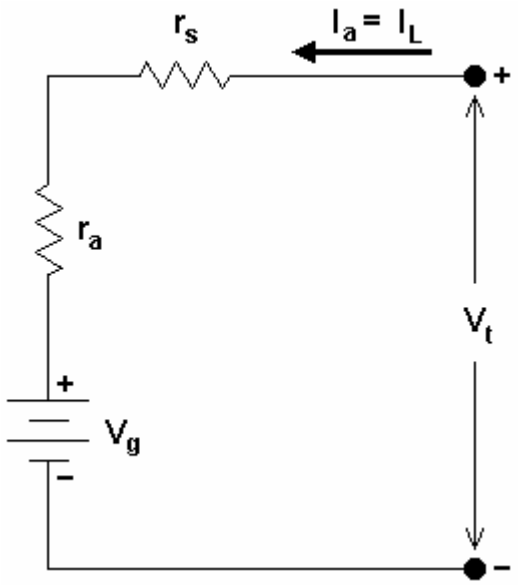
# Característica Torque x Velocidade

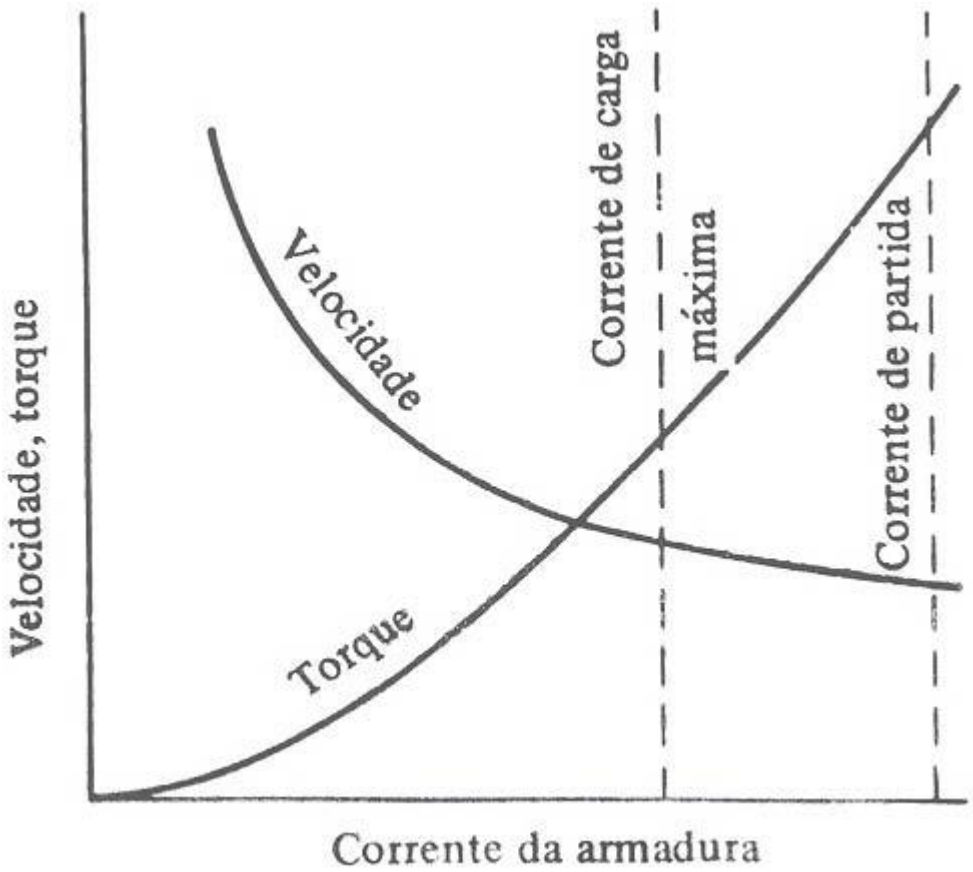
- **Motor Shunt:**
  - O torque aumenta linearmente com o aumento na corrente da armadura, enquanto a velocidade cai ligeiramente à medida que a corrente da armadura aumenta;
  - A velocidade básica é a velocidade com carga máxima. O ajuste de velocidade pode ser feito inserindo-se uma resistência no campo usando um reostato de campo.


$I_a$
$I_L$
+
$I_f$
$r_a$
$r_f$
$V_t$
+
$V_g$
–
–


Velocidade
Velocidade, torque
Corrente de carga
máxima
Corrente de partida
Torque
Corrente da armadura

- **Motor Série:**
  - A velocidade varia de um valor muito alto com uma carga leve até um valor bem baixo com a carga máxima;
  - A vazio, a velocidade aumentará ilimitadamente até o motor se destruir;
  - Os grandes motores série são geralmente ligados diretamente à carga e não através de correias ou polias.


$r_s$
$I_a = I_L$
+
$r_a$
$V_t$
+
$V_g$
–
–


Velocidade, torque
Velocidade
Torque
Corrente de carga máxima
Corrente de partida
Corrente da armadura

# 8. Controle de velocidade dos motores CC

- Partindo da equação que relaciona a velocidade com as outras grandezas da máquina. Tem-se:

$$N = \frac{\mathrm{V}_t - \mathrm{R}_a I_a}{\mathrm{K}\varphi}$$

- **Atuando em $R_a$**

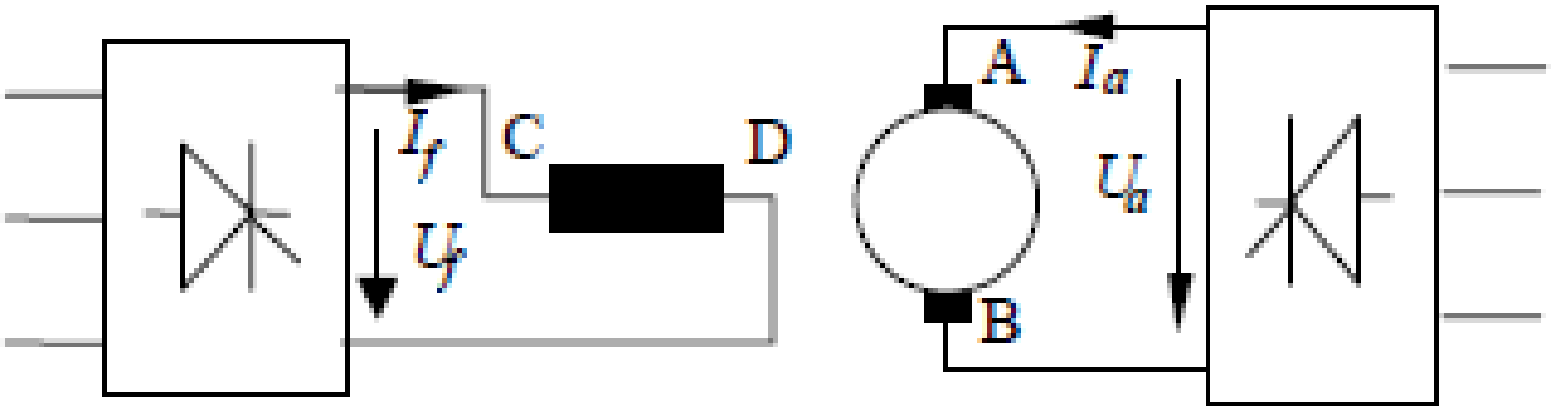
- Este processo é designado por controle Da resistência de armadura;
- A velocidade diminui proporcionalmente à queda de tensão $R_a I_a$;
- Caracterizado por um grande desperdício de energia resultante das perdas do reóstato;
- Ainda utilizado;

- **Atuando em $\varphi$**
- Reóstato em série com o enrolamento de excitação, produz aumento de $R_f$ (para $V_g$ constante) diminuindo a corrente indutora;
- Redução de $I_f$ reduz fluxo de excitação;
- Quando a intensidade do campo diminui o motor acelera porque a força contra-eletromotriz é reduzida;
- Método não permite regular a velocidade para gamas de variação largas e é utilizado essencialmente a velocidades elevadas.

- **Atuando em $V_t$**

- Motor de excitação em derivação
  - Se se diminuir a tensão de alimentação, a corrente indutora $I_f$ diminui e portanto φ diminui também;
  - A velocidade pode diminuir ou aumentar consoante o valor de φ.

- Motor de excitação separada
  - Com fluxo constante e desprezando $R_a$ $I_a$ em face de $V_g$, conclui-se que a velocidade é, em primeira aproximação, proporcional à tensão $V_g$;
  - Assim, a velocidade é modificada atuando diretamente na tensão de alimentação;
  - Este processo requer uma fonte de tensão contínua de amplitude variável ou dispositivos de eletrônica de potência.

## O Sistema Ward-Leonard Estático

- Largamente utilizado na indústria;
- Constituído por uma máquina de corrente contínua de excitação independente controlada por dispositivos de eletrónica de potência;