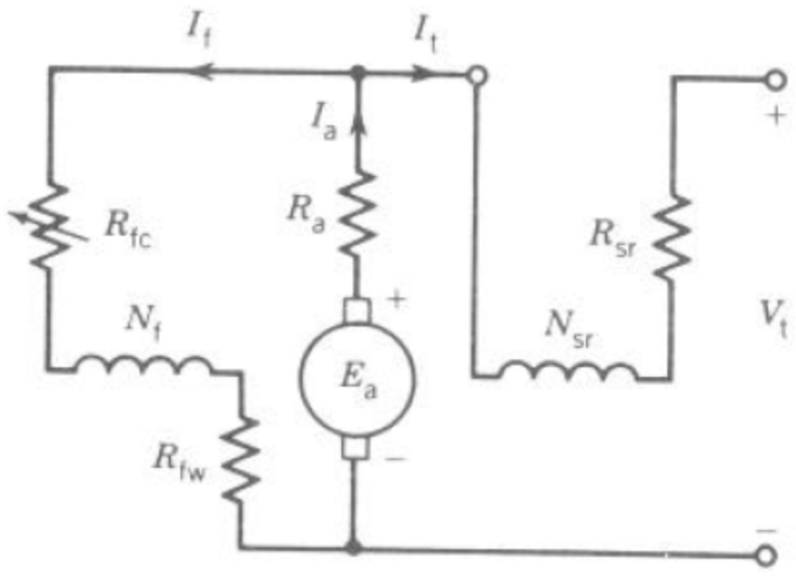
SEL 329 – CONVERSÃO ELETROMECÂNICA DE ENERGIA

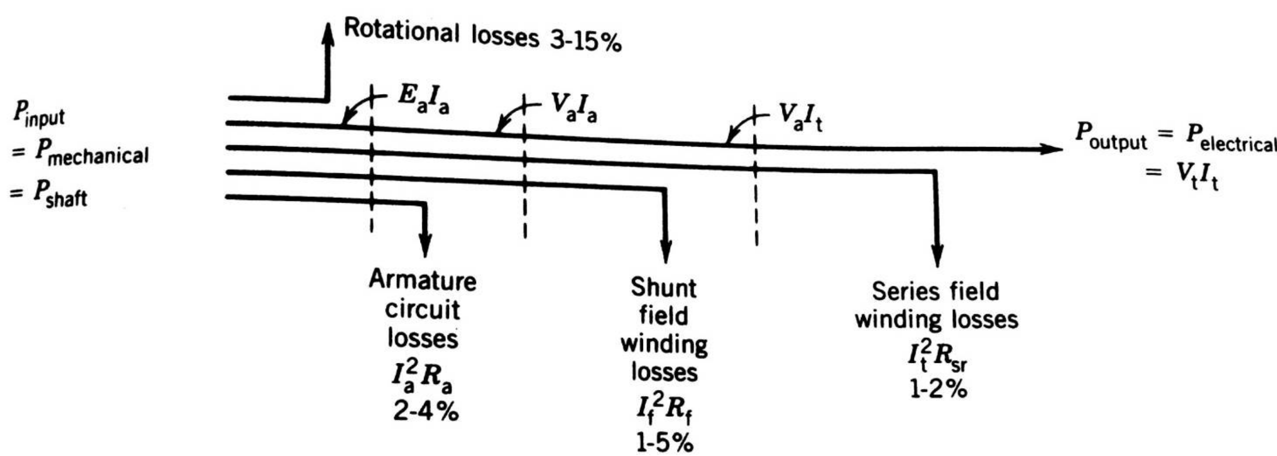
Aula 15

Revisão: Eficiência de um Gerador Composto Curto



(a)

$$\eta = \frac{\boldsymbol{Psaida}}{\boldsymbol{Pentrada}} \times \mathbf{100\%}$$



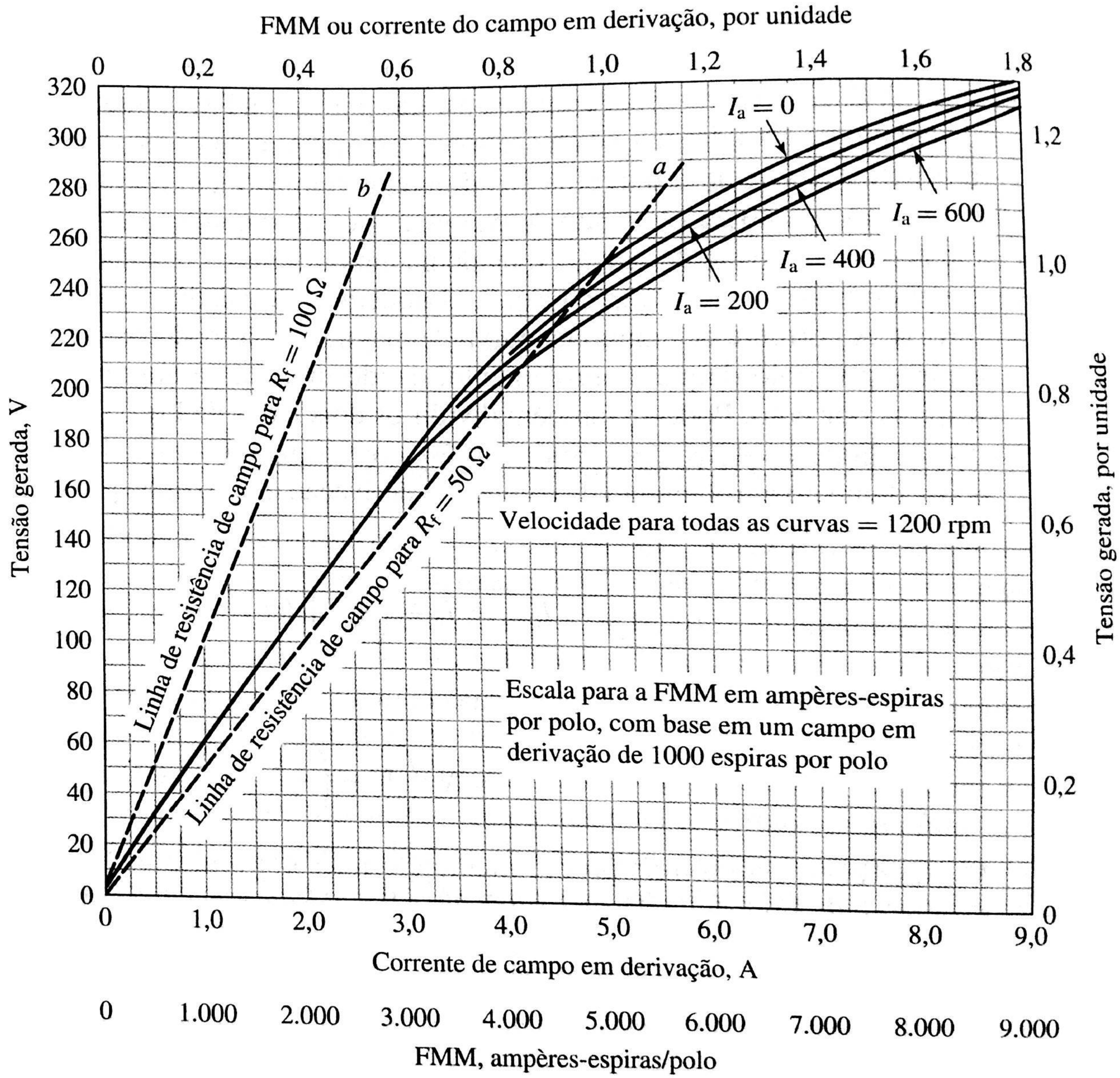
A análise é semelhante para os outros tipos de geradores CC.

Revisão: Exercício

Um gerador composto de 100kW, 250V e 400A, com uma ligação em derivação longa, tem uma resistência de armadura (incluindo as escovas) de 0,025Ω, uma resistência de campo em série de 0,005Ω 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.

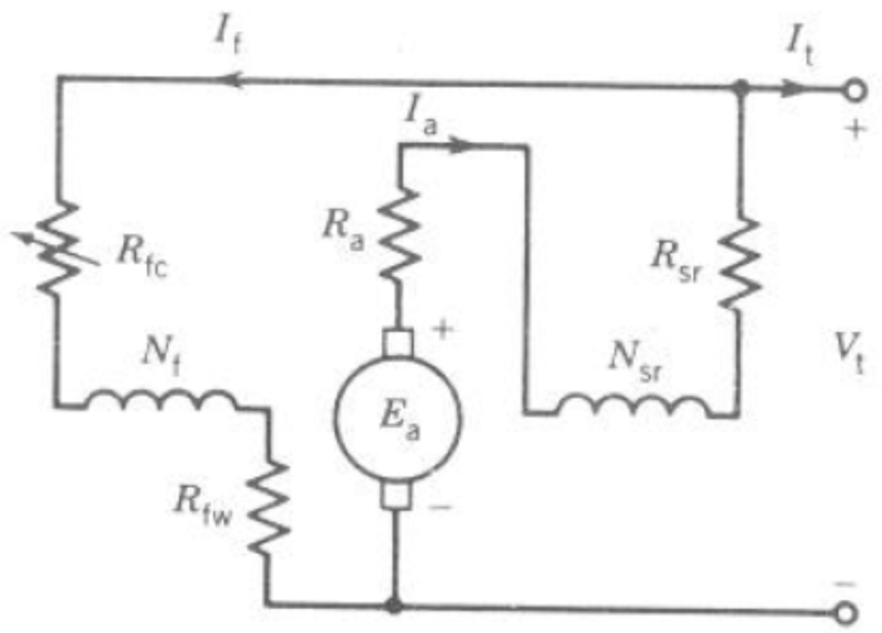
Calcule a tensão terminal, para a corrente nominal do gerador, quando a corrente de campo em derivação é 4,7A e velocidade igual a 1150 rpm. Despreze os efeitos da reação de armadura.

Revisão: Exercício



Revisão: Solução do Exercício

Gerador composto longo:



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

Corrente de campo efetiva:

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

$I_{f(RA)} = 0$

Revisão: 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:

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

Revisão: 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 *Ea*:

$$E_{a0} = 274\,V$$

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

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

Podemos agora determinar a tensão terminal:

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

Aula de Hoje

- Introdução aos Motores CC
- Motor CC com excitação paralela (shunt)
- Motor CC série
- Motor CC composto

Motor CC

- As diferentes características de Torque x Velocidade são obtidas através de combinações de enrolamentos de campo série e paralelo e por diferentes formas de excitação dos enrolamentos:

  Motor CC com excitação independente

  Motor CC paralelo (shunt)

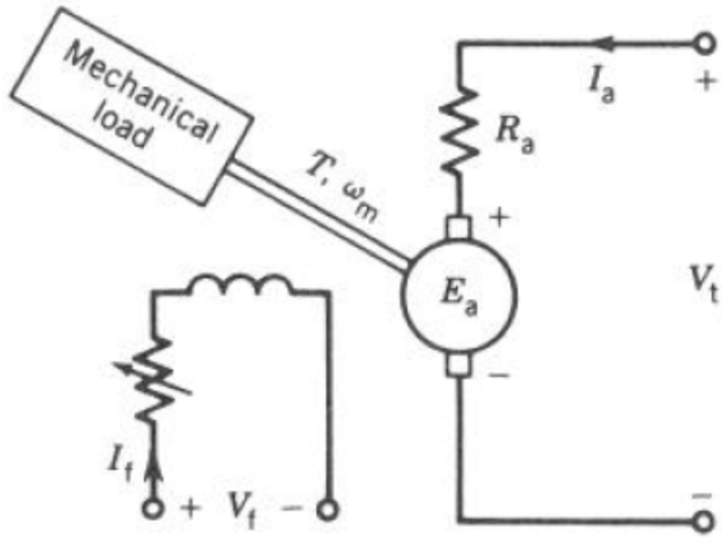
  Motor CC série

  Motor CC composto curto/longo (aditivo ou subtrativo)

- As equações de torque e tensão de armadura são as mesmas válidas para a operação como gerador:

$$\boxed{\begin{array}{l} E_a = K_a \times \Phi \times \omega_m \rightarrow \text{tensão de velocidade} \ (\mathrm{e} = \mathrm{Blv}) \\ T = K_a \times \Phi \times I_a \rightarrow \text{força de Lorentz} \ (\mathrm{f} = \mathrm{Bil}) \end{array}}$$

Motor CC – Excitação Independente – Regime Permanente



- As equações que descrevem o modelo de regime permanente ilustrado acima são:

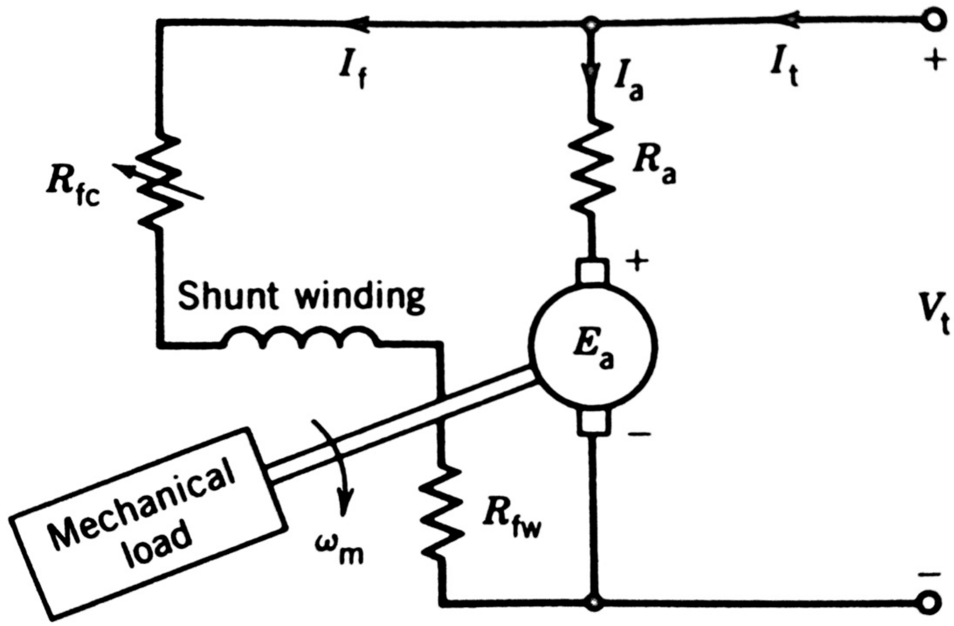
$$V_t = E_a + R_a \times I_a$$

$$E_a = K_a \times \Phi \times \omega_m = V_t - R_a \times I_a$$

$$T = K_a \times \Phi \times I_a$$

$$V_f = R_f I_f$$

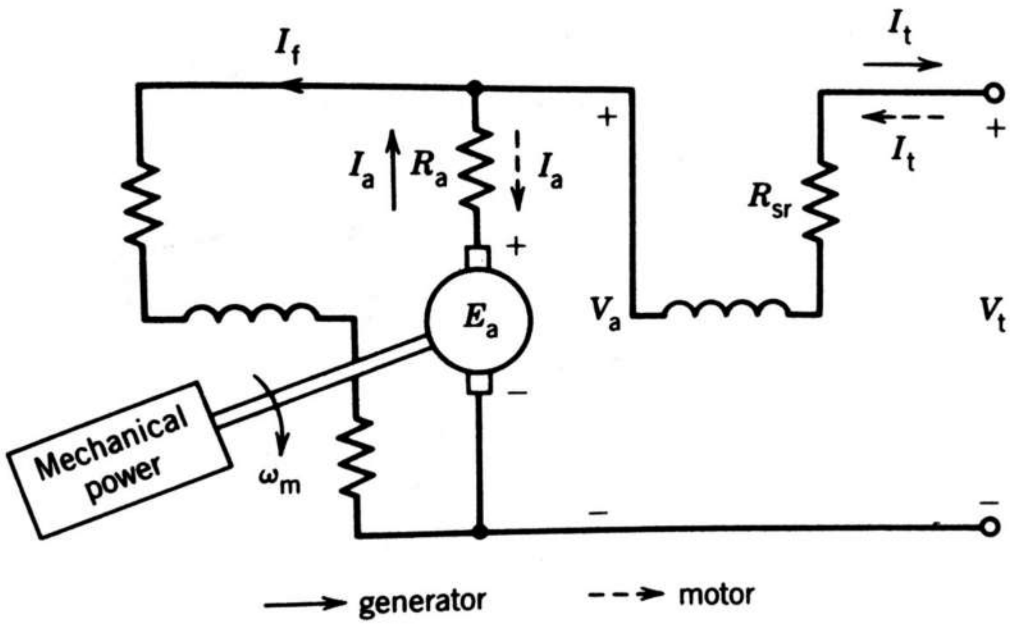
Motor CC – Excitação Shunt – Regime Permanente



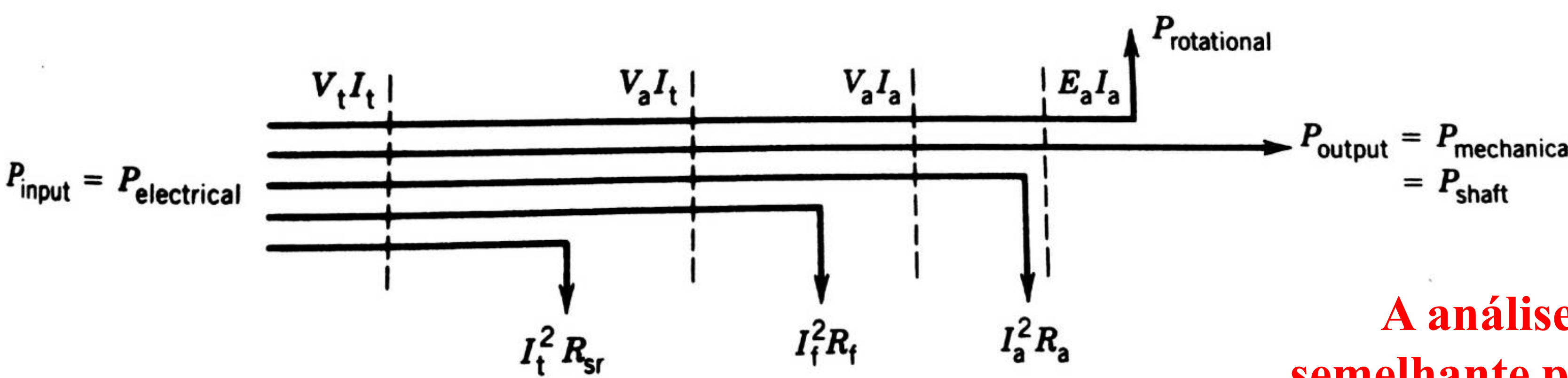
- As equações que descrevem o modelo de regime permanente ilustrado acima são:

$$V_t = E_a + R_a I_a$$
$$I_t = I_a + I_f$$
$$V_t = R_f I_f$$

Motor CC – Eficiência



$$\eta = \frac{Psaida}{Pentrada} \times 100\%$$



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

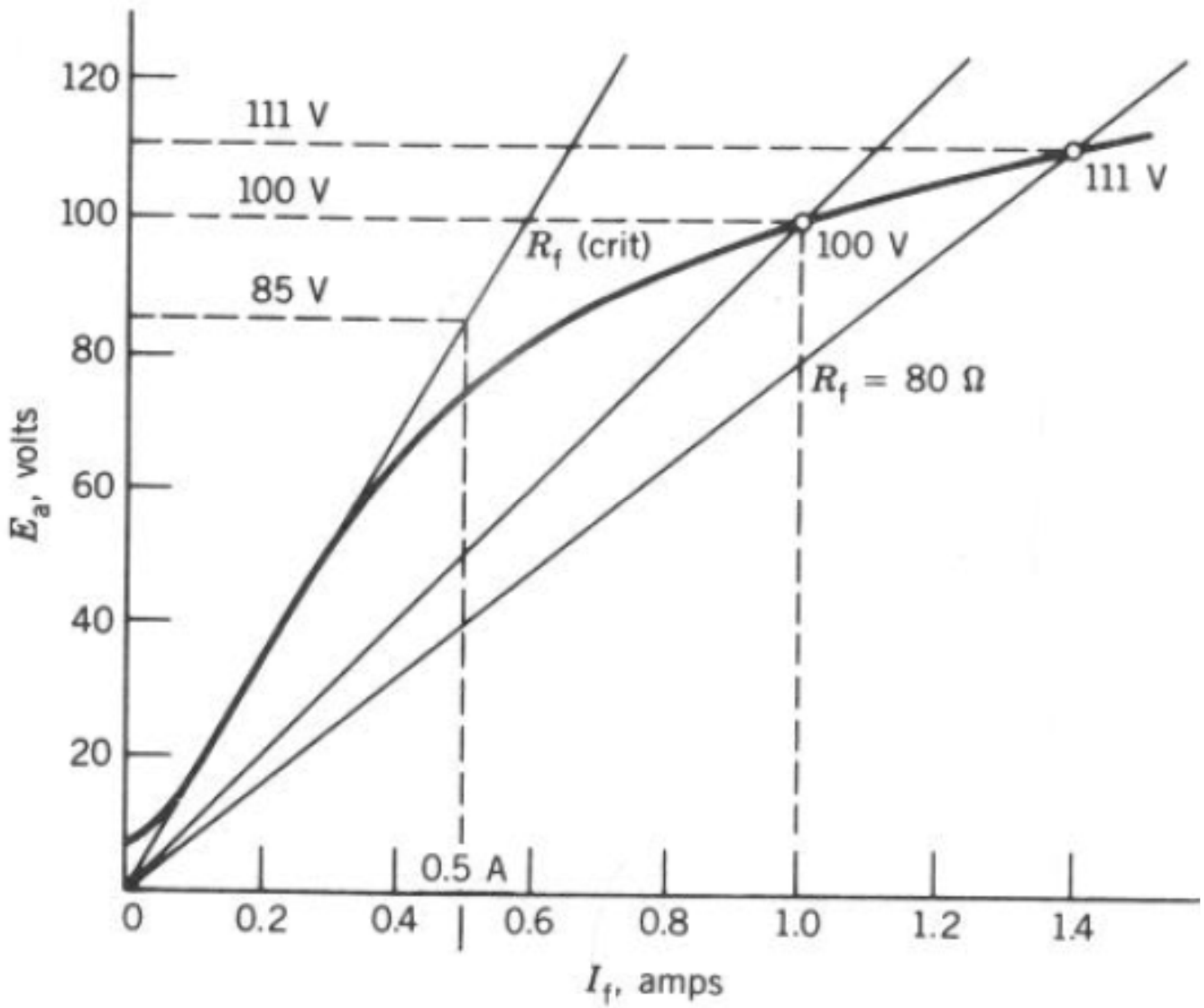
Motor CC – Regime Permanente. Exemplo 1

- Uma máquina CC (12 kW, 100 V, 1000 rpm) é conectada a uma fonte CC de 100 V e operar como motor com excitação shunt. Operando em vazio (sem carga), o motor gira a 1000 rpm e exige 6 A de corrente de armadura. Tem-se $R_a = 0{,}1\Omega$; $R_{fw} = 80\Omega$; o enrolamento de campo tem 1200 espiras/polo.

  - Calcule o valor da resistência do reostato de controle do circuito de campo.
  - Encontre as perdas rotacionais a 1000 rpm.
  - Encontre a velocidade, o valor do torque eletromagnético e a eficiência do motor quando a corrente nominal flui na armadura, considerando o seguinte: (i) despreze a reação da armadura; (ii) considere que o fluxo magnético no entreferro é reduzindo em 5% devido à reação da armadura.
  - Encontre o torque de partida se a corrente de partida da armadura é limitada a 150% do seu valor nominal considerando o seguinte: (i) despreze a reação da armadura; (ii) a corrente de reação da armadura é igual a 0,16 A.

Motor CC – Regime Permanente. Exemplo 1

- Curva de magnetização da máquina CC do Exemplo 1:



Motor CC – Excitação Shunt/Independente – Torque x Velocidade

- Em muitas aplicações, motores cc são utilizados para acionar cargas mecânicas em situações que demandam uma das seguintes características:

  - Algumas aplicações requerem que a velocidade se mantenha constante à medida que a carga (torque mecânico) varia.
  - Algumas aplicações requerem variação de velocidade em uma ampla faixa de valores.

- Com isso, dependendo da aplicação, deve-se conhecer a relação entre torque e velocidade da máquina e determinar a forma de controle mais adequada.

Motor CC – Excitação Shunt/Independente – Torque x Velocidade

- Para um motor CC com excitação independente (ou shunt), pode-se escrever que:

$$E_a = K_a \times \Phi \times \omega_m = V_t - R_a \times I_a \qquad (1)$$

$$T = K_a \times \Phi \times I_a \qquad (2)$$

de (1), temos que :

$$\omega_m = \frac{V_t - R_a \times I_a}{K_a \times \Phi} \qquad (3)$$

de (2) em (3), temos que :

$$\omega_m = \frac{V_t}{K_a \times \Phi} - \frac{R_a \times I_a}{K_a \times \Phi} = \frac{V_t}{K_a \times \Phi} - \frac{R_a}{(K_a \times \Phi)^2} \times T$$

Motor CC – Excitação Shunt/Independente – Torque x Velocidade

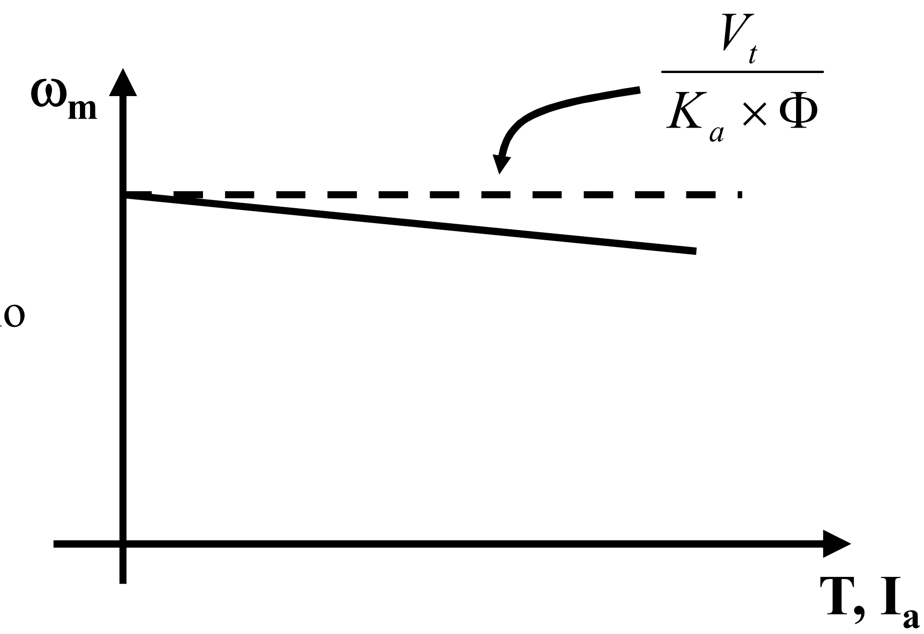
$$\omega_m = \frac{V_t}{K_a \times \Phi} - \frac{R_a}{(K_a \times \Phi)^2} \times T$$

- Se a tensão terminal V_t e o fluxo produzido pelo enrolamento de campo (ϕ) permanecerem constantes, tem-se uma relação torque versus velocidade linear:

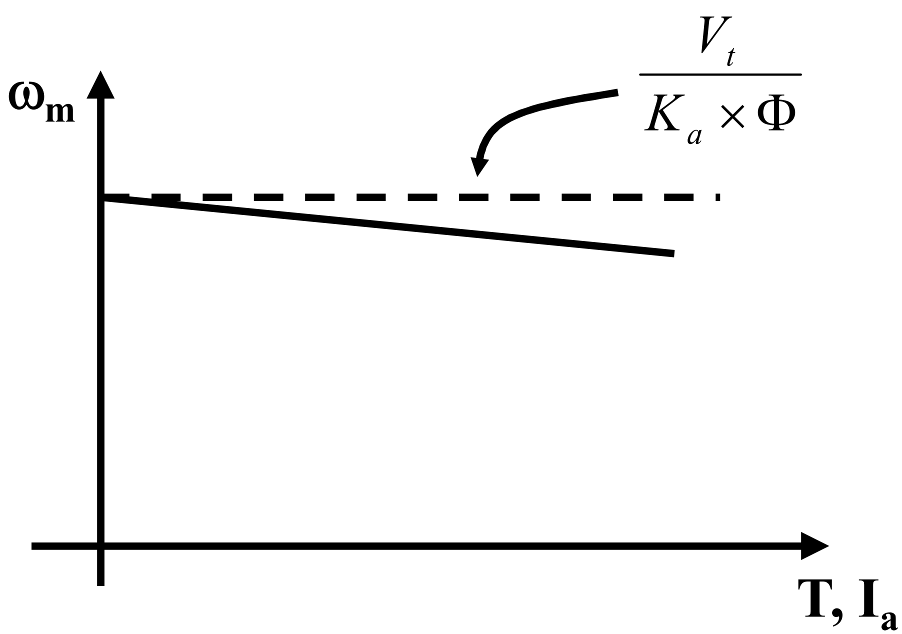
$$\omega_m = k_1 - k_2 T$$

onde $\frac{V_t}{K_a \times \Phi}$ é a velocidade da máquina a vazio

$k_2 = \frac{R_a}{(K_a \times \Phi)^2}$ é a inclinação da reta T x ω_m



Motor CC – Excitação Shunt/Independente – Torque x Velocidade



- A queda de velocidade com o aumento do torque (da carga) é pequena visto que o valor de R_a é pequeno, ou seja, o motor CC shunt ou independente, mesmo sem controle, tem boa regulação de velocidade.

- Além disso, em máquinas reais o fluxo ϕ diminui com o aumento de I_a (reação de armadura), resultando em aumento da velocidade. Portanto, a reação de armadura melhora a regulação de velocidade de motores shunt e independente.

Motor CC – Excitação Shunt/Independente – Torque x Velocidade

- A partir da equação:

$$\omega_m = \frac{V_t}{K_a \times \Phi} - \frac{R_a}{(K_a \times \Phi)^2} \times T$$

conclui-se que a velocidade da máquina pode ser controla de três maneiras diferentes:

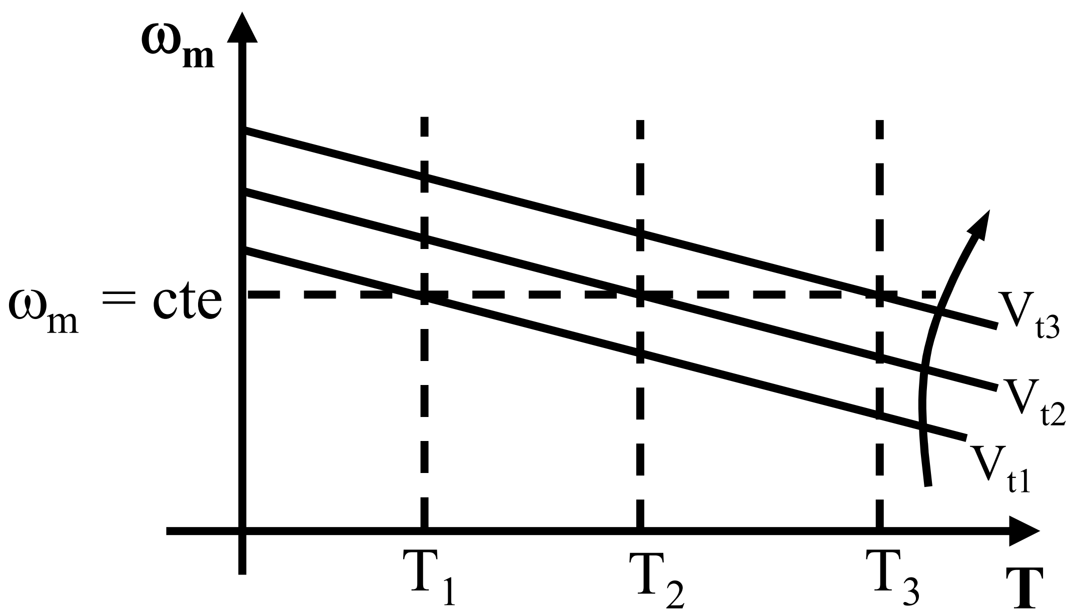
1. Controle de velocidade via tensão terminal (V_t)
2. Controle de velocidade via corrente de campo ($\phi \propto I_f$)
3. Controle de velocidade via resistência de armadura (R_a)

Obs: usualmente, a opção de controle via tensão terminal não é recomendada para o motor de cc com excitação paralela visto que a corrente de campo (e consequentemente o campo) varia com a tensão terminal. Isso exige controladores mais complexos (controle simultâneo da tensão terminal e da corrente de campo)

Motor CC Shunt/Independente – Controle de velocidade via V_t

- Neste método de controle, a resistência de armadura R_a e a corrente de campo I_f permanecem constantes. Nesse caso, a velocidade aumenta com o aumento de V_t.

$$\boxed{\omega_m = \frac{V_t}{K_a \times \Phi} - \frac{R_a}{(K_a \times \Phi)^2} \times T}$$



Motor CC Shunt/Independente – Controle de velocidade via V_t

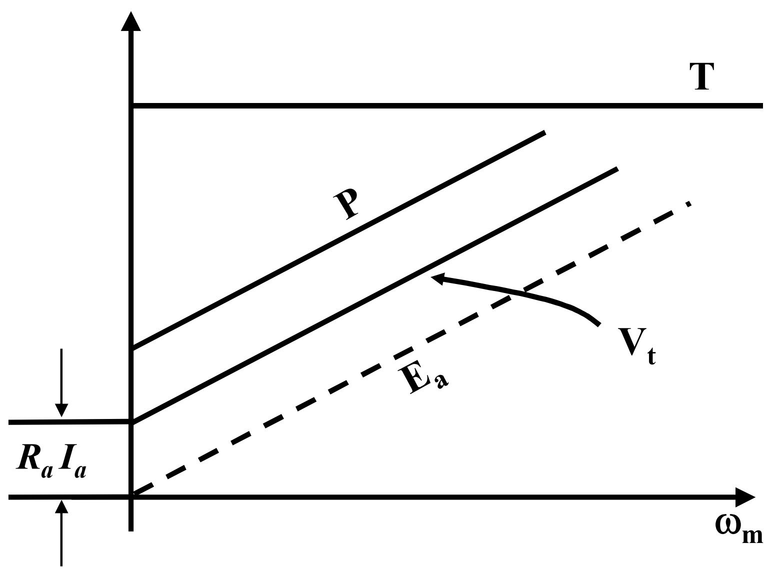
- Para torque constante, a velocidade varia linearmente com V_t.
- Se carga mecânica é variada, a velocidade pode ser ajustada para se manter constante através de V_t.
- Para cada valor de torque fornecido para a carga há um ajuste correspondente da tensão terminal de forma a manter a velocidade constante.
- Para uma carga fixa pode-se conseguir variação suave de velocidade, desde zero até valor nominal, através do ajuste de V_t. Porém, este método é caro, pois exige uma fonte de tensão CC variável para o circuito de armadura.

Motor CC Shunt/Independente – Controle de velocidade via V_t

- Se a corrente de armadura (I_a) é admitida constante, temos que:

$$\mathbf{E_a \propto V_t \propto \omega_m}$$

- E, portanto, a tensão terminal V_t aumenta linearmente com o aumento de ω_m.
- Adicionalmente, se I_a é constante, então o torque T ($K_a\ \phi\ I_a$) é constante, para um dado valor de corrente de campo.
- Com isso, a potência de entrada do motor ($P = V_t I_a$) também varia linearmente com a velocidade.



Motor CC Shunt/Independente – Controle de velocidade via I_f

- Neste método de controle, a resistência de armadura R_a e a tensão terminal V_t permanecem constantes, e a velocidade é controlada variando-se a corrente de campo I_f.
- Isto pode ser feito inserindo-se uma resistência variável (R_{fc}) em série com o enrolamento de campo.
- Desprezando a saturação do núcleo (linearidade magnética) o fluxo produzido pelo enrolamento de campo é proporcional à corrente de campo. Portanto,

$$\Phi = k \times I_f$$

Com isso,

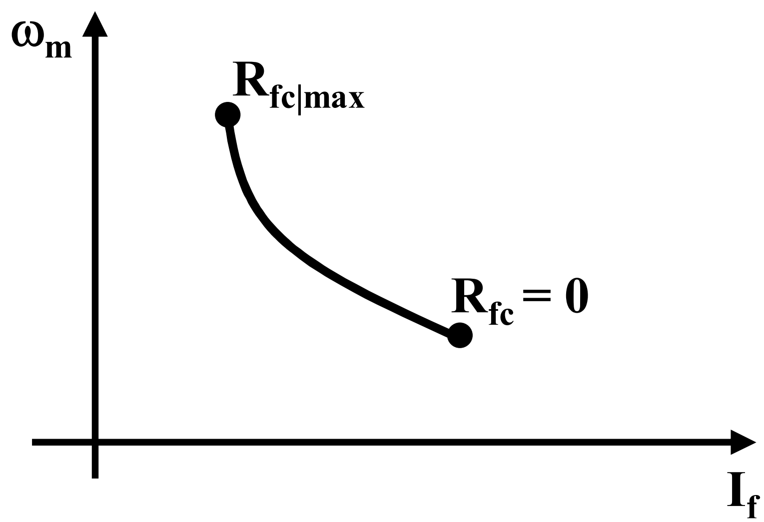
$$\omega_m = \frac{V_t}{K_a \times k \times I_f} - \frac{R_a}{(K_a \times k \times I_f)^2} \times T$$

Supondo $K_f = k \times K_a$, temos que:

$$\boxed{\omega_m = \frac{V_t}{K_f \times I_f} - \frac{R_a}{(K_f \times I_f)^2} \times T}$$

Motor CC Shunt/Independente – Controle de velocidade via I_f

- A velocidade cresce com a diminuição da corrente de campo. Deve-se destacar que se a corrente de campo for muito baixa ($I_f \rightarrow 0$), a velocidade pode atingir valores extremamente elevados.



Motor CC Shunt/Independente – Controle de velocidade via I_f

$$\omega_m = \frac{V_t}{K_f \times I_f} - \frac{R_a}{\left(K_f \times I_f\right)^2} \times T$$

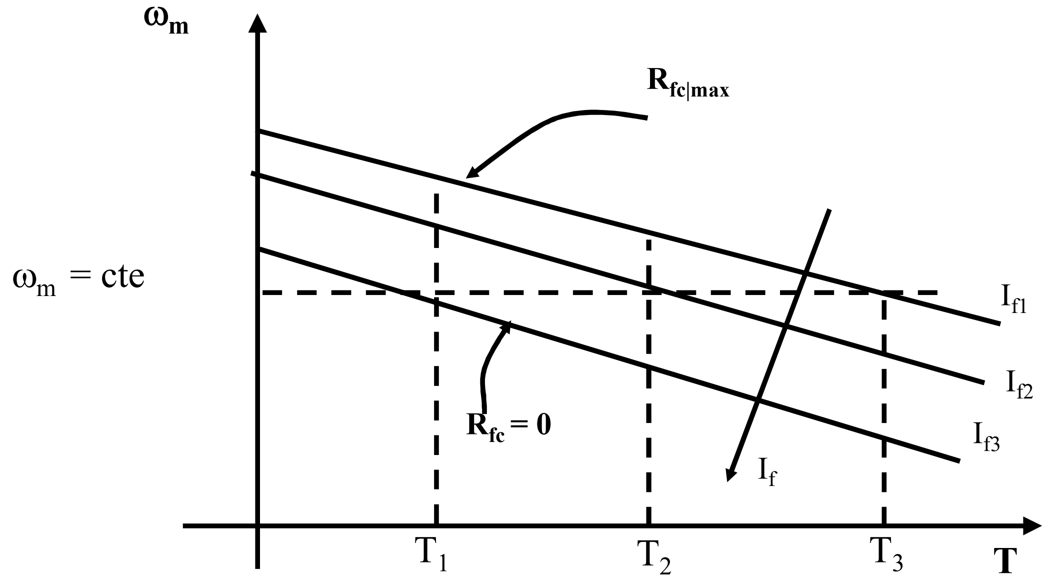
- Para um dado valor de I_f, a relação ω_m x T é dada por:

$$\omega_m = k_3 - k_4 T$$

onde $k_3 = \dfrac{V_t}{K_f \times I_f}$ é a velocidade a vazio

$k_4 = \dfrac{R_a}{\left(K_f \times I_f\right)^2}$ é a inclinação da reta T x ω_m

Motor CC Shunt/Independente – Controle de velocidade via I_f



- Para um dado torque, a velocidade operação pode ser ajustada através da variação de R_{fc} e, consequentemente, de I_f.
- Para torque variável a velocidade pode ser mantida constante com o ajuste de R_{fc}.
- Esse tipo de controle é mais simples e barato comparado com o controle da tensão terminal. Mas a resposta é mais lenta devido ao valor elevado da indutância do circuito de campo.

Motor CC Shunt/Independente – Controle de velocidade via V_t e I_f

- Controle de velocidade de zero até o valor base (*velocidade base se refere àquela atingida quando tensão terminal é nominal*) é usualmente obtido através da variação da tensão terminal V_t.
- Controle de velocidade além do valor base é obtido através da diminuição da corrente de campo I_f.
- Se a corrente de armadura não exceder seu valor nominal, controle de velocidade além do valor base é restrito a aplicações que demandem potência constante.

$$P = V_t I_a = \text{cte} \approx E_a I_a$$

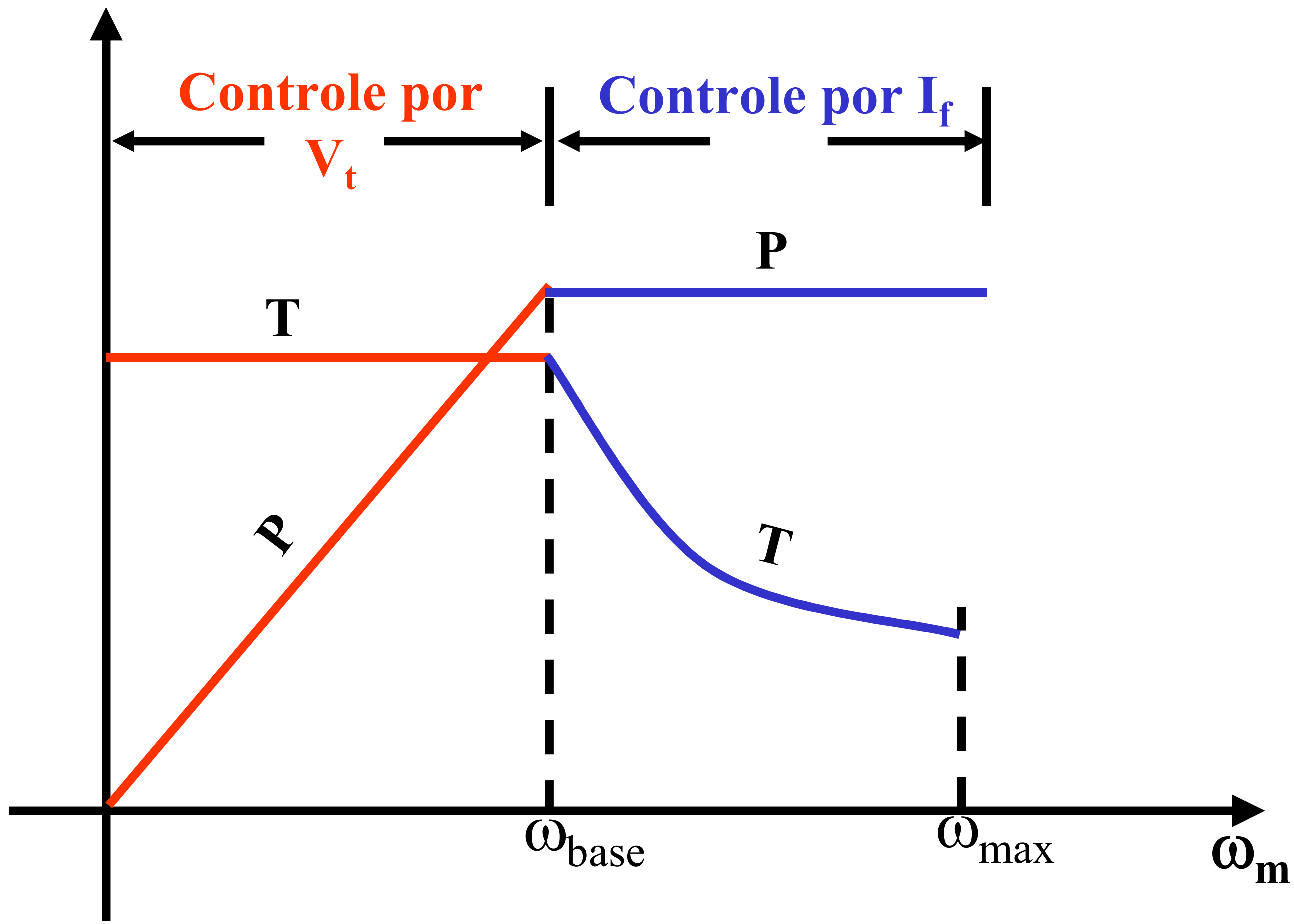
$$\text{Porém, } T\omega_m = E_a I_a \rightarrow$$

$$\rightarrow T = \frac{E_a \times I_a}{\omega_m} = \frac{\text{cte}}{\omega_m}$$

$$\Longrightarrow$$

Portanto, ao se aumentar a velocidade, a partir da diminuição da corrente de campo I_f, o torque diminui.

Motor CC Shunt/Independente – Controle de velocidade via V_t e I_f



Motor CC Shunt/Independente – Controle de velocidade via R_a

- Neste método de controle, a tensão terminal V_t e a corrente de campo I_f (ϕ) permanecem constantes nos seus valores nominais, e a velocidade é controlada variando-se a resistência da armadura R_a.

- Para isso, insere-se uma resistência variável em série com a armadura, resultando em:

$$\omega_m = \frac{V_t}{K_a \times \Phi} - \frac{R_a + R_{ae}}{(K_a \times \Phi)^2} \times T$$

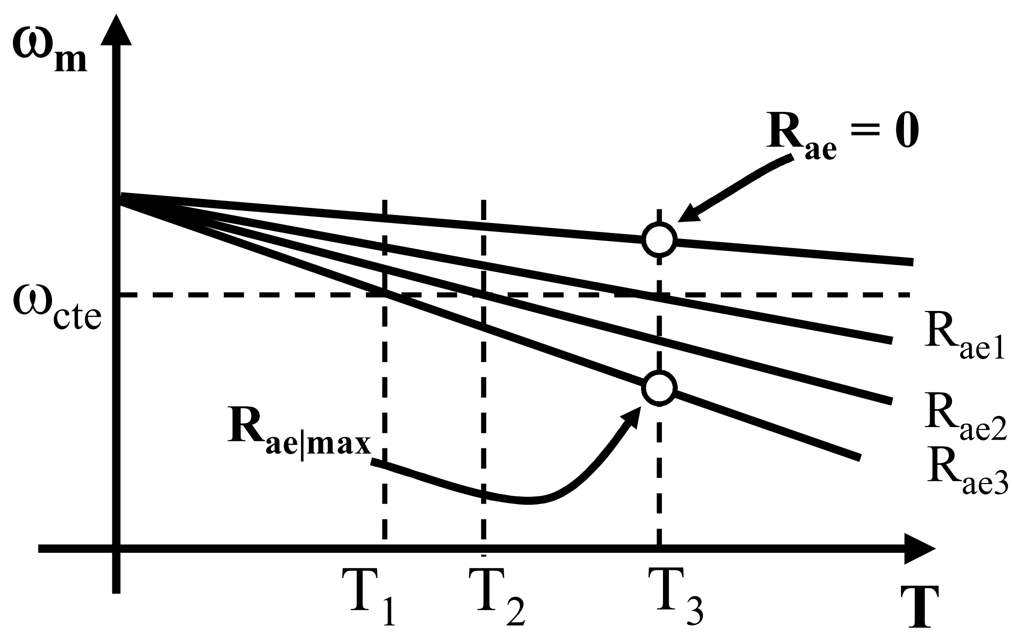
$$\omega_m = k_5 - k_6 \times T$$

$$k_5 = \frac{V_t}{K_a \times \Phi} \qquad k_6 = \frac{R_a + R_{ae}}{(K_a \times \Phi)^2}$$

Velocidade em vazio

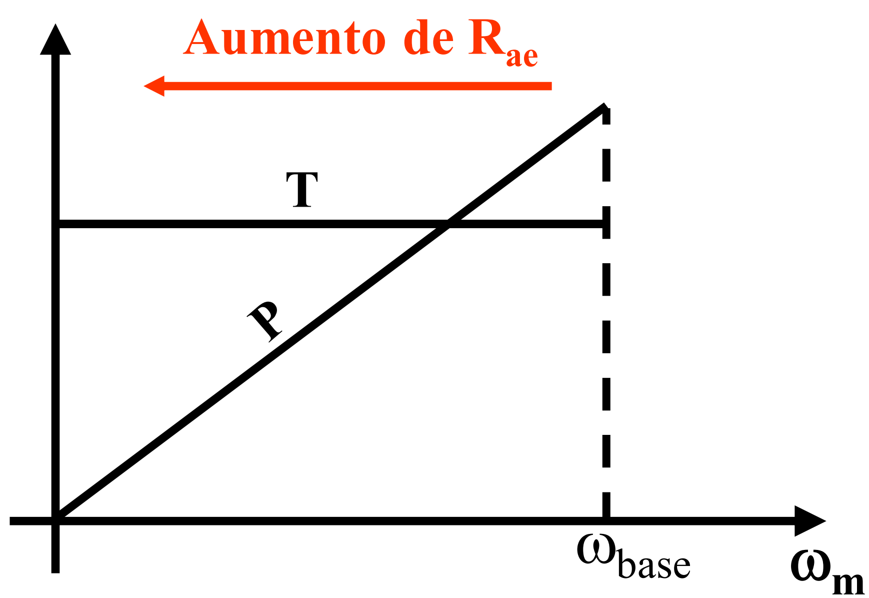
Motor CC Shunt/Independente – Controle de velocidade via R_a

- Para torque fixo, R_{ae} pode ser ajustada de forma que o motor possa girar em diferentes velocidades. Quanto maior R_{ae}, menor a velocidade.
- Para torque variável, R_{ae} pode ser ajustada para manter velocidade constante.



Motor CC Shunt/Independente – Controle de velocidade via R_a

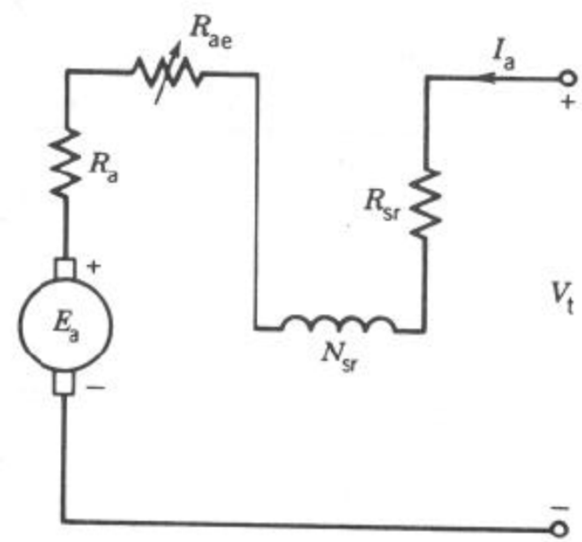
- A velocidade pode ser variada de zero até o valor base, considerando torque constante, através da variação da resistência R_{ae}.



- Desvantagem: Controle discreto, baixa precisão e perdas adicionais em R_{ae}. Além disso, uma vez que R_{ae} é percorrida pela corrente de armadura, o seu custo é maior se comparado com a resistência externa do circuito de campo R_{fc}.

Motor CC Excitação Série

- O modelo esquemático do motor CC série é mostrado abaixo. Deve-se notar a presença de uma resistência externa R_{ae}, a qual tem a função de permitir o controle de velocidade.



- As mesmas equações de regime permanente empregadas para o gerador CC série são válidas para o motor CC série.

$$E_a = K_a \times \Phi_{sr} \times \omega_m$$
$$T = K_a \times \Phi_{sr} \times I_a$$

- O fluxo é produzido pela corrente de armadura que circula pelo enrolamento de campo série composto de N_{sr} espiras.

Motor CC Excitação Série – Controle de Velocidade

- Admitindo linearidade magnética, o fluxo é proporcional à corrente de armadura:

$$K_a \times \Phi_{sr} = K_{sr} \times I_a$$

- Consequentemente, o torque mecânico desenvolvido pelo motor série será uma função quadrática da corrente de armadura, pois:

$$T = K_a \times \Phi \times I_a = \left(K_{sr} \times I_a\right) \times I_a$$

Portanto :

$$T = K_{sr} \times I_a^2$$

- Do circuito equivalente, temos que:

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

Como $\omega_m = \dfrac{E_a}{K_{sr} \times I_a}$, temos que :

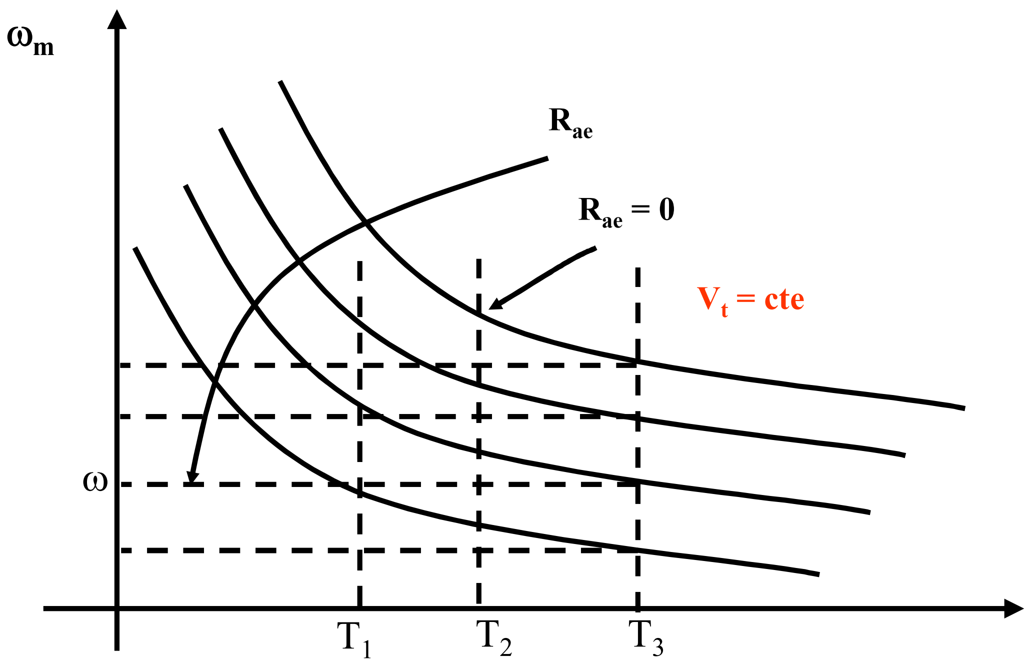
$$\omega_m = \frac{V_t}{K_{sr} \times I_a} - \frac{R_a + R_{ae} + R_{sr}}{K_{sr}}$$

Substituindo $I_a = \dfrac{\sqrt{T}}{\sqrt{K_{sr}}}$,

$$\boxed{\omega_m = \frac{V_t}{\sqrt{K_{sr}} \times \sqrt{T}} - \frac{R_a + R_{ae} + R_{sr}}{K_{sr}}}$$

Motor CC Excitação Série – Controle de Velocidade

- O aumento da resistência externa da armadura R_{ae} desloca a curva T x ω_m para baixo.



- Com isso, uma carga com torque fixo pode operar em diferentes velocidades ou uma carga com torque variável pode operar com velocidade fixa através do ajuste de R_{ae} .

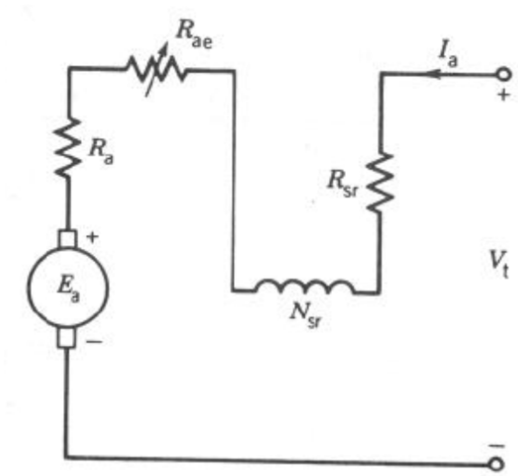
Motor CC Excitação Série – Controle de Velocidade

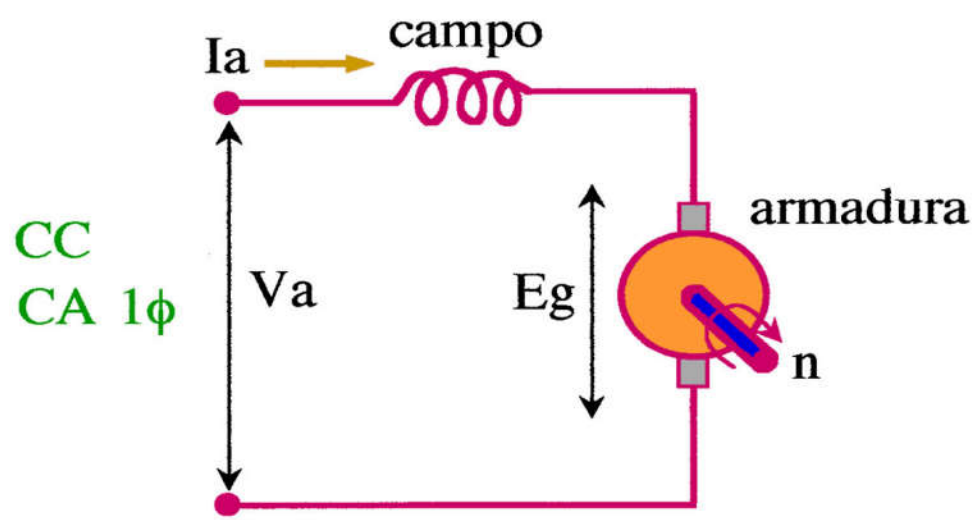
- Vantagens:
  1. Permite uma larga faixa de variação de velocidade desde zero até o valor nominal.
  2. Tem alto torque de partida (metrôs, trens, motor de partida de automóveis, etc).
- A velocidade também pode ser variada através do ajuste de V_t, o que demandaria uma fonte variável de tensão.
- Perde-se a opção de controle de velocidade via corrente de campo ($I_f = I_a$).

Motor CC Excitação Série – Motor Universal

- O motor série pode funcionar com alimentação em CA visto que o enrolamento de campo (série) e de armadura são percorridos pela mesma corrente. Assim, quando a corrente inverte sua polaridade, no mesmo instante o campo também muda sua orientação produzindo torque sempre na mesma direção (unidirecional). Em outras palavras, o sentido do fluxo produzido pelo campo e o sentido da corrente de armadura mudam ao mesmo tempo, mantendo o sentido da força eletromagnética e, portanto do torque.

$$T = K_{sr} \times I_a^2$$

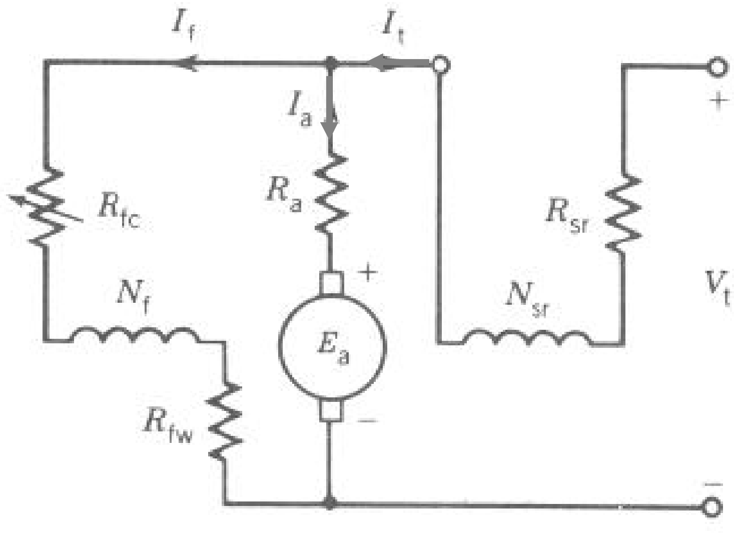




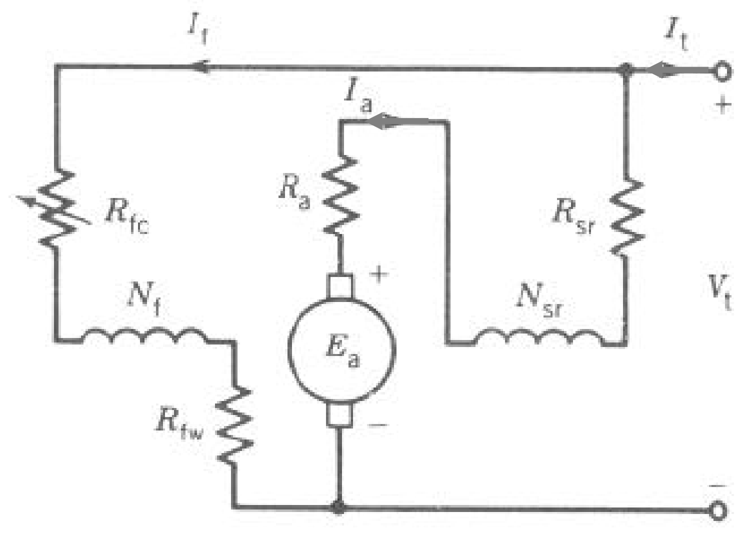
- Os motores universais são adequados para acionamento em corrente alternada de vários eletrodomésticos (liquidificadores, aspiradores de pó, furadeiras etc).

Motor CC Composto

- Pode-se conseguir diferentes características de T x ω_m combinando os enrolamentos de campo série e shunt.



(a)



(b)

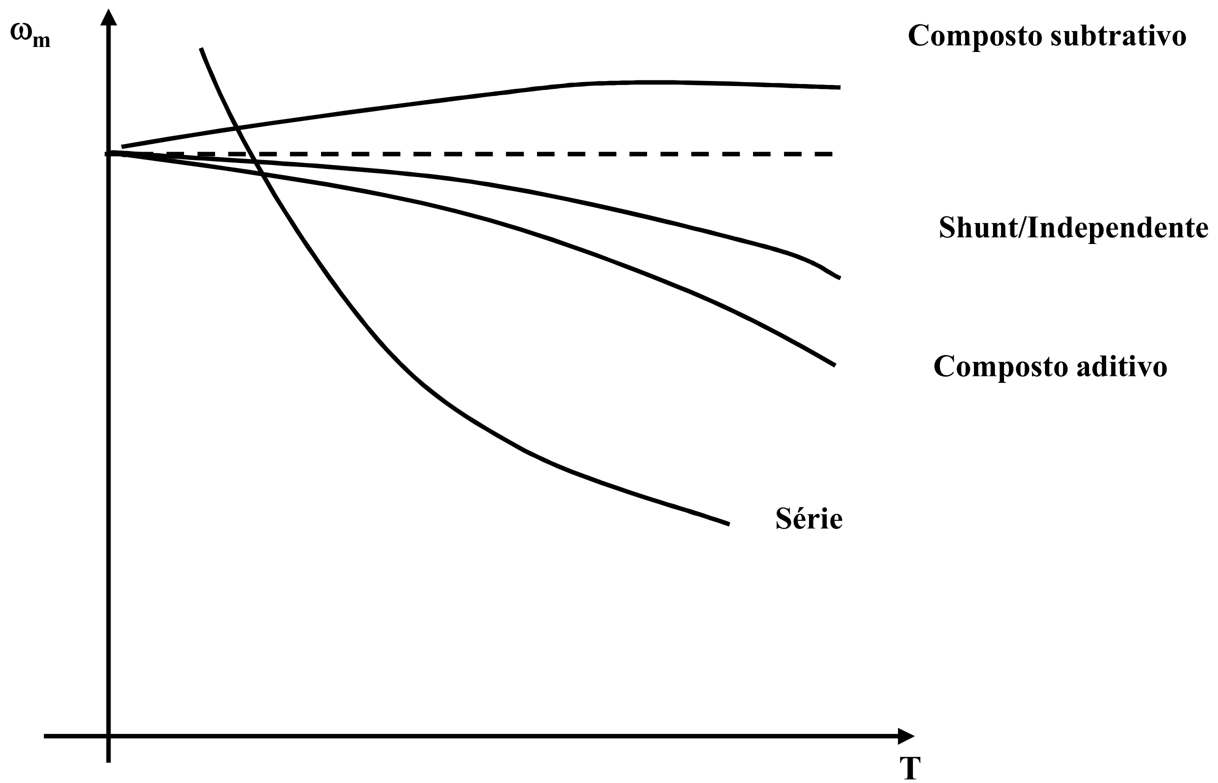
$$E_a = K_a \times \Phi \times \omega_m = K_a \times (\Phi_{sh} \pm \Phi_{sr}) \times \omega_m$$
$$T = K_a \times \Phi \times I_a = K_a \times (\Phi_{sh} \pm \Phi_{sr}) \times I_a$$

$$E_a = V_t - R_a \times I_a - R_{sr} \times I_t \text{ (composto curto, mas } I_t \approx I_a \text{ (I}_f << I_a))$$
$$E_a = V_t - R_a \times I_a - R_{sr} \times I_a \text{ (composto longo)}$$

$$\boxed{\omega_m = \frac{V_t}{K_a \times (\Phi_{sh} \pm \Phi_{sr})} - \frac{R_a + R_{sr}}{K_a^{\,2} \times (\Phi_{sh} \pm \Phi_{sr})^2} \times T}$$

Motor CC Composto

- **Composto subtrativo:** A desmagnetização fluxo (ϕ_{sh} - ϕ_{sr}) provoca aumento de velocidade se comparada com a máquina com excitação shunt/independente.
- **Composto aditivo:** O aumento do fluxo (ϕ_{sh} + ϕ_{sr}) provoca queda adicional de velocidade se comparada com a máquina com excitação shunt/independente.



Próxima Aula

- Máquinas de corrente alternada
- Campo Magnético Girante