

SEL 329 – CONVERSÃO ELETROMECCÂNICA DE ENERGIA

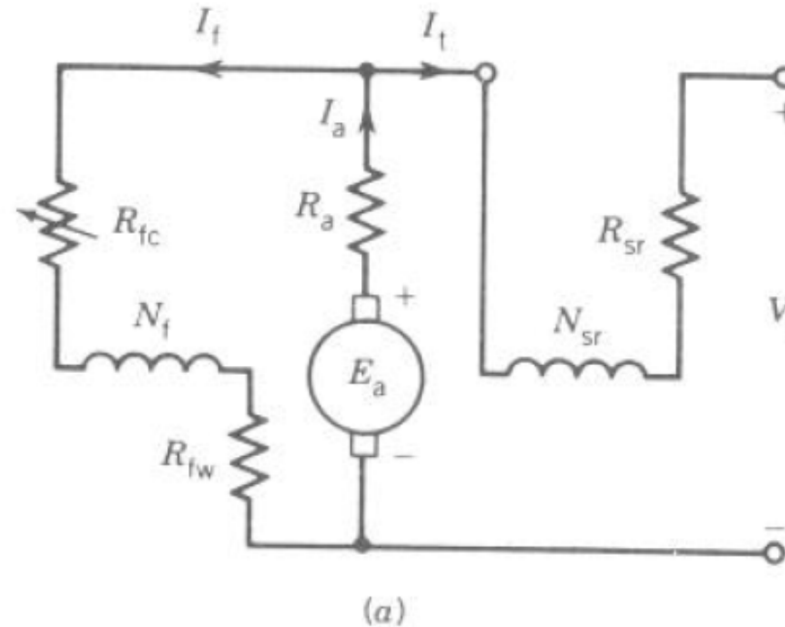
Aula 15

Aula de Hoje

- Gerador CC Composto
- Gerador Série
- Interpolos

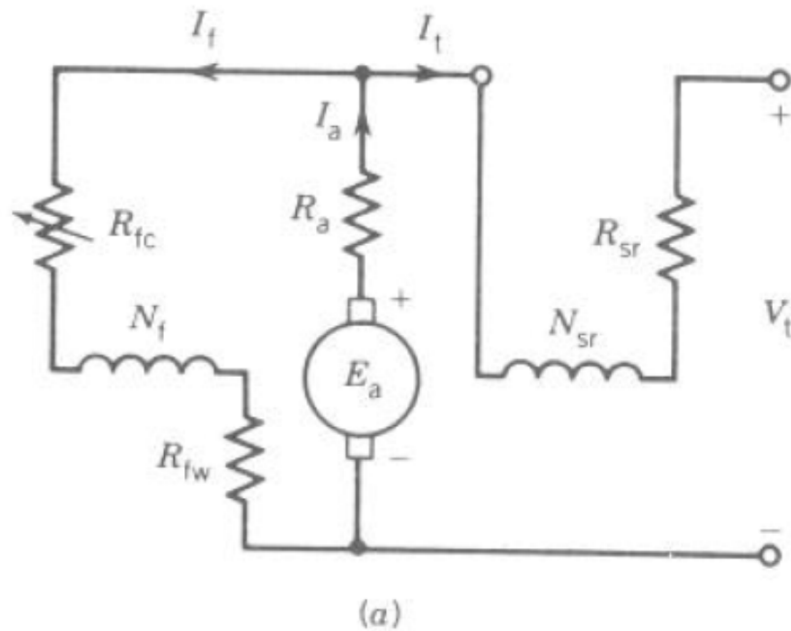
Gerador CC com Excitação Composta – Estrutura Básica

- 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.

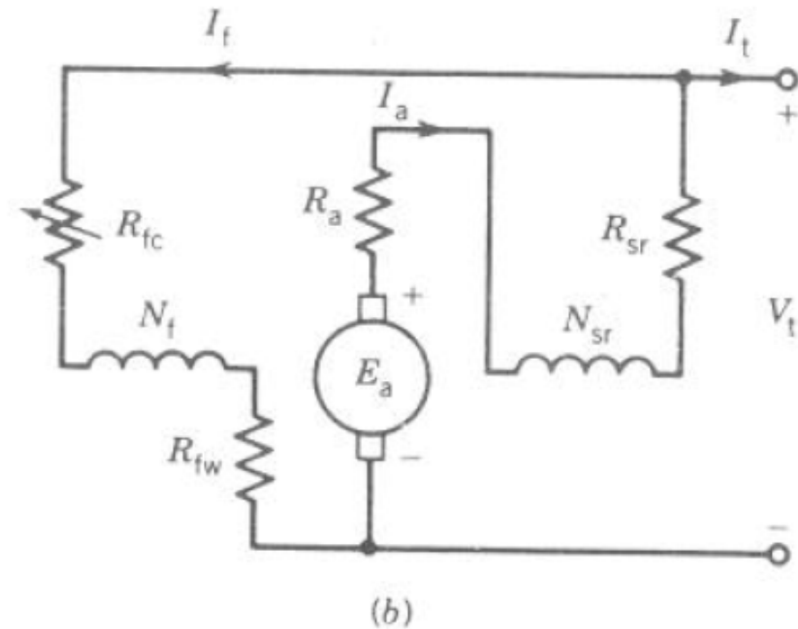


Gerador CC com Excitação Composta – Estrutura Básica

- 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).



composto curto



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,

Φ_{sh} – fluxo produzido pelo enrolamento shunt

Φ_{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)**.

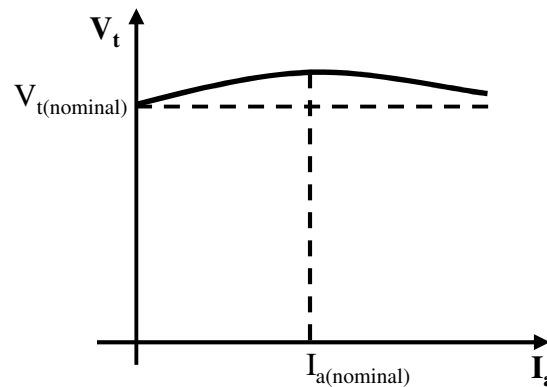
Gerador CC Composto Aditivo – Regulação de Tensão

- 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.

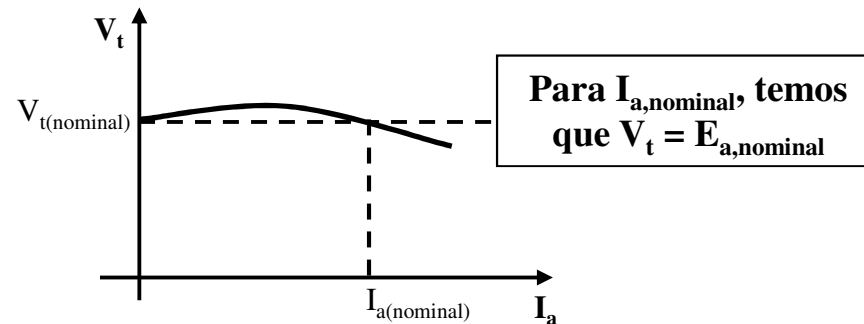


- A tensão terminal pode ser maior do que a tensão nominal de armadura à medida que a corrente de carga aumenta

Gerador CC Composto Aditivo – Regulação de Tensão

2. Máquina plana:

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

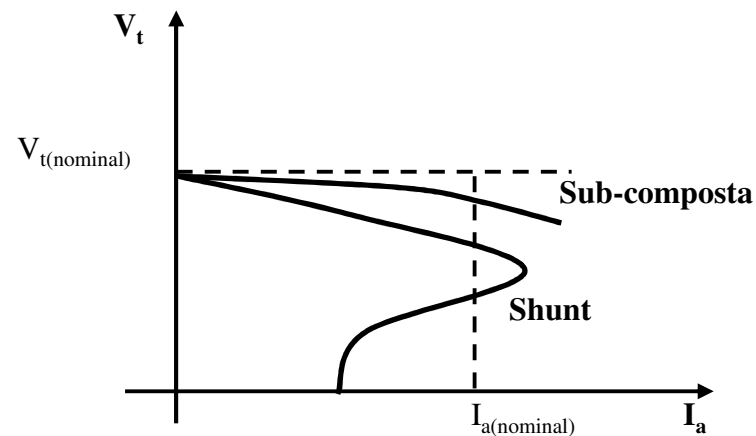


- Para carregamento diferente do nominal, a máquina mostra pequena variação da tensão.

Gerador CC Composto Aditivo – Regulação de Tensão

3. Máquina sub-composta:

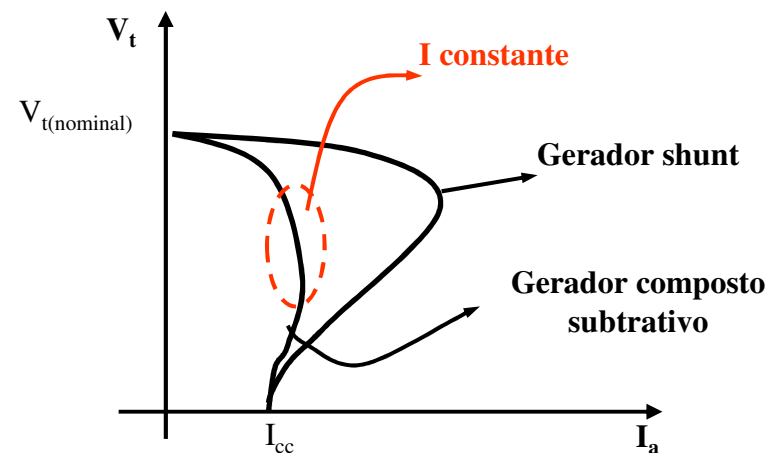
- O enrolamento série compensa parcialmente os efeitos de $R_a I_a$ e de $I_{f(RA)}$, de forma que a queda de tensão diminua em comparação com o gerador shunt.



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

Gerador CC Composto Subtrativo – Regulação de Tensão

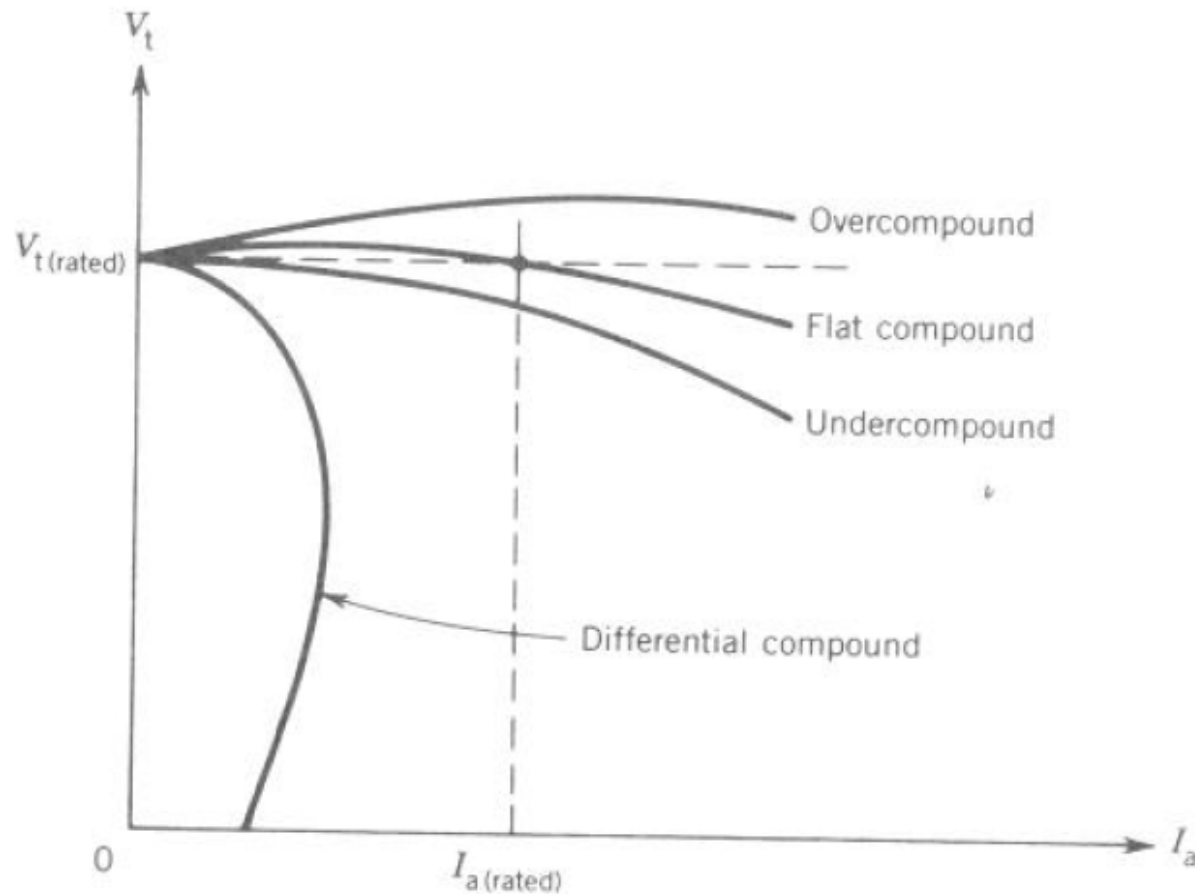
- O enrolamento série ainda pode ser ligado com o shunt de forma a produzir fluxo subtrativo, ou seja, $E_a = K_a(\Phi_{sh} - \Phi_{sr}) \omega_m$. Neste caso, o enrolamento série produz uma redução ainda maior da tensão terminal em relação ao paralelo, por duas razões:
 1. Queda de tensão $R_{sr}I_a$
 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

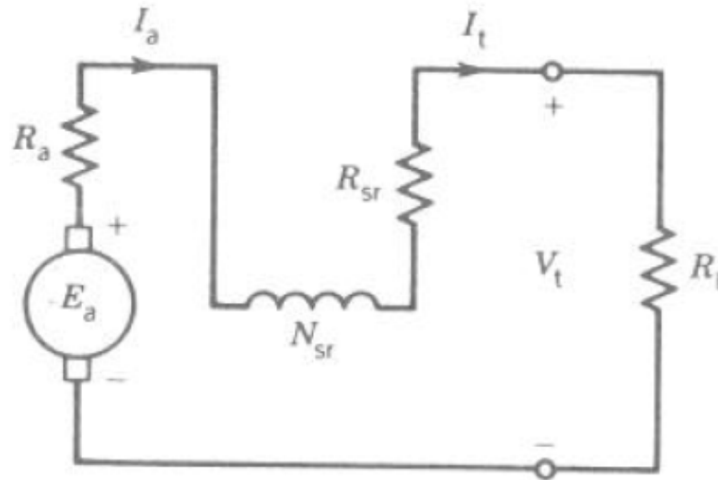
Com isso:

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

- 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

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

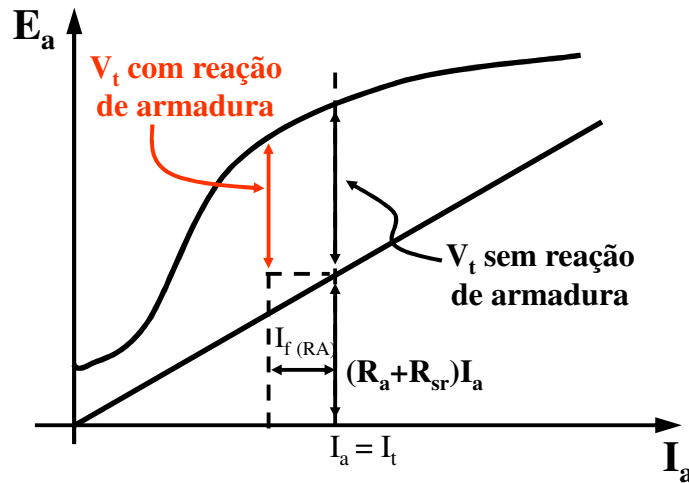
$$I_t = I_a = I_L = I_f$$

- 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

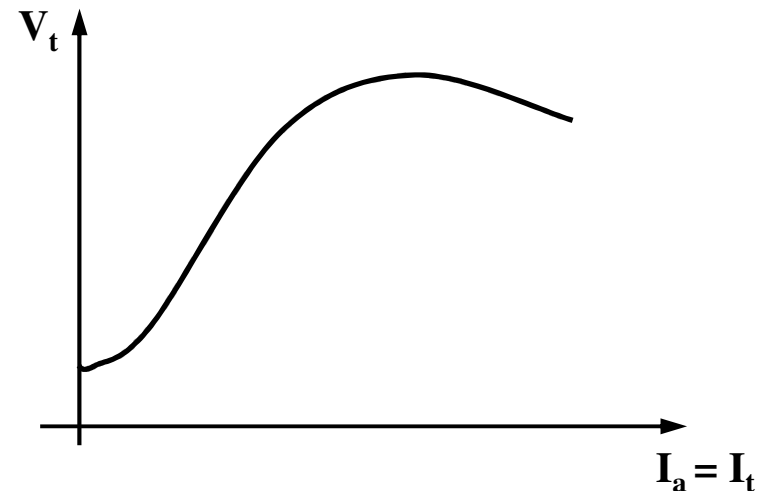
Gerador CC Série – Regulação de Tensão

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

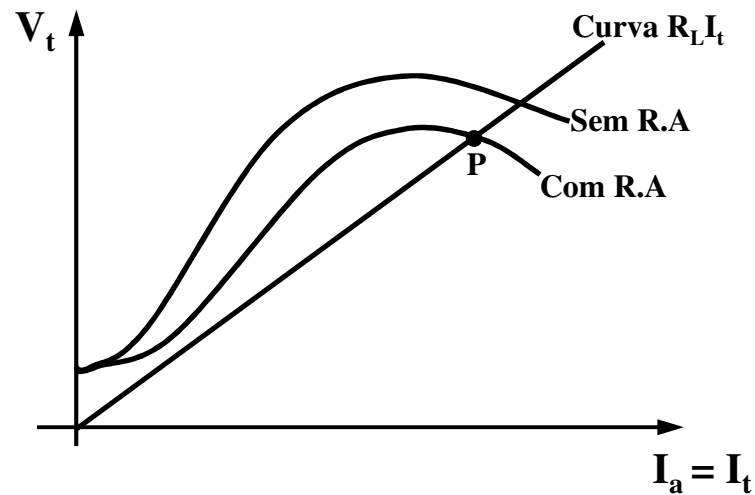


Para uma dada corrente de armadura, a distância entre a curva de magnetização e a reta $(R_a + R_{sr})I_a$ representa o valor da tensão terminal da máquina V_t .

- 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.



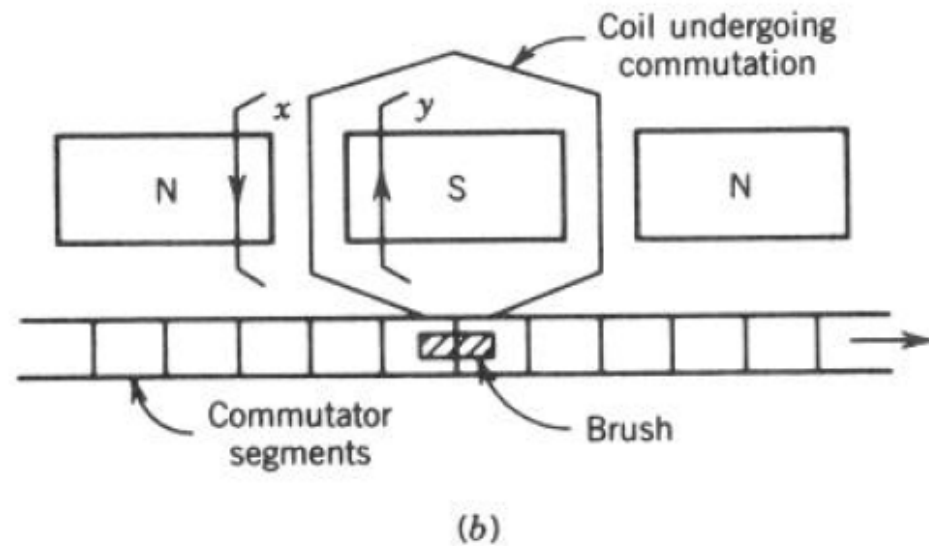
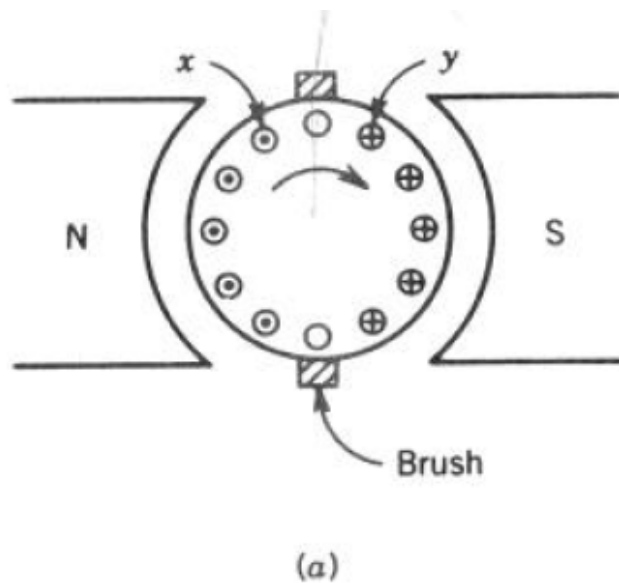
Gerador CC Série – Regulação de Tensão



- 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.

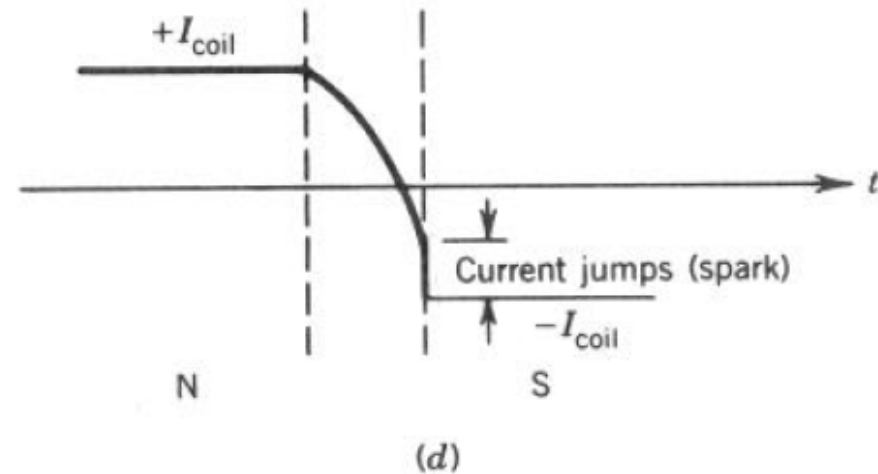
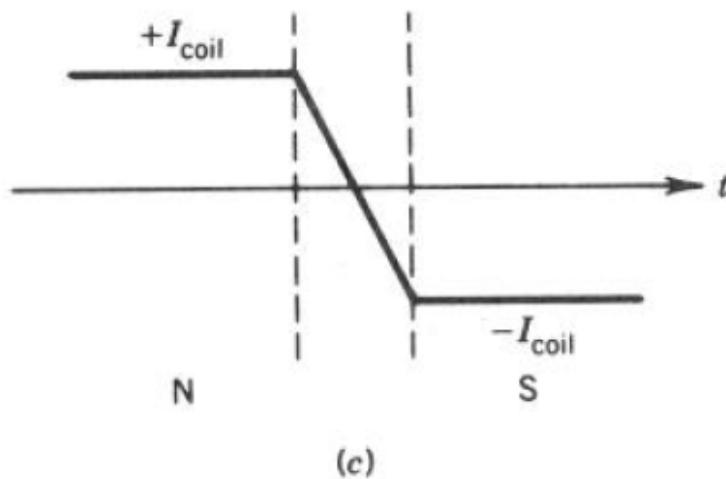
Interpólos

- 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).



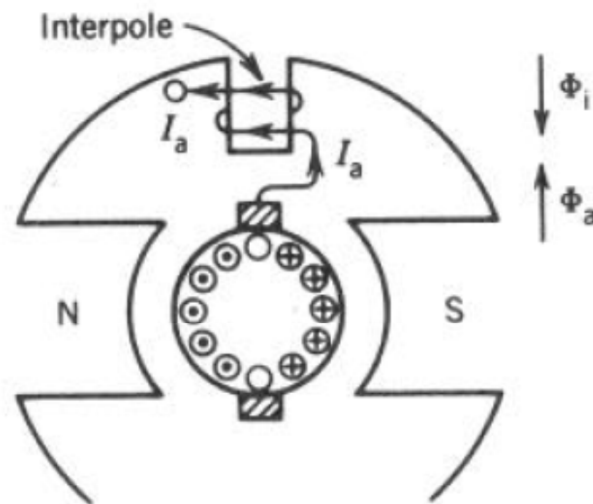
Interpólos

- 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. Consequentemente, a corrente “salta” para seu valor máximo quase instantaneamente, provocando faiscamento.

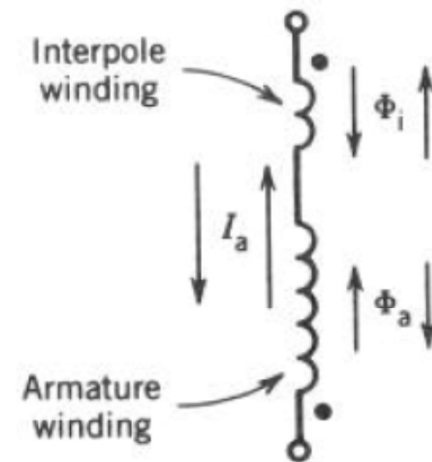


Interpólos

- 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.



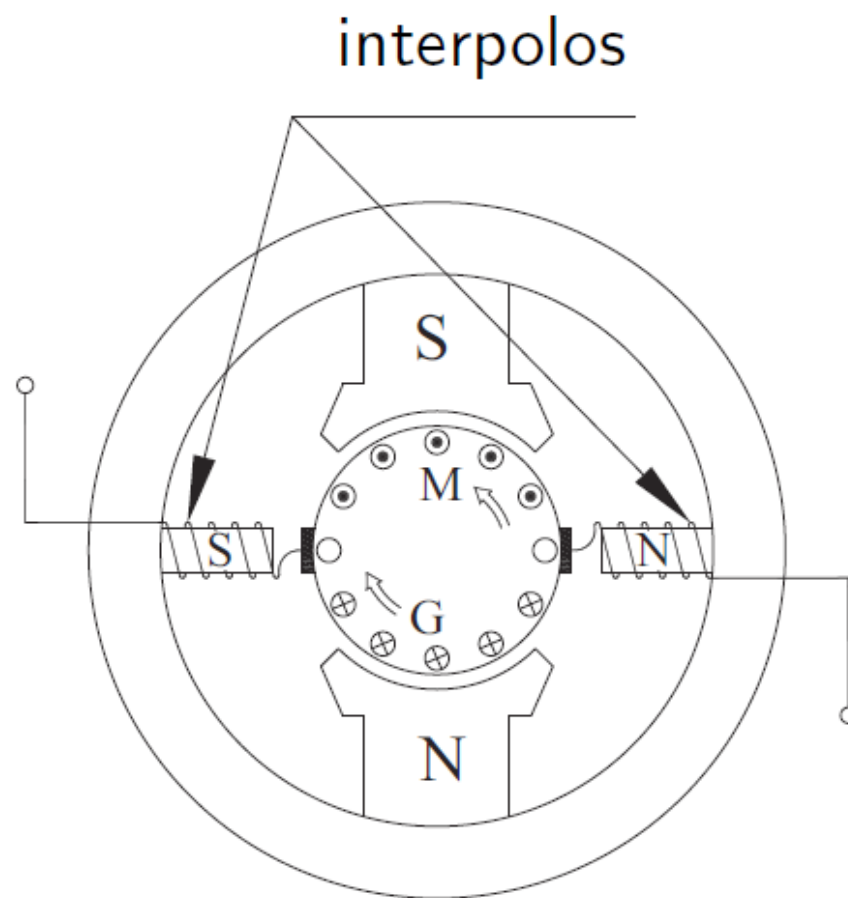
(e)



(f) Φ_a , Φ_i oppose each other, irrespective of direction of I_a .

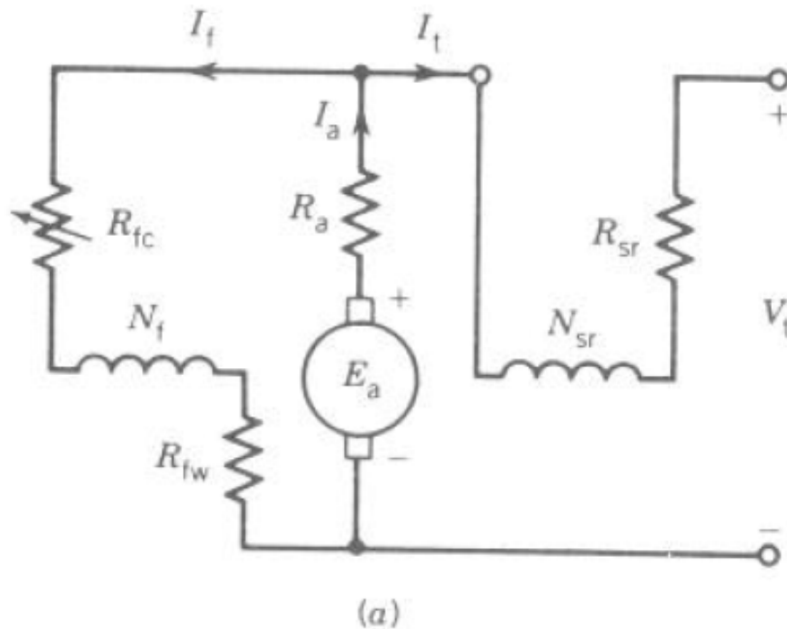
- A maioria das máquinas CC de grande porte incluem tanto os enrolamentos compensadores quanto interpólos.

Interpólos

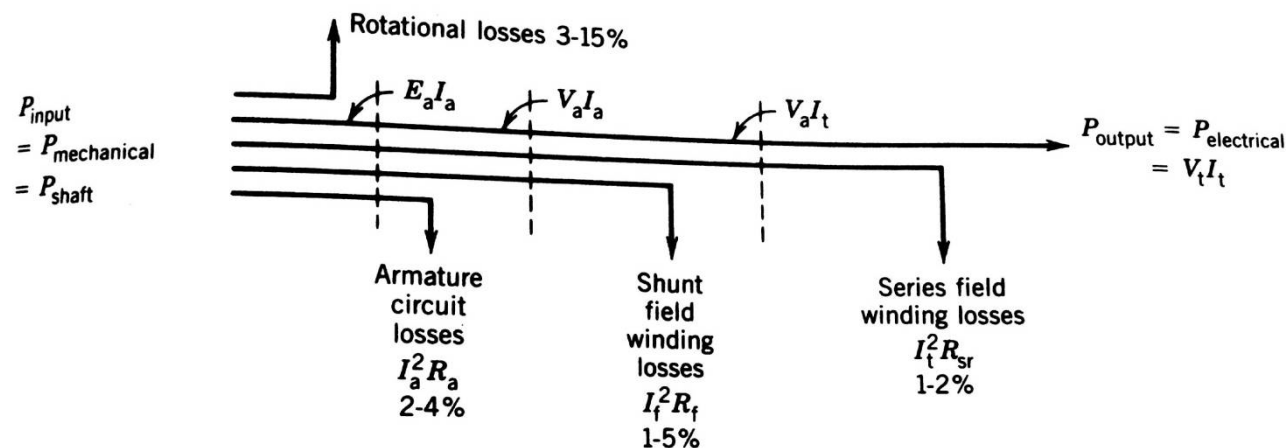


(e) Interpolos

Eficiência de um Gerador Composto Curto



$$\eta = \frac{P_{saida}}{P_{entrada}} \times 100\%$$



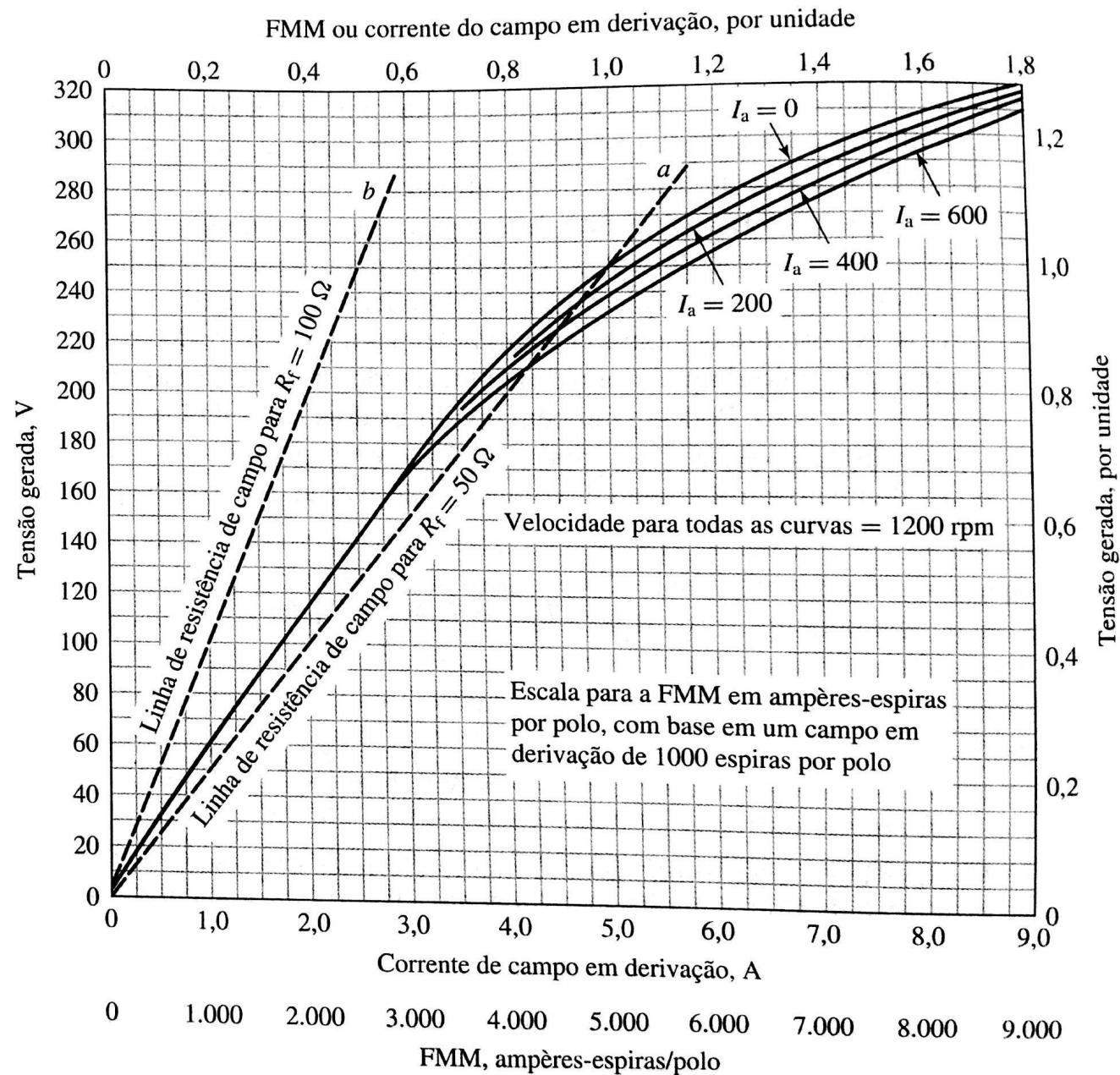
A análise é semelhante para os outros tipos de geradores CC.

Exercício

Um gerador composto de 100kW, 250V e 400A, com uma ligação em derivação longa, tem uma resistência de armadura (incluindo as escovas) de $0,025\Omega$, uma resistência de campo em série de $0,005\Omega$ e a curva de magnetização mostrada a seguir. Há um campo em derivação com 1000 espiras/polo e um campo série de 3 espiras/polo. O campo em série é ligado de tal modo que uma corrente positiva na armadura produz uma força magnetomotriz no eixo direto que se soma à do campo em derivação.

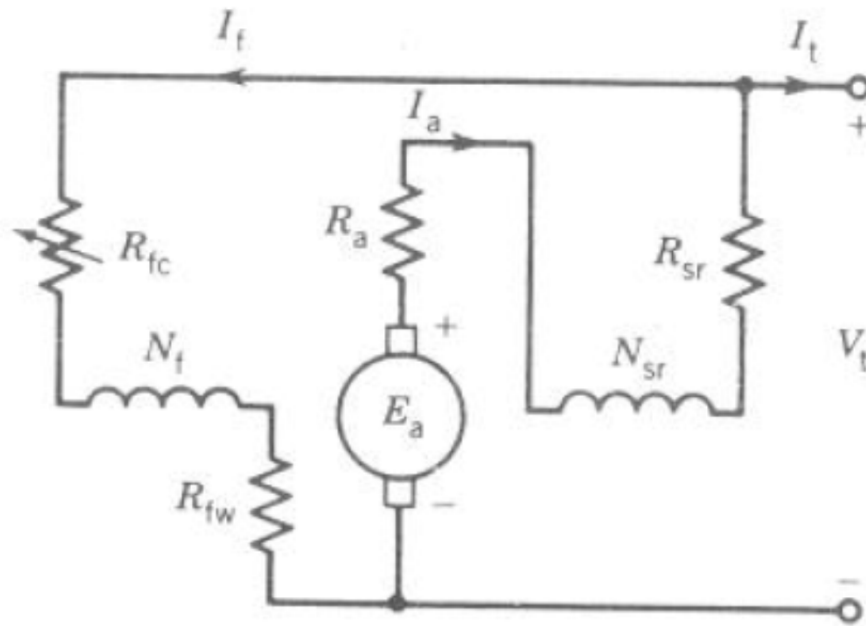
Calcule a tensão terminal, para a corrente nominal do gerador, quando a corrente de campo em derivação é 4,7A e velocidade igual a 1150 rpm. Despreze os efeitos da reação de armadura.

Exercício



Solução do Exercício

Gerador composto longo:



$$I_a = I_{sr} = I_f + I_t$$

Corrente de campo efetiva:

$$I_{f(efet)} = I_f \pm \frac{N_{sr}}{N_f} I_{sr} - \cancel{I_{f(RA)}} \quad I_{f(RA)} = 0$$

Solução do Exercício

Dos dados do problema:

$$I_a = I_{sr} = 4,7 + 400 \cong 405 A$$

Os fluxos dos campos série e em derivação se somam (dado no problema). Logo:

$$I_{f(efet)} = I_f + \frac{N_{sr}}{N_f} I_{sr} = 4,7 + \left(\frac{3}{1000} \right) \cdot 405 = 5,90 A$$

Solução do Exercício

Com a corrente de campo efetiva de 5,90A, utiliza-se a curva de magnetização obtida em vazio para encontrar a tensão gerada E_a :

$$E_{a0} = 274V$$

No entanto, a curva de magnetização foi obtida para 1200 rpm. Logo, é necessário corrigir o valor da tensão gerada:

$$E_a = \left(\frac{n}{n_0} \right) E_{a0} = \left(\frac{1150}{1200} \right) \cdot 274 = 263V$$

Podemos agora determinar a tensão terminal:

$$V_t = E_a - (R_a + R_{sr}) \cdot I_a = 263 - (0,025 + 0,005) \cdot 405 = 251V$$

Gerador CC com Excitação Paralela – Revisão (Exemplo)

Uma máquina CC (6kW, 120V, 1200 rpm) auto-excitada tem a seguinte curva de magnetização a 1200 rpm:

I_f (A)	0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,8	1	1,2
E_a (V)	5	20	40	60	79	93	102	114	120	125

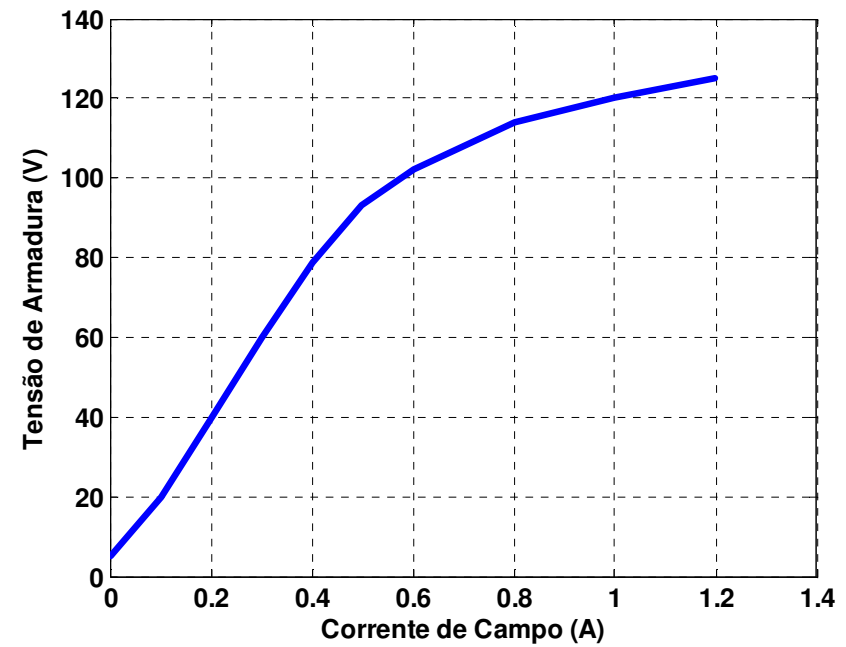
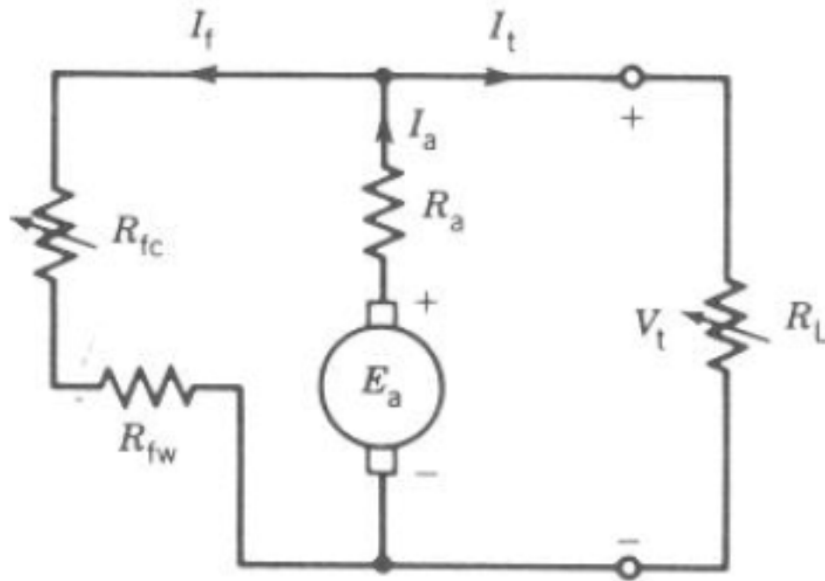
Os parâmetros da máquina são: $R_a=0,2 \, \Omega$, $R_{fw}=100 \, \Omega$. A máquina é acionada a 1200 rpm. A resistência de controle da corrente de campo pode variar de 0 a 150 Ω .

- a) Determine os valores máximo e mínimo da tensão terminal em vazio;
- b) Determine o valor de R_{fc} para que a tensão terminal em vazio seja 120V;
- i) Ignorando a reação da armadura determine a tensão terminal para corrente da armadura nominal. Determine a máxima corrente que a armadura pode fornecer. Qual é o valor da tensão terminal nessa condição?
- ii) Assumindo que $I_{f(RA)}=0,1A$ e $I_a=50A$ e considerando que a reação da armadura é proporcional à corrente de armadura, repita a parte (i);

Próxima Aula

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

Gerador CC com Excitação Paralela – Revisão (Exemplo)

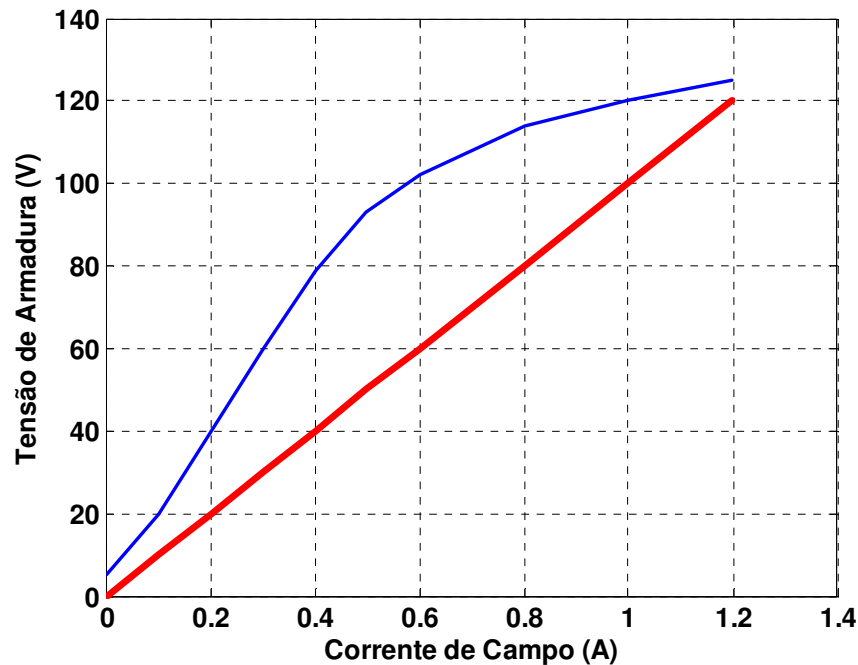


Gerador CC com Excitação Paralela – Revisão (Exemplo)

a) Determine os valores máximo e mínimo da tensão terminal em vazio;

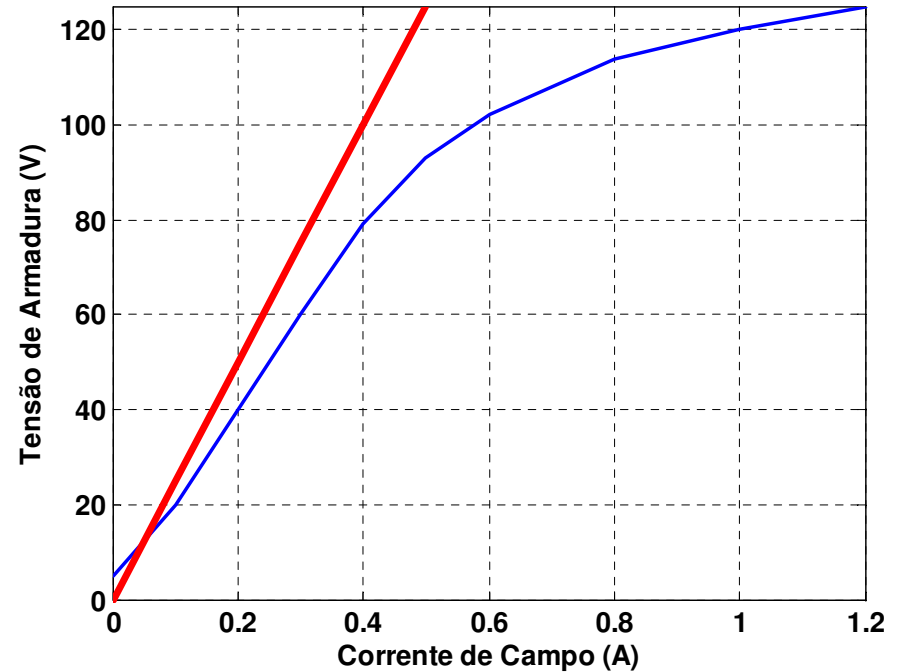
Valor Máximo

$$R_{fc} = 0; V_t = 100I_f$$
$$V_t = 126V$$



Valor Mínimo

$$R_{fc} = 150\Omega; V_t = 250I_f$$
$$V_t = 12V$$



Gerador CC com Excitação Paralela – Revisão (Exemplo)

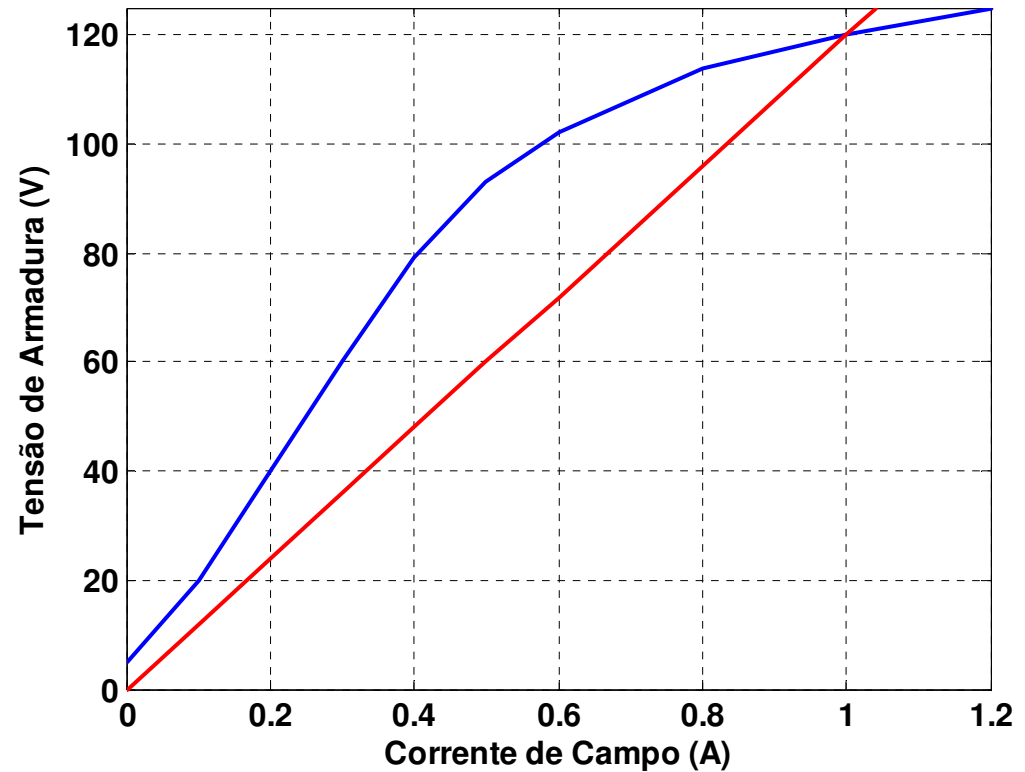
b) Determine o valor de R_{fc} para que a tensão terminal em vazio seja 120V;

$$V_t = 120 I_f$$

$$R_{fc} = (120 - 100) = 20 \, \Omega$$

Lembrando que em vazio,

$$E_a \approx V_t$$



Gerador CC com Excitação Paralela – Revisão (Exemplo)

(b)

(i) Ignorando a reação da armadura determine a tensão terminal para corrente da armadura nominal. Determine a máxima corrente que a armadura pode fornecer. Qual é o valor da tensão terminal nessa condição?

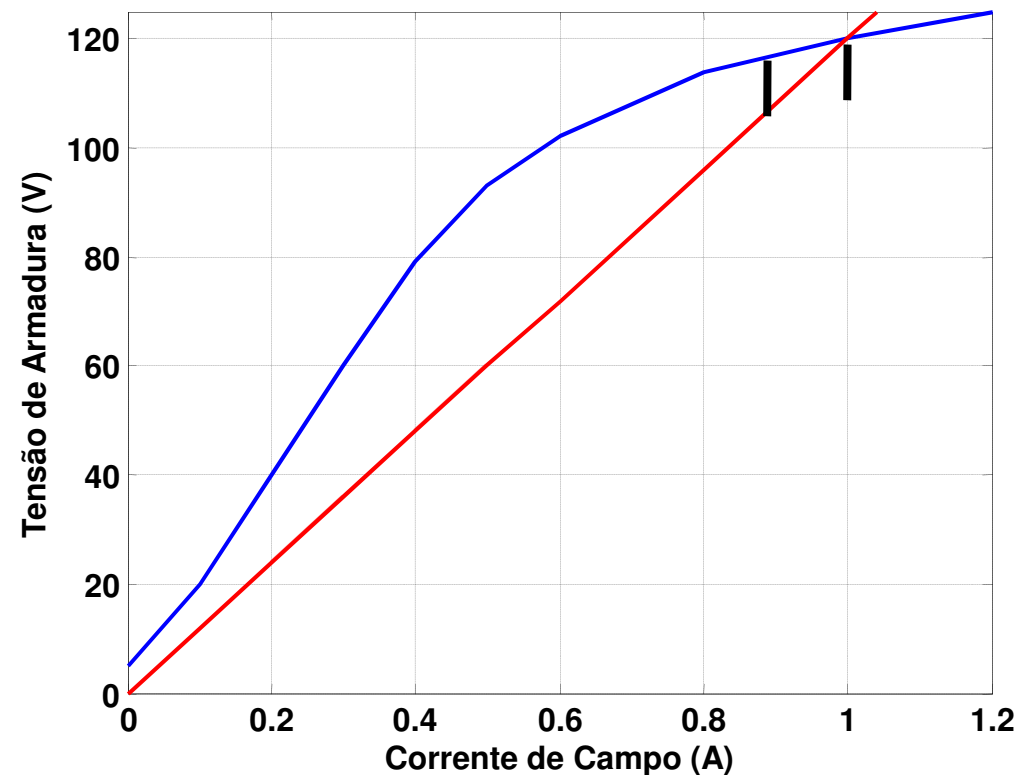
Corrente nominal da armadura:

$$I_a = \frac{6000}{120} = 50A$$

$$R_a I_a = 0,2 * 50 = 10V$$

$$V_t = 108V;$$

$$E_a = 118V;$$



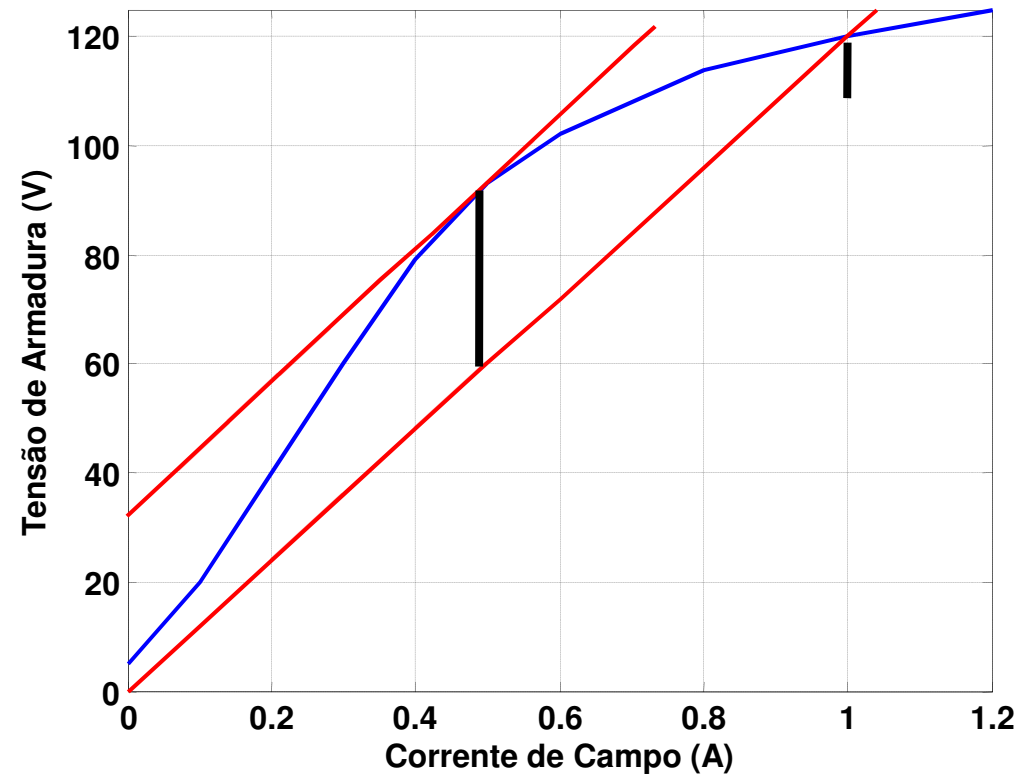
Gerador CC com Excitação Paralela – Revisão (Exemplo)

Máxima corrente da armadura:

$$V_t = 60\text{V};$$

$$E_a = 93\text{V};$$

$$I_a = \frac{33}{0,2} = 165\text{A}$$



Gerador CC com Excitação Paralela – Revisão (Exemplo)

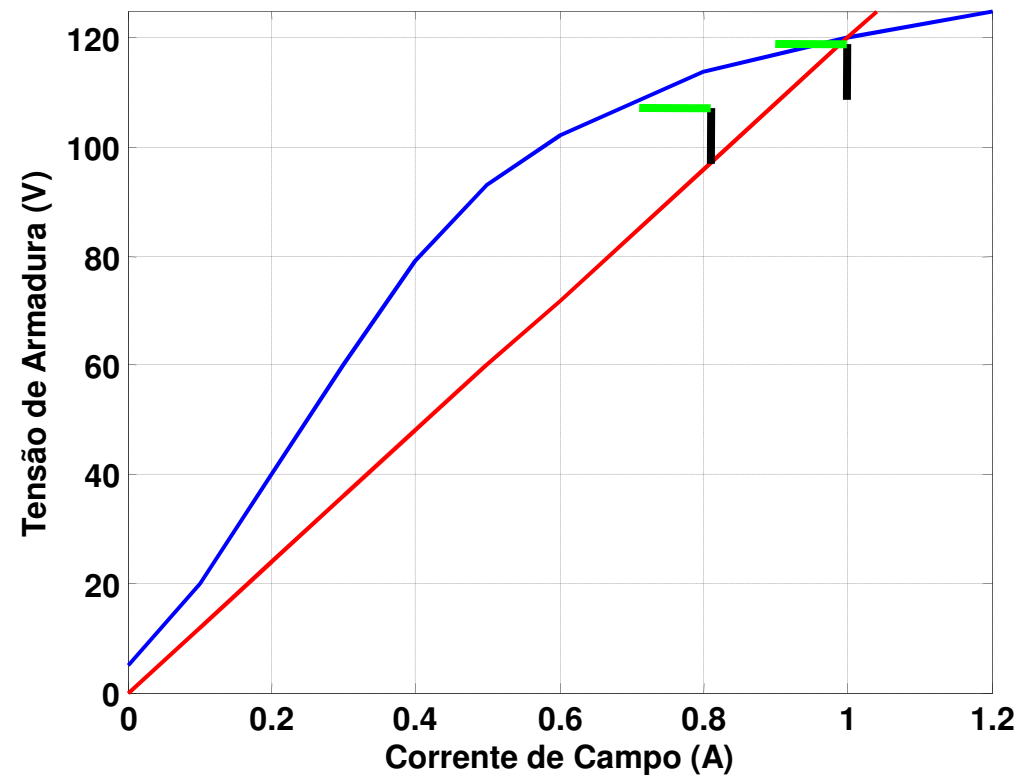
(b)

(ii) Admitindo que $I_{f(RA)} = 0,1\text{A}$ e $I_a = 50\text{A}$ e considerando que a reação da armadura é proporcional à corrente de armadura, repita a parte (i);

Corrente nominal da armadura:

Sem RA	Com RA
--------	--------

$V_t = 108\text{V};$	$V_t = 98\text{V};$
$E_a = 118\text{V};$	$E_a = 108\text{V};$



Gerador CC com Excitação Paralela – Revisão (Exemplo)

(b)

(ii) Assumindo que $I_{f(RA)}=0,1A$ e $I_a=50A$ e considerando que a reação da armadura é proporcional à corrente de armadura, repita a parte (i);

Máxima corrente da armadura:

Sem RA

Com RA

$$V_t=60V;$$

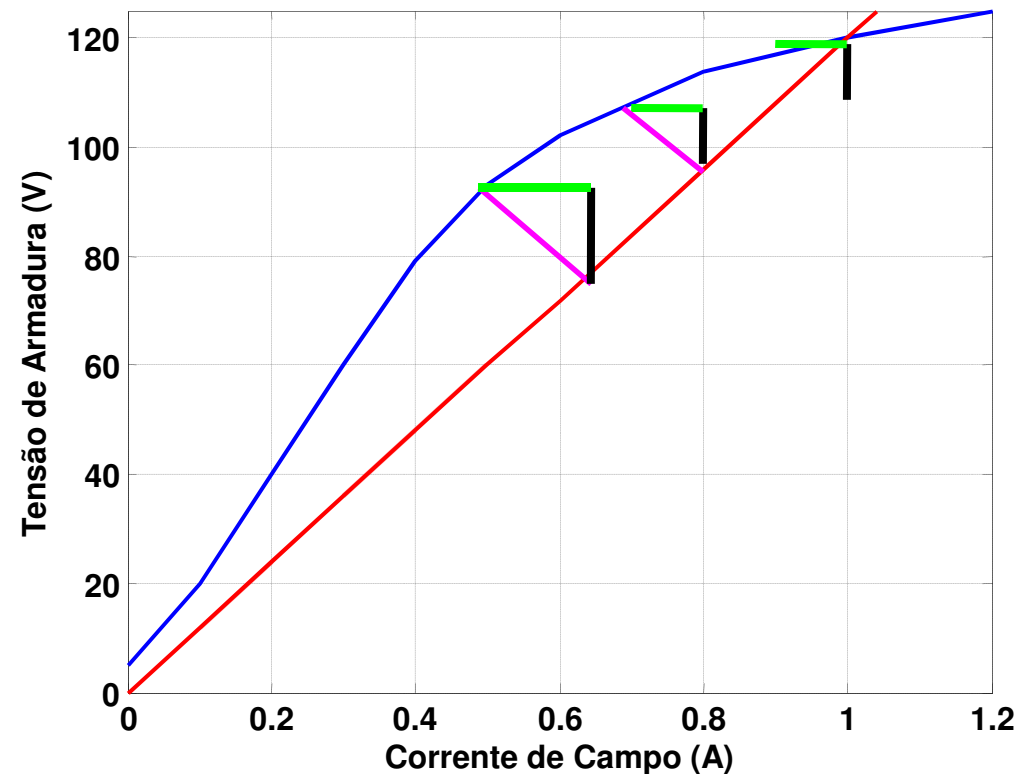
$$V_t=75V;$$

$$E_a=93V;$$

$$E_a=93V;$$

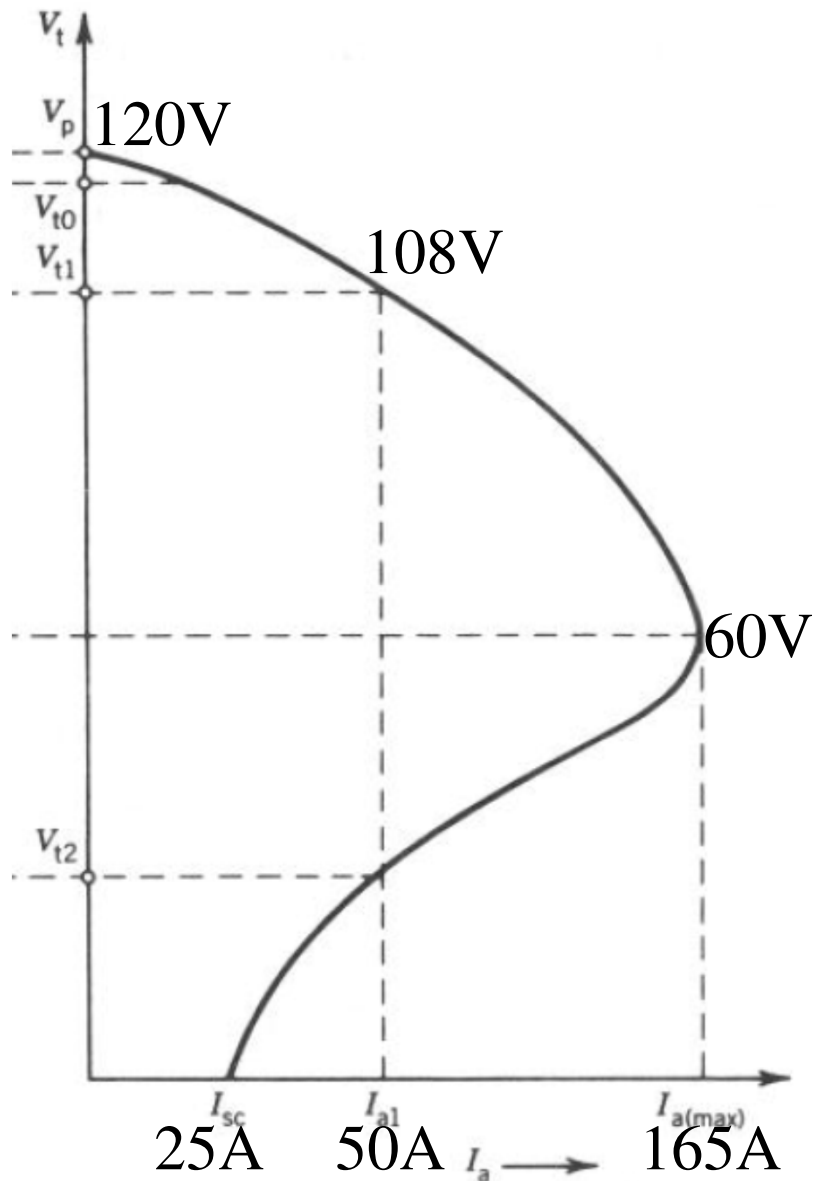
$$I_a = 165A$$

$$I_a = \frac{18}{0,2} = 90A$$



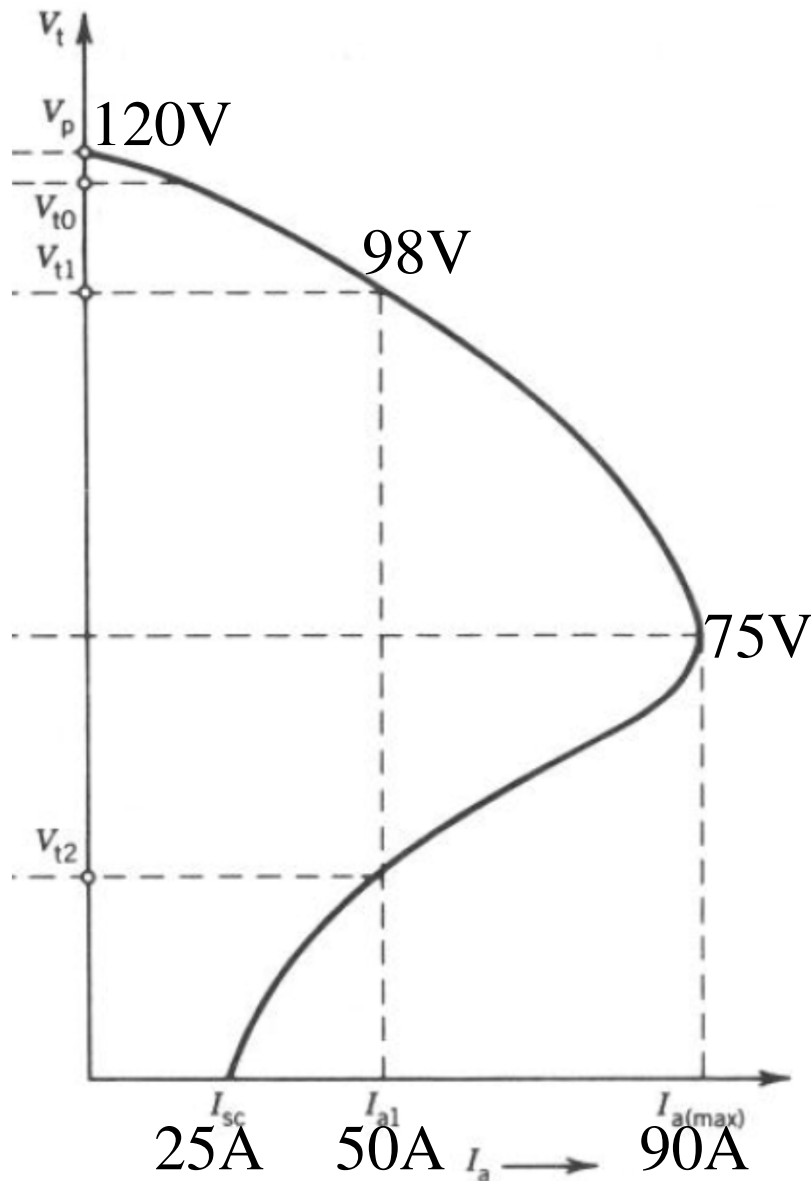
Gerador CC com Excitação Paralela – Revisão (Exemplo)

Curva de regulação de tensão sem a reação de armadura:



Gerador CC com Excitação Paralela – Revisão (Exemplo)

Curva de regulação de tensão com a reação de armadura:



Gerador CC com Excitação Paralela – Revisão (Exemplo)

Curva de regulação de tensão com e sem a reação de armadura:

