

# **SEL 404 – ELETRICIDADE II**

## **Aula 14**

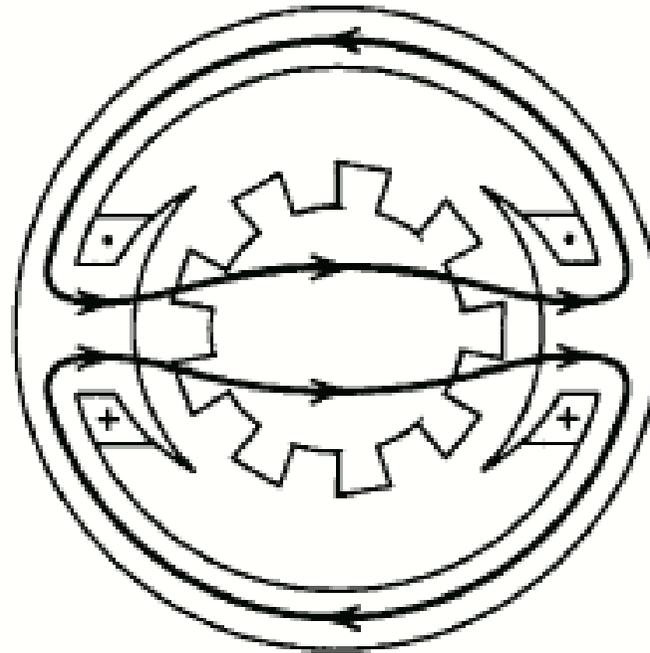
## Aula de Hoje

---

- Curva de magnetização
- Classificação das máquinas CC
- Geradores CC

## Curva de Magnetização

---

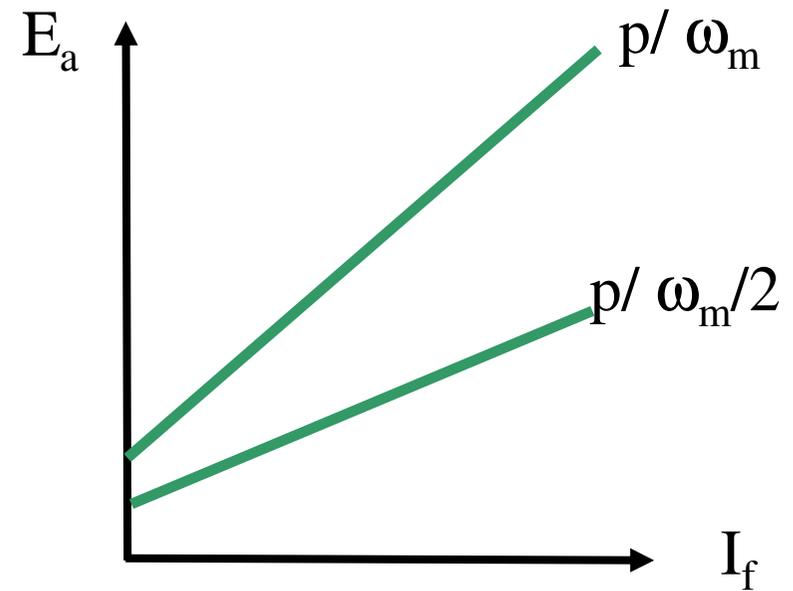
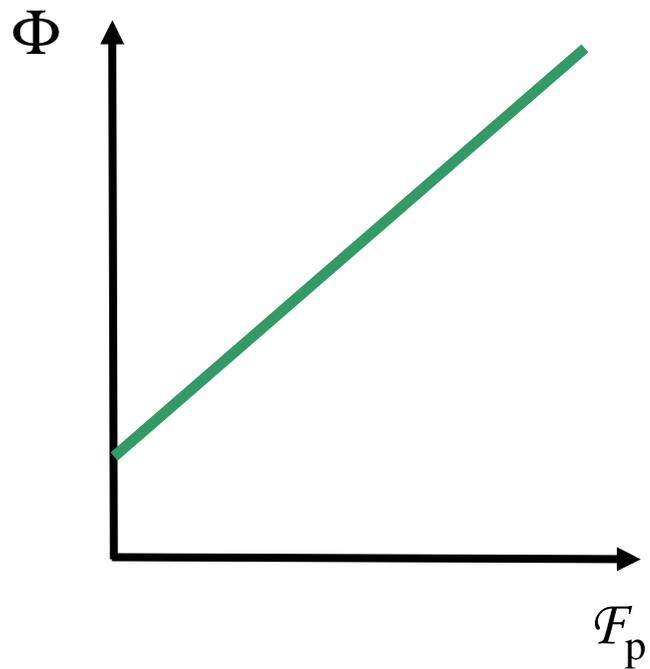


$$\Phi = \frac{F_p}{\mathcal{R}_g} \quad \text{ou} \quad \frac{E_a}{K_a \omega_m} = \frac{NI_f}{\mathcal{R}_g}$$

daí:

$$E_a = \frac{K_a N}{\mathcal{R}_g} \omega_m I_f$$

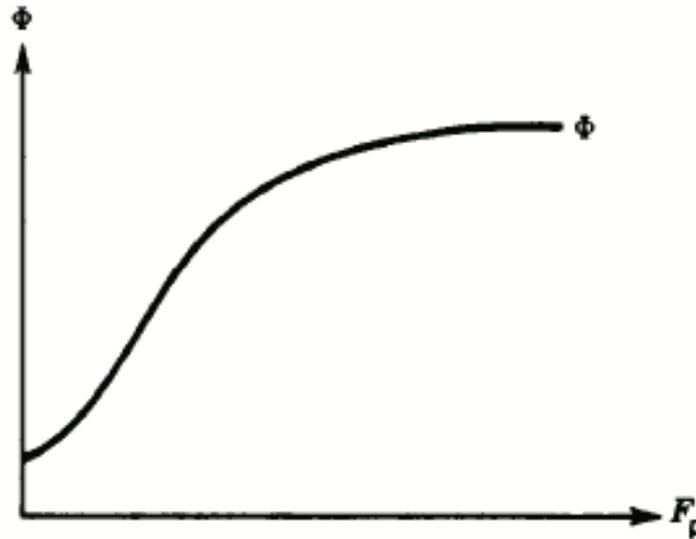
## Curva de Magnetização – para baixos valores de fluxo



Obs.: depende da velocidade

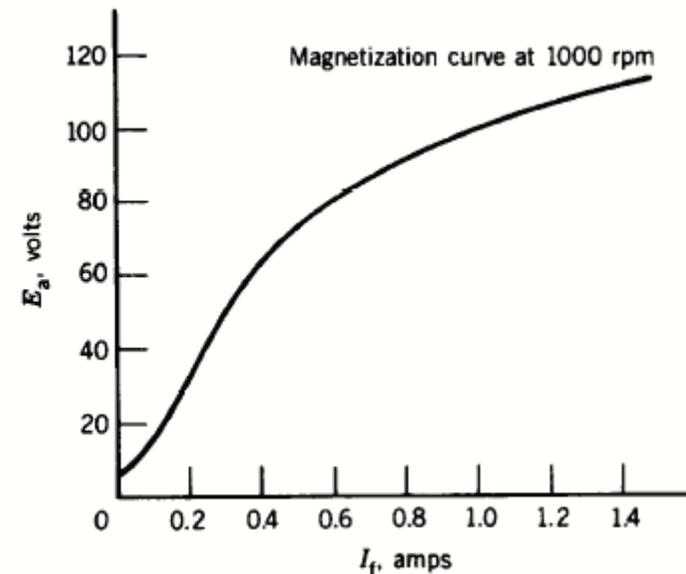
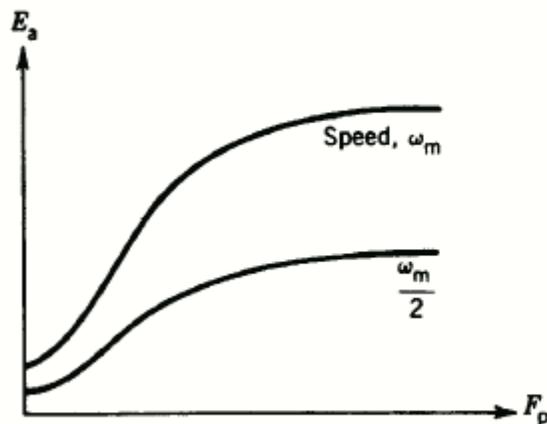
## Curva de Magnetização – para elevados valores de fluxo

- Para valores elevados de alta corrente de campo, a permeabilidade do material magnético tende a diminuir, resultando em aumentos não-lineares das relutâncias das partes ferromagnéticas com aumento da corrente de campo;
- Isto resulta em características  $\Phi \times \mathcal{F}_p$  (ou  $E_a \times I_f$ ) não-lineares;



## Curva de Magnetização – para elevados valores de fluxo

- Para valores elevados de excitação ( $F_p$  ou  $I_f$ ) pode-se chegar a uma situação onde o ganho no fluxo/tensão de armadura é desprezível (baixo) para uma grande variação na excitação;
- Nestas condições, ocorre a saturação do núcleo magnético, resultando em baixa permeabilidade e alta relutância;
- As características  $E_a \times I_f$  são chamadas curvas de magnetização ou de saturação das máquinas CC, e são obtidas experimentalmente.



## Classificação de Máquinas CC

---

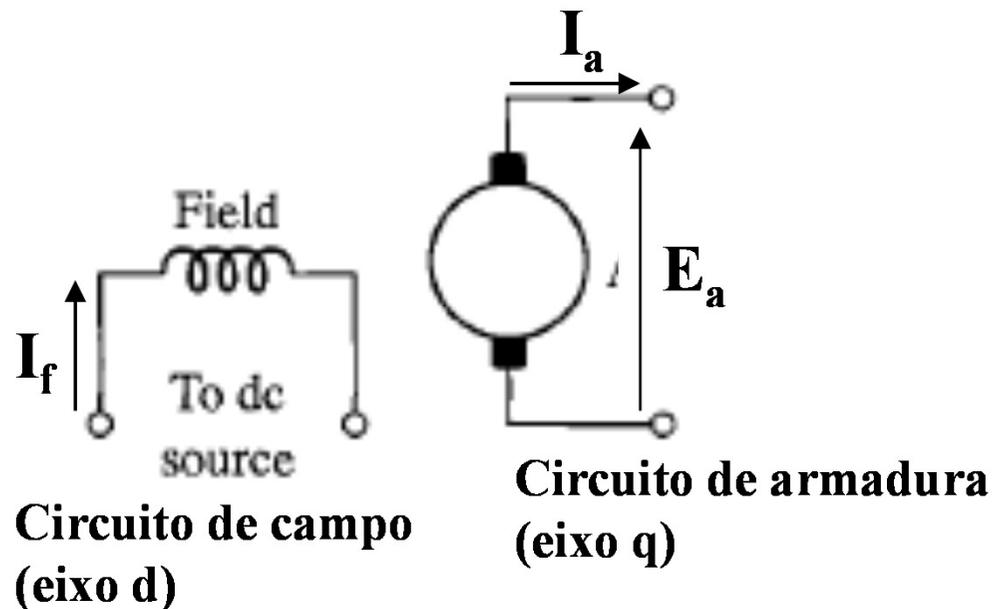
- Dependendo da forma de alimentação dos enrolamentos de campo e de armadura, as máquinas CC recebem diferentes classificações, e fornecem diferentes características de operação, cada uma delas adequada para aplicações específicas.

# Classificação de Máquinas CC

---

## Excitação Independente:

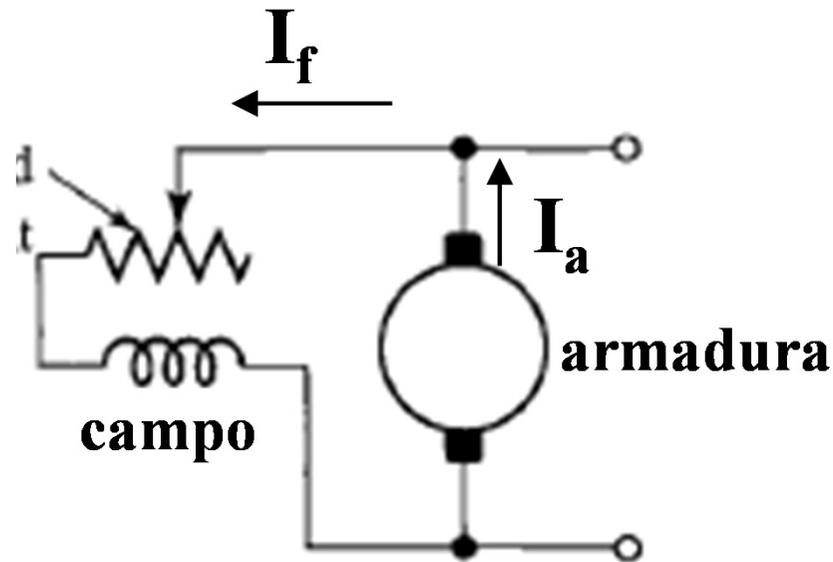
- O enrolamento de campo é alimentado por uma fonte CC separada (externa).
- Máquinas de ímã permanente também são consideradas como máquinas de excitação independente, porém, nesse caso a corrente de campo é constante.



## Classificação de Máquinas CC

### **Máquina Auto-Excitada Paralela (shunt):**

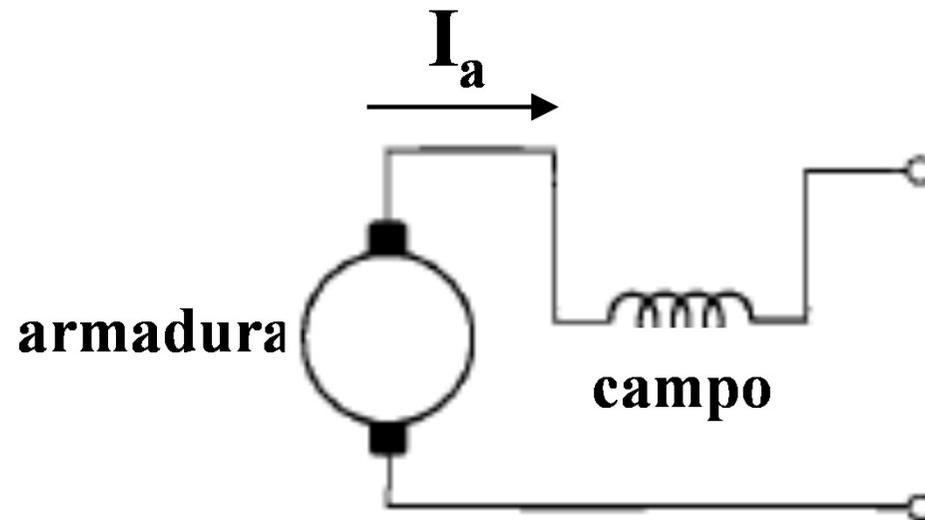
- Os enrolamentos de campo e de armadura são ligados em paralelo.
- Normalmente, um reostato é incluído no circuito de campo para controlar a corrente de campo, e, portanto variar a tensão induzida no circuito de armadura.



## Classificação de Máquinas CC

### **Máquina Auto-Excitada Série:**

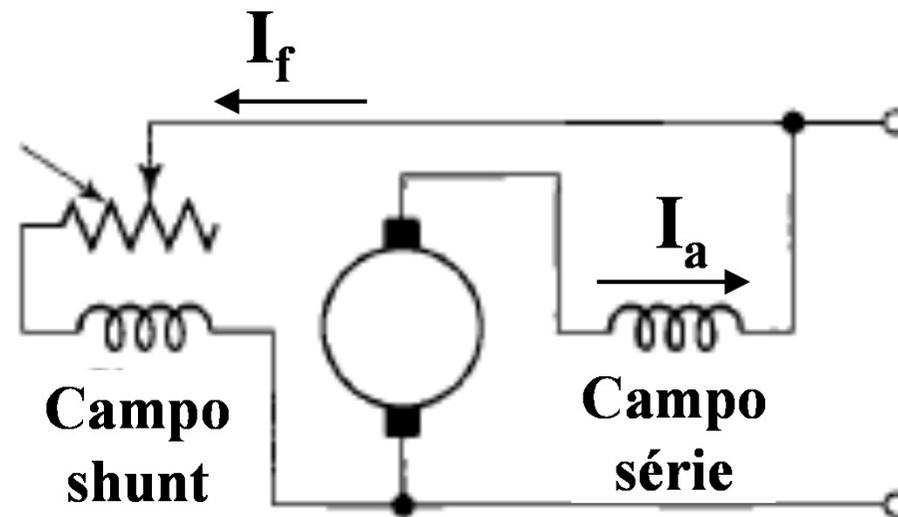
- Os enrolamentos de campo e de armadura são ligados em série.



## Classificação de Máquinas CC

### **Máquina Auto-Excitada Composta:**

- O enrolamento de campo tem duas partes, sendo que uma é ligada em série com a armadura e a outra em paralelo.
- O enrolamento de campo paralelo (shunt) é constituído de um grande número de espiras e drena uma pequena corrente (5% da corrente de armadura nominal).
- O enrolamento de campo série possui menos espiras e drena uma corrente elevada.



---

# **Gerador CC com Excitação Independente**

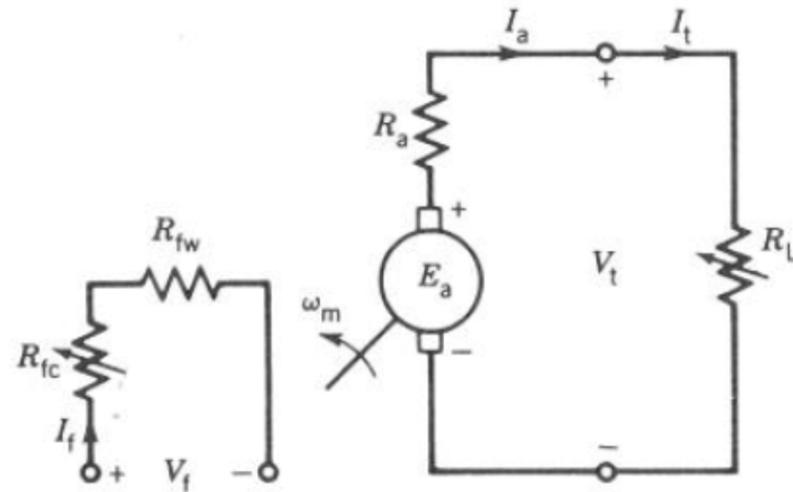
## Gerador CC com Excitação Independente

---

- A máquina CC como gerador é acionada pela turbina (*máquina primária*) e os terminais da armadura são conectados a uma carga.
- Para geradores, é essencial o conhecimento da variação da tensão terminal em função da corrente consumida pela carga (regulação de tensão).
- No gerador CC de excitação independente, o enrolamento de campo é conectado a uma fonte CC externa (bateria, retificador, etc).

# Gerador CC com Excitação Independente

## Modelo de Regime Permanente:



Para o modelo acima, temos que:

$R_{fw}$  – resistência do enrolamento do campo

$R_{fc}$  – resistência variável usada para controlar a corrente de campo

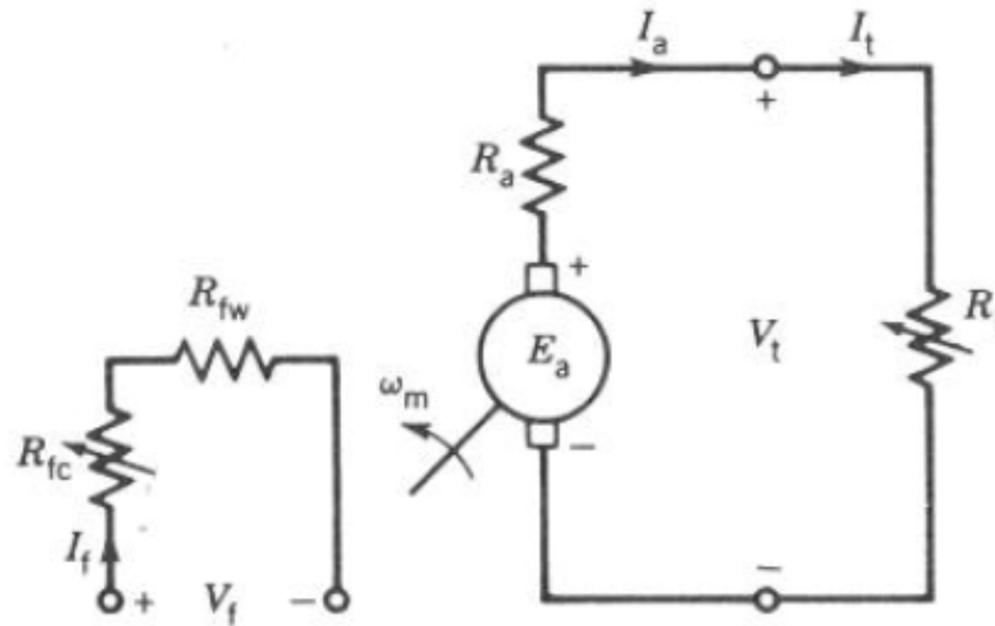
$R_f = R_{fw} + R_{fc}$  – resistência total do circuito de campo

$R_a$  – resistência do circuito de armadura

$R_L$  – resistência da carga

**Obs:** no modelo de regime permanente, as indutâncias dos enrolamentos de campo e armadura não são consideradas.

## Gerador CC com Excitação Independente

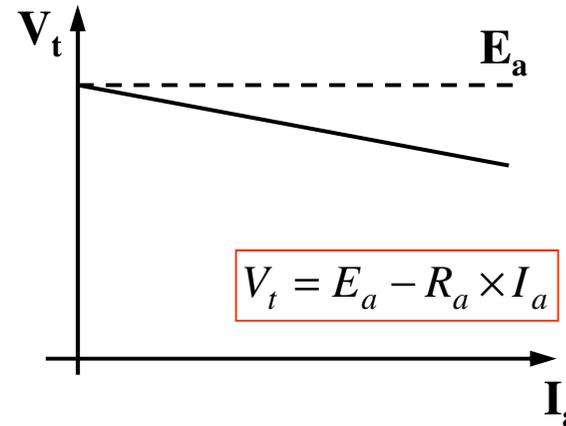


$$\left. \begin{aligned} V_f &= R_f \times I_f \\ E_a &= V_t + R_a \times I_a \\ E_a &= K_a \times \Phi \times \omega_m \\ V_t &= R_L \times I_a \end{aligned} \right\}$$

## Gerador CC com Excitação Independente

- Considerando o modelo anterior, a seguinte modelagem matemática pode ser obtida:

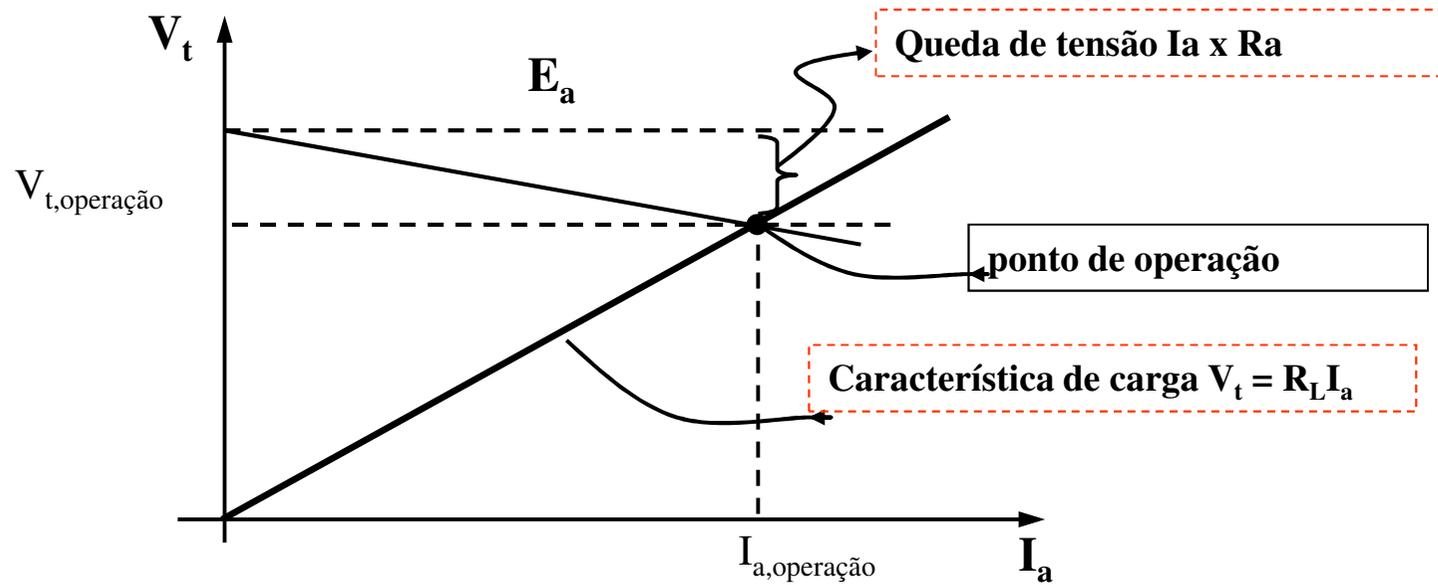
$$\left. \begin{aligned} V_f &= R_f \times I_f \\ E_a &= V_t + R_a \times I_a \\ E_a &= K_a \times \Phi \times \omega_m \\ V_t &= R_L \times I_a \end{aligned} \right\}$$



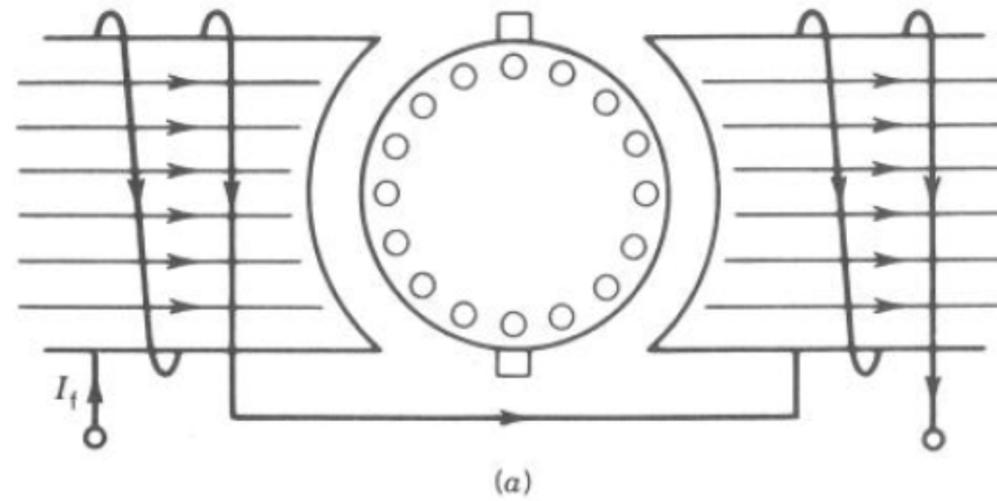
- Considerando que a corrente de carga ( $I_a = I_t$ ) não afeta a distribuição de fluxo ( $\phi$ ), e assim  $E_a$  permanece constante, a tensão terminal do gerador cai linearmente com o aumento da corrente de carga.
- A queda de tensão na armadura ( $R_a I_a$ ) é pequena, uma vez que a resistência do enrolamento ( $R_a$ ) é baixa.
- O gerador CC com excitação independente mantém a tensão terminal aproximadamente constante.

## Gerador CC com Excitação Independente

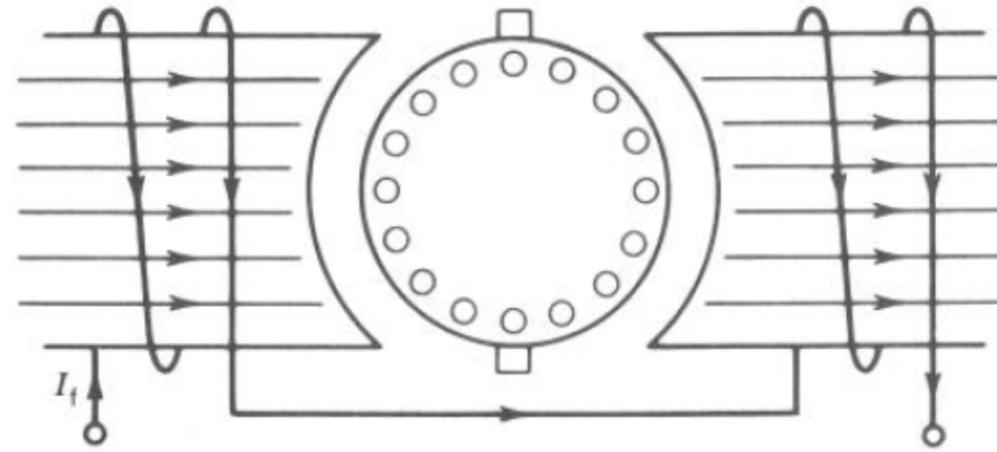
- Para uma dada carga  $R_L$  ( $V_t = R_L I_a$ ) o ponto de operação da máquina é dada pela interseção entre a característica da carga e a curva de regulação de tensão da máquina CC ( $V_t$  versus  $I_a$ ).



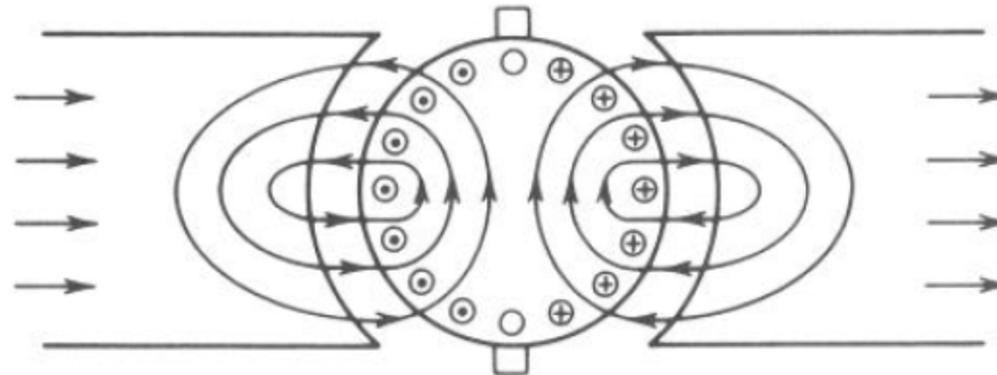
## Gerador CC com Excitação Independente – Reação de Armadura



# Gerador CC com Excitação Independente – Reação de Armadura

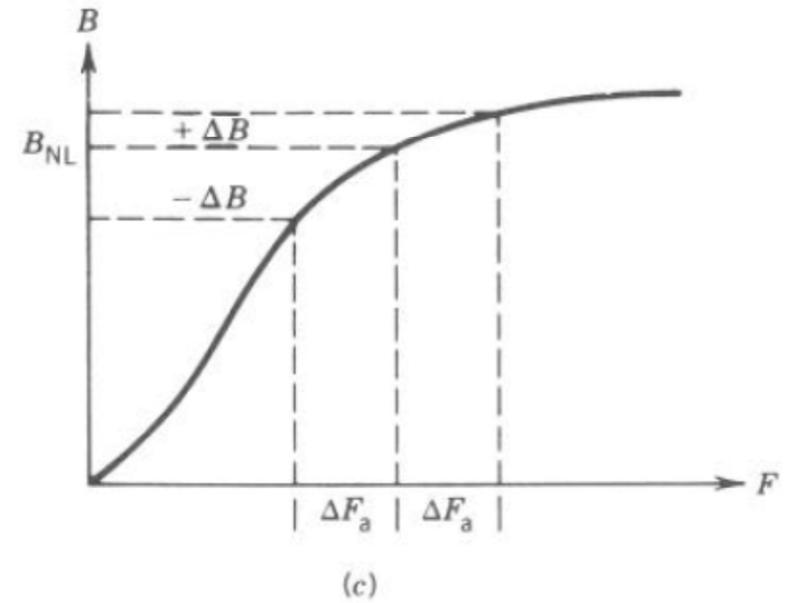
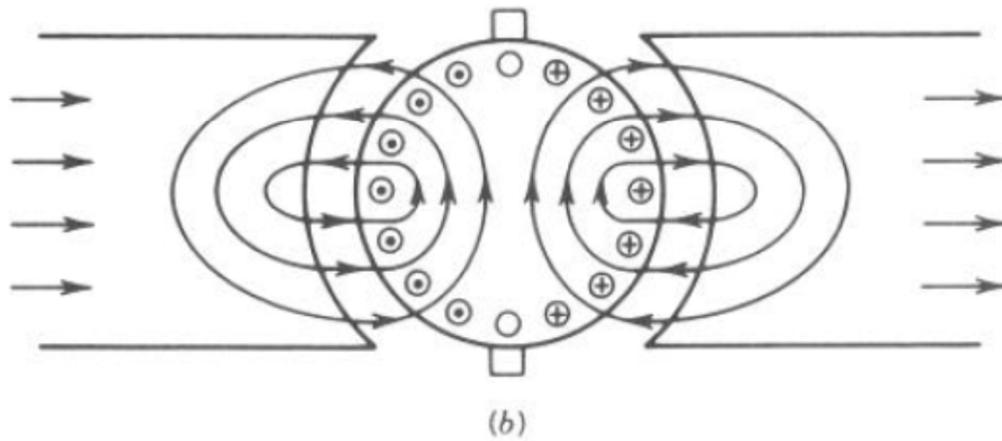
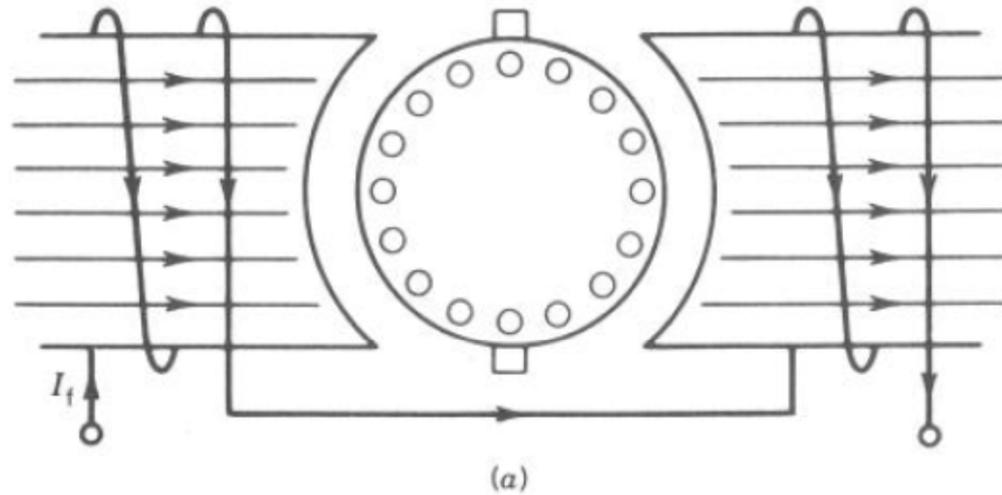


(a)

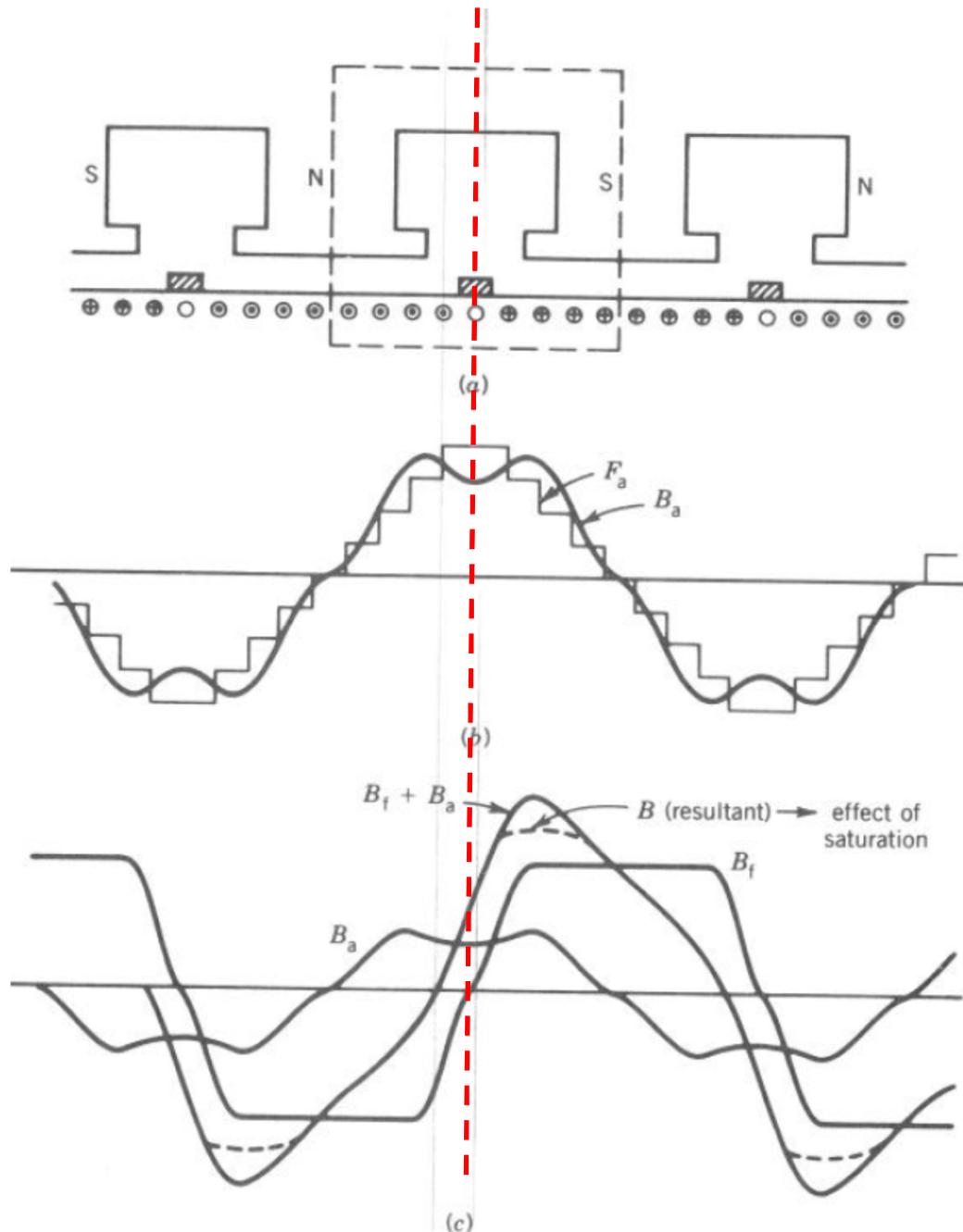


(b)

# Gerador CC com Excitação Independente – Reação de Armadura



# Gerador CC com Excitação Independente – Reação de Armadura



Obs:

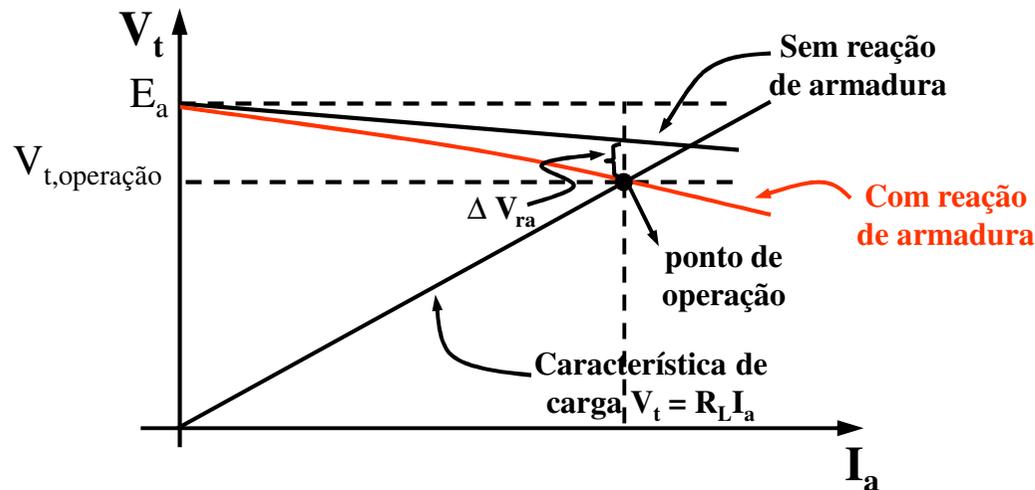
- A reação de armadura diminui o campo efetivo (efeito desmagnetizante).
- A reação de armadura também desloca a zona neutra do campo (antes sobre o eixo q). Isto traz dificuldades e maiores perdas associadas à comutação (faiscamento).

## Gerador CC com Excitação Independente – Reação de Armadura

- Quando percorrido por corrente (da carga) o enrolamento de armadura produz uma força magnetomotriz no eixo  $q$ , e portanto, uma distribuição própria de fluxo magnético.
- Com isso, a distribuição de fluxo original, produzida pelo enrolamento de campo, será modificada.
- Metade da região polar sofrerá magnetização adicional, e a outra metade será parcialmente desmagnetizada pelo campo contrário da armadura.
- Com isso, metade da região polar exposta ao fluxo adicional da armadura poderá saturar.
- O efeito líquido, portanto, é traduzido como uma diminuição do fluxo por pólo, *i.e.*, reação da armadura representa um efeito desmagnetizante na máquina.

## Gerador CC com Excitação Independente – Reação de Armadura

- Este efeito desmagnetizante cresce com o aumento da corrente de armadura (corrente de carga).
- A reação da armadura resulta em uma queda de tensão adicional na curva de regulação de tensão da máquina ( $V_t \times I_a$ ) que cresce não linearmente com o aumento de  $I_a$ .



- A reação de armadura, para uma dada corrente  $I_a$ , provoca uma diminuição (desmagnetização) do fluxo de campo ( $\phi$ ), provocando, então, uma diminuição da tensão de armadura ( $E_a = K_a \phi \omega_m$ ), que será imposta sobre a tensão terminal ( $V_t = E_a - R_a I_a - \Delta V_{ra}$ )

## Gerador CC com Excitação Independente – Reação de Armadura

- O efeito líquido da reação de armadura pode ser traduzido (imaginado/interpretado) como uma diminuição da corrente de campo, ou seja:

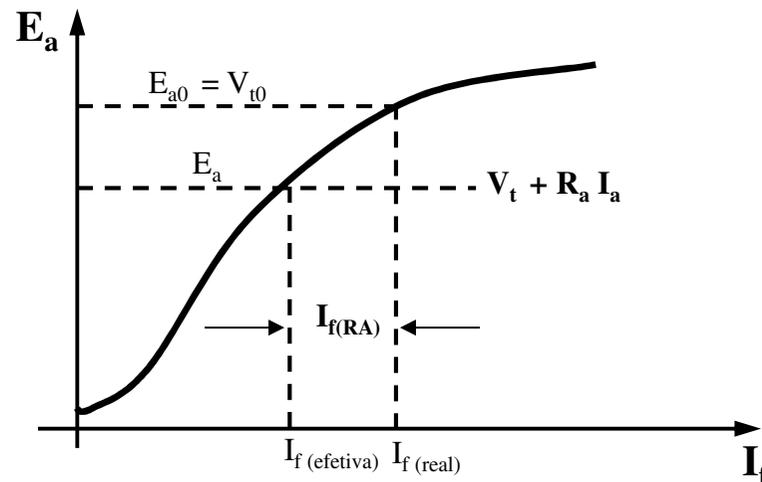
$$I_{f(\text{efetiva})} = I_{f(\text{real})} - I_{f(\text{RA})}$$

sendo:

$I_{f(\text{real})}$  – corrente que percorre o enrolamento de campo

$I_{f(\text{efetiva})}$  – corrente que produz o fluxo líquido no eixo d.

$I_{f(\text{RA})}$  – é a reação de armadura traduzida como uma corrente desmagnetizante no enrolamento de campo.

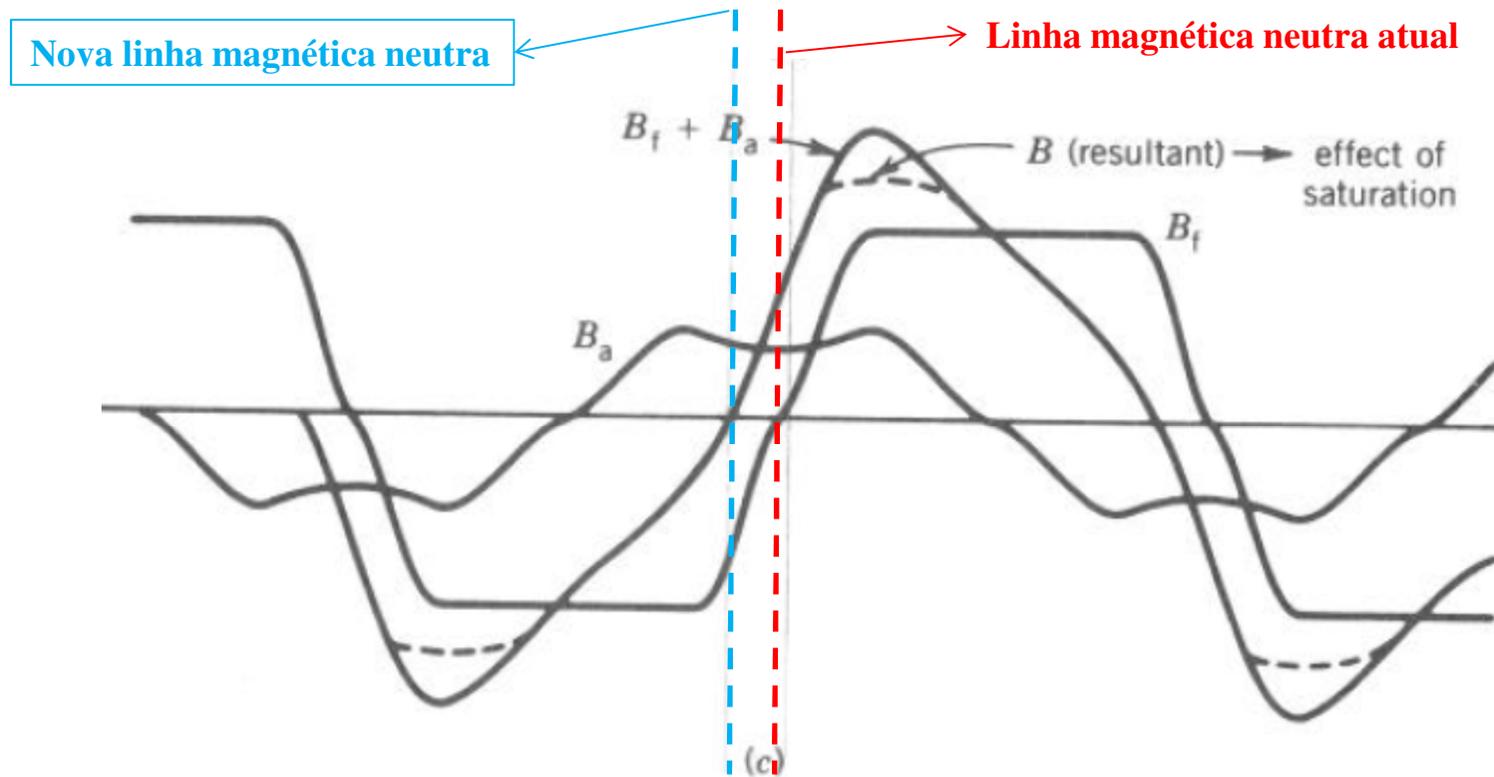


## Gerador CC com Excitação Independente – Reação de Armadura

Além de produzir um efeito desmagnetizante a reação de armadura também desloca a zona neutra do campo (antes sobre o eixo q), isto traz dificuldades e maiores perdas associadas à comutação (faiscamento).

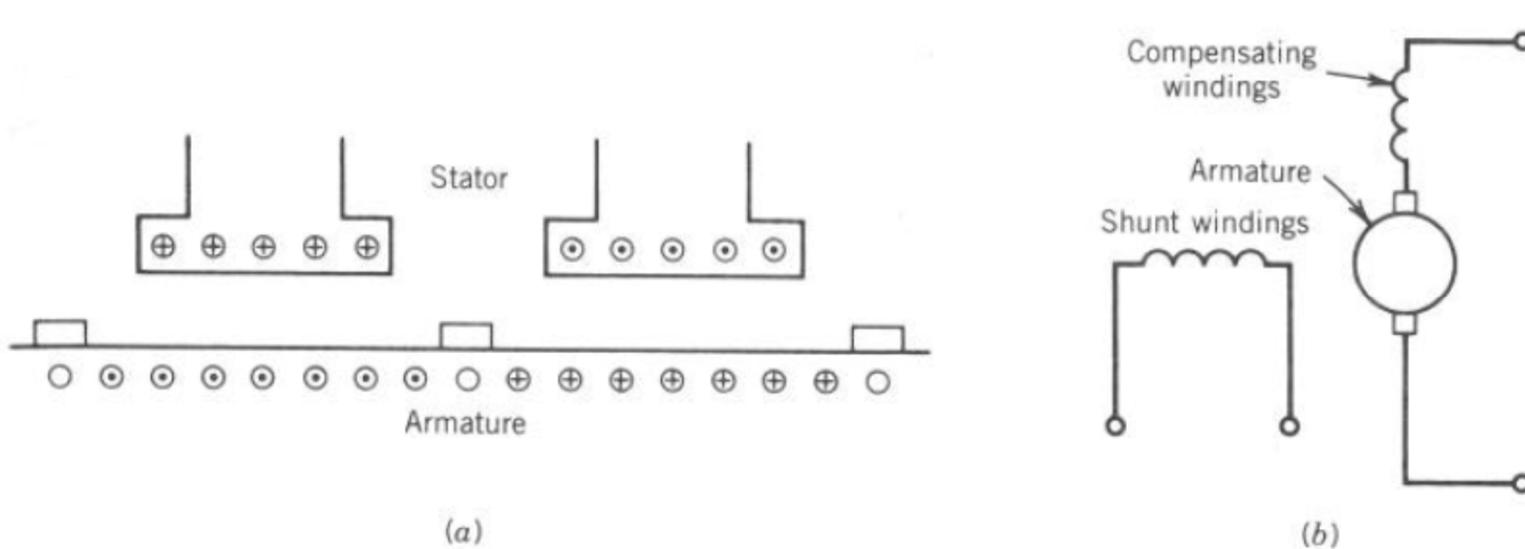
**Solução:**

**Pequenas máquinas:** deslocamento das escovas buscando a nova zona neutra.



## Gerador CC com Excitação Independente – Reação de Armadura

**Grandes máquinas:** enrolamentos compensadores adicionais visando a anulação (ou diminuição) da reação da armadura. Tais enrolamentos são inseridos nas sapatas polares e conectados em série com o enrolamento da armadura.

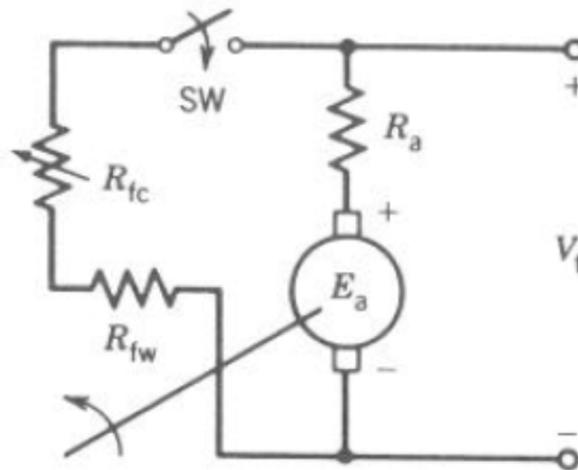


---

# **Gerador CC com Excitação Paralela (Gerador Shunt)**

## Gerador CC com Excitação Paralela (Gerador Shunt)

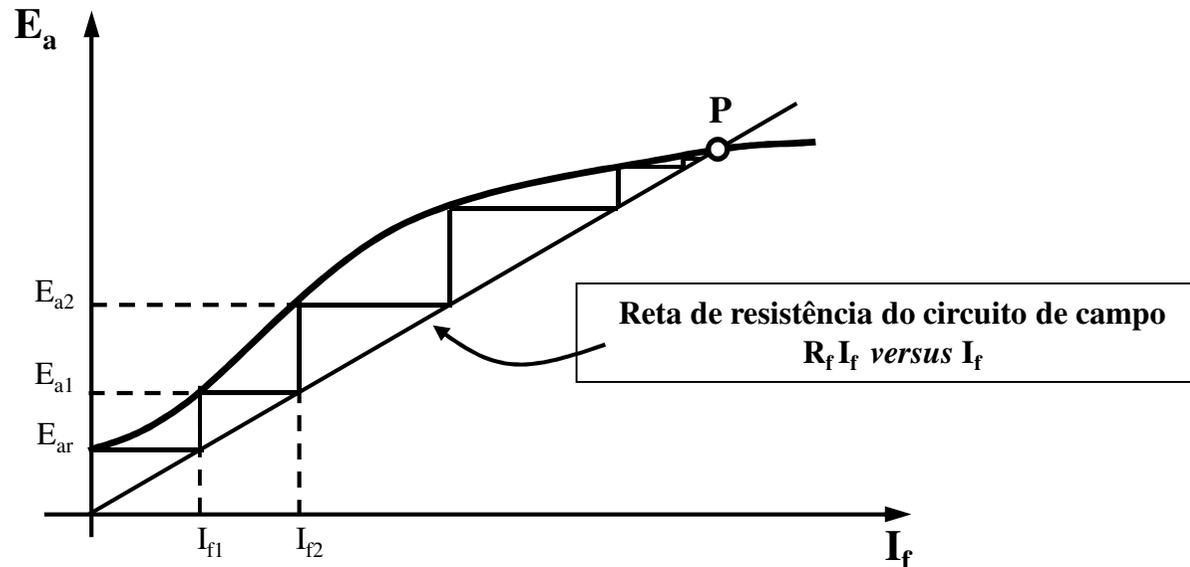
- No gerador shunt, o enrolamento de campo é conectado em paralelo com a armadura.
- Com isso, a corrente de campo é fornecida pela armadura (tensão induzida), ou seja, a máquina é auto-excitada.



- Considerando que uma máquina primária acione o eixo, algum magnetismo residual deve existir na armadura para que haja uma corrente de campo inicial no momento do fechamento da chave.

## Gerador CC com Excitação Paralela (Gerador Shunt)

- Pode-se entender o processo de excitação do gerador CC paralelo através da curva de magnetização e da reta de resistência do circuito de campo.



- Existindo um magnetismo residual ( $\phi_r$ ), surgirá uma tensão de armadura residual ( $E_{ra}$ ) quando a máquina estiver girando.
- Quando a chave for fechada surgirá uma corrente de campo inicial produzida por  $E_{ra}$ .
- O enrolamento de campo passará a produzir fluxo, aumentando a tensão induzida o que, por sua vez, aumentará a corrente de campo.
- Esse processo se repete até encontrar o ponto de equilíbrio  $P$ .

## Gerador CC com Excitação Paralela (Gerador Shunt)

- Se o fluxo de campo estiver no mesmo sentido do campo residual (magnetização adicional) a tensão de armadura crescerá, senão haverá a desmagnetização total da armadura e a tensão de armadura irá para zero, assim como a corrente de campo.
- A repetição desse processo (fluxo aditivo) tornará a tensão de armadura cada vez maior, e, conseqüentemente, a corrente de campo cada vez maior.
- O ponto de equilíbrio se dará na intersecção entre a curva de magnetização e a reta de resistência do circuito de campo, assumindo-se que a queda de tensão em  $R_a$  é desprezível (*i.e.*,  $R_a \ll R_f$ ).
- Assim, o ponto de equilíbrio final depende da resistência total do circuito de campo. Para que se tenha controle sobre a tensão de armadura e a corrente de campo usualmente insere-se uma resistência de controle ( $R_{fc}$ ) em série com o enrolamento de campo.
- Portanto, a resistência total do circuito de campo é:

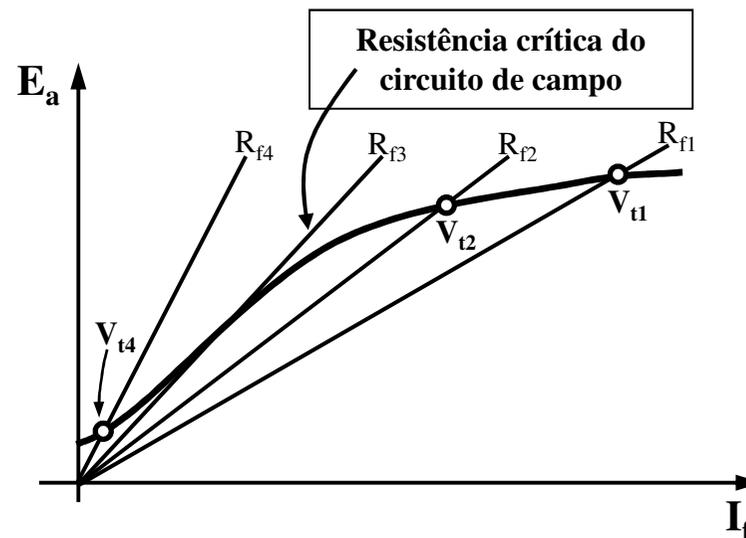
$$R_f = R_{fw} + R_{fc}$$

**Obs:** a reta de carga do circuito de campo relaciona  $R_f I_f$  com  $I_f$ .

## Gerador CC com Excitação Paralela (Gerador Shunt)

### Efeito da variação da resistência do circuito de campo:

- Para valores baixos de  $R_f$ , a tensão de armadura de equilíbrio encontrará valores mais elevados (pontos  $V_{t1}$  e  $V_{t2}$ ).
- Para valores altos de  $R_f$ ,  $E_a$  terá valores de equilíbrio muito baixos (ponto  $V_{t4}$ ).
- Existe um valor para  $R_f$ , chamado de **resistência crítica** do circuito de campo ( $R_{f3}$ ), tal que a reta de resistência de campo coincide com a parte linear da curva de magnetização de forma que não exista um ponto de equilíbrio com produção significativa de tensão.



## Gerador CC com Excitação Paralela (Gerador Shunt)

- Ao processo de energização do gerador CC com excitação paralela dá-se o nome de **escorvamento**.
  
- Assim, são necessárias três condições para que o gerador CC com excitação paralela possa fornecer valores adequados de tensão de armadura:
  - a) **Deve existir magnetismo residual na armadura;**
  - b) **O fluxo produzido pela corrente de campo deve ser aditivo em relação ao magnetismo residual;**
  - c) **A resistência do circuito de campo deve ser menor que a resistência crítica.**

## Gerador Shunt: Características de Regulação de Tensão

- A partir do modelo do gerador paralelo abaixo, as equações que descrevem a operação em regime permanente dessa máquina são:

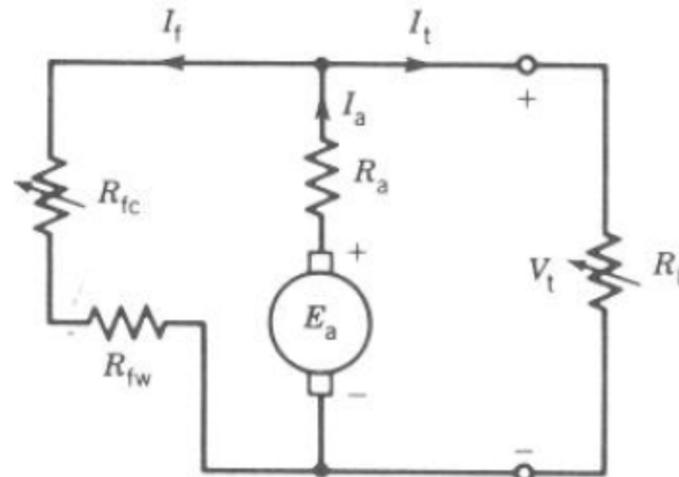
$$E_a = V_t + R_a \times I_a \quad \text{ou} \quad V_t = E_a - R_a \times I_a$$

$$E_a = K_a \Phi \omega_m \rightarrow \Phi \text{ em função de } I_f$$

$$V_t = R_f \times I_f = (R_{fw} + R_{fc}) \times I_f$$

$$V_t = R_L \times I_L$$

$$I_a = I_f + I_L$$

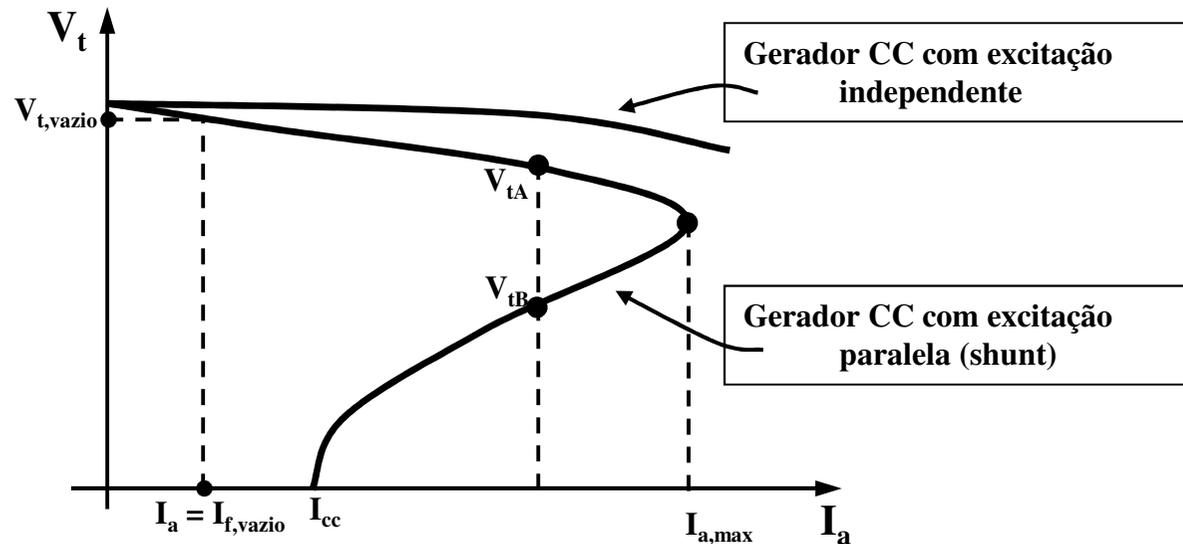


## Gerador Shunt: Características de Regulação de Tensão

- A tensão terminal do gerador decairá com o aumento da corrente de carga, por duas razões:
  1. **Queda de tensão no enrolamento de armadura ( $R_a I_a$ );**
  2. **Queda de tensão associada ao efeito desmagnetizante da reação de armadura ( $\Delta V_{RA}$ )**
  
- A curva de regulação de tensão do gerador shunt tem característica altamente não linear, uma vez que a queda de tensão na armadura provoca diminuição na corrente de campo diminuindo a intensidade do campo magnético no entreferro ( $E_a = K_a \phi \omega_m$ ), o que provoca tensão de armadura ainda menor.

## Gerador Shunt: Características de Regulação de Tensão

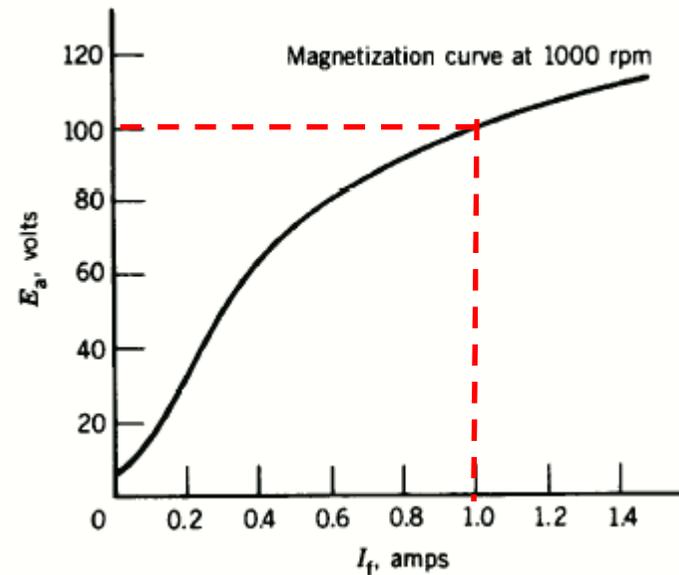
- O gráfico formado pelo conjunto de pontos define a curva de regulação de tensão do gerador shunt.



- O gerador shunt apresenta queda de tensão mais acentuada comparado ao gerador com excitação independente. Isto porque na excitação independente, a corrente de campo é mantida constante, enquanto que no shunt, a queda de tensão na armadura reduz a corrente de campo, o que provoca queda adicional na tensão de armadura.

## Exercício: Gerador CC com Excitação Independente

Considere um gerador CC de 12 kW, 100V, 1000 rpm, conectado na configuração de excitação independente com  $R_a = 0,1\Omega$  e 1200 espiras por polo. A corrente de campo nominal é 1 A. A característica de magnetização é dada a seguir.



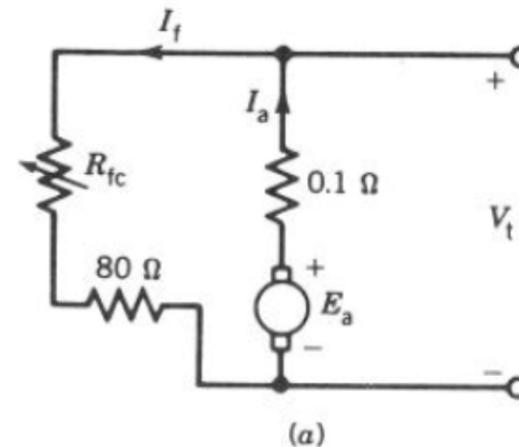
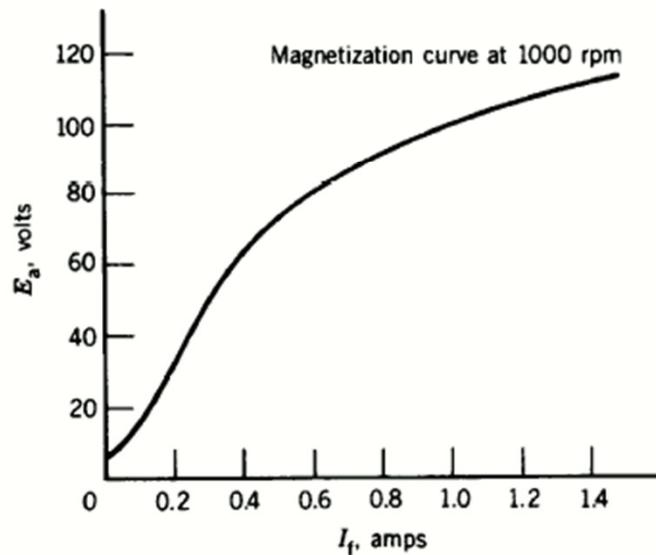
Considerando que a máquina opera com 1A de corrente de campo nominal e a 1000 rpm, pede-se:

- A tensão terminal em vazio e a plena carga, desprezando a reação da armadura.
- Se a reação de armadura for 0,06 A (corrente de campo) na condição de plena carga:
  - Determine tensão terminal à plena carga
  - Determine a corrente de campo equivalentes para fazer com que a tensão terminal seja 100V à plena carga.

## Exercício: Gerador Shunt

Gerador CC com excitação paralela de 12 kW, 100 V, 1000 rpm, tem  $R_a = 0,1 \Omega$ ,  $R_{fw} = 80 \Omega$ ,  $N_f = 1200$  espiras/pólo. A corrente nominal de campo ( $I_{f,N}$ ) é igual a 1A. A curva de magnetização da máquina é dada abaixo.

- Determine o valor máximo da tensão gerada.
- Determine o valor da resistência de controle do circuito de campo ( $R_{fc}$ ), tal que o gerador forneça tensão nominal (100 V).
- Determine o valor da resistência crítica para o circuito de campo.



## Exercício: Gerador Shunt

(a) A tensão máxima ( $E_{a,max}$ ) é gerada para o menor valor da resistência do circuito de campo, *i.e.*,  $R_{fc} = 0$ . A reta de resistência para  $R_f = R_w = 80 \Omega$  pode ser desenhada juntamente com a curva de magnetização. Logo, da curva, temos:

$$E_{a,max} = 111 \text{ V}$$

(b) Supondo queda em  $R_a$  desprezível, temos que  $V_t \approx E_a = 100 \text{ V}$ . Desenhando-se a reta de resistência passando por esse ponto, temos que:

$$I_f = 1 \text{ A}$$

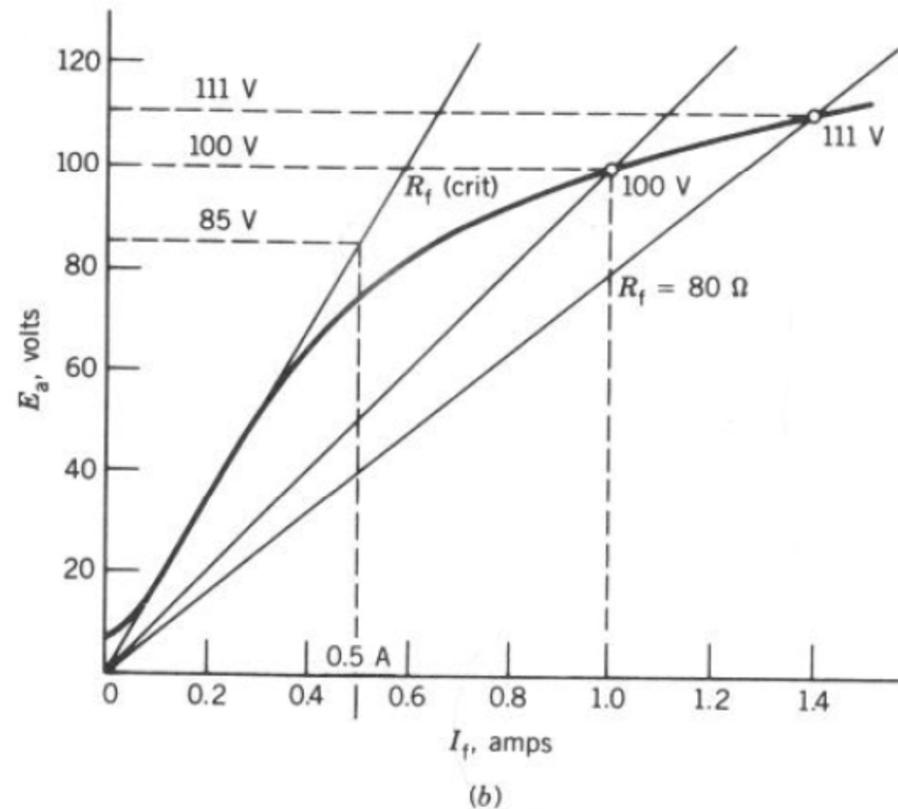
$$R_f = \frac{100}{1} = 100 \Omega = R_{fw} + R_{fc}$$

$$R_{fc} = 100 - 80 = 20 \Omega$$

(c) Desenhando-se a reta de resistência crítica passando pela parte linear da curva, temos que:

$$R_{f(crit)} = \frac{85}{0,5} = 170 \Omega$$

$$R_{fc} = 170 - 80 = 90 \Omega$$



## Próxima Aula

---

- Gerador CC Composto
- Gerador Série
- Interpolos