

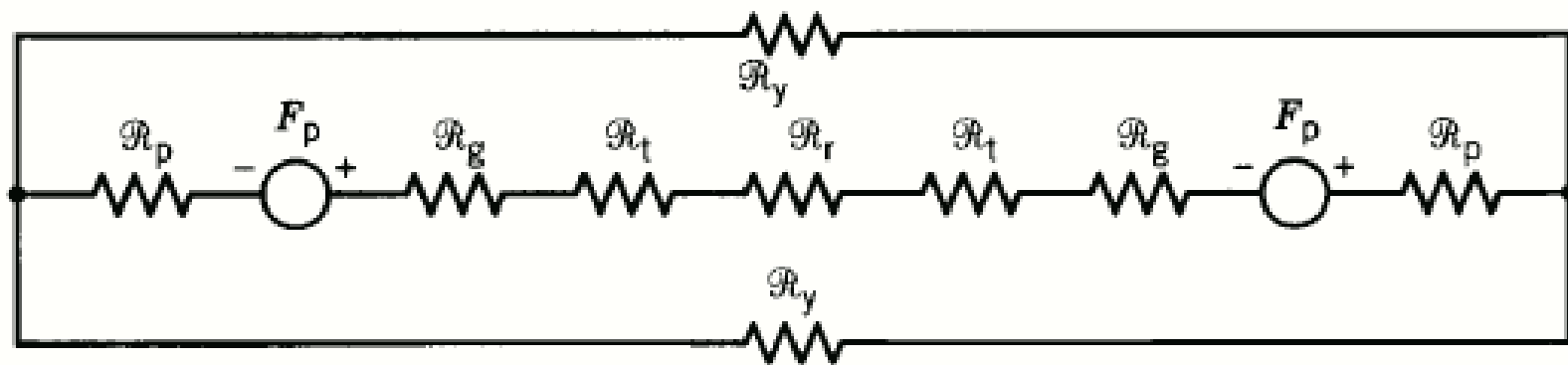
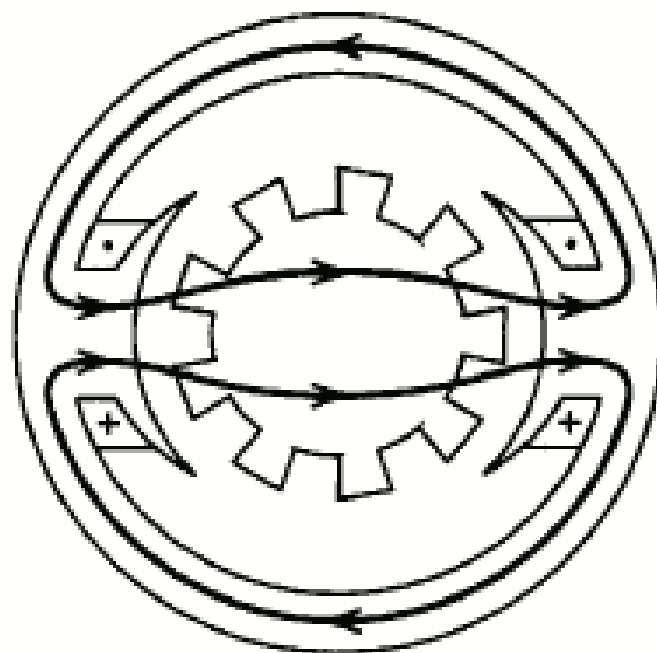
SEL 329 – CONVERSÃO ELETROMECAÂNICA DE ENERGIA

Aula 14

Aula de Hoje

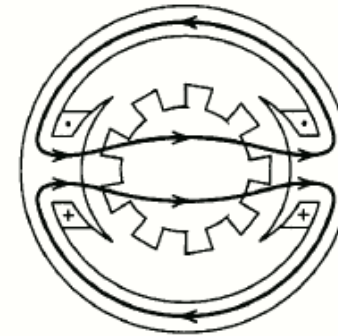
- Curva de magnetização
- Classificação das máquinas CC
- Geradores CC

Curva de Magnetização



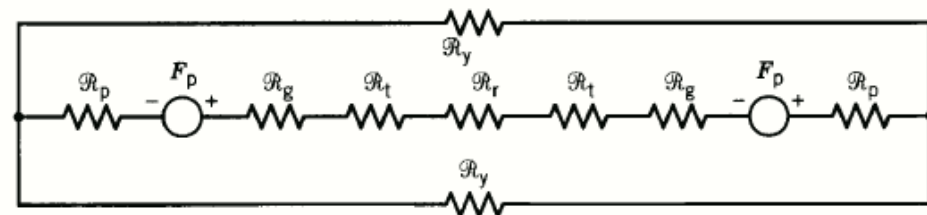
Curva de Magnetização

- O fluxo por pólo de uma máquina CC depende da excitação do enrolamento de campo ($\mathcal{F}_p = Ni \text{ A.esp}$) e da relutância do caminho magnético ($\mathcal{R}$);
- Para uma máquina de dois pólos o fluxo atravessa o seguinte caminho magnético:



(a)

1. *Atravessa o pólo*
2. *Atravessa o entreferro*
3. *Atravessa os dentes do rotor*
4. *Atravessa o núcleo do rotor*
5. *Atravessa os dentes do rotor*
6. *Atravessa o entreferro*
7. *Atravessa o pólo oposto*
8. *Retorna através do núcleo do estator*

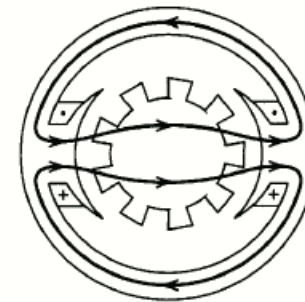


Curva de Magnetização

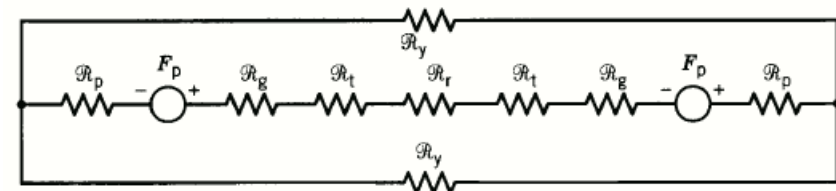
➤ Assim, o fluxo por pólo é calculado por:

$$\Phi = \frac{2\mathcal{F}_p}{2\mathcal{R}_p + 2\mathcal{R}_g + 2\mathcal{R}_t + \mathcal{R}_r + \mathcal{R}_y / 2}$$

$$\Phi = \frac{2Ni_f}{2\mathcal{R}_p + 2\mathcal{R}_g + 2\mathcal{R}_t + \mathcal{R}_r + \mathcal{R}_y / 2}$$



(a)



Curva de Magnetização

- Para baixos valores de fluxo, a relutância do núcleo é significativamente menor que a do entreferro, restando somente a relutância do entreferro:

$$\Phi = \frac{2Ni_f}{\cancel{2\mathcal{R}_p} + 2\mathcal{R}_g + \cancel{2\mathcal{R}_t} + \cancel{\mathcal{R}_r} + \cancel{\mathcal{R}_y} / 2} \quad \longrightarrow \quad \Phi = \frac{2Ni_f}{2\mathcal{R}_g}$$

- A relutância do entreferro é constante:

$$\mathcal{R}_g = \frac{g}{\mu_o A}$$

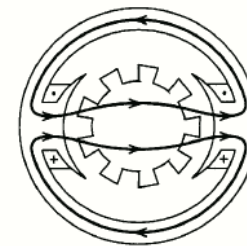
- Assim, a relação $\Phi \times \mathcal{F}_p$ (ou $E_a \times I_f$) é linear (para baixos valores de fluxo)

Curva de Magnetização – para baixos valores de fluxo

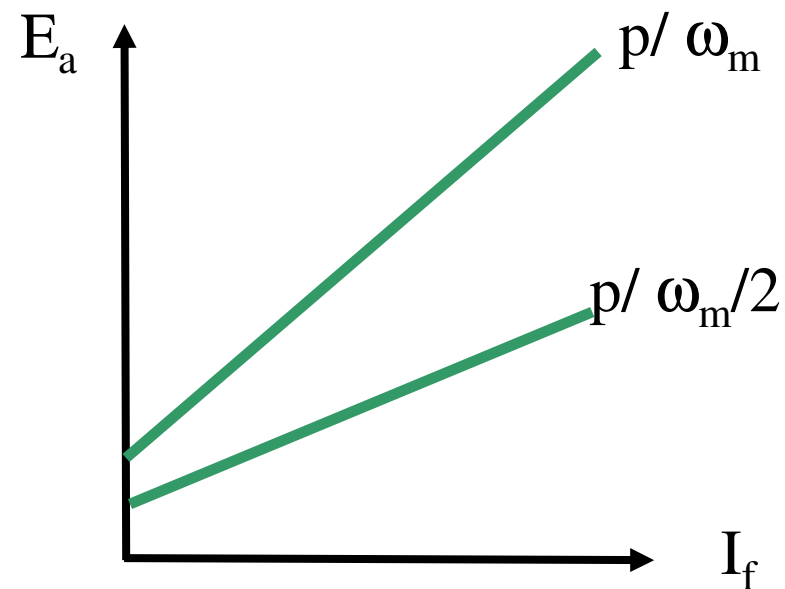
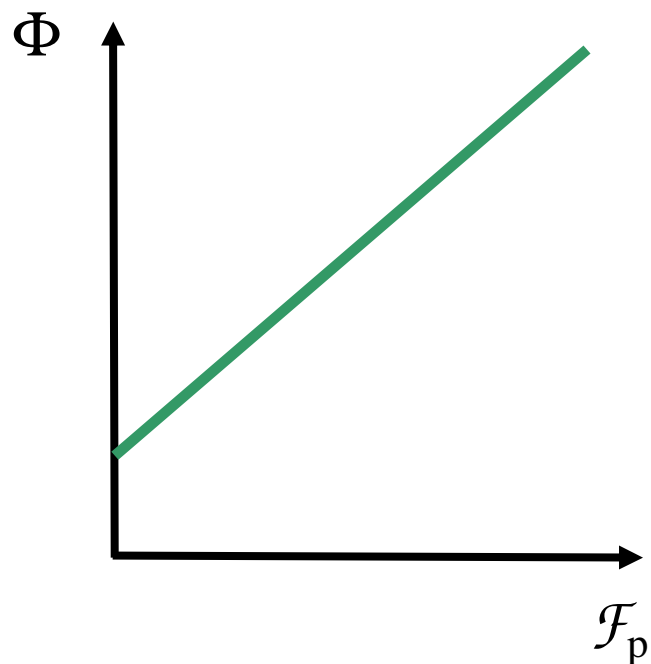
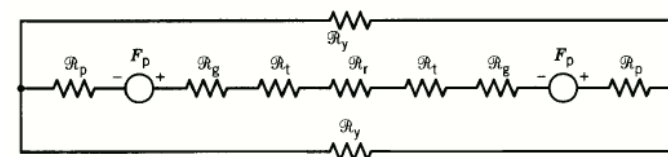
$$\Phi = \frac{\mathcal{F}_p}{\mathcal{R}_g} \quad \text{ou} \quad \frac{E_a}{K_a \omega_m} = \frac{NI_f}{\mathcal{R}_g}$$

daí:

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



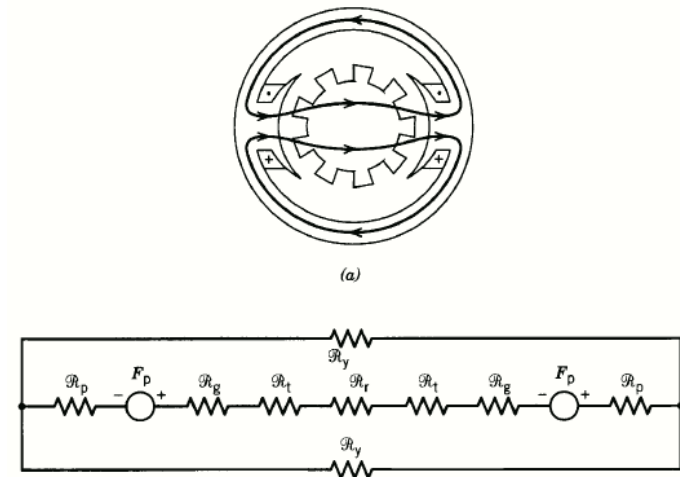
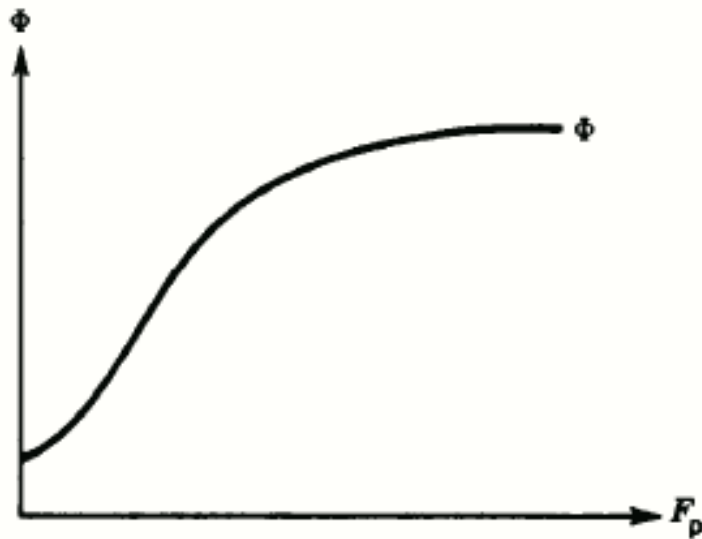
(a)



Obs.: depende da velocidade

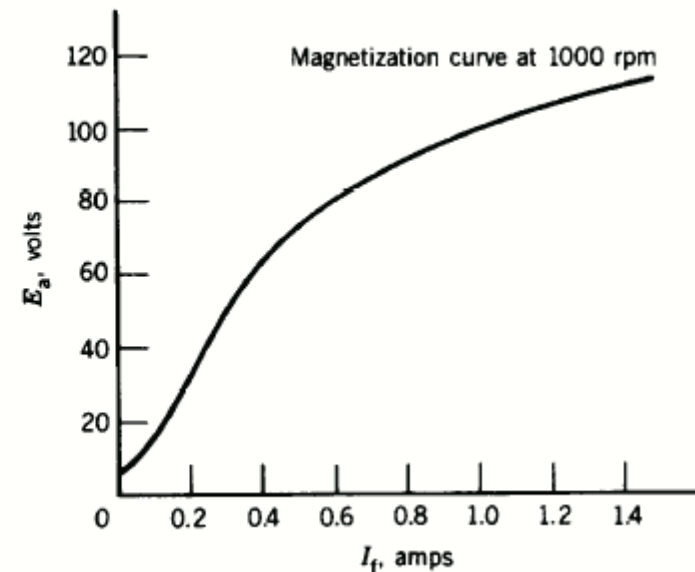
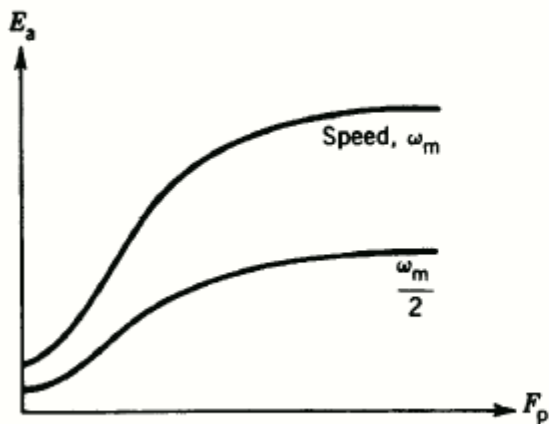
Curva de Magnetização – para elevados valores de fluxo

- 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 ($\mathcal{F}_p$ 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.



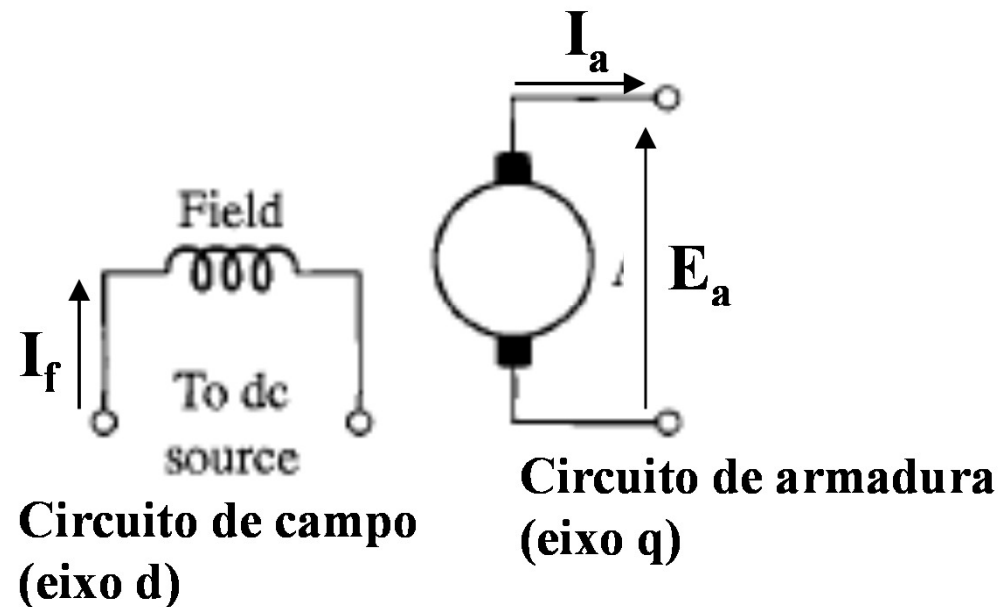
Classificação de Máquinas CC

- 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:

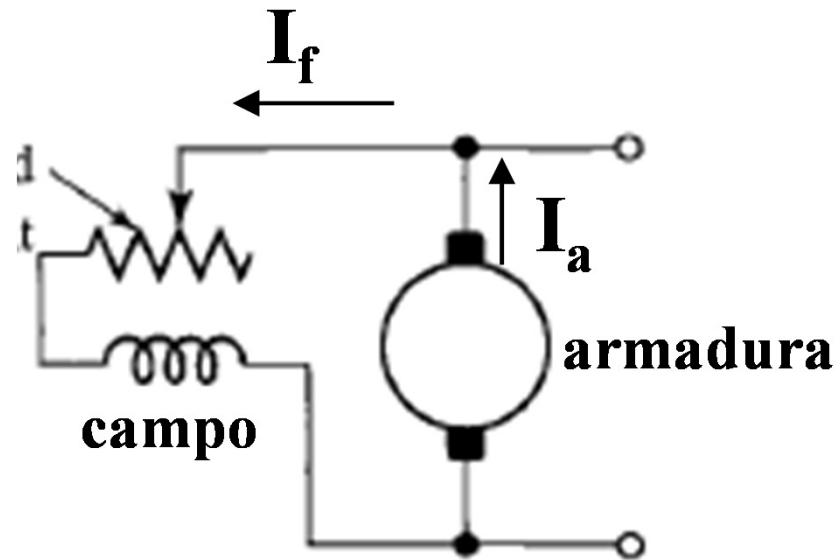
- O enrolamento de campo é alimentado por uma fonte CC separada (externa).
- Máquinas de ímã permanente também são consideradas como máquinas de excitação independente, porém, nesse caso a corrente de campo é constante.



Classificação de Máquinas CC

Máquina Auto-Excitada Paralela (shunt):

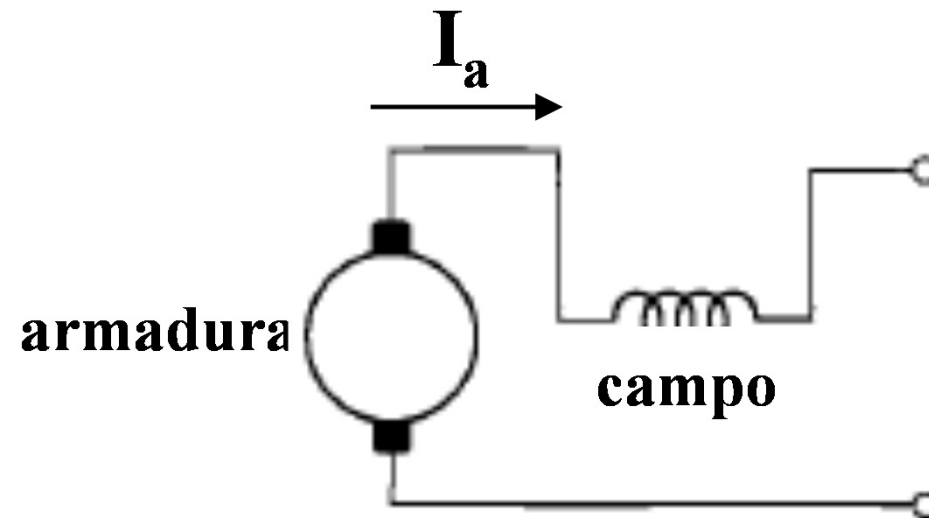
- Os enrolamentos de campo e de armadura são ligados em paralelo.
- Normalmente, um reostato é incluído no circuito de campo para controlar a corrente de campo, e, portanto variar a tensão induzida no circuito de armadura.



Classificação de Máquinas CC

Máquina Auto-Excitada Série:

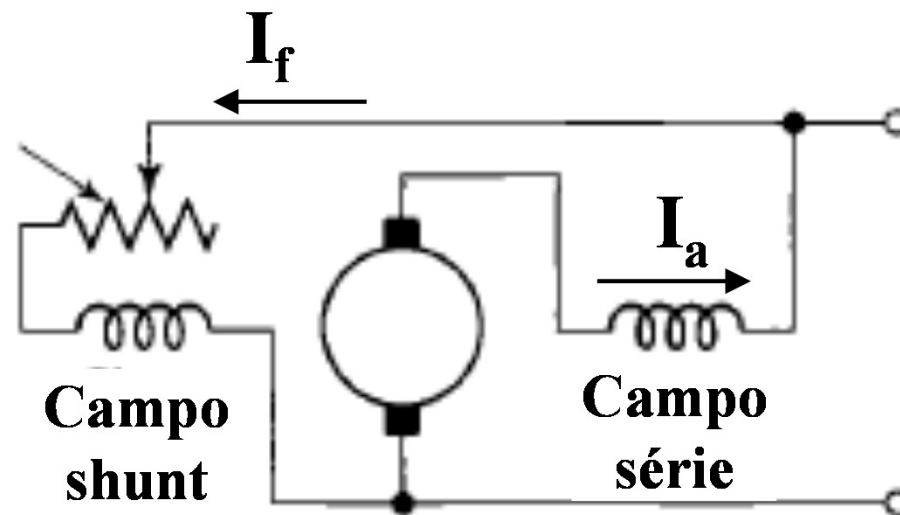
- Os enrolamentos de campo e de armadura são ligados em série.



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.



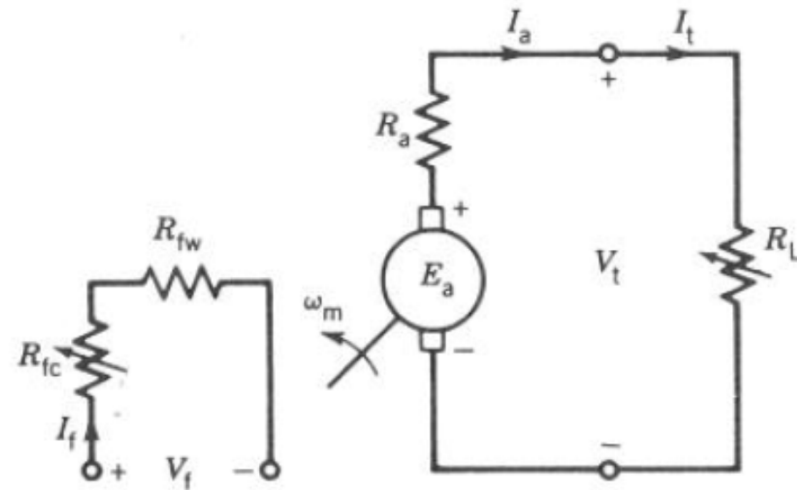
Gerador CC com Excitação Independente

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

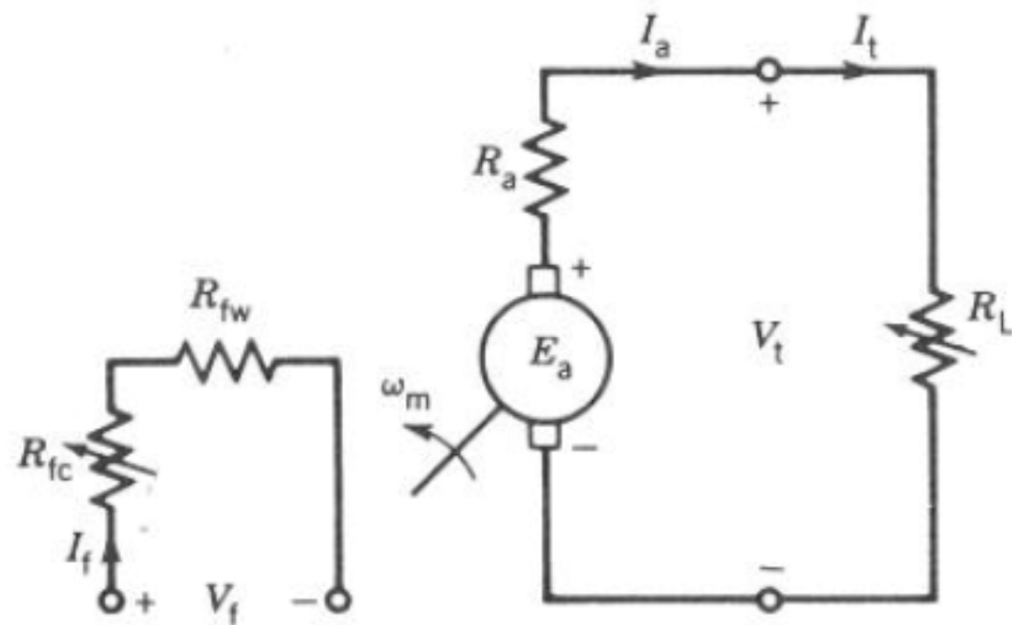
$R_f = R_{fw} + R_{fc}$ – resistência total do circuito de campo

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.

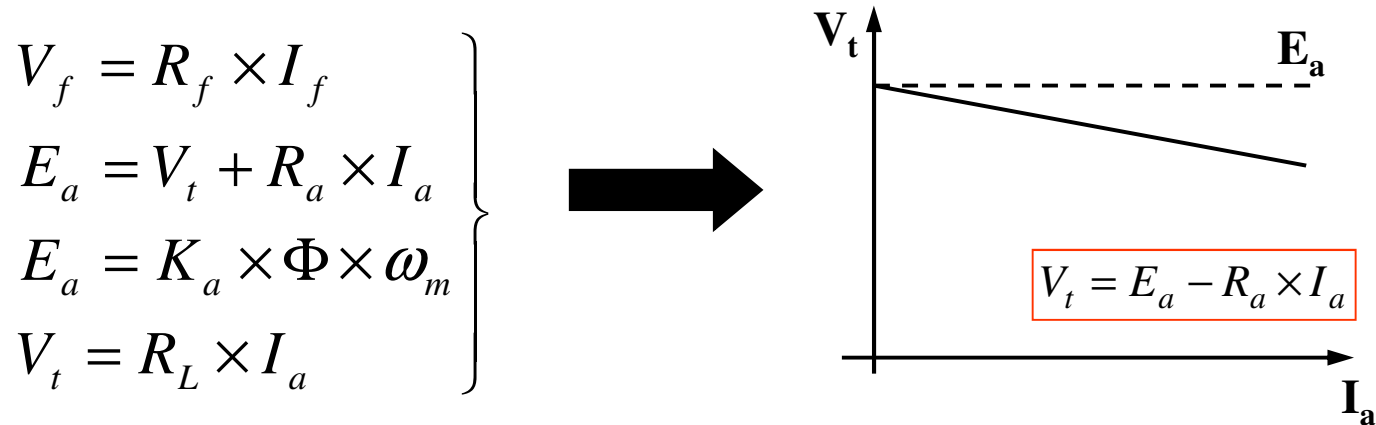
Gerador CC com Excitação Independente



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

Gerador CC com Excitação Independente

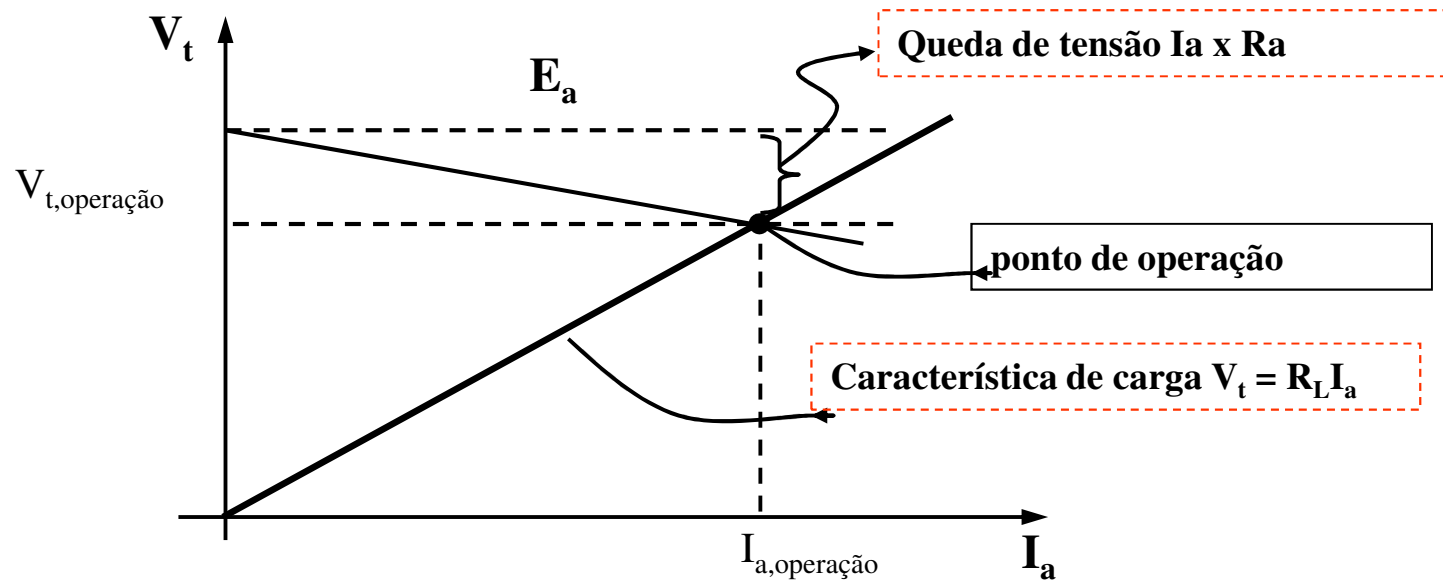
- Considerando o modelo anterior, a seguinte modelagem matemática pode ser obtida:



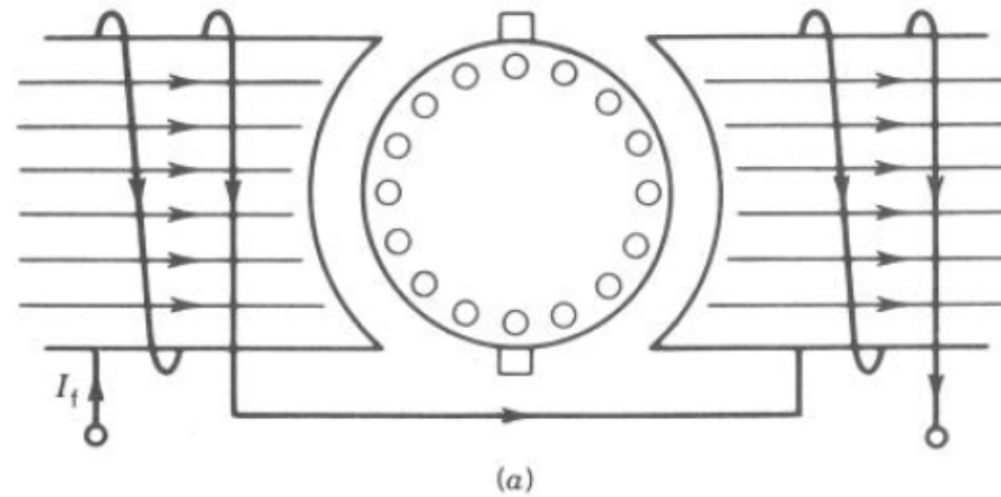
- Considerando que a corrente de carga ($I_a = I_t$) não afeta a distribuição de fluxo (ϕ), e assim E_a permanece constante, a tensão terminal do gerador cai linearmente com o aumento da corrente de carga.
- A queda de tensão na armadura ($R_a I_a$) é pequena, uma vez que a resistência do enrolamento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

Gerador CC com Excitação Independente

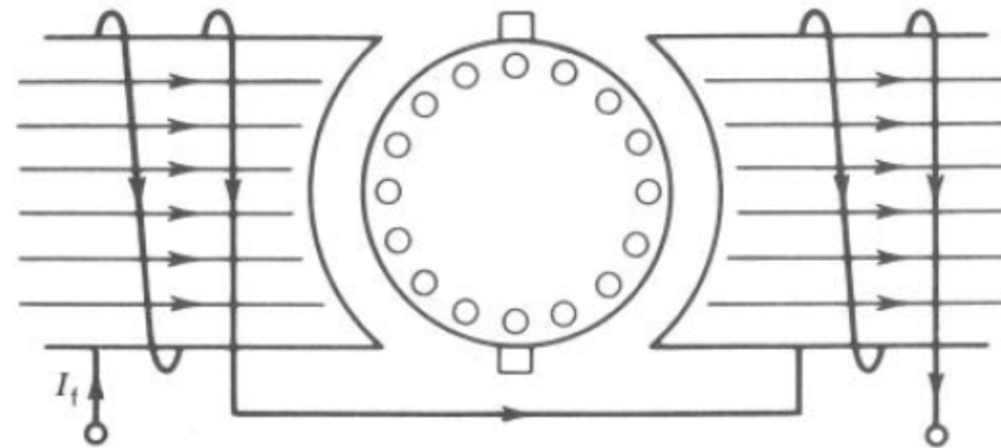
- Para uma dada carga R_L ($V_t = R_L I_a$) o ponto de operação da máquina é dada pela interseção entre a característica da carga e a curva de regulação de tensão da máquina CC (V_t versus I_a).



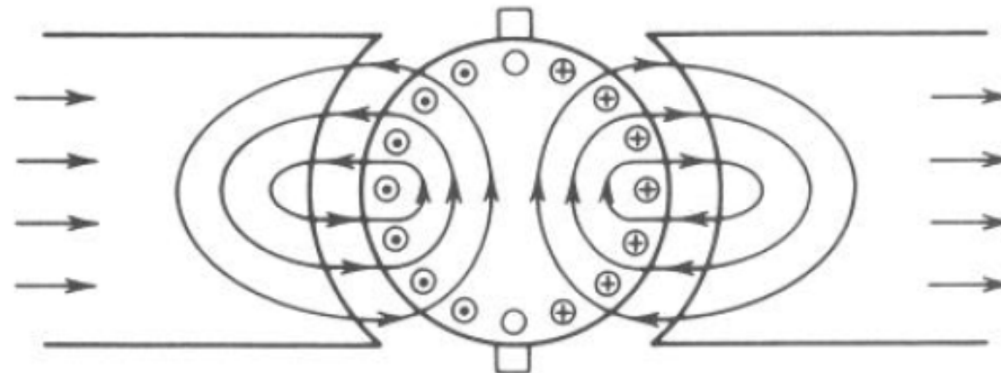
Gerador CC com Excitação Independente – Reação de Armadura



Gerador CC com Excitação Independente – Reação de Armadura

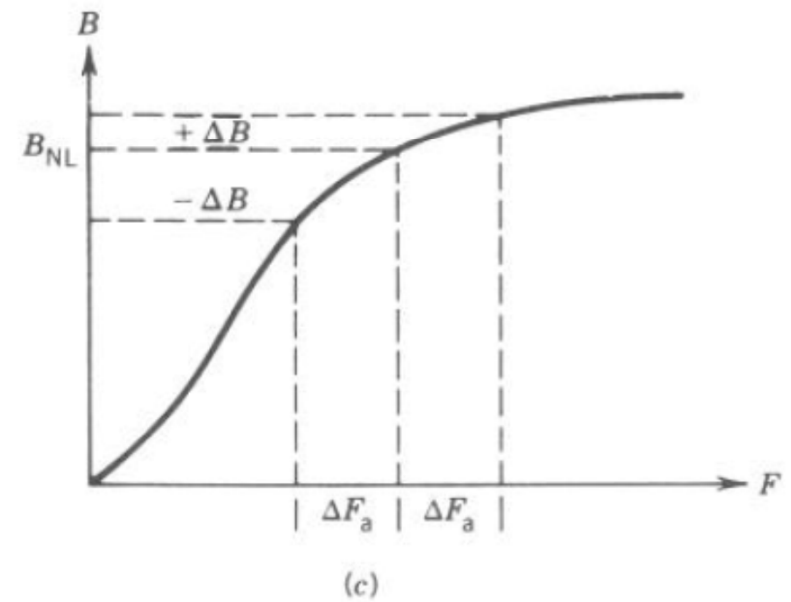
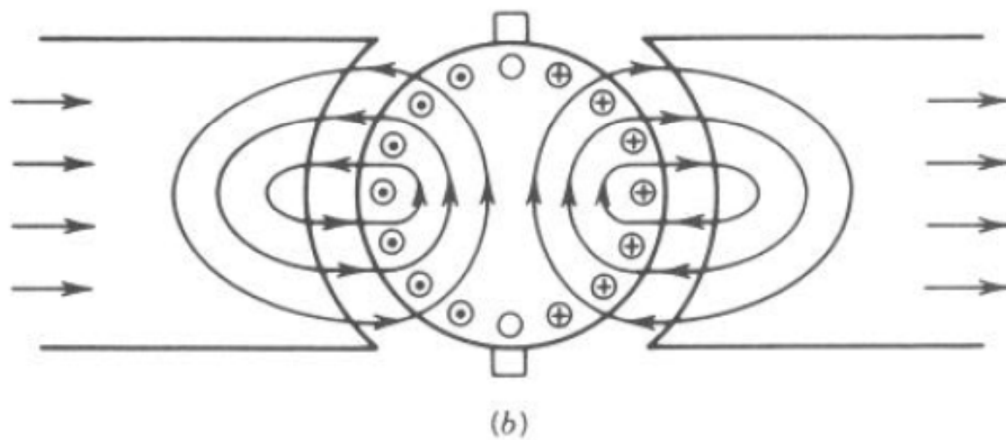
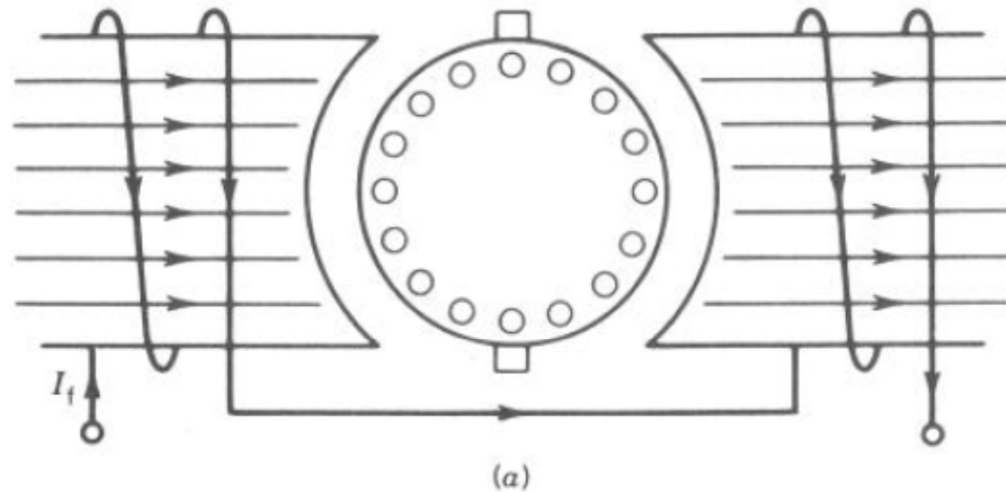


(a)

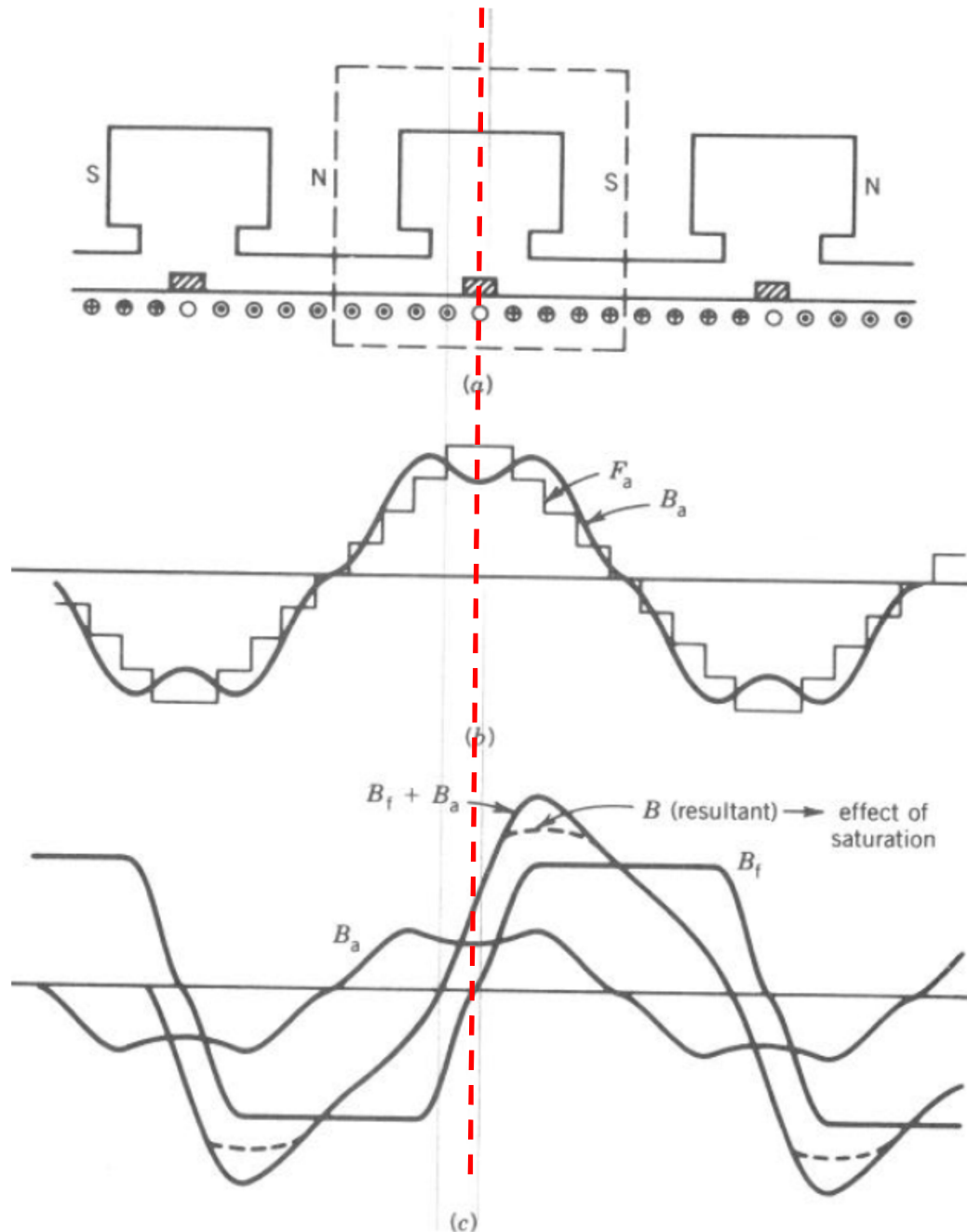


(b)

Gerador CC com Excitação Independente – Reação de Armadura



Gerador CC com Excitação Independente – Reação de Armadura



Obs:

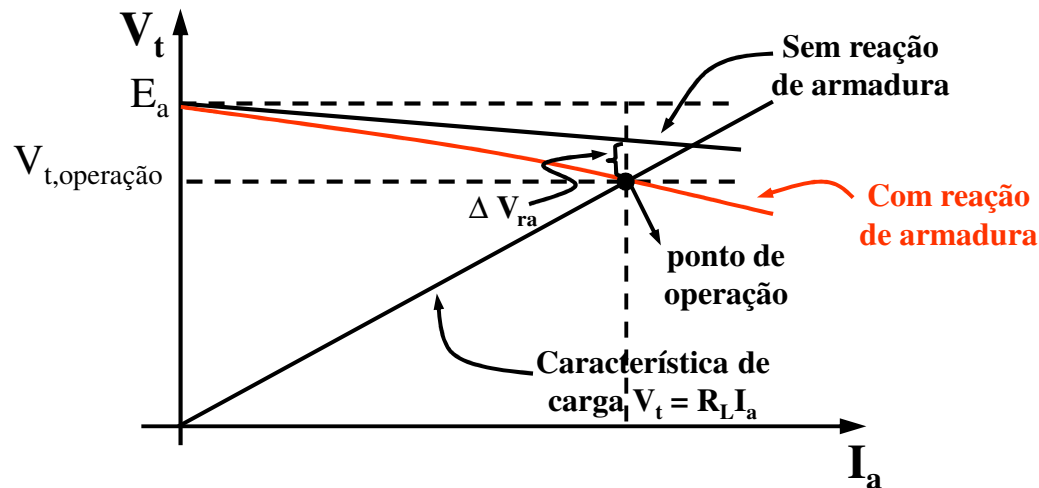
- A reação de armadura diminui o campo efetivo (efeito desmagnetizante).
- A reação de armadura também desloca a zona neutra do campo (antes sobre o eixo q). Isto traz dificuldades e maiores perdas associadas à comutação (fiscamento).

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 (ϕ), 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:

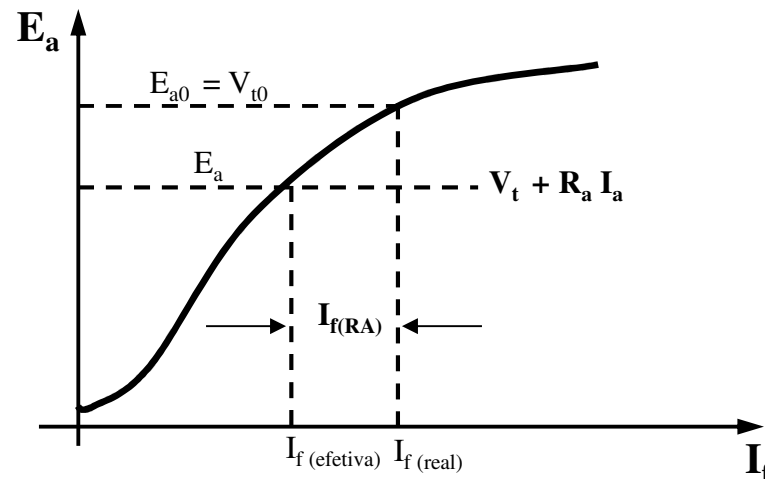
$$I_{f \text{ (efetiva)}} = I_{f \text{ (real)}} - I_{f \text{ (RA)}}$$

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.

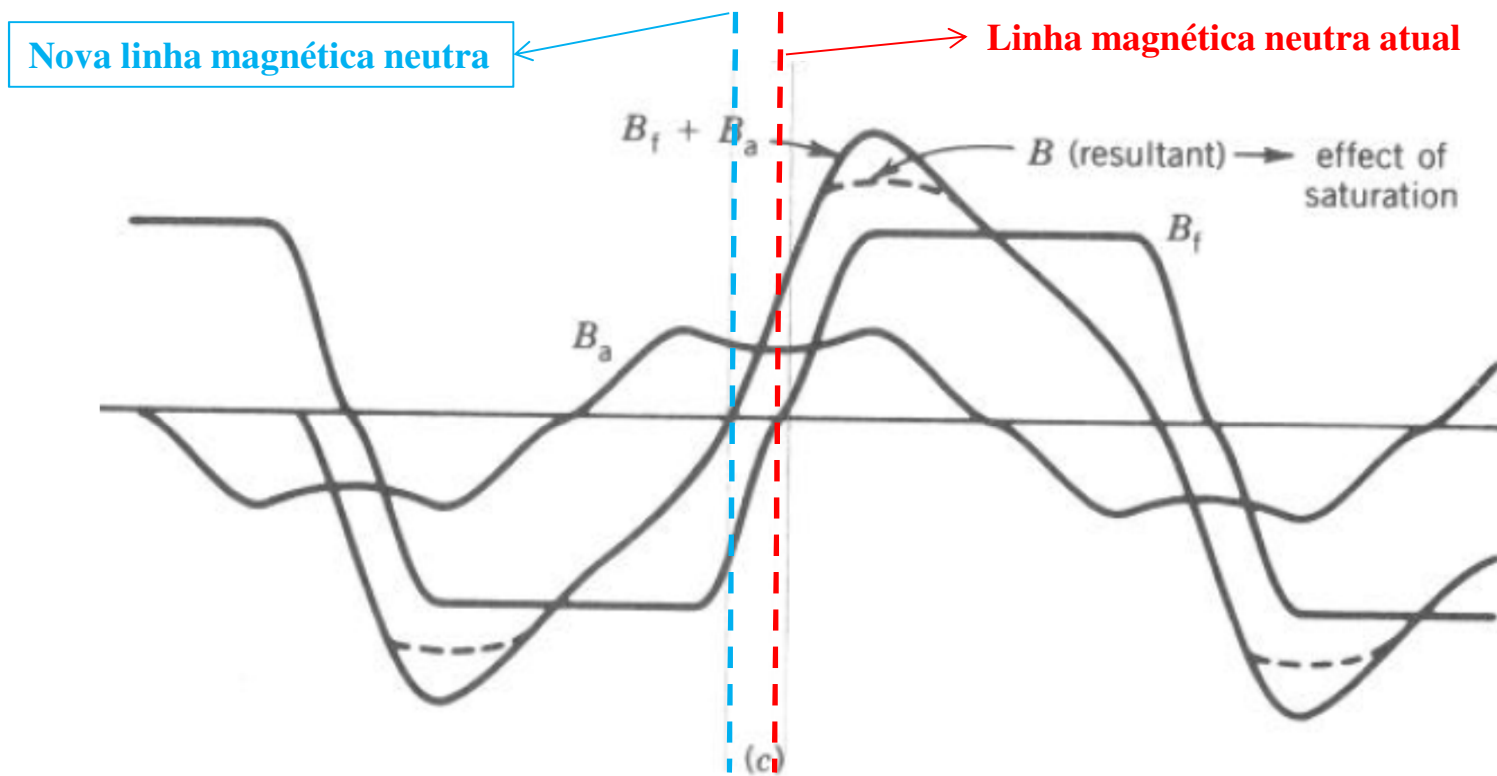


Gerador CC com Excitação Independente – Reação de Armadura

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).

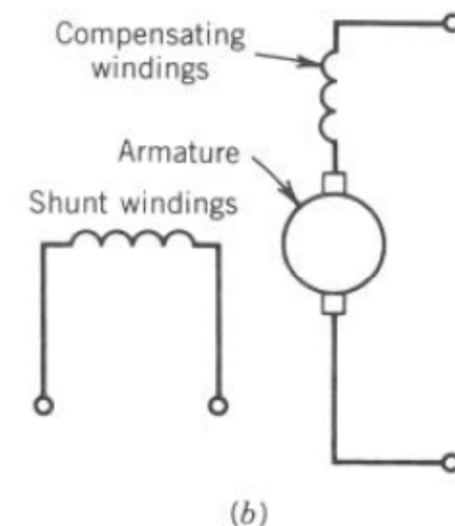
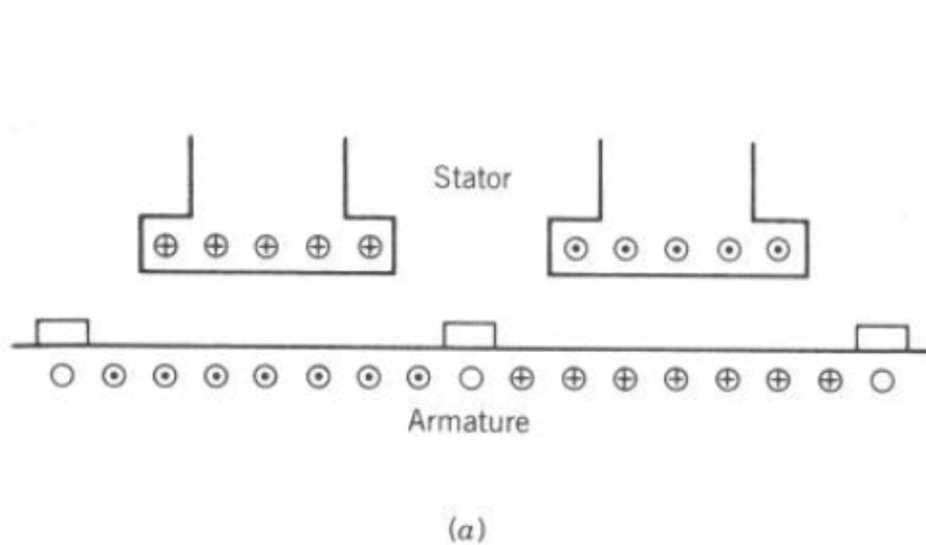
Solução:

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



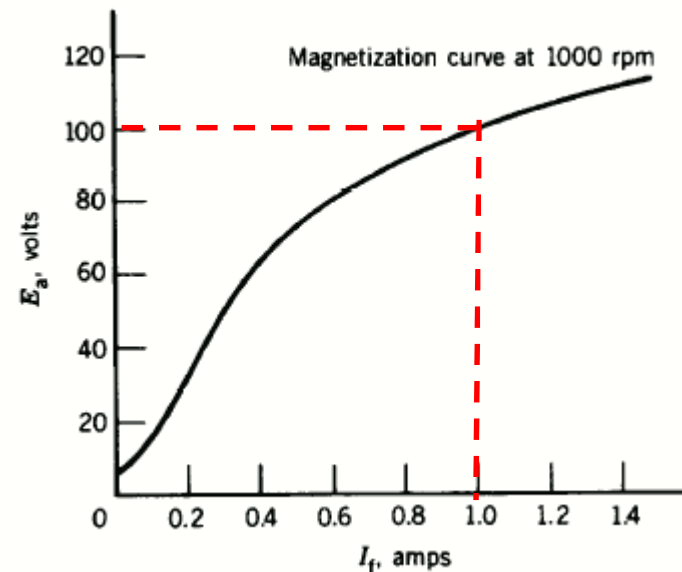
Gerador CC com Excitação Independente – Reação de Armadura

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.



Exercício: Gerador CC com Excitação Independente

Considere um gerador CC de 12 kW, 100V, 1000 rpm, conectado na configuração de excitação independentes 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.



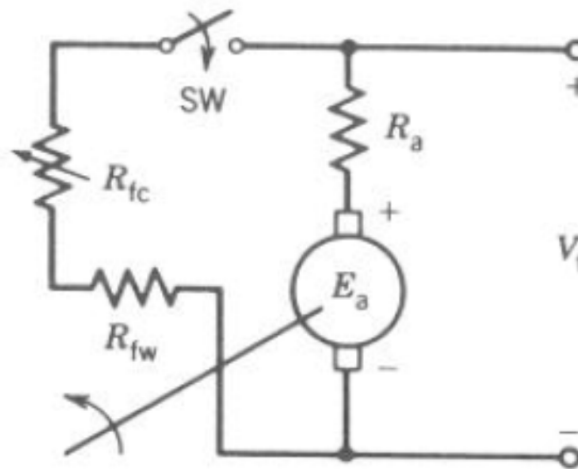
Considerando que a máquina opera com 1A de corrente de campo nominal e a 1000 rpm, pede-se:

- (a) A tensão terminal a plena carga, desprezando a reação da armadura.
- (b) 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 equivalente para fazer com que a tensão terminal seja 100V à plena carga.

Gerador CC com Excitação Paralela (Gerador Shunt)

Gerador CC com Excitação Paralela (Gerador Shunt)

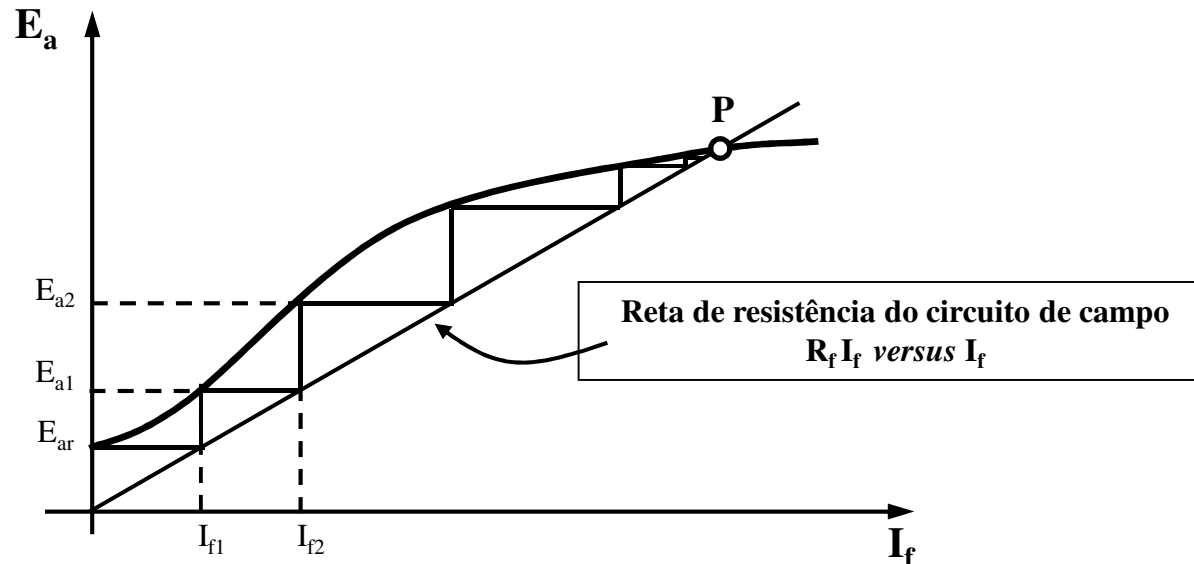
- No gerador shunt, o enrolamento de campo é conectado em paralelo com a armadura.
- Com isso, a corrente de campo é fornecida pela armadura (tensão induzida), ou seja, a máquina é auto-excitada.



- 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 (ϕ_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:

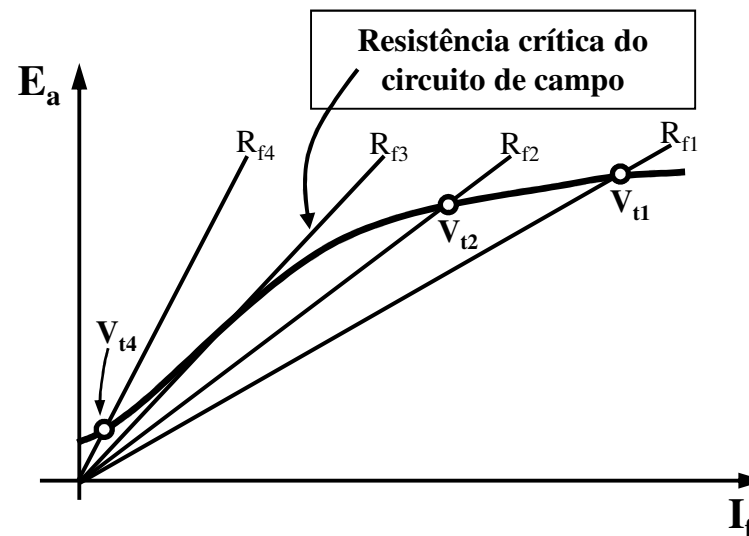
$$R_f = R_{fw} + R_{fc}$$

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:

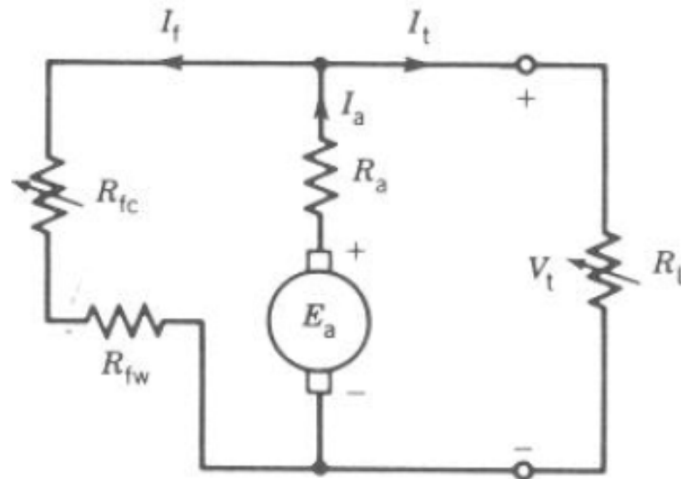
$$E_a = V_t + R_a \times I_a \quad \text{ou} \quad V_t = E_a - R_a \times I_a$$

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

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

$$V_t = R_L \times I_L$$

$$I_a = I_f + I_L$$



Gerador Shunt: Características de Regulação de Tensão

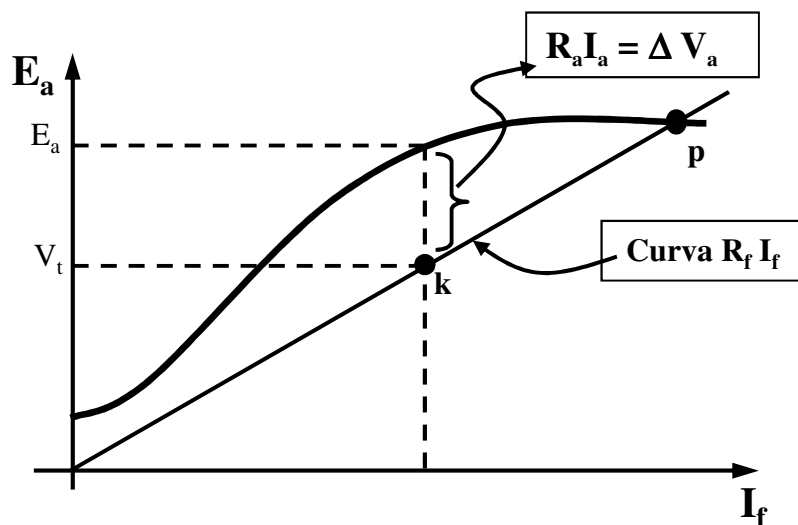
- A tensão terminal do gerador decairá com o aumento da corrente de carga, por duas razões:
 1. **Queda de tensão no enrolamento de armadura ($R_a I_a$);**
 2. **Queda de tensão associada ao efeito desmagnetizante da reação de armadura (ΔV_{RA})**

- 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

Curva de regulação de tensão sem a reação de armadura:

- Objetivo: obter curva V_t em função de I_a . Essa curva pode ser obtida através da curva de magnetização da máquina e da reta da resistência do circuito de campo.



Para um dado valor da corrente de campo, a distância entre a curva de magnetização e a reta da resistência do circuito de campo representa a queda de tensão na resistência da armadura.

Prova:

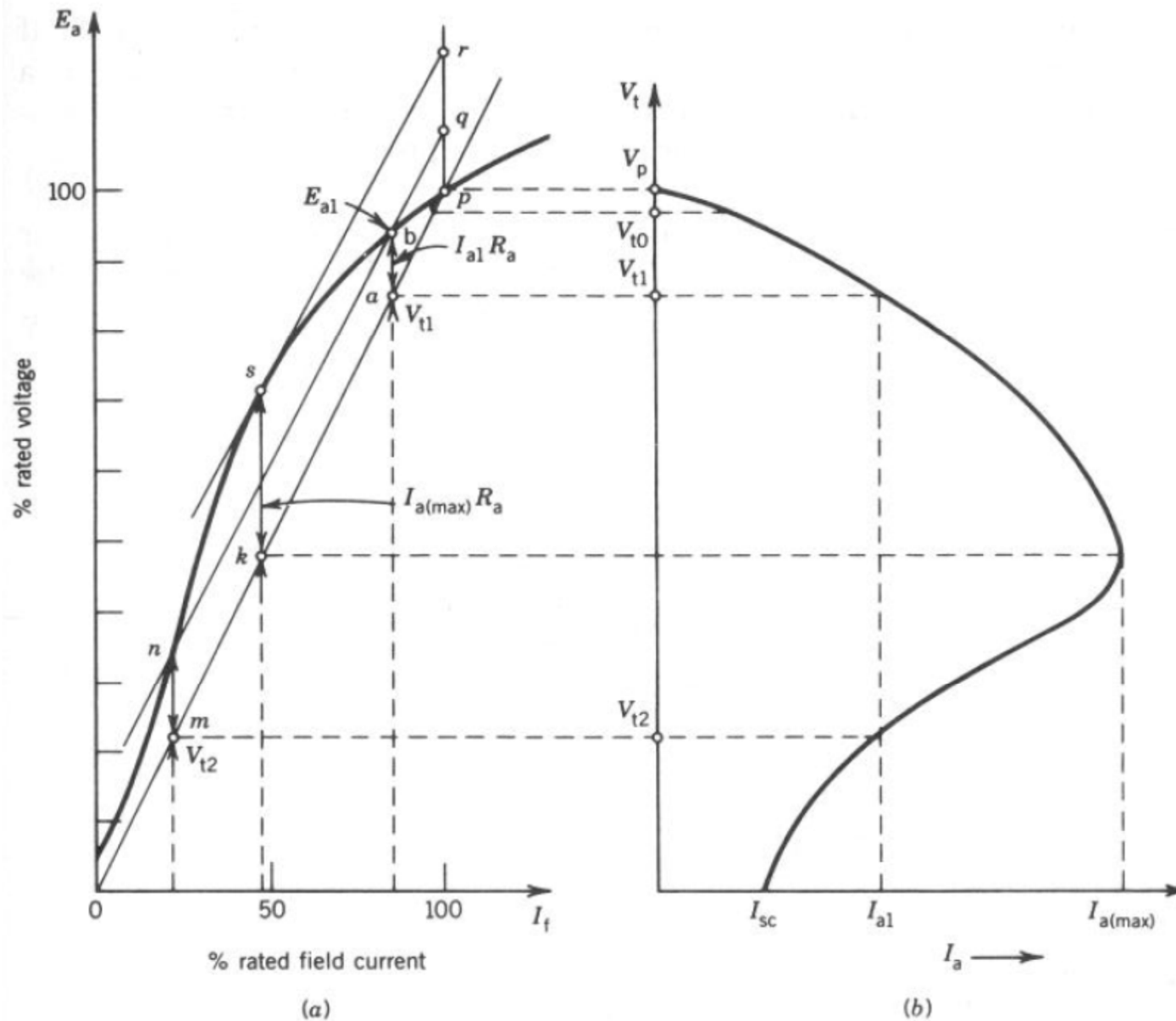
$$\left. \begin{array}{l} V_t = E_a - R_a \times I_a \\ V_t = R_f \times I_f \end{array} \right\} \Rightarrow \begin{array}{l} E_a - R_a \times I_a = R_f \times I_f \text{ ou} \\ E_a - R_f \times I_f = R_a \times I_a = \Delta V_a \end{array}$$

Uma “varredura” sobre a reta da resistência juntamente com a curva de magnetização fornece os valores pares de V_t e I_a para obter a curva de regulação, por exemplo:

- O ponto (k) fornece o valor da tensão terminal (V_t);
- A distância $R_a I_a = \Delta V_a$ fornece o valor da corrente de armadura ($I_a = \Delta V_a / R_a$).
- A repetição dos passos anteriores para todos os pontos da reta de carga do circuito de campo gerará um conjunto de pontos (V_t, I_a) que compõem a curva de regulação de tensão da máquina para o caso em que a reação da armadura é desprezada.

Gerador Shunt: Características de Regulação de Tensão

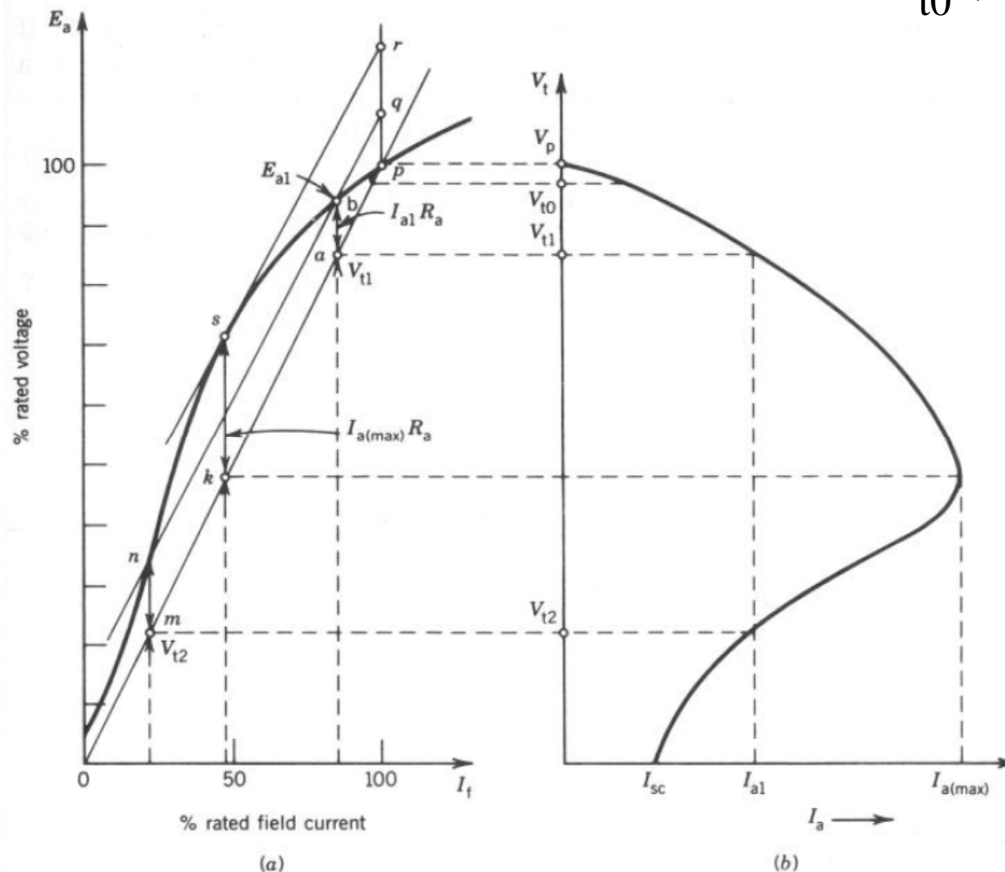
Curva de regulação de tensão sem a reação de armadura:



Gerador Shunt: Características de Regulação de Tensão

Terminais da carga em aberto: $I_t = 0, I_a = I_f$

$$V_{t0} \neq V_p$$



A corrente de campo é pequena

$$\Delta V_a = R_a \times I_a = R_a \times I_f \approx 0$$

$$V_t = E_a - R_a \times I_a = E_a - R_a \times I_f \approx E_a$$

- Mesmo em vazio, há uma queda de tensão na armadura, proporcional à corrente de campo (mas para cálculos práticos esta queda é desprezível).

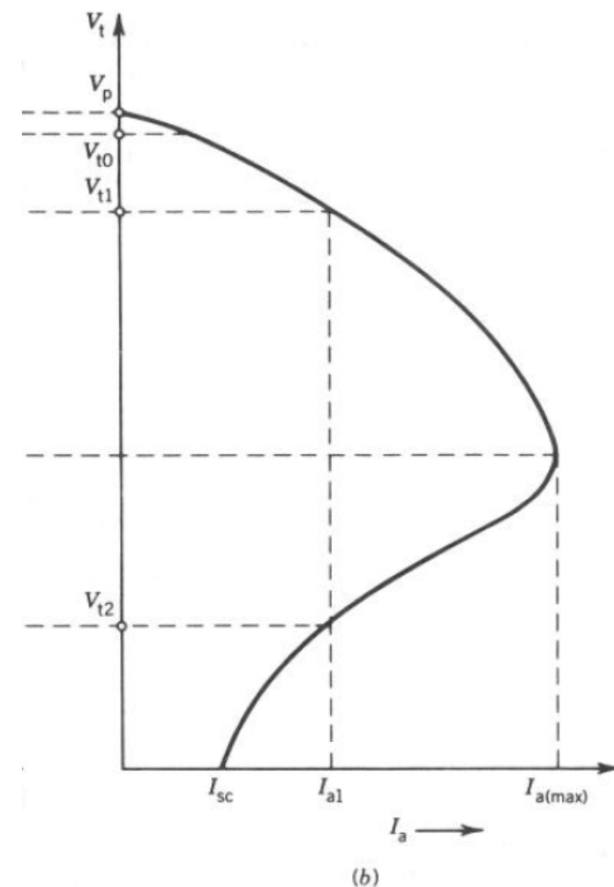
Gerador Shunt: Características de Regulação de Tensão

Terminais da carga em curto-circuito ($V_t = 0$ / $R_L \rightarrow 0$):

- A corrente de campo será nula e a corrente de armadura dependerá da tensão de armadura residual ($E_a = E_r$), ou seja:

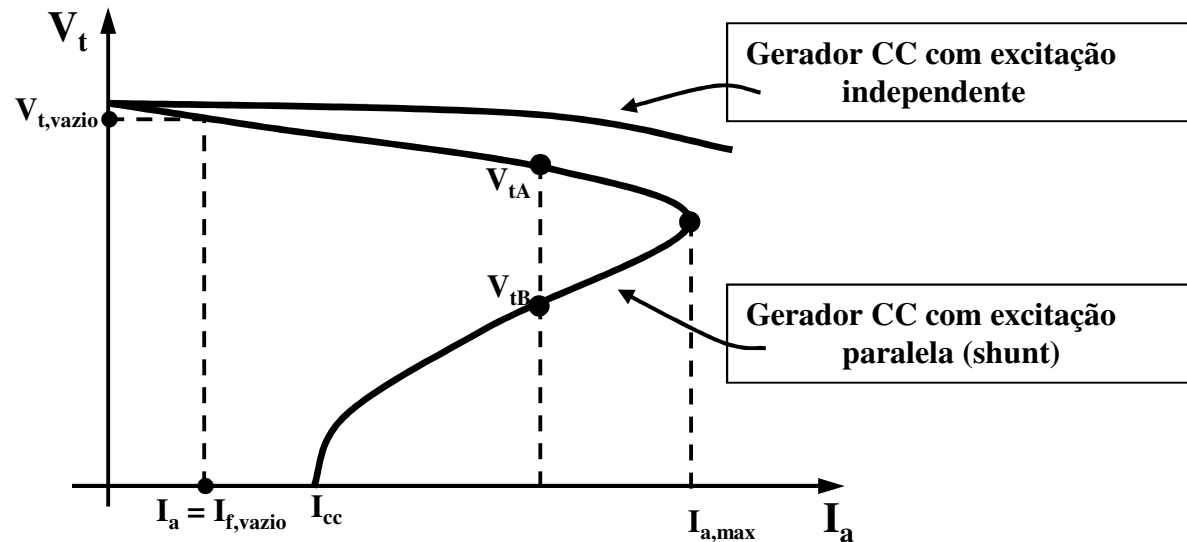
$$I_a = I_{cc} = \frac{E_a}{R_a} = \frac{E_r}{R_a} (I_f = 0)$$

- Verifica-se que a corrente de armadura não é elevada para o caso da máquina operando sob curto-circuito.
- Diz-se que a máquina CC auto-excitada em paralelo é auto-protegida contra curtos-circuitos.



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.

Gerador Shunt: Características de Regulação de Tensão

Queda de tensão associada com a reação de armadura:

- O efeito desmagnetizante devido a altas correntes de armadura provoca uma queda de tensão adicional nos terminais de um gerador CC shunt.
- Este efeito pode ser traduzido como uma redução na corrente de campo que efetivamente produz fluxo no entreferro.

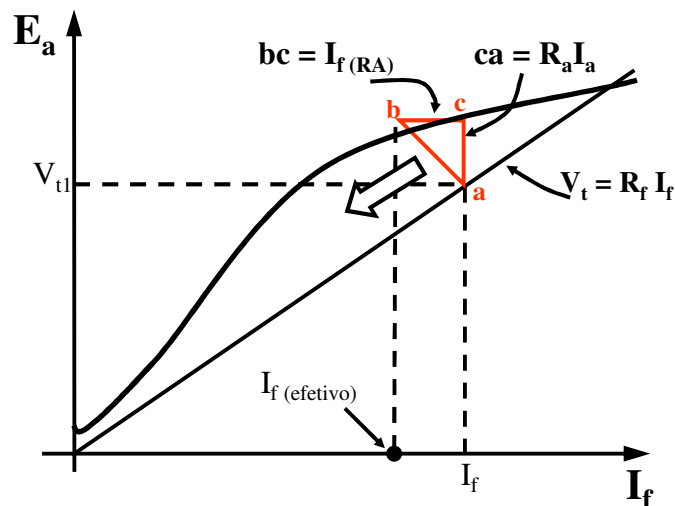
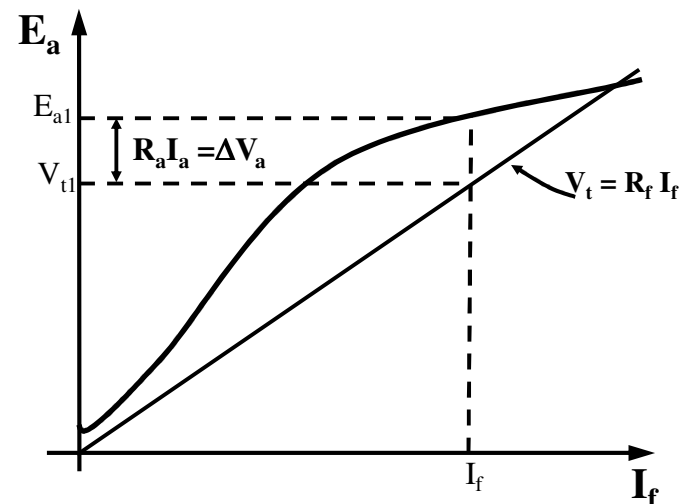
$$I_{f \text{ (efetivo)}} = I_{f \text{ (real)}} - I_{f \text{ (RA)}}$$

$I_{f \text{ (RA)}}$ – representa o efeito desmagnetizante da corrente de armadura, e equivale a uma porcentagem da corrente de campo.

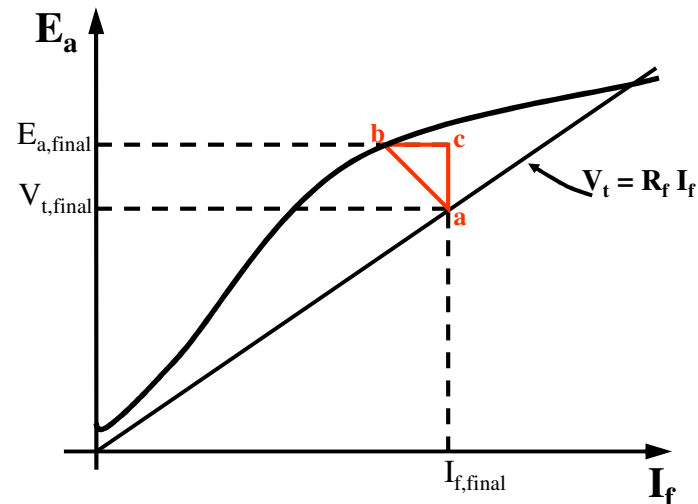
Gerador Shunt: Características de Regulação de Tensão

Queda de tensão associada com a reação de armadura:

1. Para um dado valor da corrente de armadura tem-se $R_a I_a$, queda de tensão na armadura.



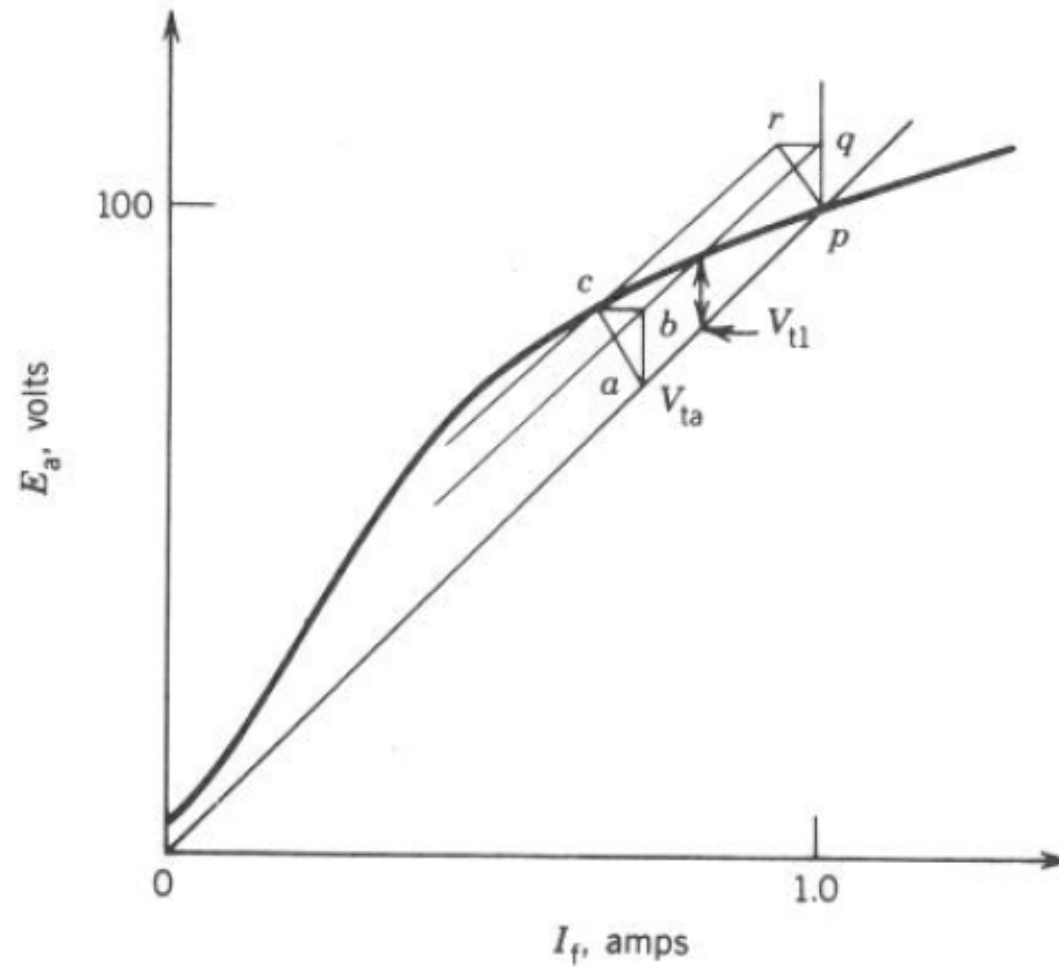
2. Considera-se então, uma redução da corrente de campo devido a reação de armadura $I_f(RA)$.



3. Desloca-se o triângulo abc até que o vértice (b) esteja sobre a curva de magnetização e o vértice (a) sobre a reta de carga do circuito de campo.

Gerador Shunt: Características de Regulação de Tensão

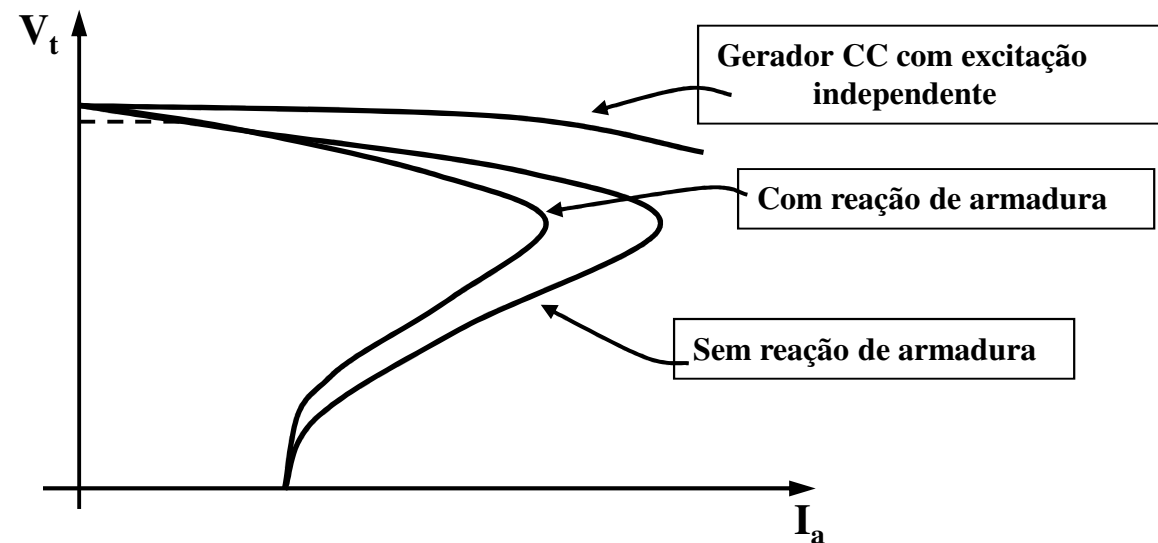
Queda de tensão associada com a reação de armadura:



Gerador Shunt: Características de Regulação de Tensão

Queda de tensão associada com a reação de armadura:

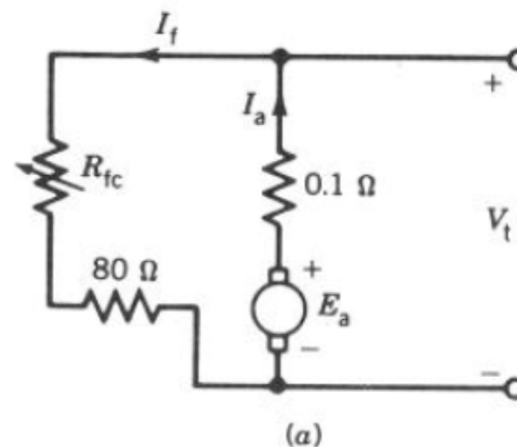
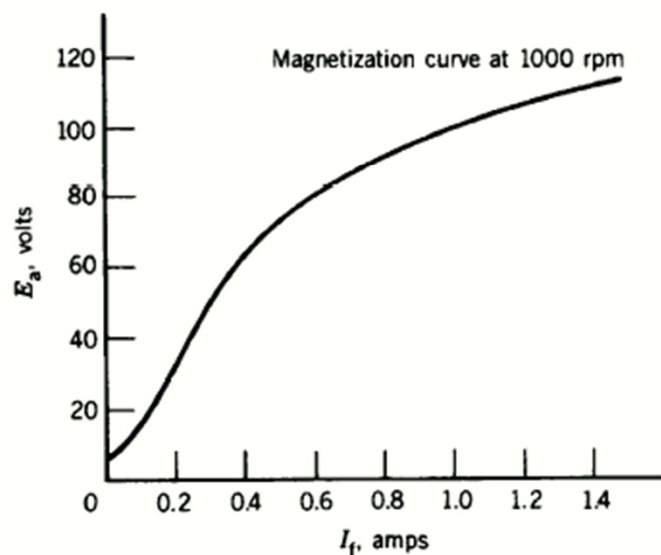
- Com isso, obtém-se um ponto da curva de regulação de tensão do gerador shunt.
- Repete-se o processo aumentando a corrente de armadura e construindo-se um triângulo similar a abc , de tal maneira que ca é proporcional a $R_a I_a$ e bc é proporcional a $I_{f(RA)}$, e deslocando-o até “encaixar” entre a curva de magnetização e a curva de carga do circuito de campo.



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 1 A. 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:

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

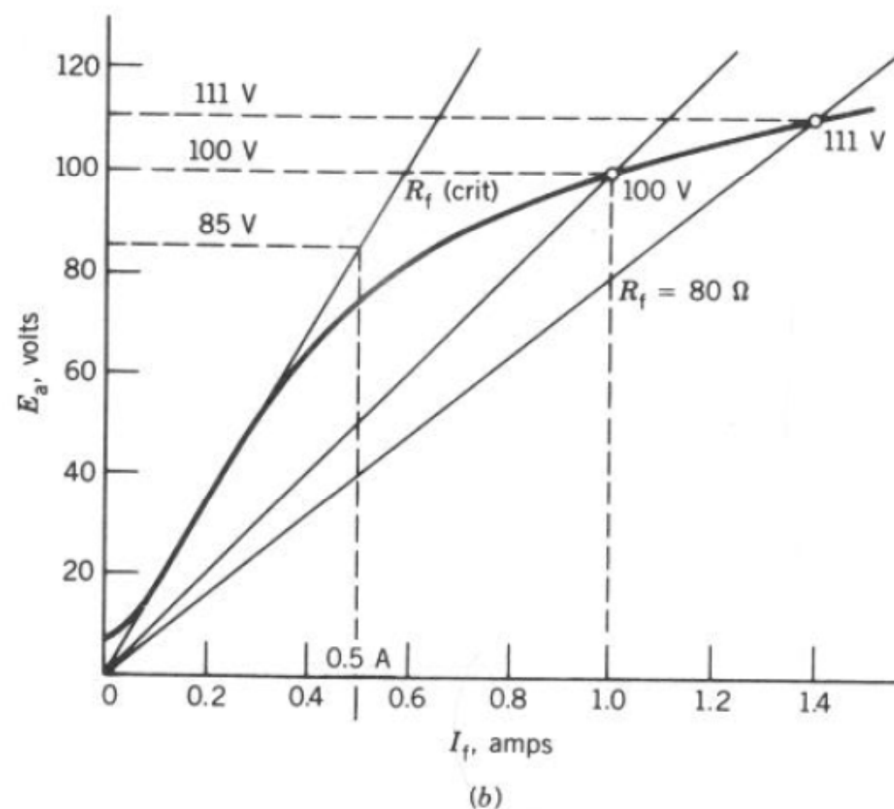
$$R_f = \frac{100}{1} = 100 \, \Omega = R_{fw} + R_{fc}$$

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

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

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

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



Próxima Aula

- Gerador CC Composto
- Gerador Série
- Interpolos