

# **SEL 404 – ELETRICIDADE II**

## **Aula 12**

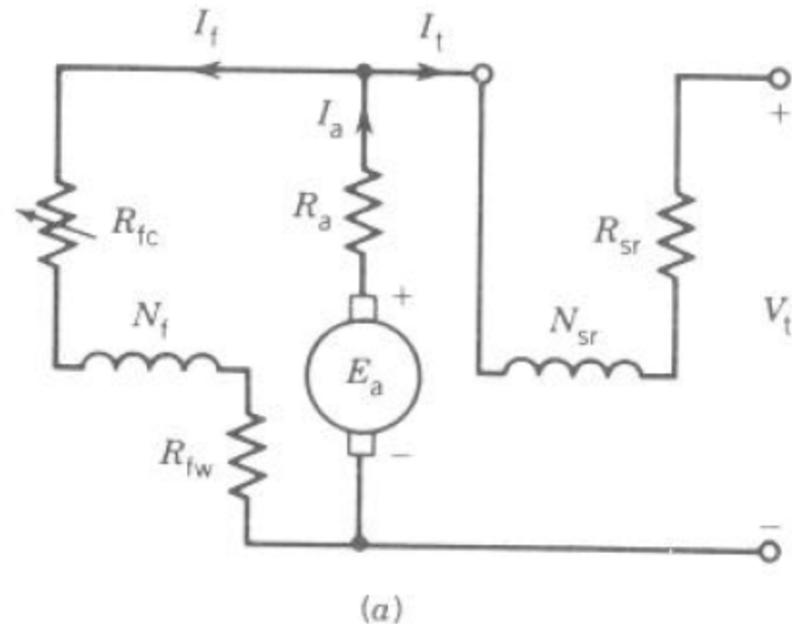
## Aula de Hoje

---

- Gerador CC Composto
- Gerador Série
- Interpolos

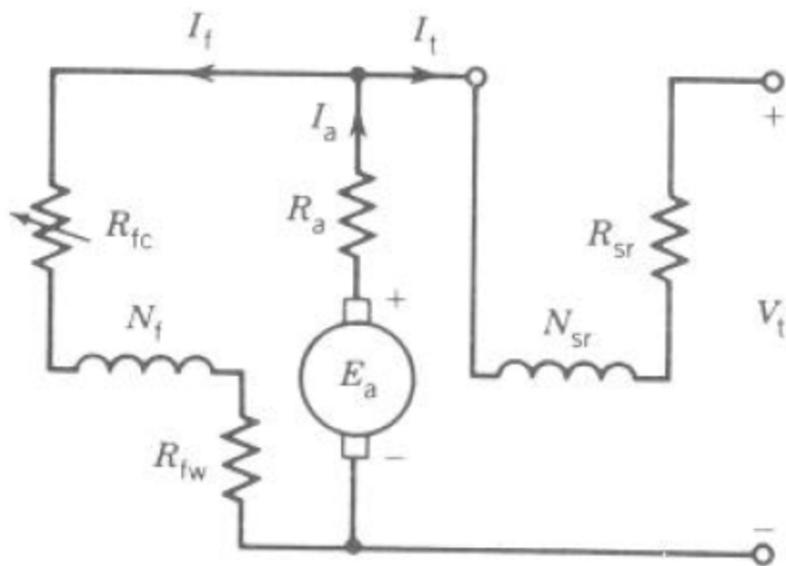
## Gerador CC com Excitação Composta – Estrutura Básica

- Utiliza combinações de enrolamentos de campo em série e paralelo (shunt) de forma a eliminar a queda de tensão excessiva associada à resistência de armadura e o efeito desmagnetizante da corrente de carga (reação de armadura).
- O enrolamento de **campo shunt** representa o principal enrolamento, o qual é **responsável pela produção da maior parte do fluxo magnético na máquina**. Esse enrolamento possui muitas espiras, área de seção transversal baixa e conduz uma corrente bem menor que a da armadura (tipicamente 5%).
- O enrolamento de campo série possui **menos espiras**, porém com maior área de seção transversal e conduz a corrente de armadura.



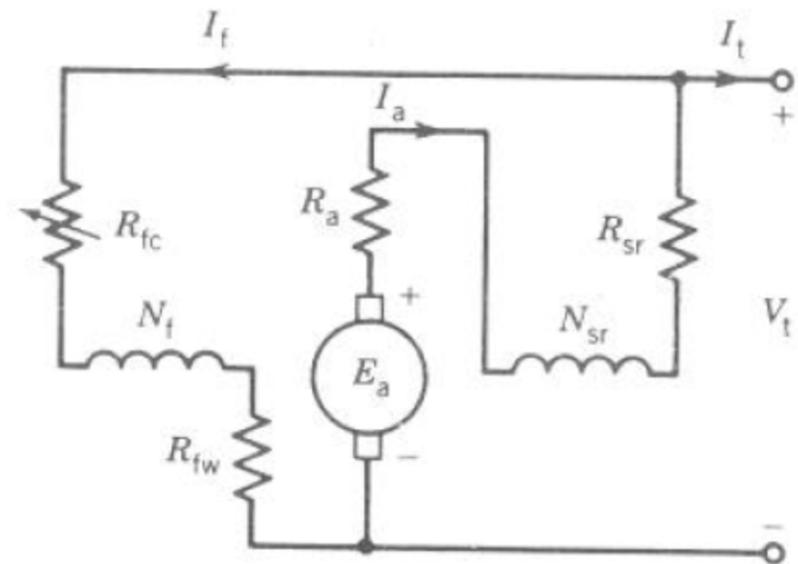
## Gerador CC com Excitação Composta – Estrutura Básica

- O enrolamento shunt pode ser conectado em paralelo com a armadura (gerador CC composto curto) ou pode ser conectado em paralelo com associação série dos enrolamentos de armadura e de campo série (gerador CC composto longo).



(a)

composto curto



(b)

composto longo

# Gerador CC com Excitação Composta – Regulação de Tensão

## Modelo de Regime Permanente (composto curto):

$$V_t = E_a - R_a \times I_a - R_{sr} \times I_t$$

$$I_t = I_a - I_f$$

## Modelo de Regime Permanente (composto longo):

$$V_t = E_a - R_a \times I_a - R_{sr} \times I_a = E_a - I_a \times (R_a + R_{sr})$$

$$I_t = I_a - I_f$$

$$I_f = \frac{V_t}{R_{fw} + R_{fc}}$$

Adicionalmente, para ambas as conexões, e supondo linearidade magnética, temos que:

$$E_a = K_a \times (\Phi_{sh} \pm \Phi_{sr}) \times \omega_m$$

onde,

$\Phi_{sh}$  – fluxo produzido pelo enrolamento shunt

$\Phi_{sr}$  – fluxo produzido pelo enrolamento série

- Quando esses fluxos se somam, a máquina é denominada **composta aditiva (ou acumulativa)**, e quando se subtraem, a máquina é denominada **composta subtrativa (ou diferencial)**.

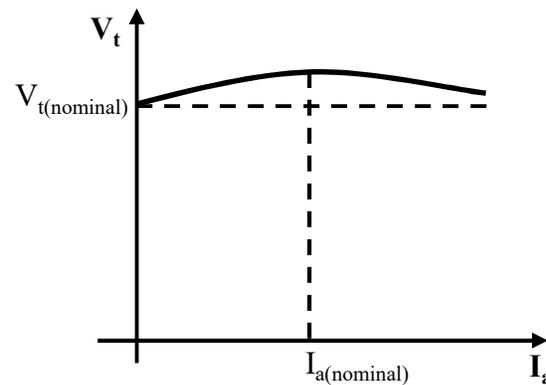
## Gerador CC Composto Aditivo – Regulação de Tensão

- Mesmo introduzindo uma nova queda de tensão  $R_{sr}I_t$ , a tensão terminal irá aumentar se o fluxo série for aditivo com o fluxo shunt, uma vez que a tensão de armadura será maior, pois  $E_a = K_a(\Phi_{sh} + \Phi_{sr})\omega_m$ .
- $R_{sr}I_t$  é pequena, pois o enrolamento série é formado por poucas espiras e com bitola de maior área.
- O enrolamento série pode ser dimensionado para compensar (aditivo) a queda de tensão  $R_a I_a$  e a reação da armadura  $I_{f(RA)}$  de três diferentes formas:
  1. **Máquina supercomposta**
  2. **Máquina plana**
  3. **Máquina subcomposta**

# Gerador CC Composto Aditivo – Regulação de Tensão

## 1. Máquina supercomposta:

- O enrolamento série compensa totalmente os dois efeitos e ainda fornece magnetização adicional para a máquina.

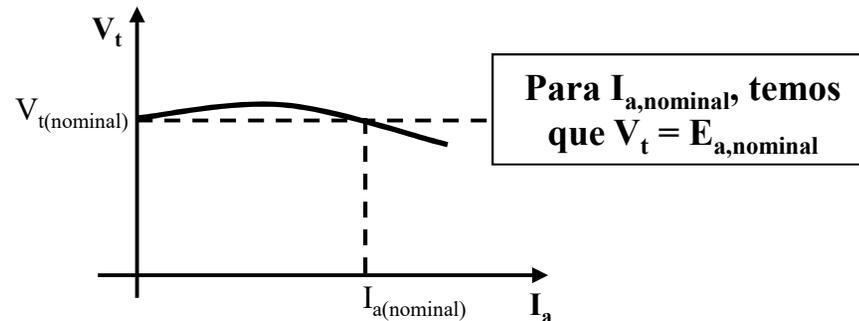


- A tensão terminal pode ser maior do que a tensão nominal de armadura à medida que a corrente de carga aumenta

## Gerador CC Composto Aditivo – Regulação de Tensão

### 2. Máquina plana:

- O enrolamento de campo compensa totalmente os dois efeitos para corrente de carga nominal.

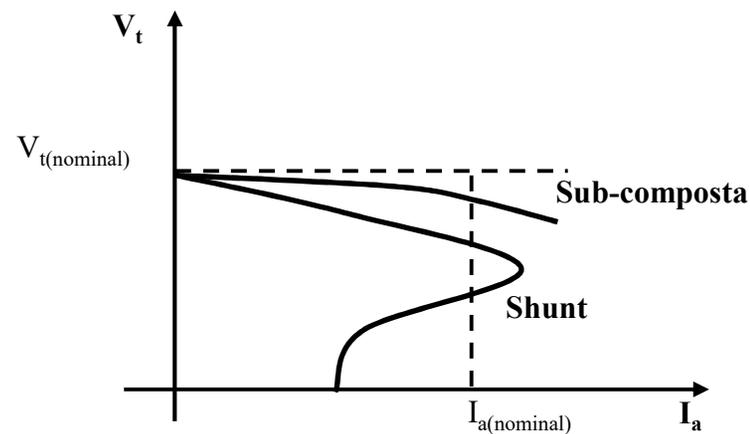


- Para carregamento diferente do nominal, a máquina mostra pequena variação da tensão.

## Gerador CC Composto Aditivo – Regulação de Tensão

### 3. Máquina sub-composta:

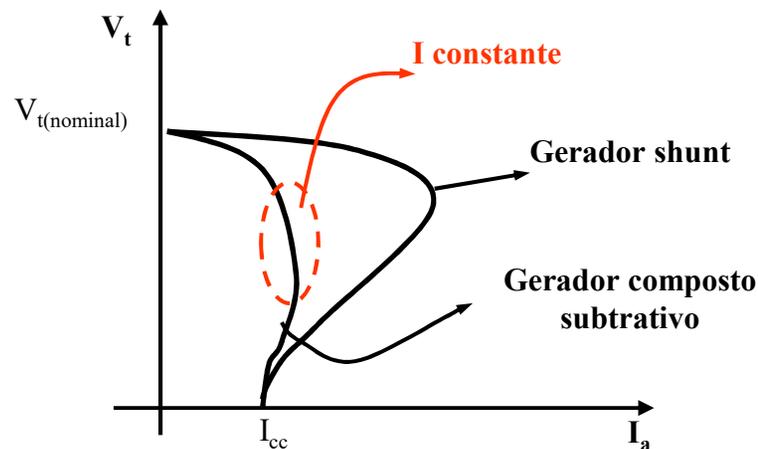
- O enrolamento série compensa parcialmente os efeitos de  $R_a I_a$  e de  $I_{f(RA)}$ , de forma que a queda de tensão diminua em comparação com o gerador shunt.



- Para corrente de carga nominal a tensão terminal será menor do que a tensão de armadura nominal.

## Gerador CC Composto Subtrativo – Regulação de Tensão

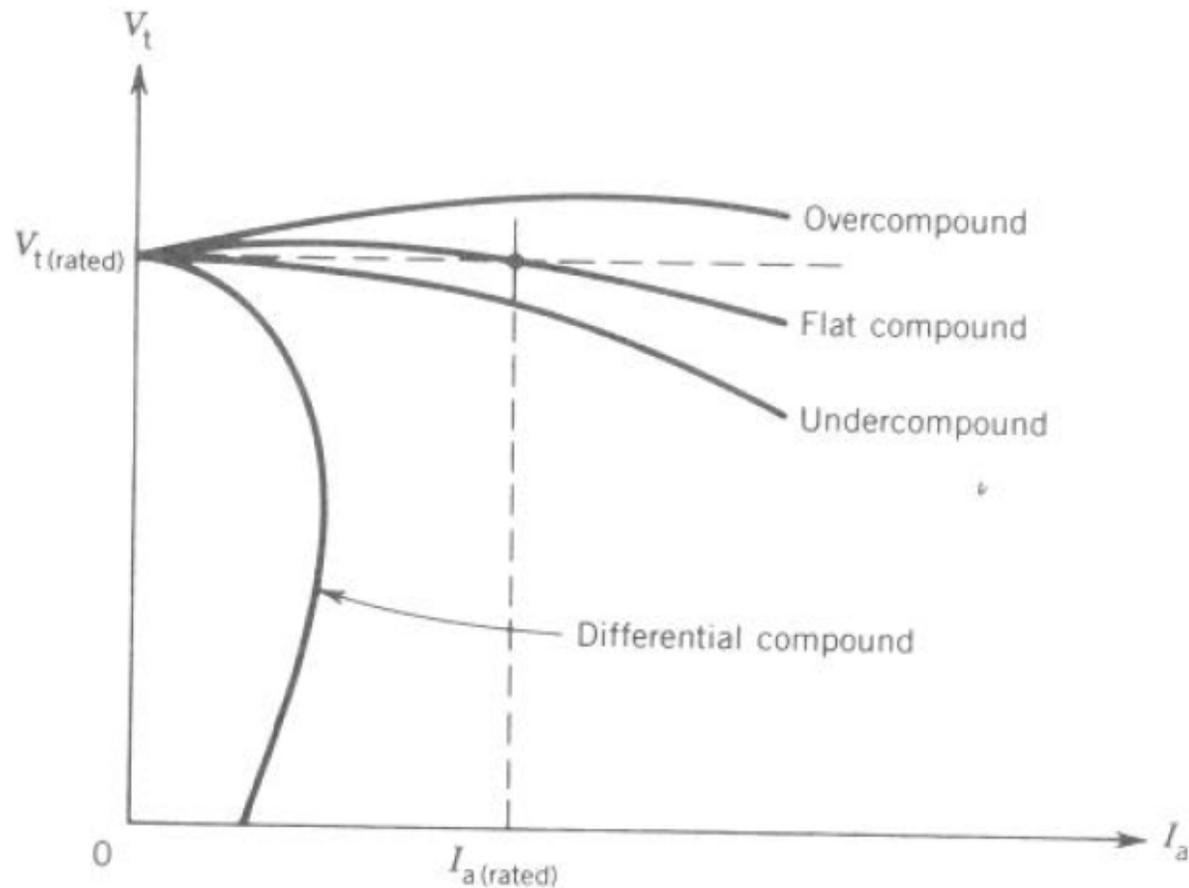
- O enrolamento série ainda pode ser ligado com o shunt de forma a produzir fluxo subtrativo, ou seja,  $E_a = K_a(\Phi_{sh} - \Phi_{sr}) \omega_m$ . Neste caso, o enrolamento série produz uma redução ainda maior da tensão terminal em relação ao paralelo, por duas razões:
  1. Queda de tensão  $R_{sr}I_a$
  2. Desmagnetização adicional  $\Phi_{sh} - \Phi_{sr}$
- Assim, o gerador composto subtrativo mostra queda de tensão elevada para pequenas variações da corrente de carga.



- Vantagens: pode ser usado como fonte de corrente constante para longa faixa de variação de tensão (máquina de solda).

## Gerador CC Composto – Regulação de Tensão

- A combinação de enrolamentos e formas de excitação dos mesmos fornece muita flexibilidade ao gerador CC composto, do ponto de vista de características de regulação de tensão.



## Dimensionamento do enrolamento série no gerador CC composto

- A força magnetomotriz efetiva por pólo é dada por:

$$F_{efetiva} = F_{shunt} \pm F_{sr} - F_{RA}$$

$$N_f I_{f(efet)} = N_f I_f \pm N_{sr} I_{sr} - N_f I_{f(RA)}$$

onde,

$N_f$  – número de espiras por polo do enrolamento de campo shunt

$N_{sr}$  – número de espiras por polo do enrolamento de campo série

$F_{RA}$  – força magnetomotriz associada a reação de armadura

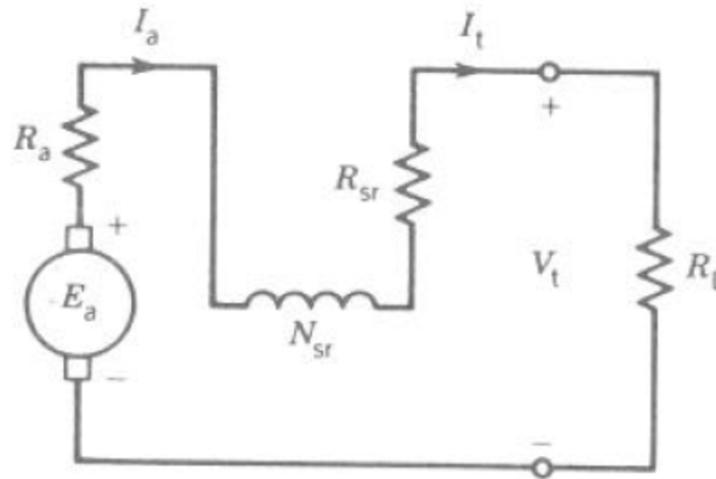
Com isso:

$$I_{f(efet)} = I_f \pm \frac{N_{sr}}{N_f} I_{sr} - I_{f(RA)}$$

- O número de espiras do enrolamento shunt definirá o grau de compensação, resultando em geradores CC supercompostos, planos, subcompostos ou subtrativos, dependendo se o fluxo série ser aditivo ou subtrativo com o campo shunt.

## Gerador CC Série – Estrutura Básica

- O enrolamento de campo é único e ligado em série com a armadura. A corrente de armadura alimenta a carga e produz o campo simultaneamente.



- As equações que descrevem a operação em regime permanente do gerador série são:

$$E_a = V_t + R_a \times I_a + R_{sr} \times I_a$$

ou

$$V_t = E_a - (R_a + R_{sr}) \times I_a$$

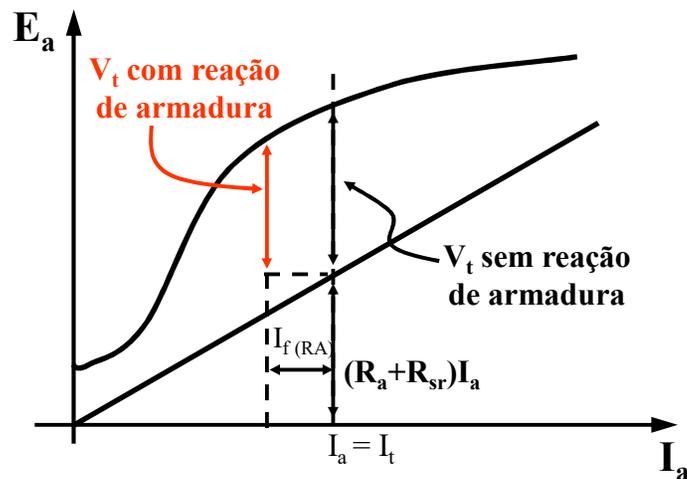
$$I_t = I_a = I_L = I_f$$

- $R_{sr}$  deve ser baixa para limitar a queda na tensão terminal ( $I_a$  é alta)

Alta Bitola => Alto Custo => Máquina maior para a mesma potência

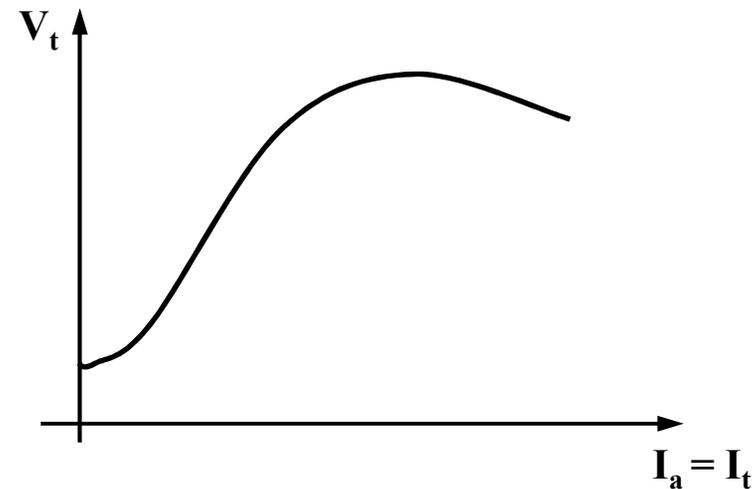
## Gerador CC Série – Regulação de Tensão

- A curva de regulação de tensão pode ser obtida através da curva de magnetização da máquina e da reta dada por  $(R_a + R_{sr})I_a$ .

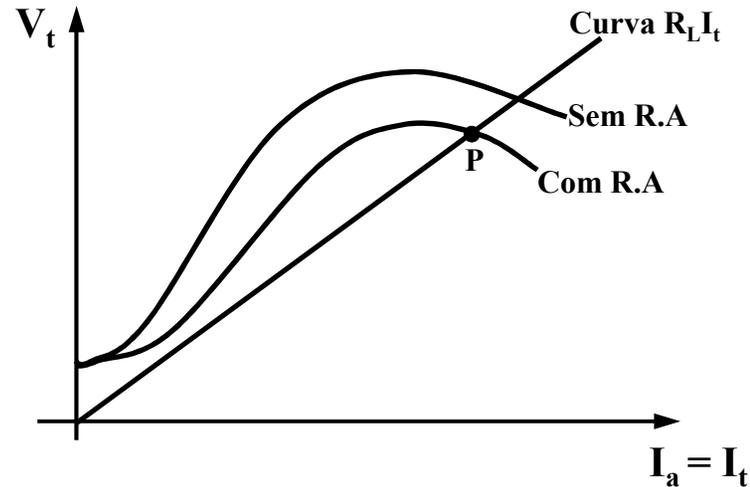


Para uma dada corrente de armadura, a distância entre a curva de magnetização e a reta  $(R_a + R_{sr})I_a$  representa o valor da tensão terminal da máquina  $V_t$ .

- Assim, o conjunto dos valores de  $V_t$  para cada valor de  $I_a$  fornecerá um conjunto dos pontos  $(V_t, I_a)$  que compõem a curva de regulação de tensão da máquina.
- A inclusão da reação de armadura produzirá uma queda de tensão adicional na tensão terminal.



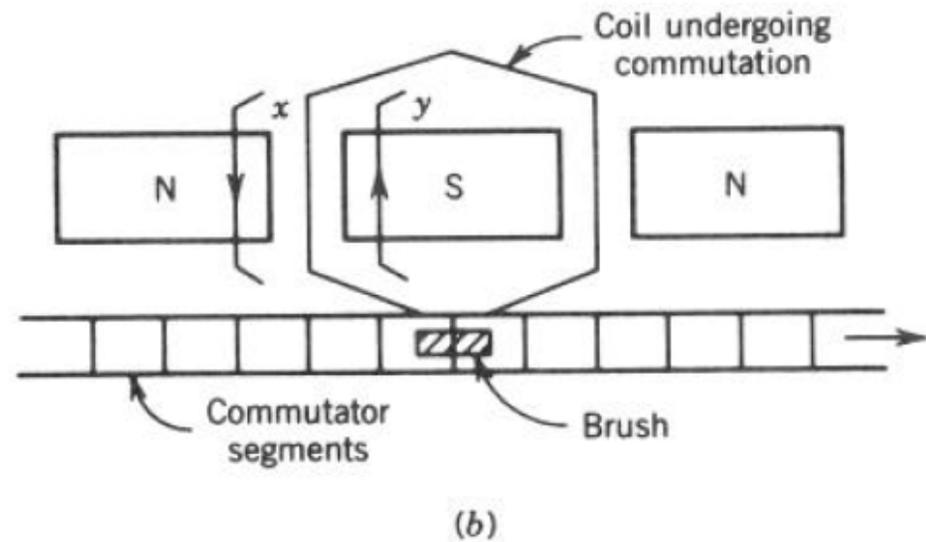
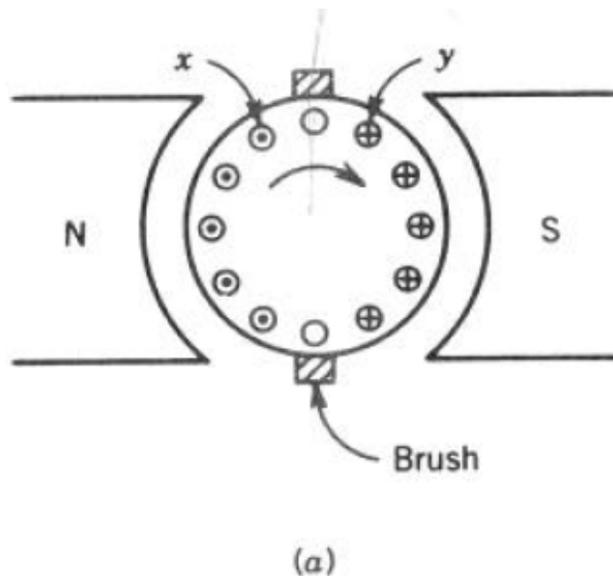
## Gerador CC Série – Regulação de Tensão



- O ponto de operação da máquina é dado pela intersecção entre a curva de regulação de tensão e a característica da carga ( $R_L I_t$ ).
- Para valores elevados de resistência de carga o gerador CC série só pode fornecer valores muito baixos para a tensão terminal.

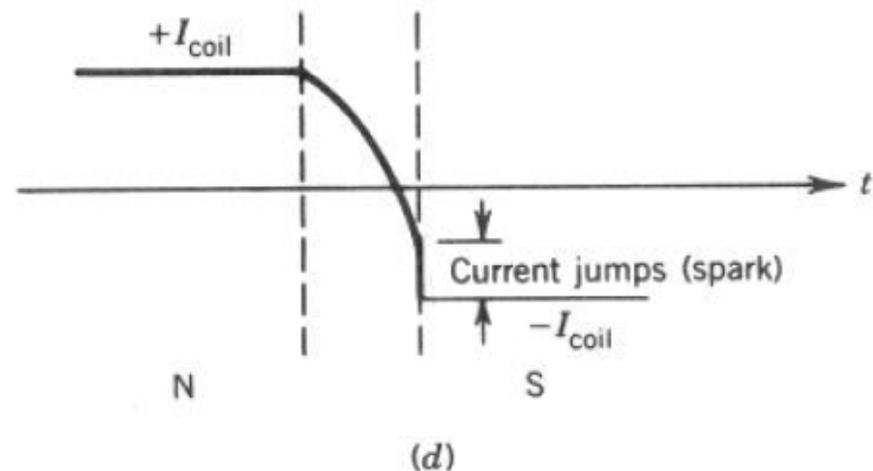
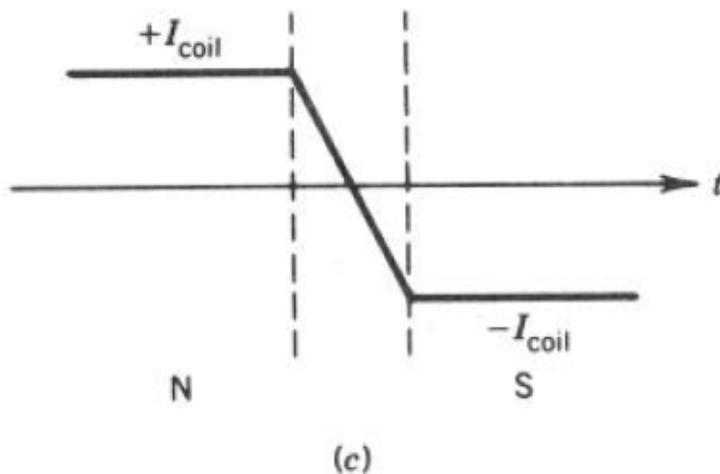
## Interpólos

- A função do comutador nas máquinas CC é mudar o sentido da corrente no condutor quando o mesmo passa de um pólo para outro.
- Quando o condutor x está sob o pólo norte, o sentido da corrente é saindo (“positiva”), porém quando passa pela escova o condutor fica sob o pólo sul e a corrente muda de sentido (condutor y).



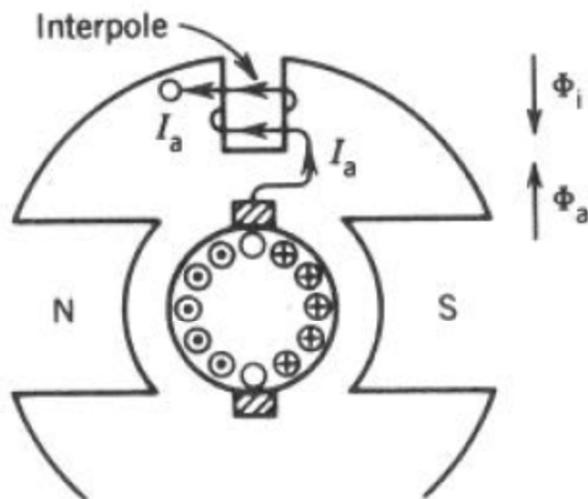
## Interpólos

- A figura abaixo ilustra uma variação linear da corrente no condutor. Entretanto, a comutação da corrente não é linear devido a dois fatores:
- **Indutância do condutor**: a bobina sob comutação tem indutância que durante o transitório (mudança de polaridade) provoca um atraso na corrente.
- **Tensão de reatância**: é a tensão induzida na bobina sob comutação devido ao fluxo produzido na região interpolar pelo enrolamento de armadura.
- Esses fatores contribuem para um atraso na variação da corrente. Com isso, no momento que o condutor deixa as escovas, a inversão do sentido da corrente ainda é incompleto. Conseqüentemente, a corrente “salta” para seu valor máximo quase instantaneamente, provocando faiscamento.

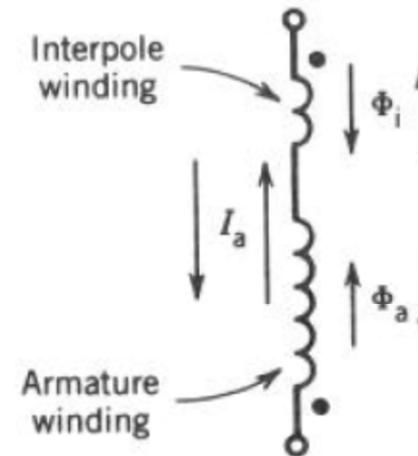


## Interpólos

- Para melhorar a comutação, um pequeno pólo, denominado interpolo, é empregado. O enrolamento desse interpolo é percorrido pela corrente de armadura, cujo sentido é tal que o fluxo produzido oponha-se ao fluxo produzido pela armadura.
- Com isso, o fluxo líquido na região interpolar é aproximadamente nulo. Se a corrente na armadura se inverte, o mesmo deve ocorrer no enrolamento do interpolo, de tal maneira que os fluxos sempre se oponham.



(e)

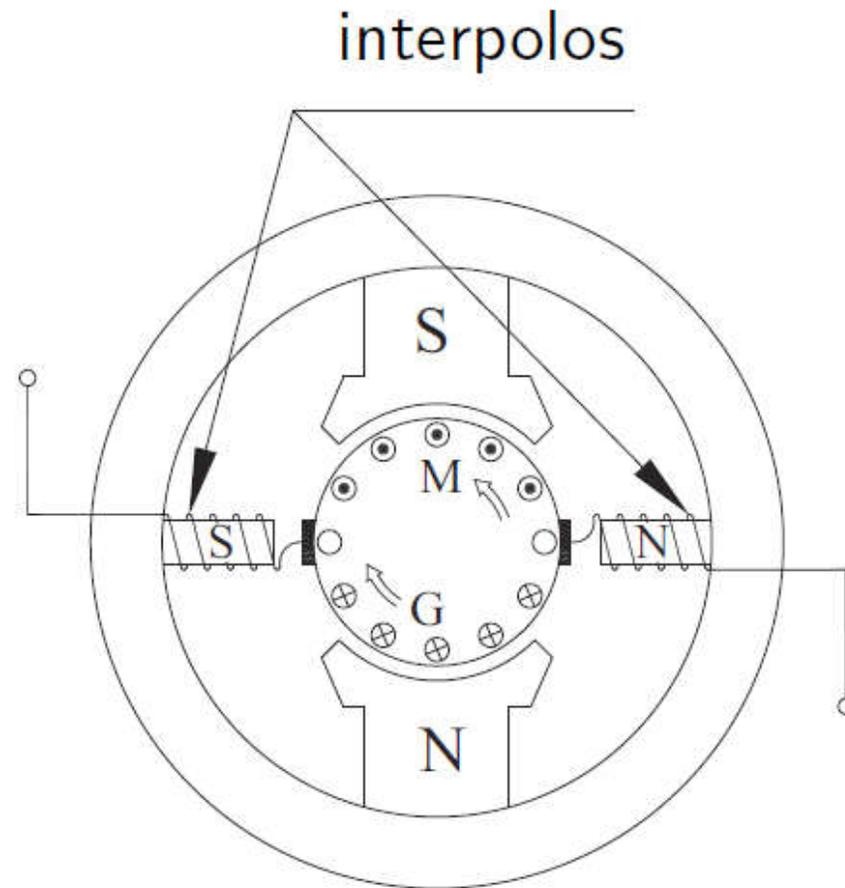


(f)  $\Phi_a$ ,  $\Phi_i$  oppose each other, irrespective of direction of  $I_a$ .

- A maioria das máquinas CC de grande porte incluem tanto os enrolamentos compensadores quanto interpólos.

# Interpólos

---



(e) Interpolos

## Próxima Aula

---

- Estrutura básica do Motor CC
- Motor CC com excitação paralela (shunt)
- Motor CC série
- Motor CC composto