

SEL 329 – CONVERSÃO ELETROMECCÂNICA DE ENERGIA

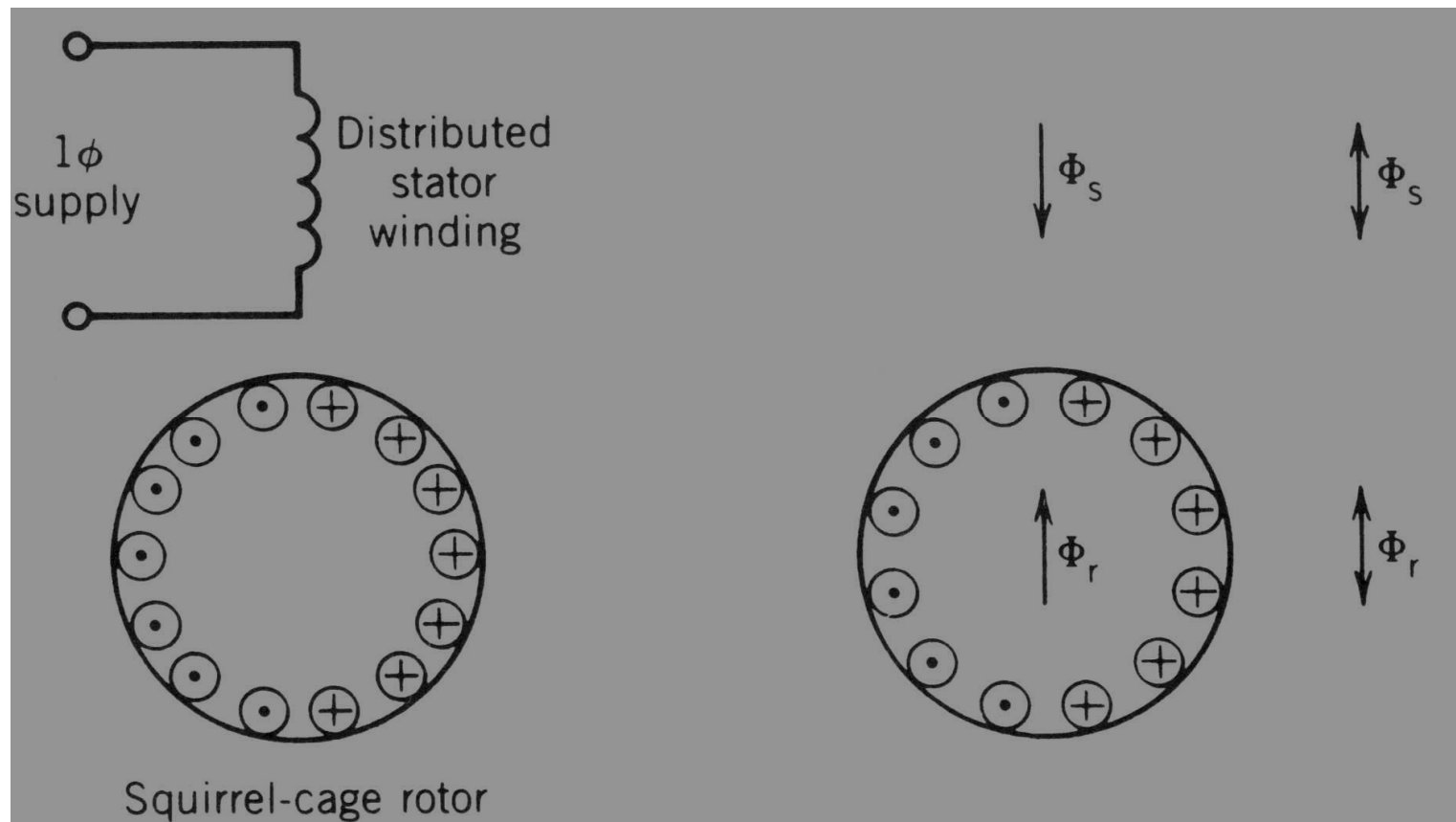
Aula 21

Motor de indução monofásico

- Pequenos motores usados em geladeiras, lavadoras de roupa, ventiladores, condicionadores de ar, etc., são monofásicos;
- Em geral a potência desses pequenos motores é fracionária, ou seja, menor do que 1 hp ($1/2$ hp, $1/3$ hp, $1/20$ hp, $1/30$ hp);
- Os motores monofásicos mais comuns são do tipo:
 - ✓ Motor de indução monofásico – mais utilizado
 - ✓ Motor síncrono monofásico – p/ aplicações com velocidade constante.
 - ✓ Motor universal (motor série CA ou CC) – aplicações que demandem alto torque de partida ou alta velocidade (bastante usado em pequenos eletrodomésticos: liquidificador, batedeira, processadores (mixers), etc.)

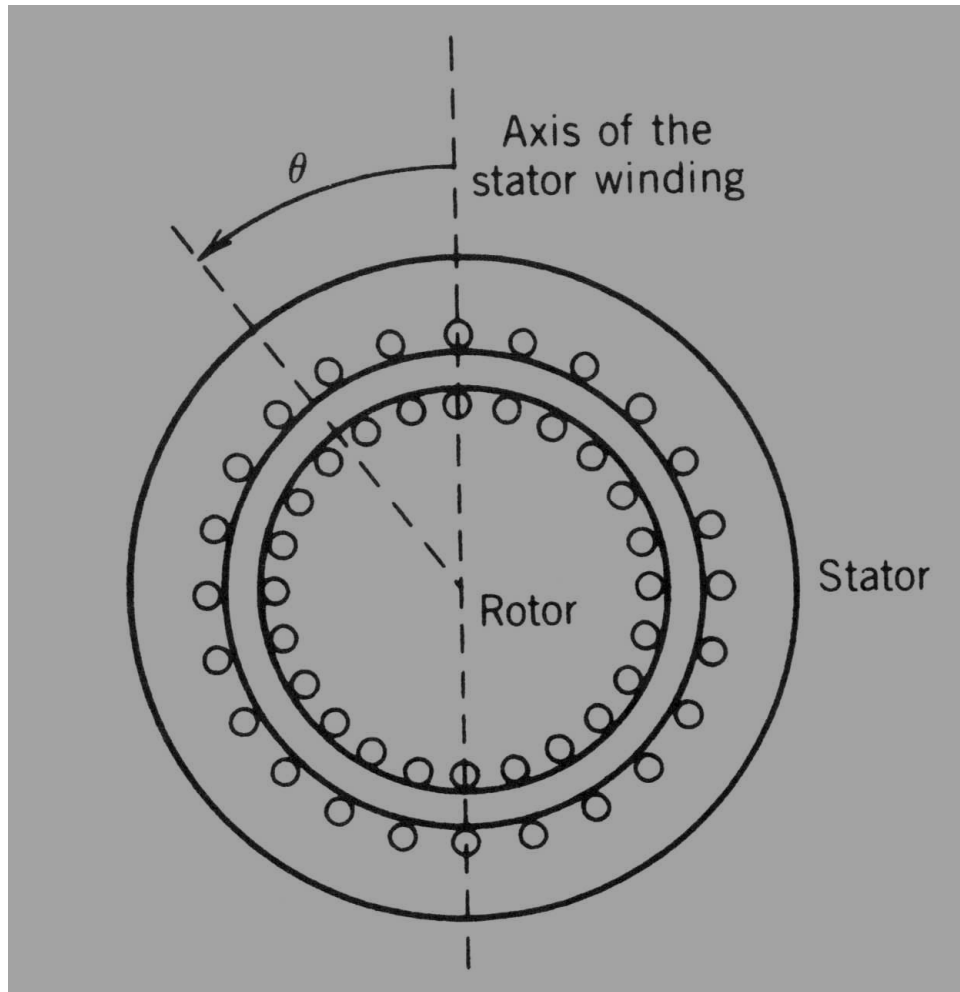
Motor de indução monofásico

- Pela Lei de Lenz o fluxo produzido no rotor pela gaiola, se opõe ao fluxo produzido pelo enrolamento distribuído do estator;
- Não havendo defasagem angular entre os dois campos pulsantes não há produção de torque (não há torque de partida);



Motor de indução monofásico

- Se o motor estiver girando, através da aplicação de um torque externo ou de circuitos auxiliares, o motor de indução monofásico produz torque, pois cria-se uma defasagem entre os dois campos pulsantes;



$$T = k \bar{B}_r \times \bar{B}_s$$

Decomposição do campo pulsante

- O campo pulsante do estator pode ser decomposto em dois campos girantes no entreferro, um direto e outro reverso;
- Considerando um enrolamento distribuído senoidalmente, tem-se que:

$$N(\theta) = N \cos \theta$$

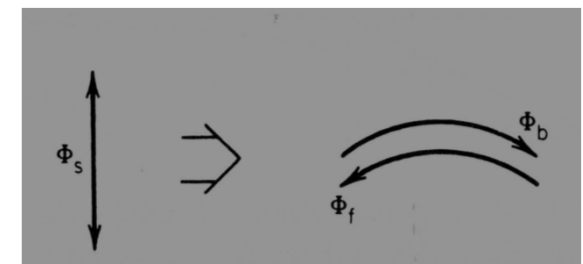
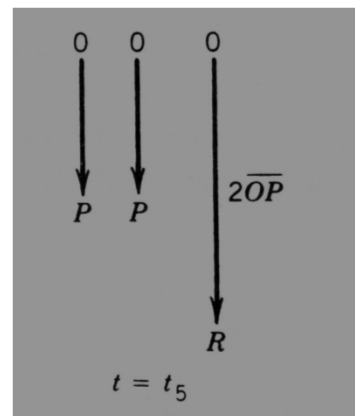
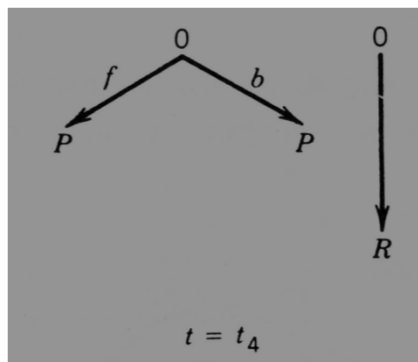
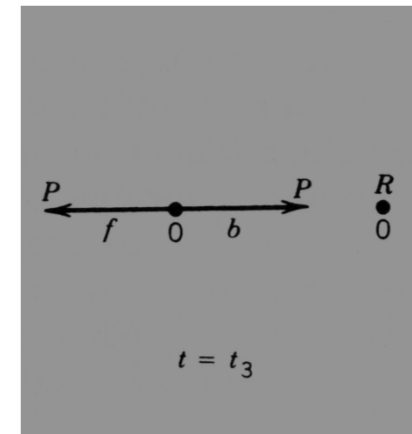
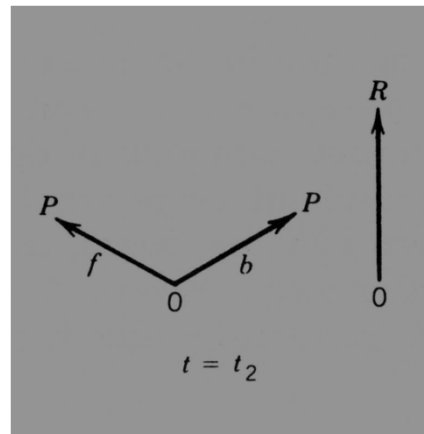
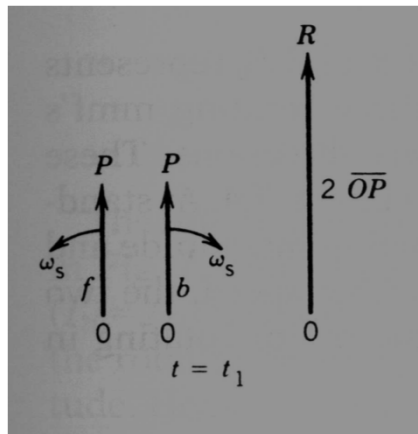
- Alimentando esse enrolamento com corrente alternada senoidal, tem-se a seguinte força magnetomotriz:

$$F(\theta, t) = N(\theta) * i(t) = N \cos \theta * I_{\max} \cos \omega t$$

Motor de indução monofásico

- O campo pulsante do estator pode ser decomposto em dois campos girantes no entreferro, um direto e outro reverso, com a metade da magnitude do campo pulsante;

$$F(\theta, t) = \frac{NI_{\max}}{2} \cos(\omega t - \theta) + \frac{NI_{\max}}{2} \cos(\omega t + \theta) = F_{f,\text{direto}} + F_{b,\text{reverso}}$$



Motor de indução monofásico

- À medida em que θ varia, o campo direto se desloca com velocidade síncrona na direção da velocidade mecânica, e o campo reverso se desloca com velocidade síncrona na direção oposta à velocidade mecânica;
- Tem-se então, o campo pulsante decomposto em dois campos girantes, e toda a teoria de campo girante pode ser usada para analisar a máquina;

Escorregamento do campo direto

- O escorregamento é baixo, pois o campo direto gira na mesma direção da velocidade mecânica (baixa velocidade relativa);

$$s_f = \frac{n_s - n}{n_s} = s$$

- Como o escorregamento é baixo, a frequência da corrente induzida na gaiola do rotor pelo campo girante direto é baixa:

$$f_{2_f} = sf_1$$

Escorregamento do campo reverso

- O escorregamento é alto, pois o campo reverso gira na direção oposta à velocidade mecânica (alta velocidade relativa);

$$s_b = \frac{n_s - (-n)}{n_s} = \frac{n_s + n}{n_s} = \frac{2n_s - n_s + n}{n_s} = \frac{2n_s}{n_s} - \frac{n_s - n}{n_s} = 2 - s$$

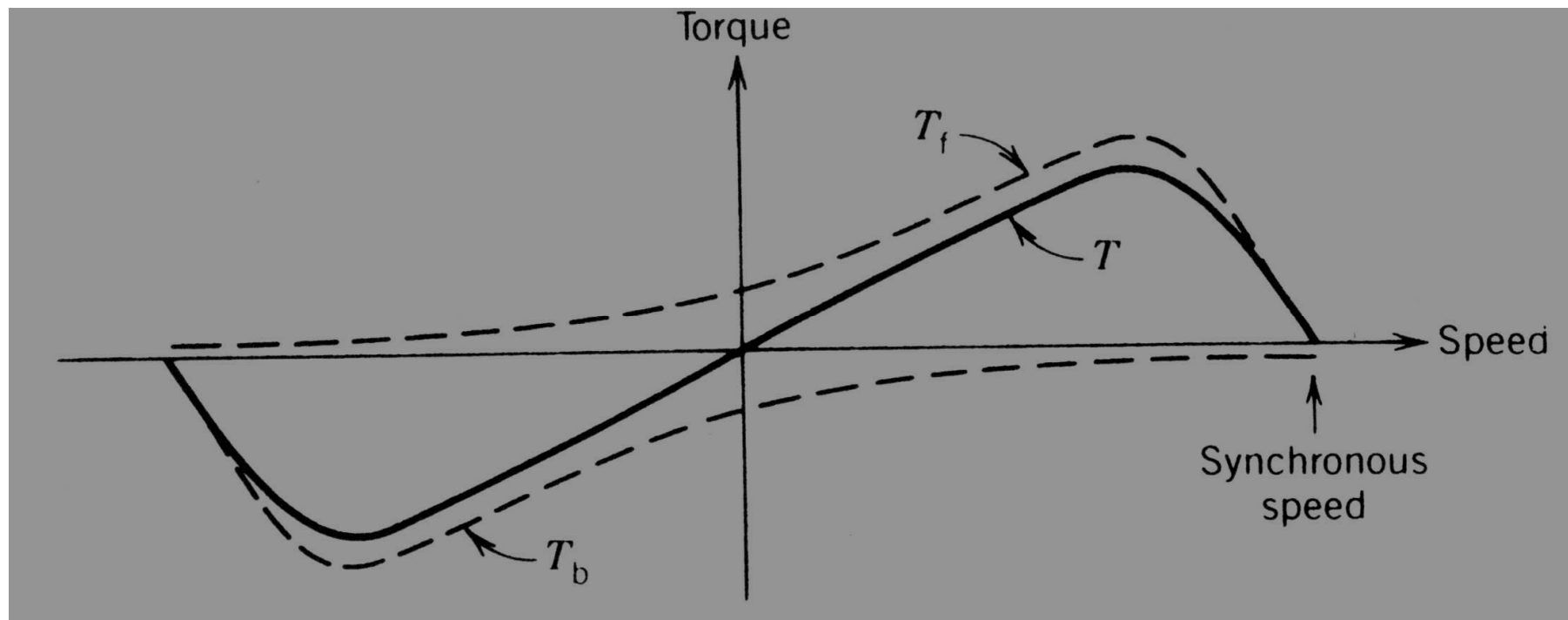
- Como o escorregamento é alto, a frequência da corrente induzida na gaiola do rotor pelo campo girante reverso é alta:

$$f_{2_b} = (2 - s)f_1$$

Curva torque x velocidade

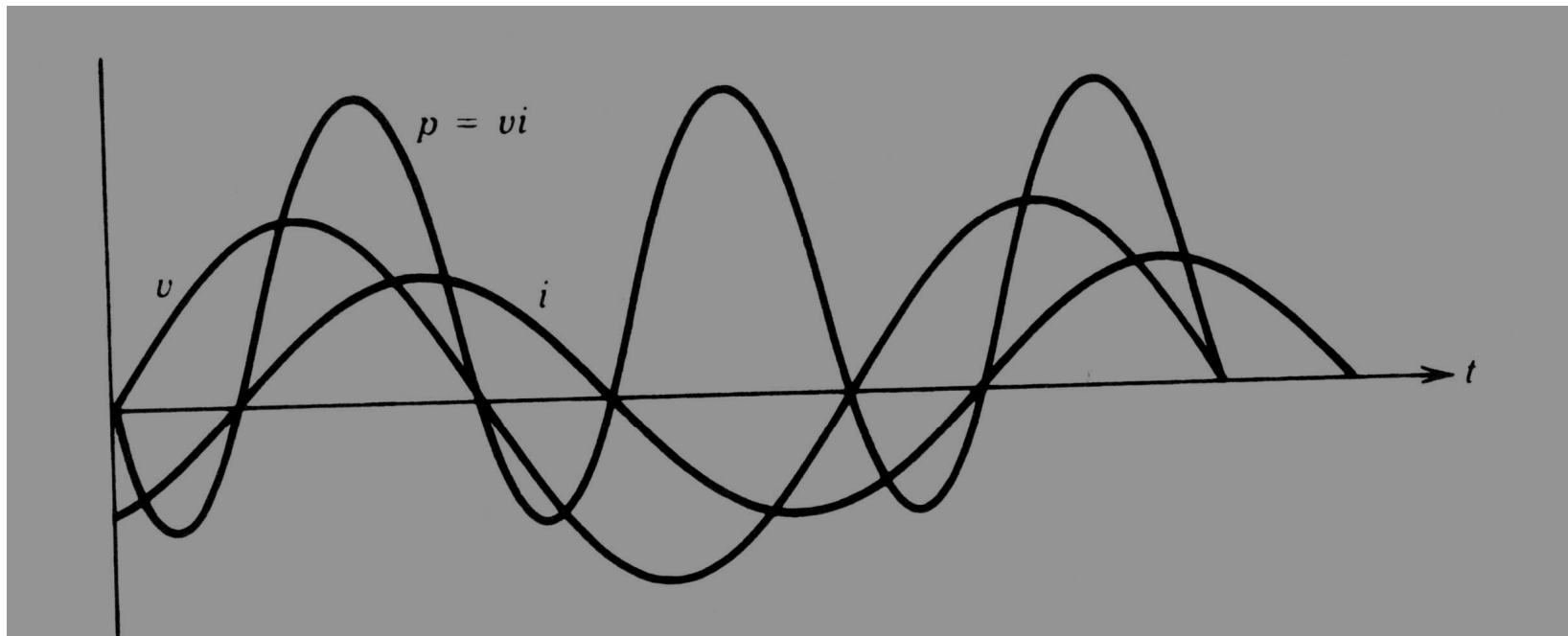
- O torque total da máquina é a soma das contribuições dos torques direto e reverso;
- O torque direto impulsiona o eixo, enquanto o torque reverso é frenante;
- O torque direto é alto para baixo escorregamento (próximo de zero), enquanto o torque reverso só será elevado para alto escorregamento (próximo de 2);
- Em velocidade nula o torque reverso iguala o torque direto, ou seja, a máquina não tem torque de partida;
- Em velocidade não nula e diferente da síncrona o torque líquido é diferente de zero, mantendo a máquina em movimento;

Curva torque x velocidade



Potência instantânea

- A potência instantânea em uma MI monofásica é pulsante com o dobro da frequência da rede (o valor médio é positivo);
- Como consequência, o nível de vibração e ruído de MI monofásicas é elevado, demandando algum sistema de amortecimento/absorção das vibrações mecânicas;



Partida do motor de indução monofásico

- Um estator com dois enrolamentos idênticos defasados de 90 graus pode produzir um campo girante com magnitude constante;
- Isto é, na presença de dois campos defasados no tempo e no espaço produzidos por enrolamentos no estator, tem-se um campo girante.
- Portanto, as principais formas empregadas para partir um motor de indução são baseadas no uso de enrolamentos auxiliares que criam dois campos defasados.

Partida do motor de indução monofásico

- Usa-se um enrolamento auxiliar durante a partida;

O enrolamento auxiliar é defasado de 90 graus em relação ao principal, de maneira que surge um campo girante no entreferro;

- As impedâncias Z_m e Z_a são projetadas de forma a fornecer uma defasagem entre as correntes dos dois enrolamentos:

$$i_m = \sqrt{2}I_m \cos \omega t$$

$$i_a = \sqrt{2}I_a \cos(\omega t + \theta_a)$$

- A defasagem θ_a produzida pelos enrolamentos é fundamental para o funcionamento da máquina, uma vez que a tensão de alimentação é a mesma (sistema monofásico);

Partida do motor de indução monofásico

- Portanto, durante a partida a máquina é “bifásica”;
- Se projetados adequadamente, os enrolamentos principal e auxiliar criam um campo girante no entreferro, produzindo assim, torque de partida;

$$N_m(\theta) = N_m \cos \theta$$

$$N_a(\theta) = N_a \cos(\theta + 90^\circ)$$

- Força magnetomotriz total, produzida pelos dois enrolamentos (considere que I_m e I_a são valores eficazes):

$$\begin{aligned} F(\theta, t) &= F_m(\theta, t) + F_a(\theta, t) \\ &= N_m(\theta) * i_m(t) + N_a(\theta) * i_a(t) \\ &= N_m \cos \theta * \sqrt{2} I_m \cos \omega t + N_a \cos(\theta + 90^\circ) * \sqrt{2} I_a \cos(\omega t + \theta_a) \\ &= \sqrt{2} N_m I_m \cos \theta * \cos \omega t - \sqrt{2} N_a I_a \sin \theta * \cos(\omega t + \theta_a) \end{aligned}$$

..... continuand o

Partida do motor de indução monofásico

- Força magnetomotriz total, produzida pelos dois enrolamentos:

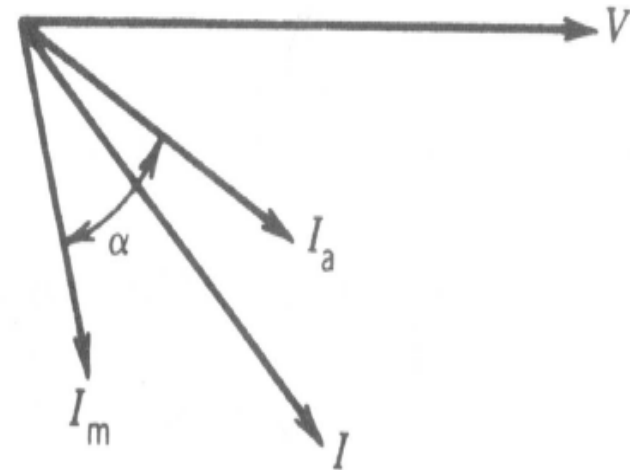
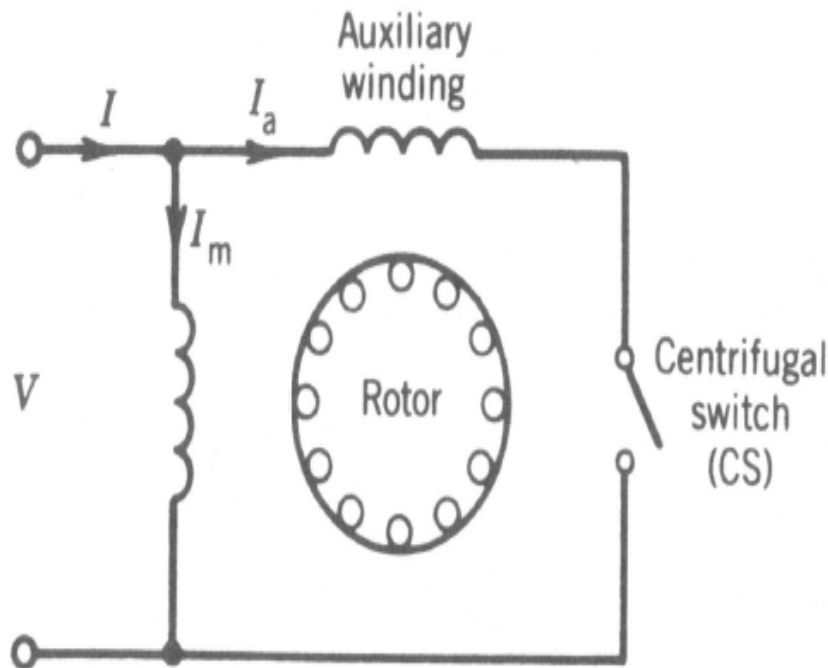
$$\begin{aligned} F(\theta, t) &= F_m(\theta, t) + F_a(\theta, t) \\ &= \frac{\sqrt{2}}{2} [(N_m I_m - N_a I_a \sin \theta_a) \cos(\omega t + \theta) - N_a I_a \cos \theta_a \sin(\omega t + \theta)] \\ &\quad + \frac{\sqrt{2}}{2} [(N_m I_m + N_a I_a \sin \theta_a) \cos(\omega t - \theta) + N_a I_a \cos \theta_a \sin(\omega t - \theta)] \end{aligned}$$

- Os termos com $(-\theta)$ formam o campo direto;
- Os termos com $(+\theta)$ formam o campo reverso;
- Se $N_m I_m = N_a I_a$ e $\theta_a = 90^\circ$ as componentes de campo reverso desaparecem, resultando em um campo direto, girante, à velocidade síncrona e amplitude constante :

$$\begin{aligned} F(\theta, t) &= F_m(\theta, t) + F_a(\theta, t) \\ &= \sqrt{2} N_m I_m \cos(\omega t - \theta) \end{aligned}$$

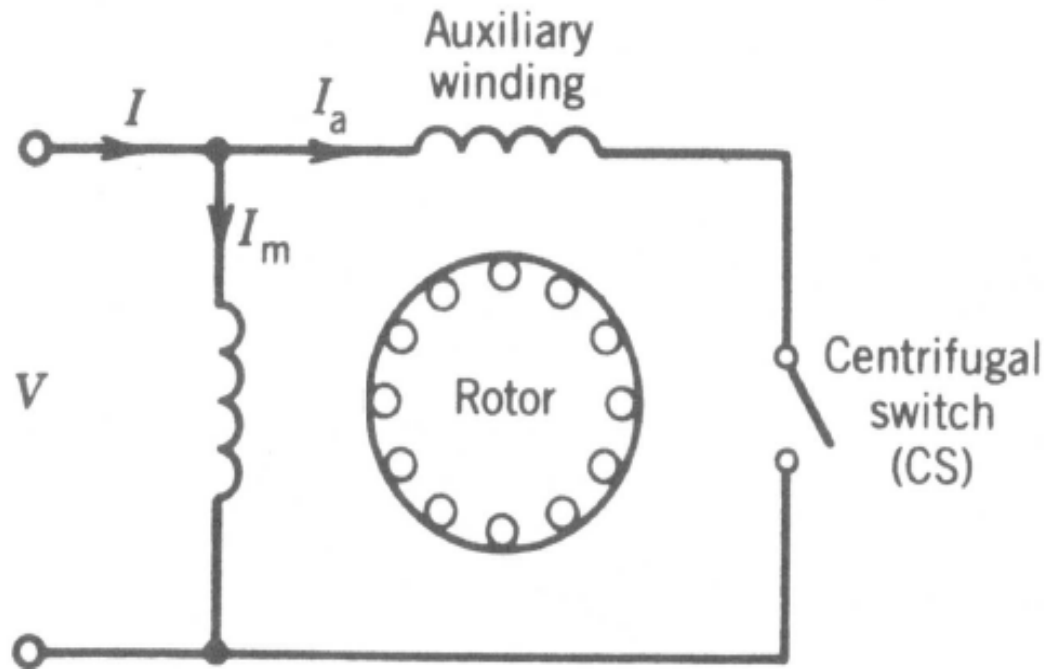
Motor de fase dividida – partida à resistência

- Um enrolamento auxiliar é usado para proporcionar uma defasagem inicial entre os campos principal e auxiliar de forma a criar um campo girante;
- O enrolamento auxiliar tem alta taxa R/X (resistência elevada: fio fino e baixa reatância: poucas espiras) de forma a aumentar a defasagem;
- O enrolamento principal tem baixa taxa R/X de forma a garantir melhor rendimento em regime permanente e magnetização suficiente para a máquina (baixo R e X elevada/muitas espiras);



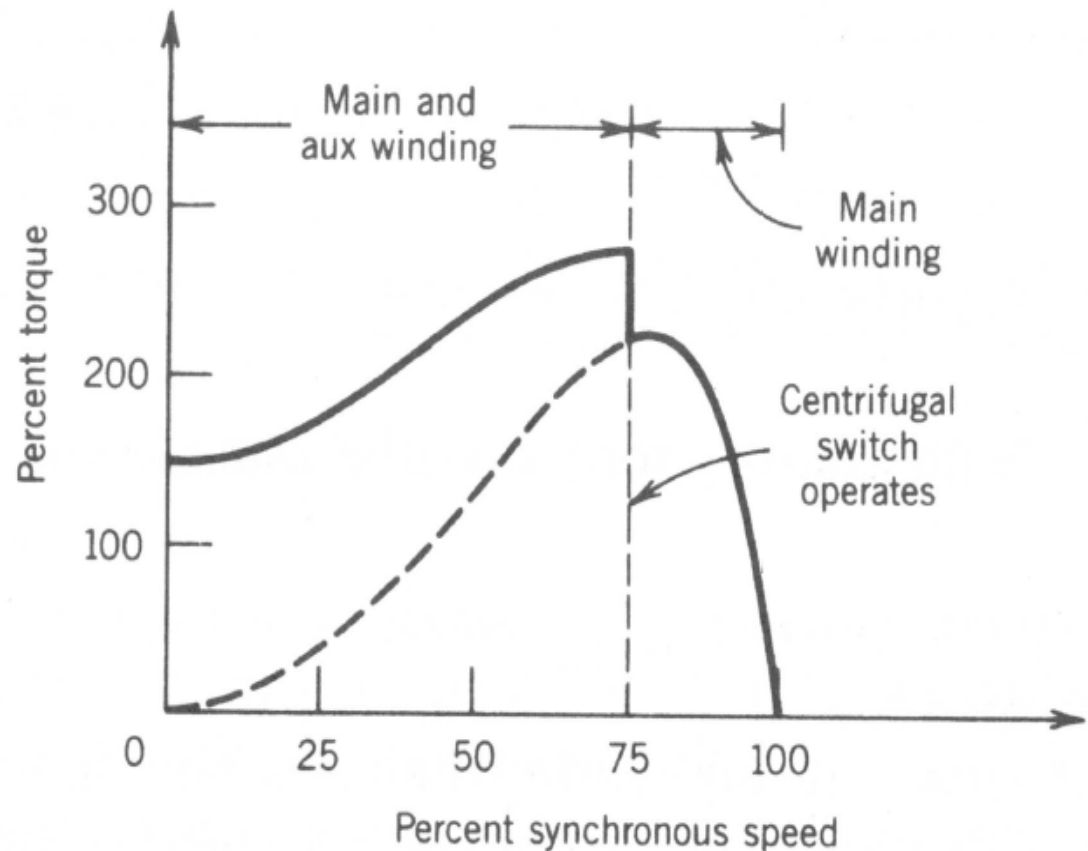
Motor de fase dividida – partida à resistência

- A defasagem vai ser sempre menor que 90 graus (tipicamente em torno de 25°), fornecendo torque de **partida moderado**, para baixa corrente de partida;
- Uma chave centrífuga desliga o enrolamento auxiliar a 75% da velocidade nominal;
- Para inverter o sentido de rotação é necessário inverter a ligação do enrolamento auxiliar com a máquina parada (não reversível), visto que o torque produzido pelo enrolamento auxiliar (operação bifásica) é menor que o torque produzido pelo enrolamento principal (operação monofásica);



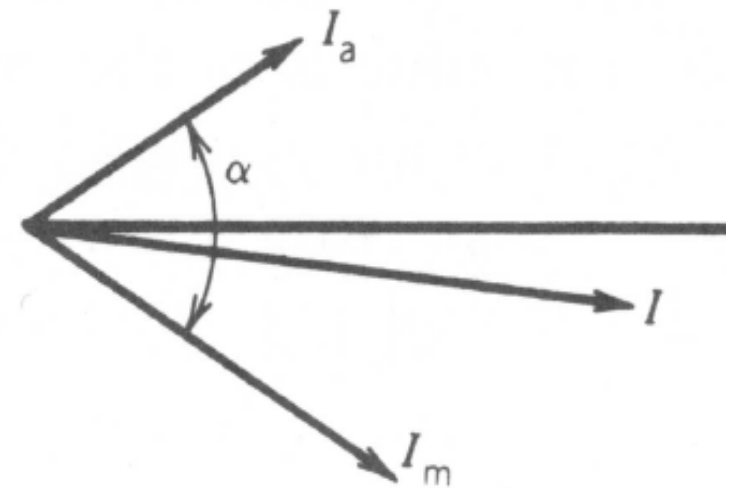
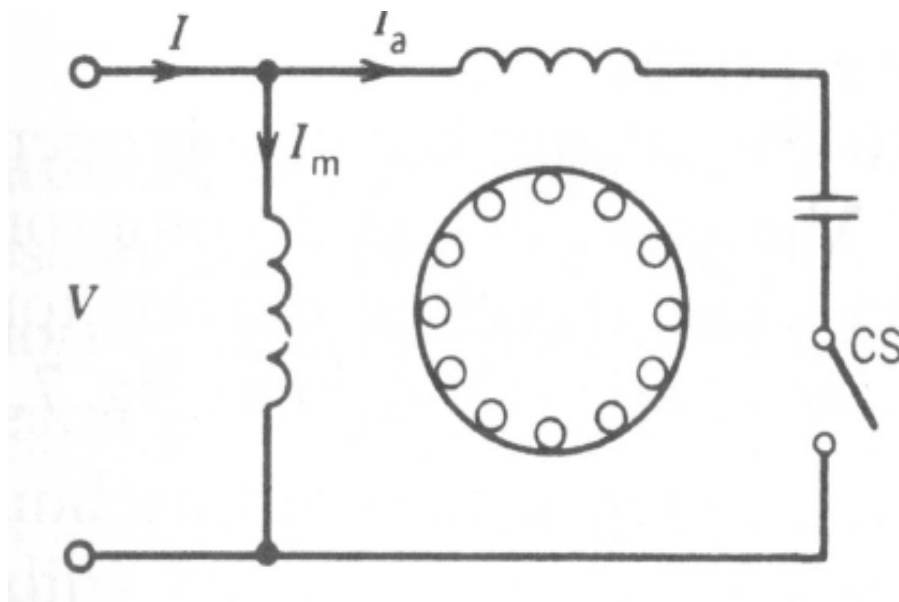
Motor de fase dividida – partida à resistência

- Bifásica desequilibrada até a abertura da chave centrífuga (correntes diferentes nos dois enrolamentos);
- Monofásica a partir do desligamento do enrolamento auxiliar;
- Usada em potências entre 50 e 500W em ventiladores, bombas e compressores;
- São de baixo custo;



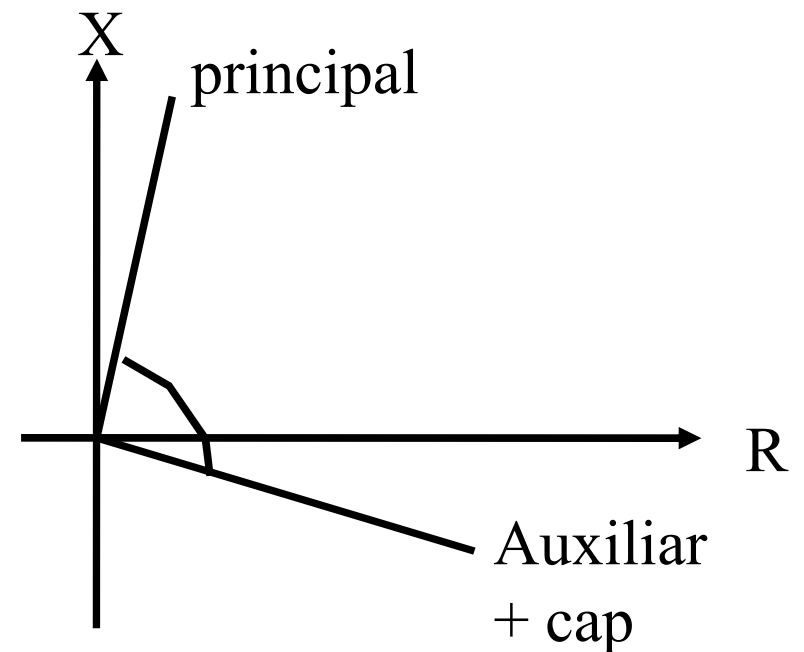
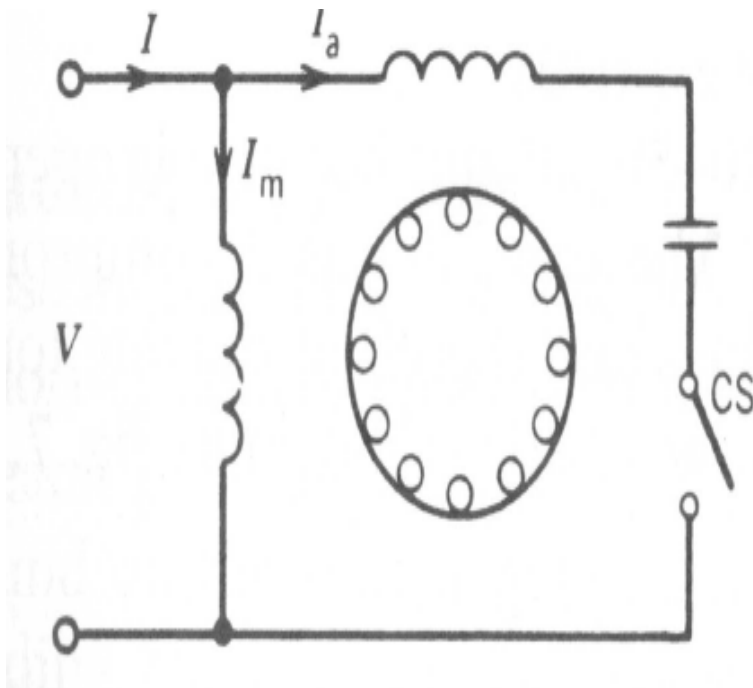
Motor de fase dividida – partida à capacitor

- Usa-se um capacitor em série com o enrolamento auxiliar, para aumentar a defasagem inicial entre os campos do enrolamento principal e auxiliar;
- Resulta em maior torque de partida;
- Através do capacitor é possível aproximar a defasagem de 90 graus (tipicamente em torno de 82°);
- Produz torque de partida 2,35 maior que o motor com partida à resistência



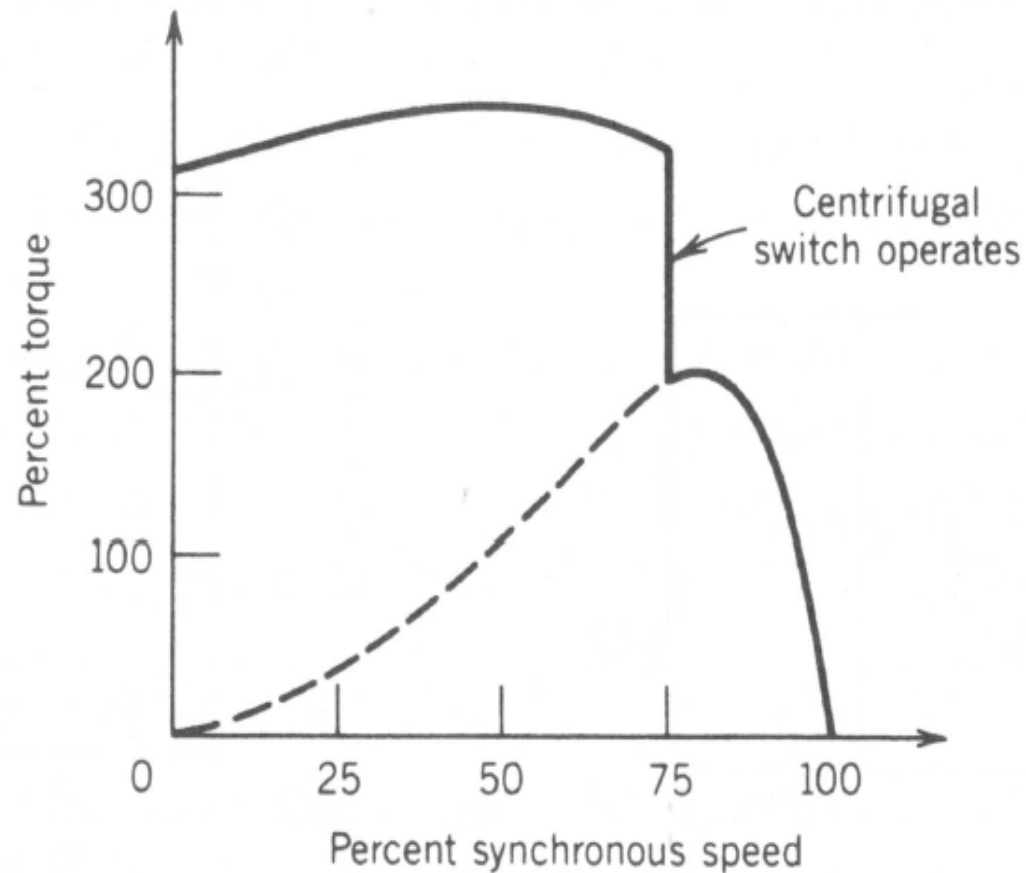
Motor de fase dividida – partida à capacitor

- Tende a reduzir a corrente de partida, pois melhora o fator de potência;
- Capacitor eletrolítico do tipo seco p/ operação intermitente (1min/1h);
- É reversível (mudança do sentido de rotação com a máquina em movimento), pois a alta defasagem (82 graus) faz com que o torque em operação bifásica seja maior do que o torque monofásico;



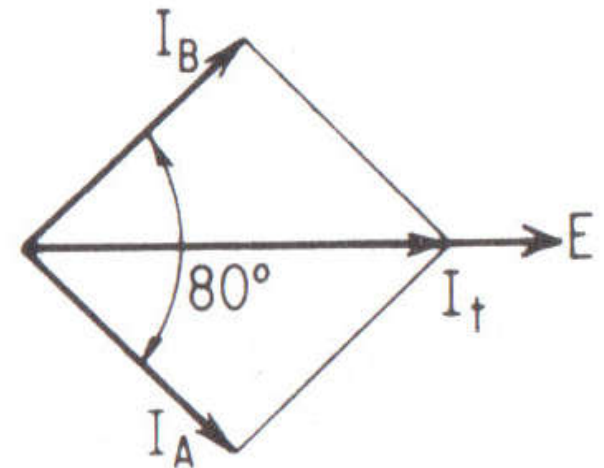
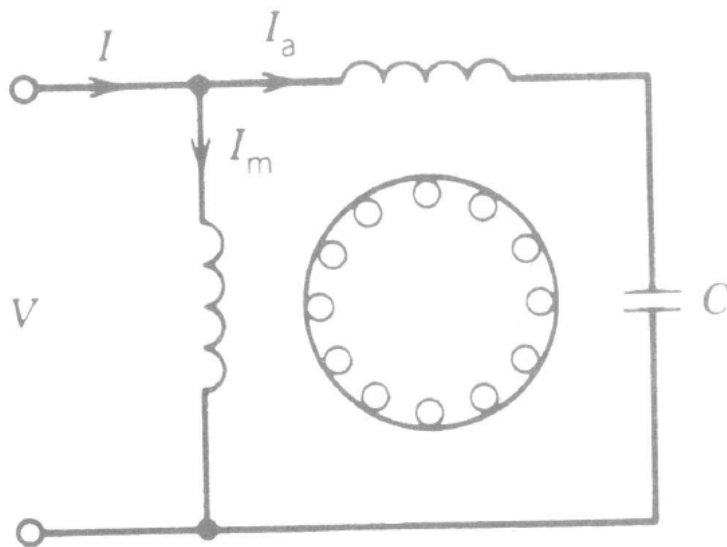
Motor de fase dividida – partida à capacitor

- Usada em potências até 7,5 hp, para cargas de difícil partida (alto torque de partida), ou onde seja necessária a inversão do motor;
- São usados para acionar bombas, compressores, unidades refrigeradoras, condicionadores de ar, e máquinas de lavar de maior porte;



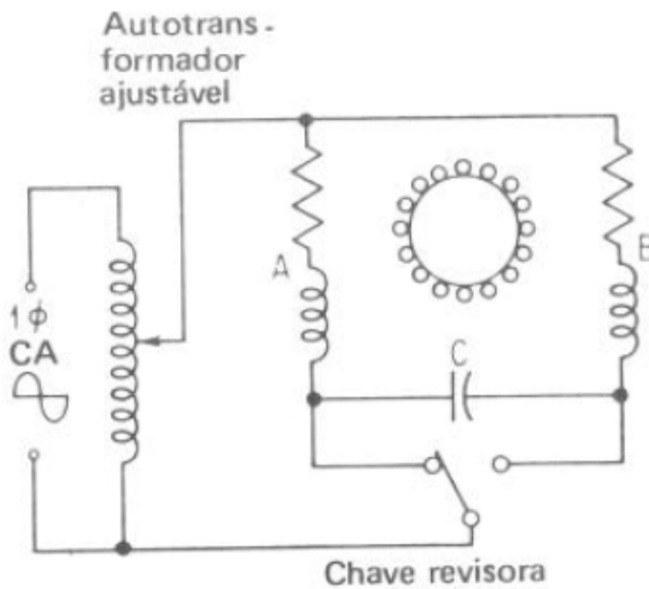
Motor de fase dividida – capacitor permanente

- Os enrolamentos principal e auxiliar são idênticos (mesma bitola e mesmo número de espiras);
- Usa-se um capacitor em série com o enrolamento auxiliar, para proporcionar a defasagem entre as duas correntes;
- Não requer chave centrífuga;
- Através do capacitor é possível aproximar a defasagem de 90 graus (tipicamente em torno de 80°);

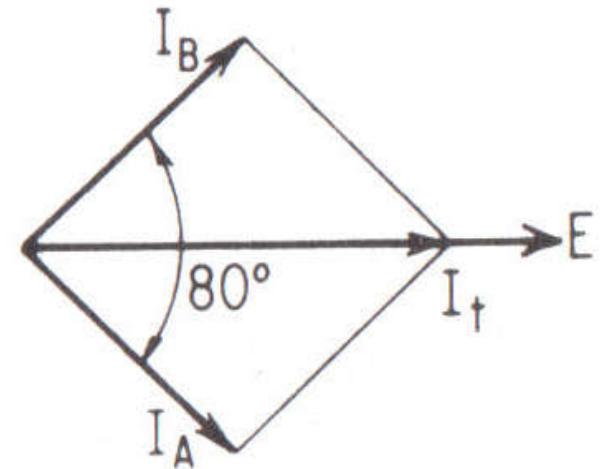


Motor de fase dividida – capacitor permanente

- Capacitor a óleo para operação contínua;
- No instante da partida a corrente no ramo do capacitivo é muito baixa, assim o torque de partida é baixo, da ordem de 50 a 100% do torque nominal;
- Através de uma chave reversora (mudando o capacitor de um enrolamento para o outro), pode-se inverter facilmente o sentido de rotação, uma vez que o torque de operação é baixo;

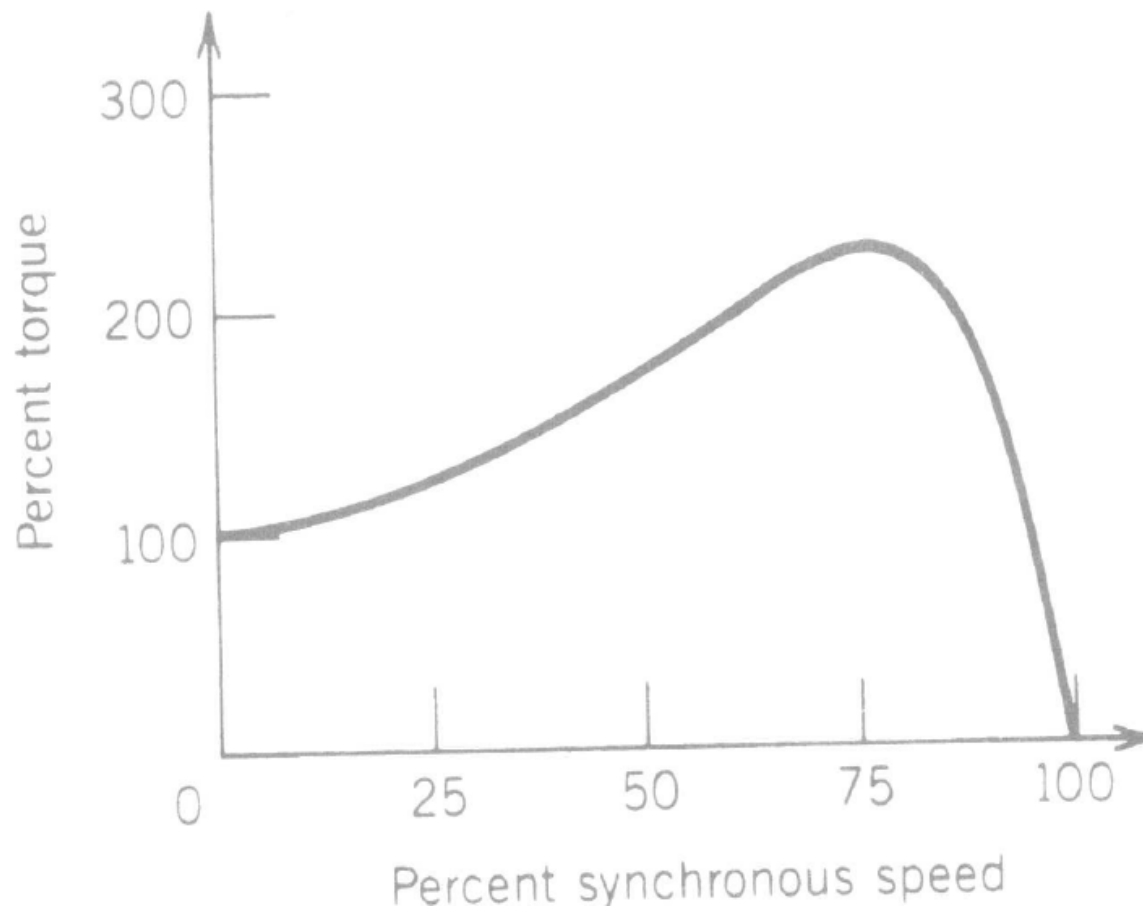


(a) Diagrama de ligações.



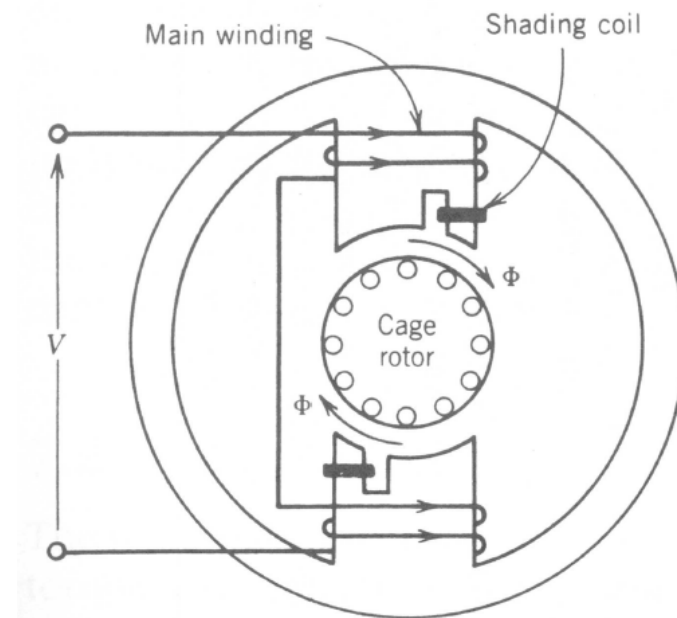
Motor de fase dividida – capacitor permanente

- O fator de potência, nível de vibração e o rendimento melhoram, uma vez que a máquina passa a operar como bifásica continuamente;



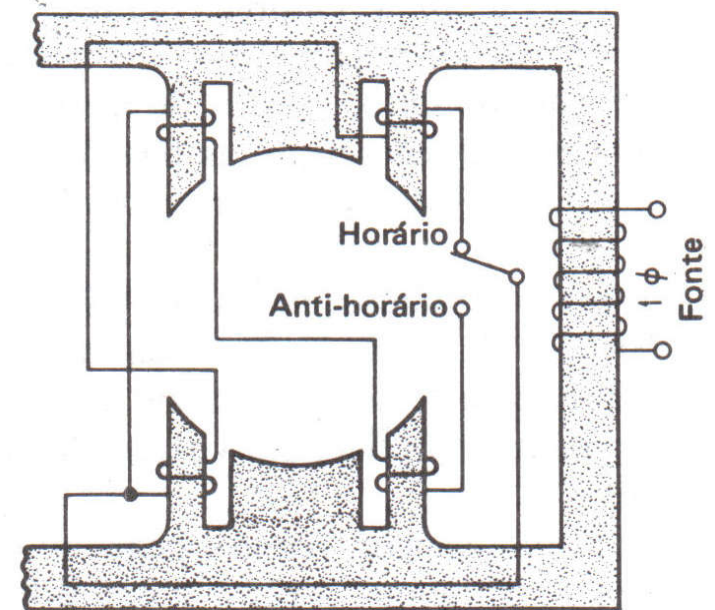
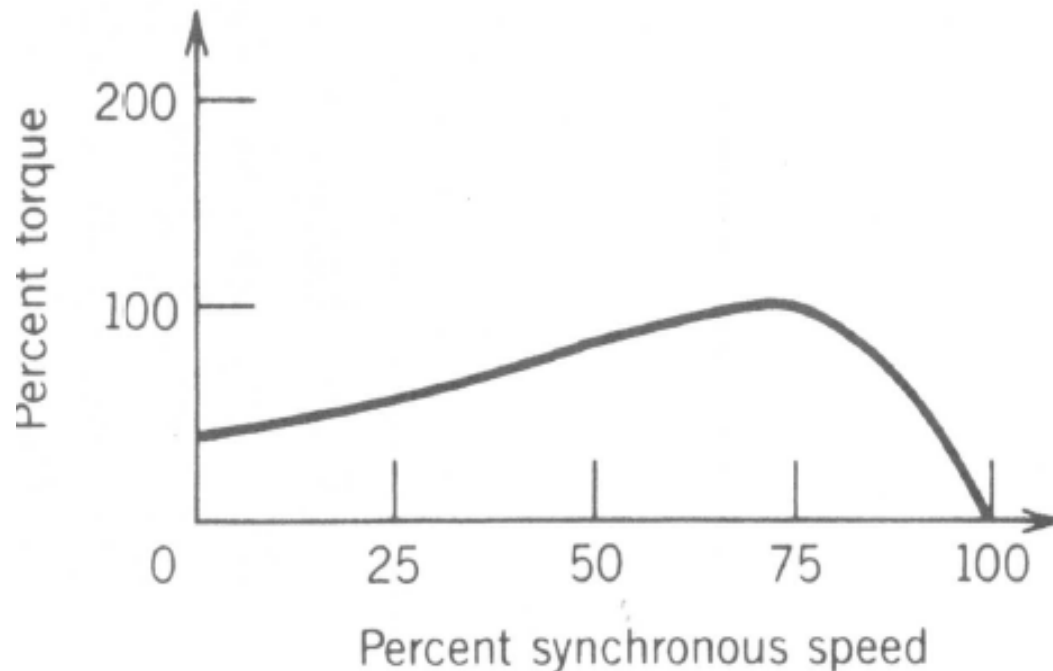
MI polos ranhurados ou “polos sombreados”

- Para motores pequenos, até 1/10 hp;
- A maior vantagem é a simplicidade: enrolamento monofásico, rotor em gaiola e peças polares especiais;
- Não utiliza chaves centrífugas, capacitores ou enrolamentos auxiliares;
- Apresenta torque de partida apenas com um enrolamento monofásico;
- A corrente induzida no anel de cobre do polo ranhurado, produz um fluxo atrasado, em relação ao fluxo do estator, fornecendo a defasagem necessária para a partida da máquina;



MI polos ranhurados ou “polos sombreados”

- Máquina barata;
- O torque de partida é limitado;
- Não reversível, seria necessário desmontar o motor e inverter a posição do polo ranhurado;
- Pode-se projetar um motor com dupla ranhura, uma para cada sentido de rotação da máquina;



Motor Universal

- Pode ser alimentado em CC ou CA;
- Produz elevado torque de partida;
- Proporciona operação em velocidade elevada;
- Usando em motores fracionários, ex. liquidificadores, furadeiras elétricas, aspiradores de pó;
- Usado em motores de grande porte para tração elétrica;
- Requer comutador, escovas, resistência de controle, etc.;
- Maioria opera em CA com velocidades entre 1.500 e 10.000 rpm.

Motor Universal: Motor CC Série

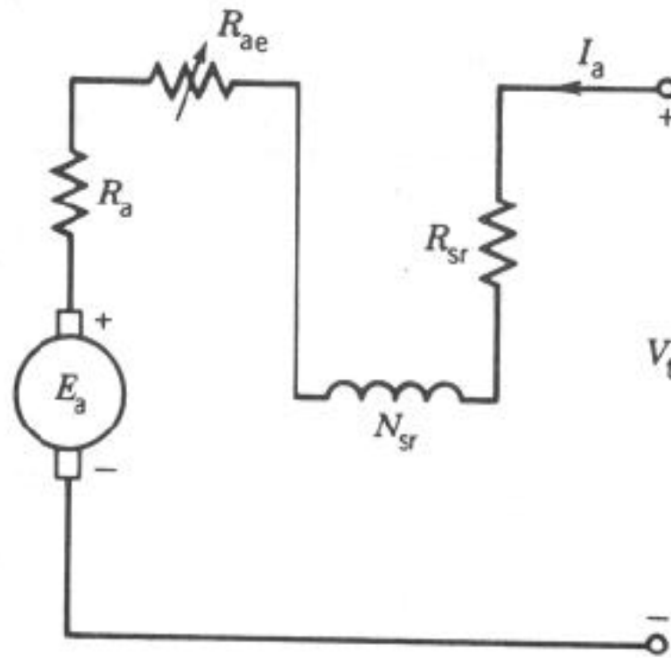
- Torque e Tensão da armadura considerando linearidade magnética;

$$T = K_a \Phi I_a$$

$$E_a = K_a \Phi \omega_m$$

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

$$E_a = K_{sr} I_a \omega_m$$



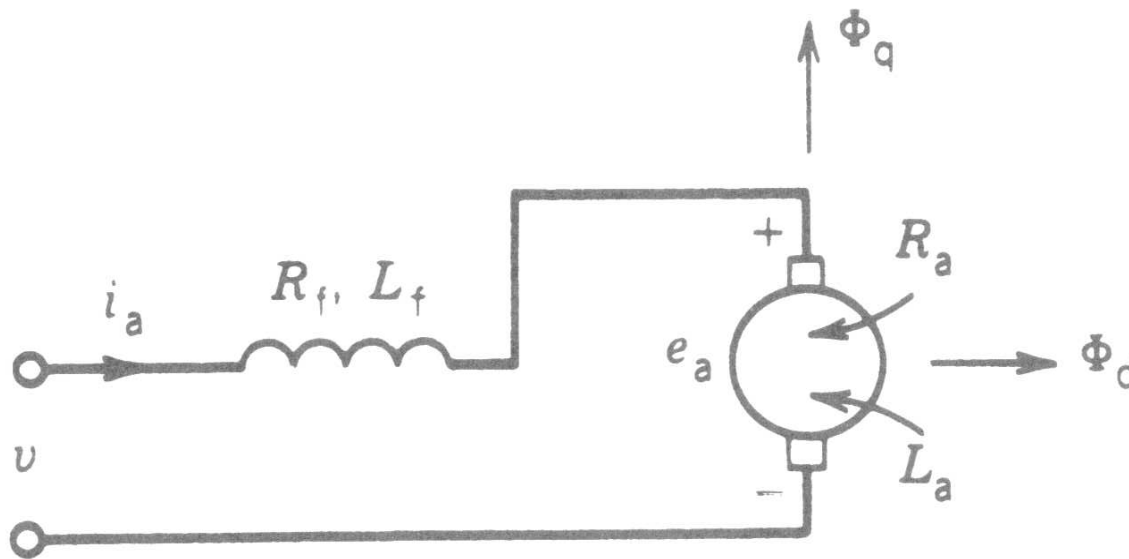
Excitação CA

- Torque e Tensão da armadura considerando linearidade magnética;

$$i_a = I_{a\max} \cos \omega t$$

$$T = K_{sr} i_a^2 = K_{sr} I_{a\max}^2 \cos^2 \omega t$$

$$E_a = K_{sr} i_a \omega_m = K_{sr} \omega_m I_{a\max} \cos \omega t$$



Excitação CA

- Torque e Tensão da armadura considerando linearidade magnética;

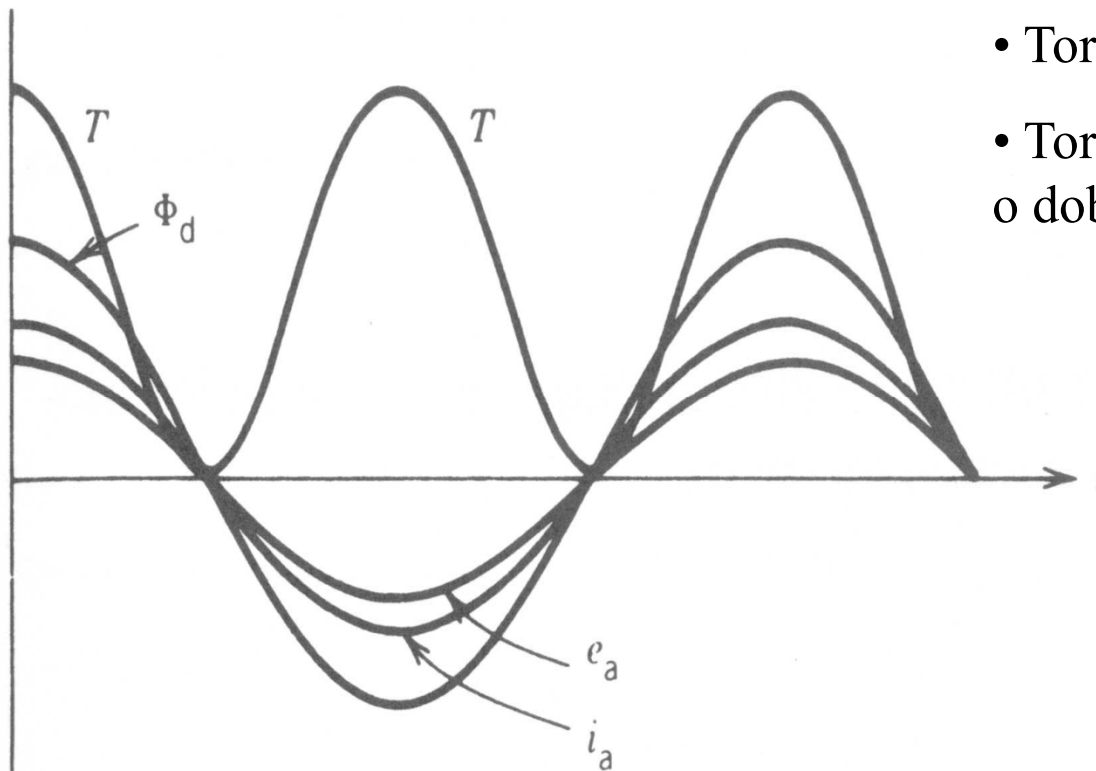
$$i_a = I_{a \max} \cos \omega t$$

$$\phi_d = \phi_{d \max} \cos \omega t$$

$$e_a = K_a \phi_d \omega_m = K_a \phi_{d \max} \omega_m \cos \omega t$$

$$T = K_{sr} i_a^2 = K_{sr} I_{a \max}^2 \cos^2 \omega t$$

$$T = \frac{K_{sr} I_{a \max}^2}{2} (1 + \cos 2\omega t)$$

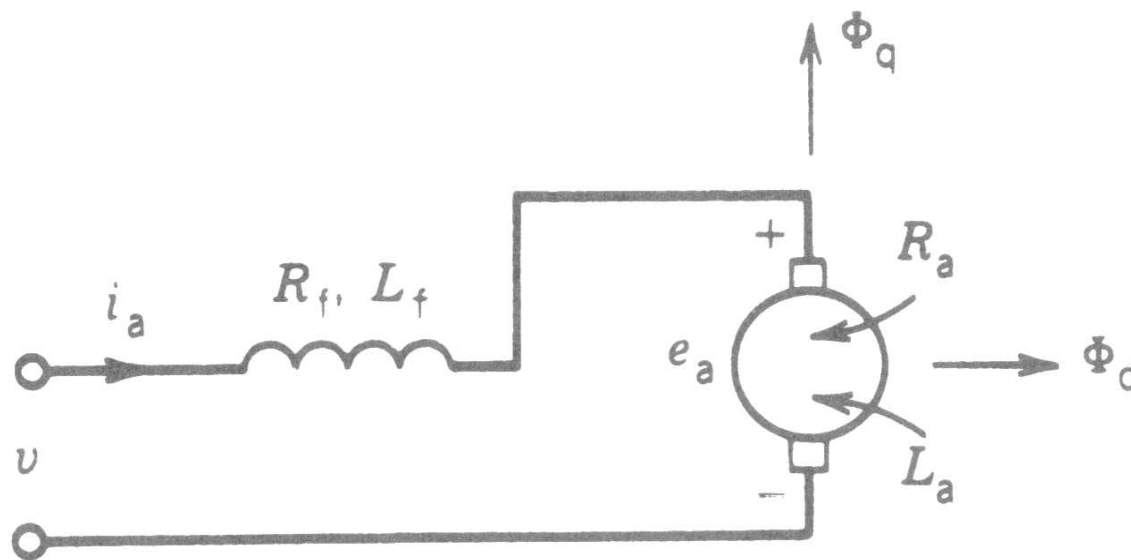


- Torque instantâneo é unidirecional
- Torque instantâneo é pulsante com o dobro da frequência da rede

Excitação CA

- As indutâncias dos enrolamentos fazem com que a queda de tensão em excitação CA seja maior do que em excitação CC;

$$V = (R_f + R_a)I_a + j(X_f + X_a)I_a + E_a$$



Excitação CC *versus* Excitação CA

- Além do torque ser um pouco menor, a vibração é maior e a velocidade um pouco menor para os mesmos valores de tensão e corrente de armadura;
- Em CA o fator de potência é baixo,

