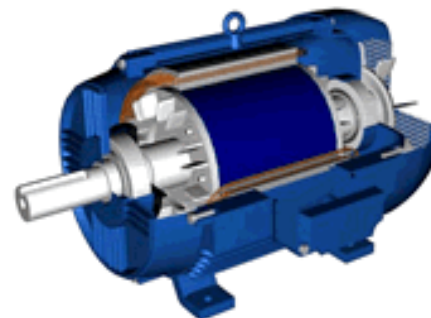
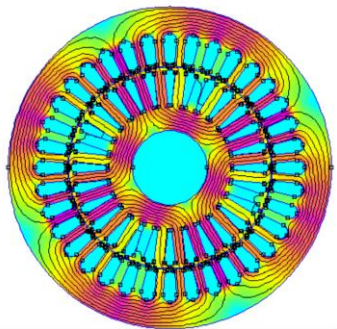


Princípio de funcionamento da máquina síncrona

Prof. Allan Fagner Cupertino
afcupertino@ieee.org

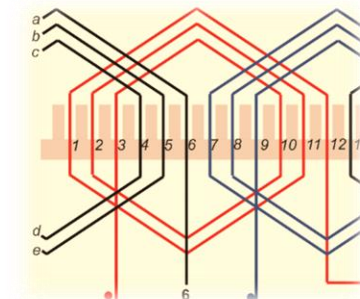


Sumário

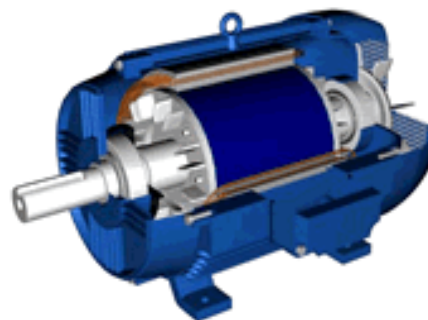
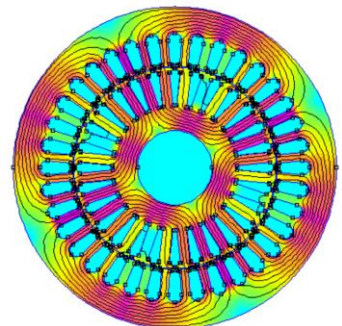
❑ Gerador de tensão alternada elementar;

❑ Funcionamento como gerador;

❑ Funcionamento como motor.



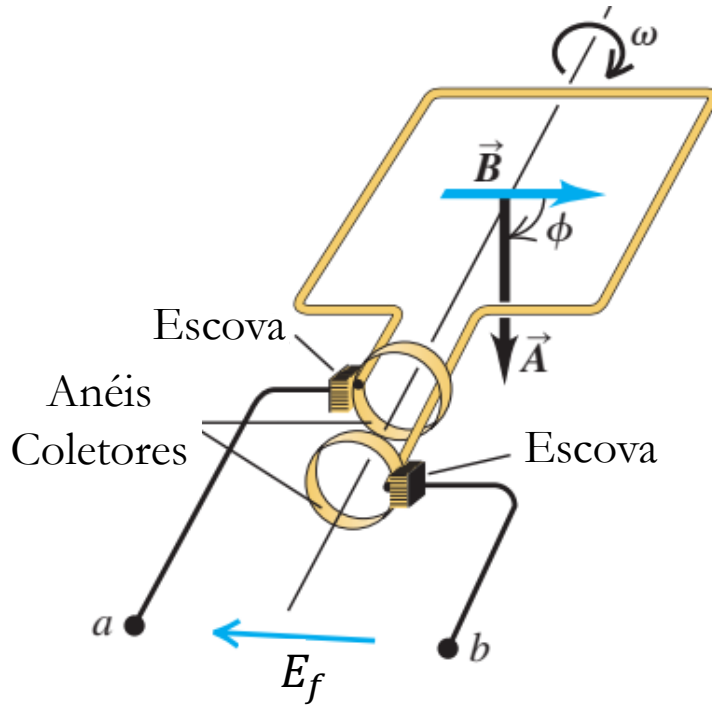
Gerador de tensão alternada elementar



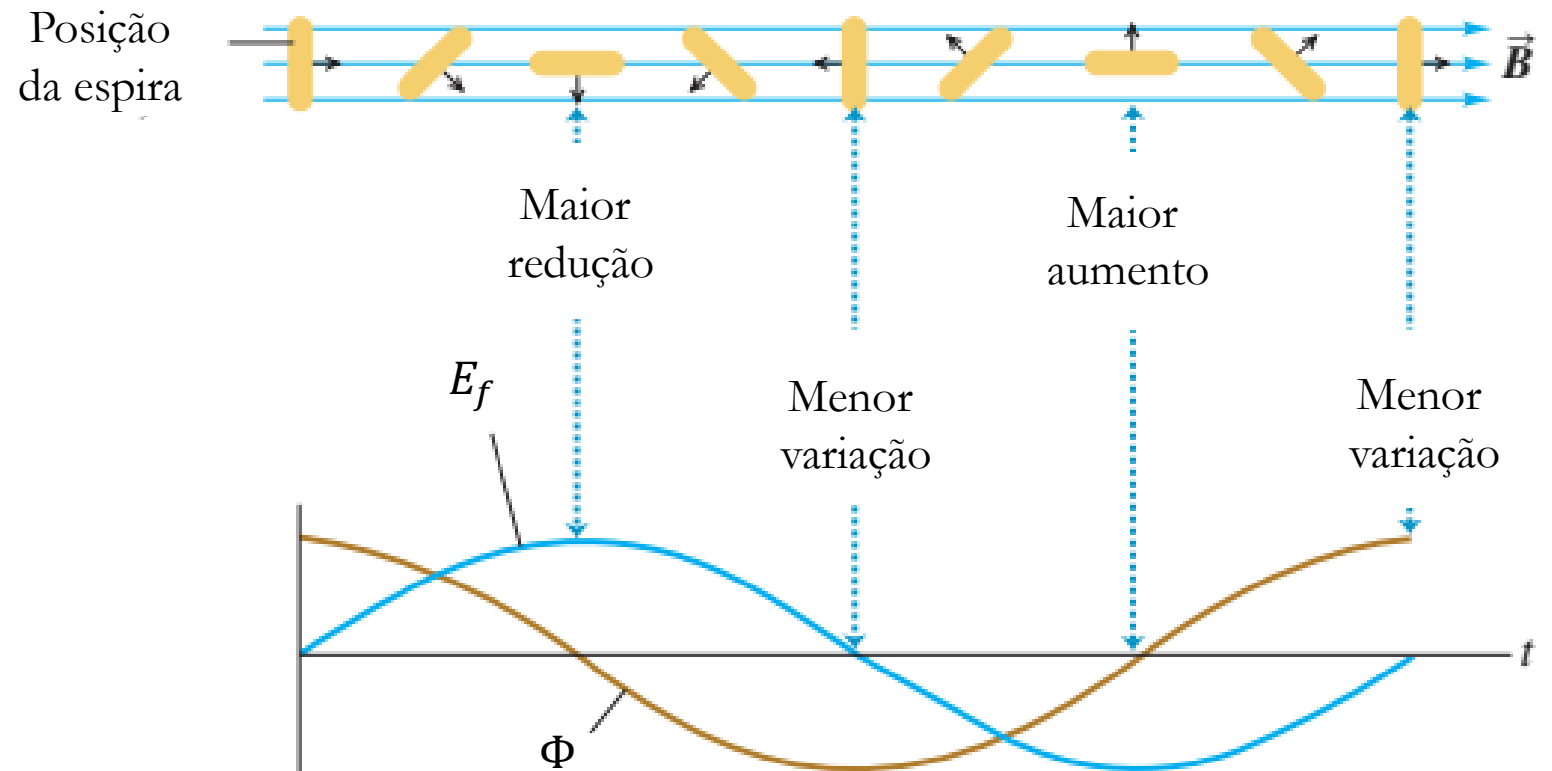
<http://www.semage.com.br/calternada.ph>



Gerador de corrente alternada elementar



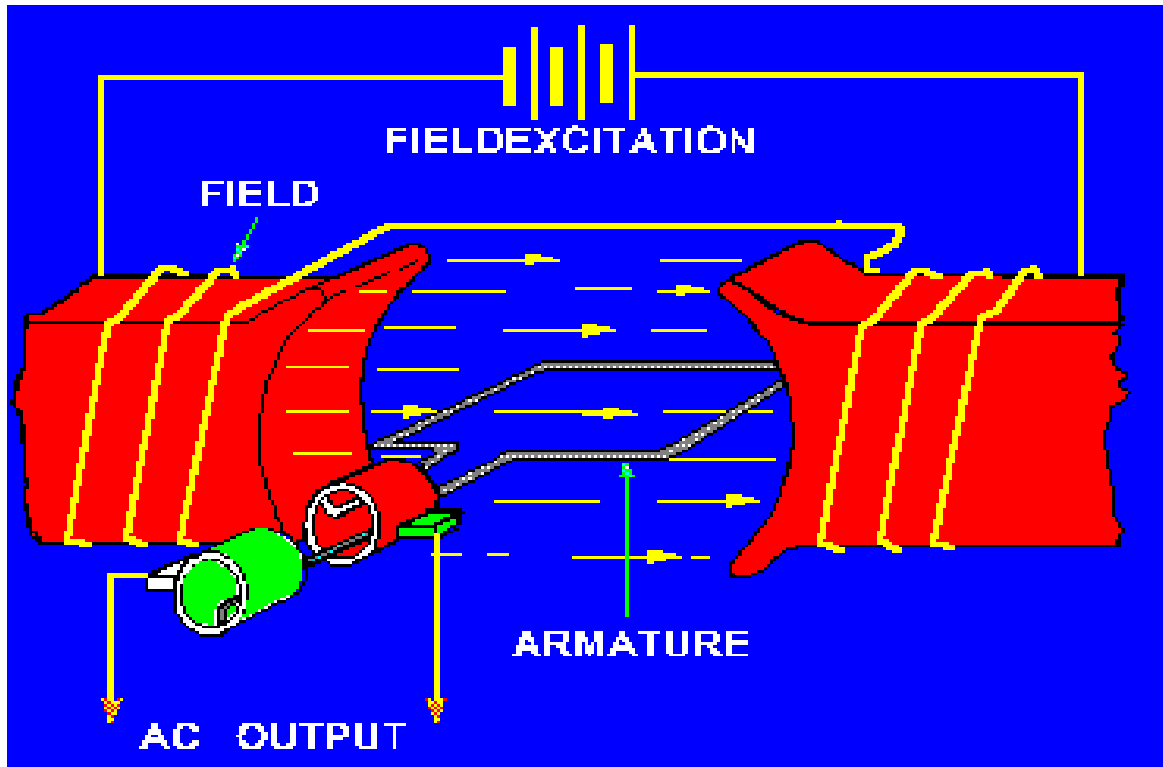
$$\Phi = B A \cos \phi \qquad E_f = -N \frac{d\Phi}{dt} = BA\omega \sin \phi$$



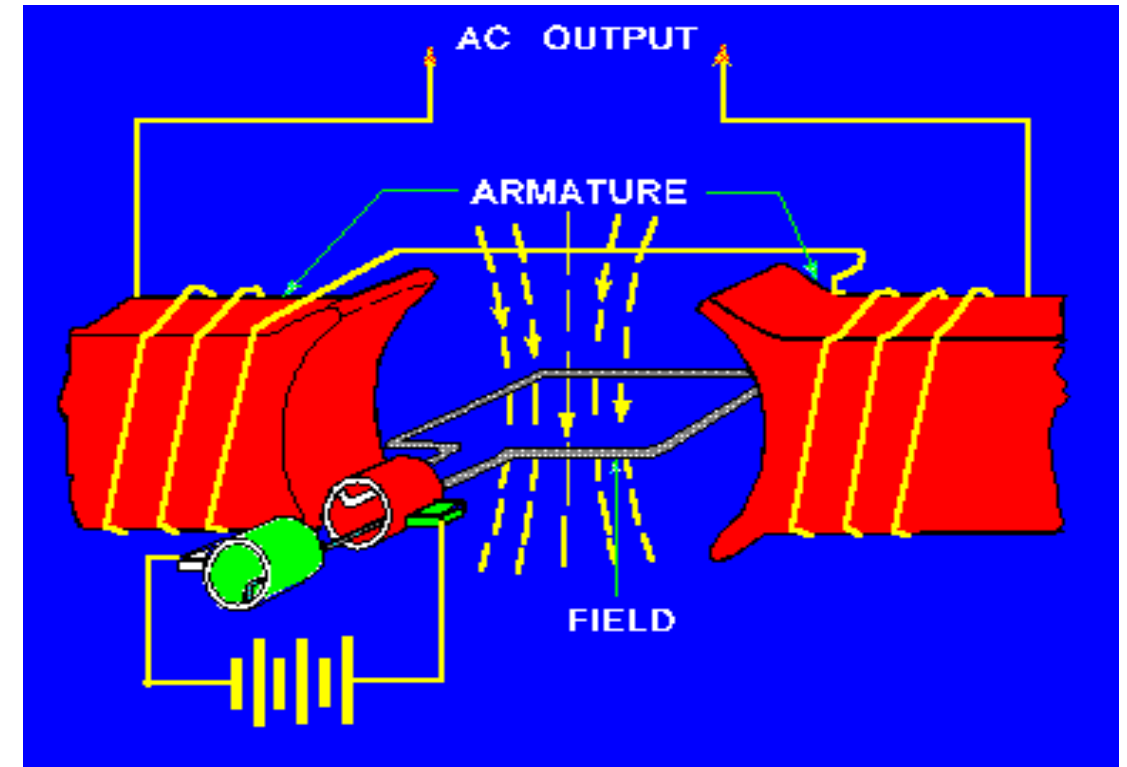
Fonte: Young and Freedman. "Física III: Eletromagnetismo".

Comparação de abordagens

Proposta inicial



Proposta modificada



Vantagens da segunda solução

- ❑ Princípio de funcionamento análogo → espira em repouso e campo em movimento;
- ❑ Complexidade do enrolamento da armadura em relação ao enrolamento de campo;
- ❑ Melhoria do isolamento: Isolar o circuito CC de baixa tensão (campo) é mais fácil que isolar um circuito CA de alta tensão (armadura);
- ❑ Peso e inércia do rotor reduzidos → Enrolamento de campo utiliza condutores de menor bitola.

Vantagens da segunda solução – gerador trifásico

- ❑ Para o caso de uma armadura rotativa, seriam necessários três ou quatro anéis coletores para um gerador trifásico;

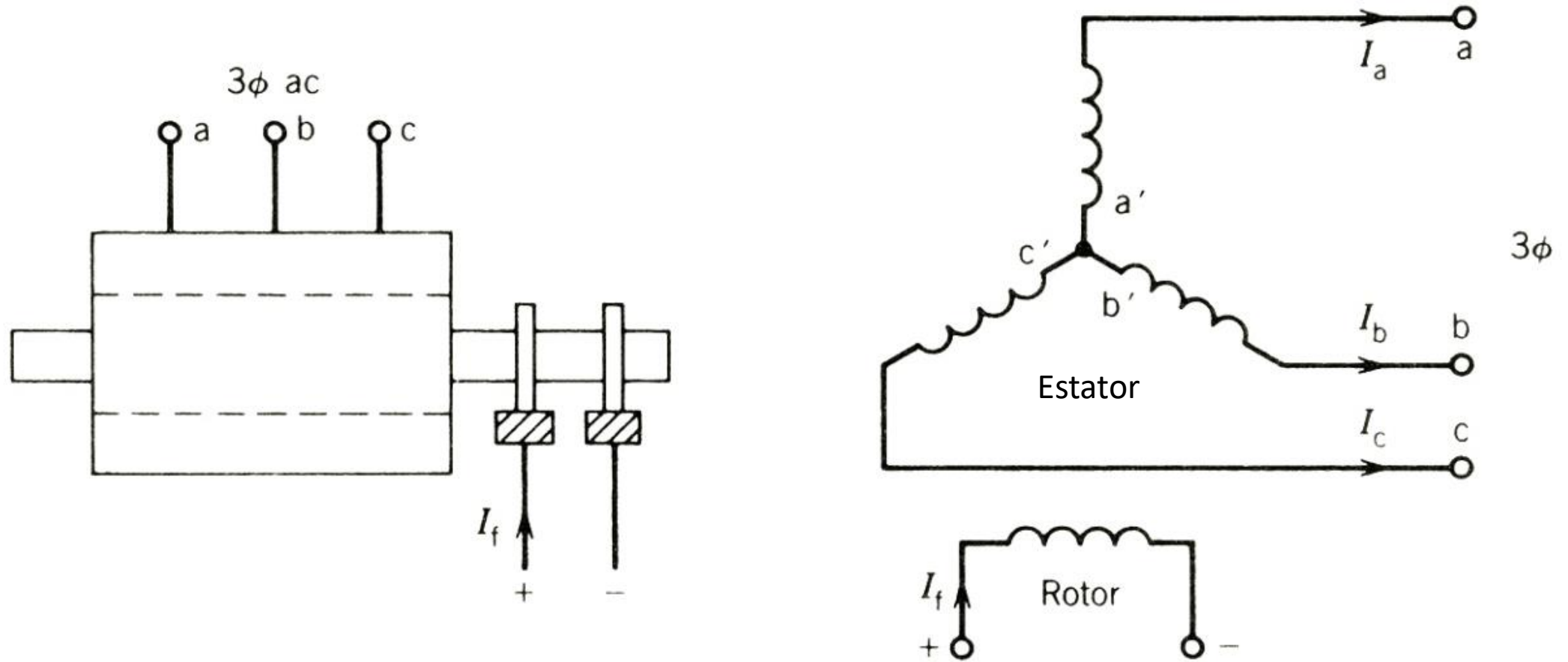
- ❑ Problemas adicionais:
 - Altas tensões e correntes nas escovas;
 - Isolamento elétrico entre o eixo e os anéis coletores;

- ❑ Para alimentar o campo apenas 2 anéis de baixa tensão são necessários.

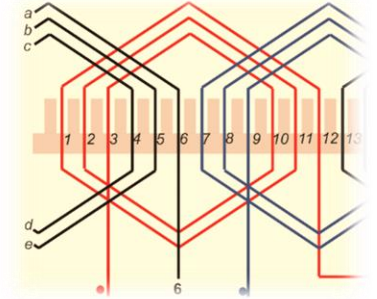
- ❑ Conclusão: Segunda abordagem se tornou mais popular!



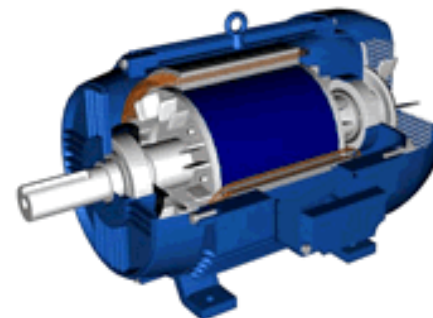
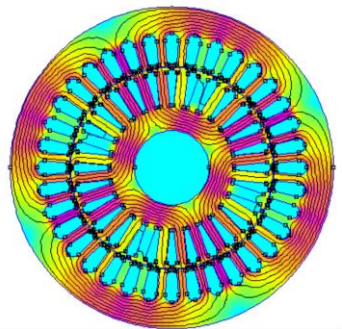
Estrutura interna da máquina síncrona trifásica



Fonte: P. C. Sen. "Principles of Electrical Machines and Power Electronics".



Funcionamento como gerador

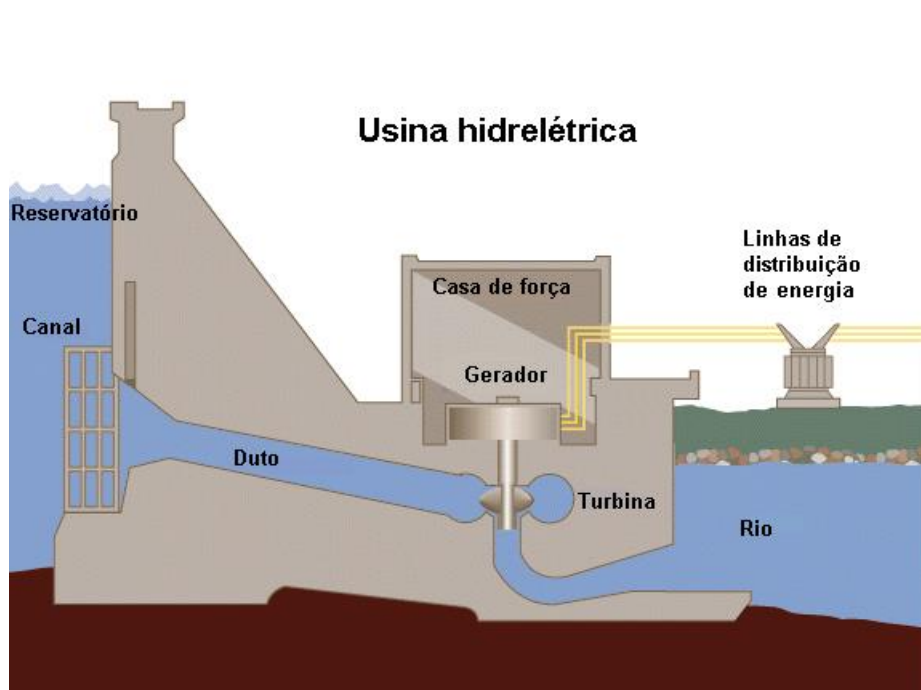


<http://www.semage.com.br/calternada.ph>

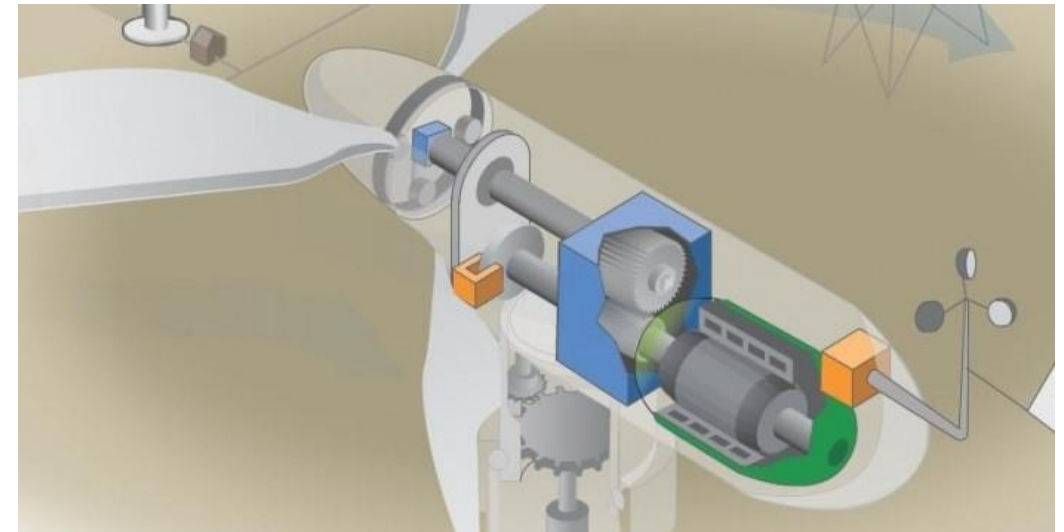


Geração de energia baseada em máquinas síncronas

- ❑ Parte do pressuposto de uma fonte de energia mecânica que rotaciona o gerador;

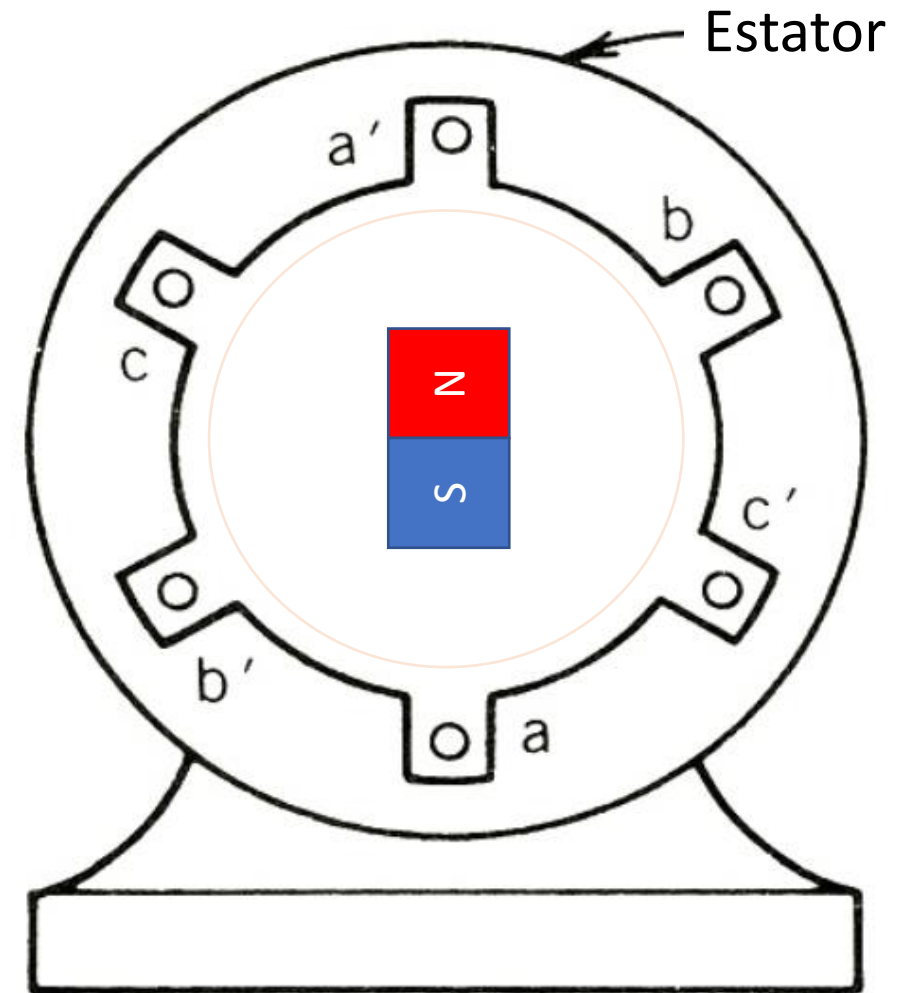
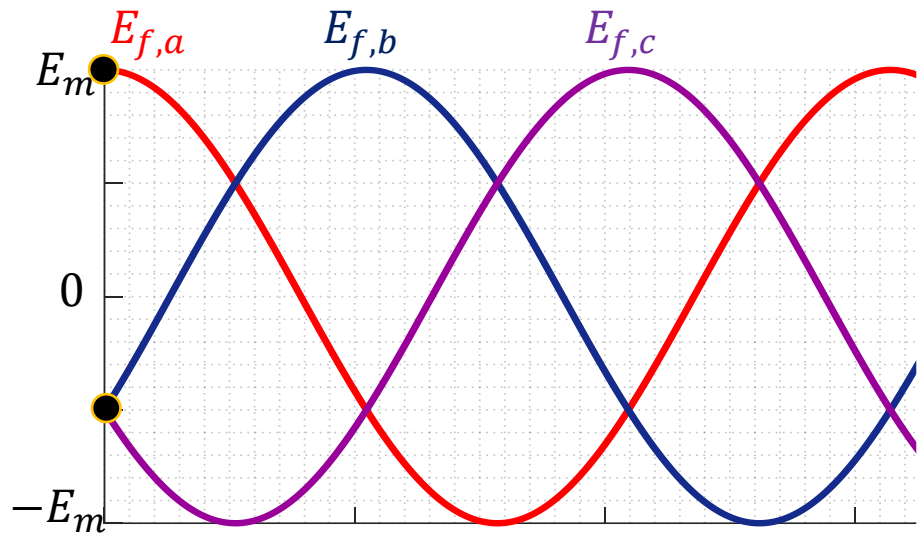


Fonte: Wikipedia

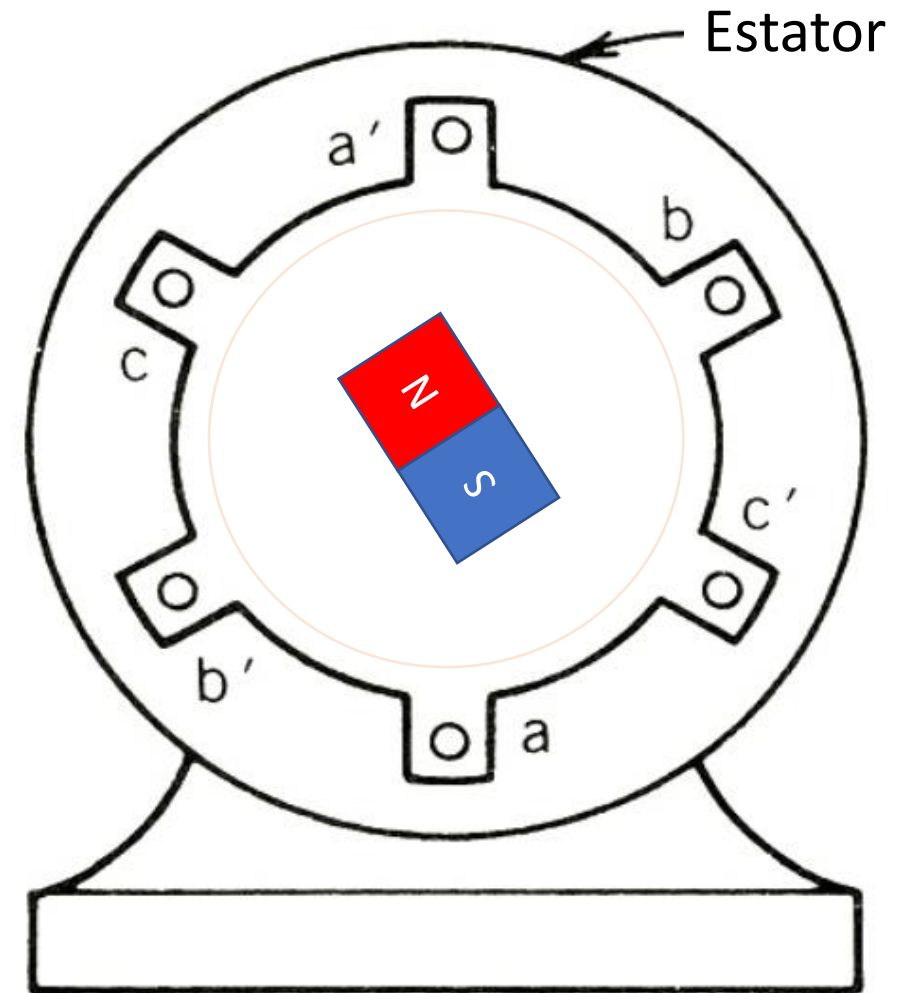
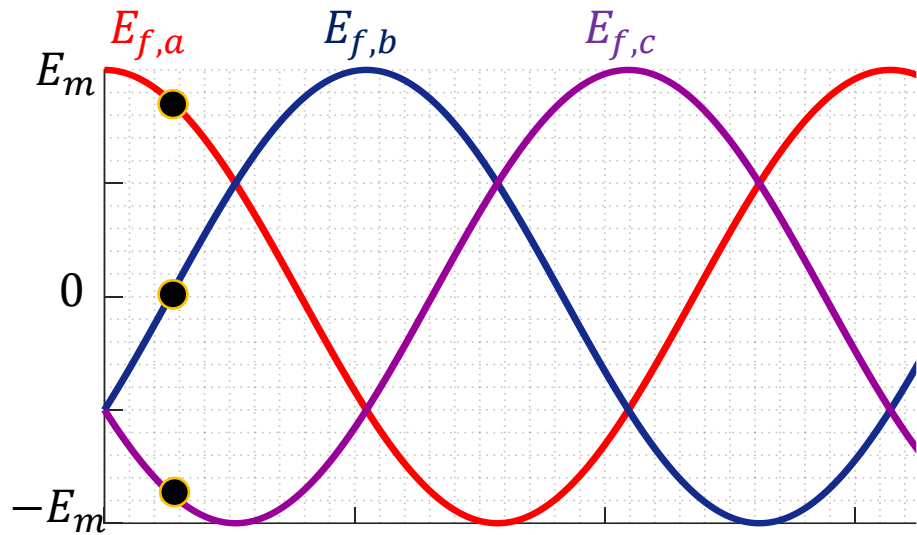


Fonte: Portal energia.

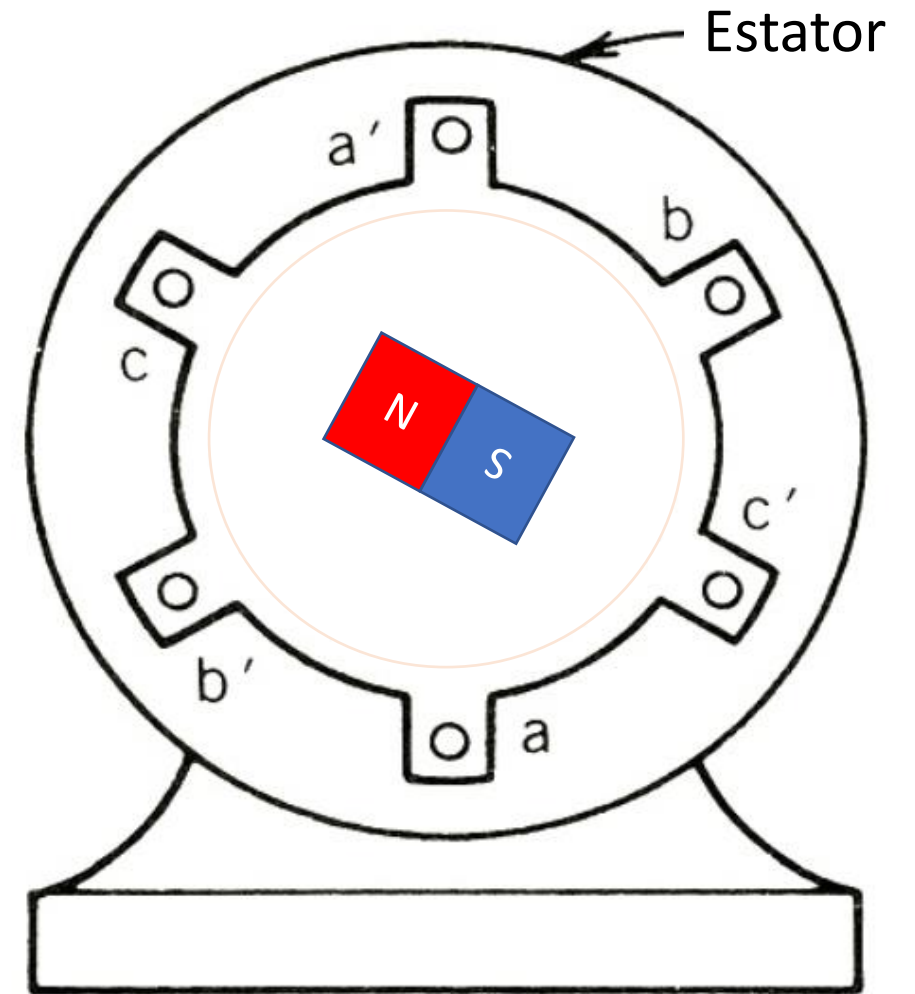
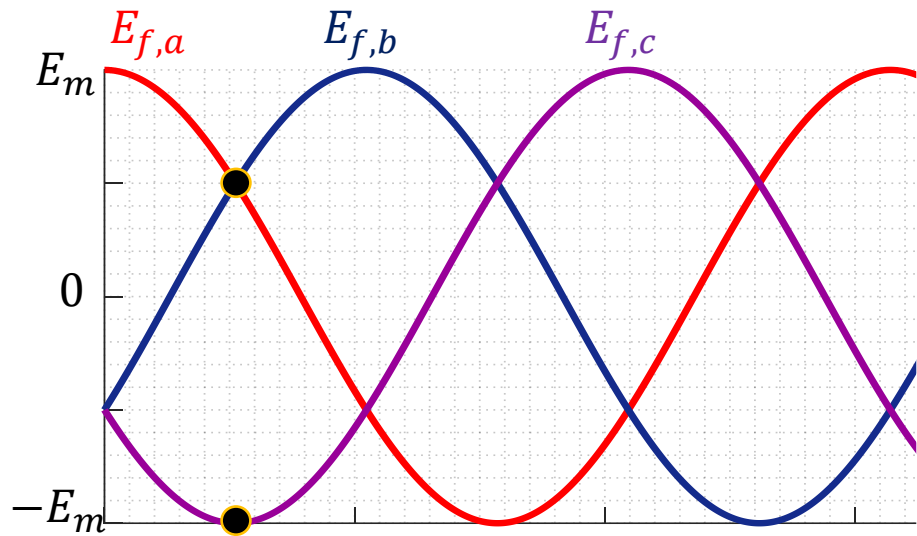
Tensão induzida no estator – máquina de 2 pólos



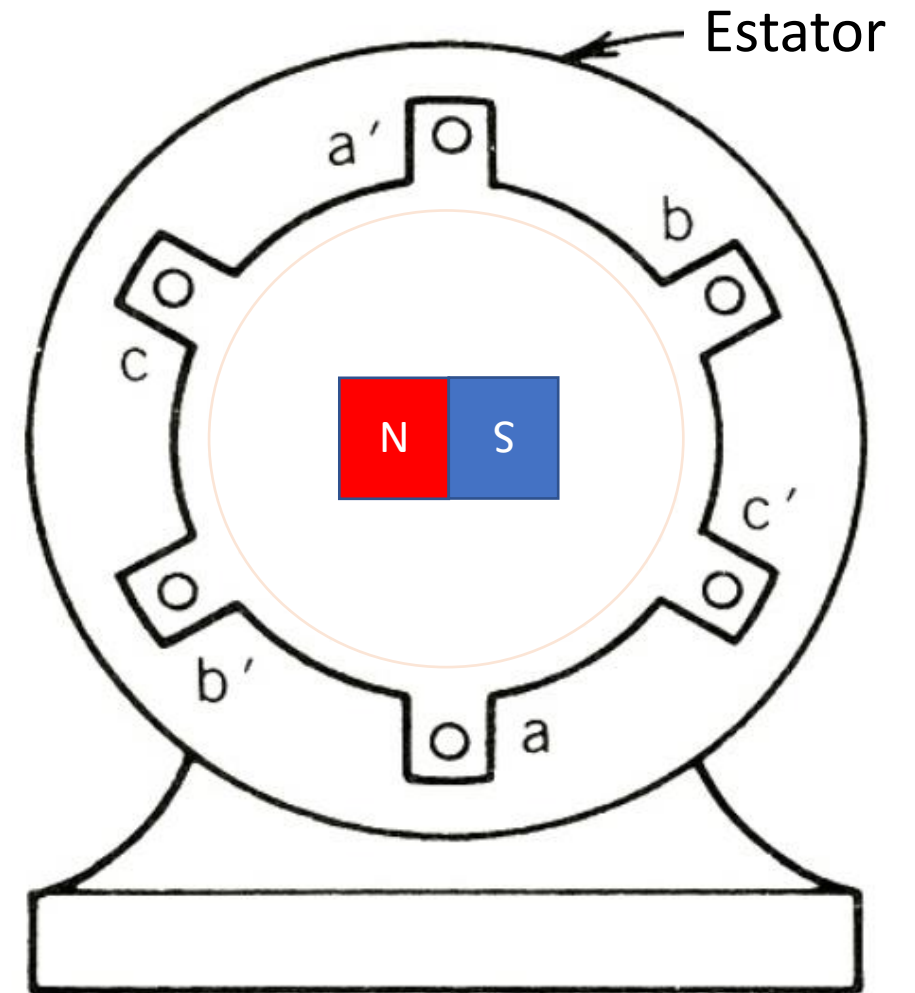
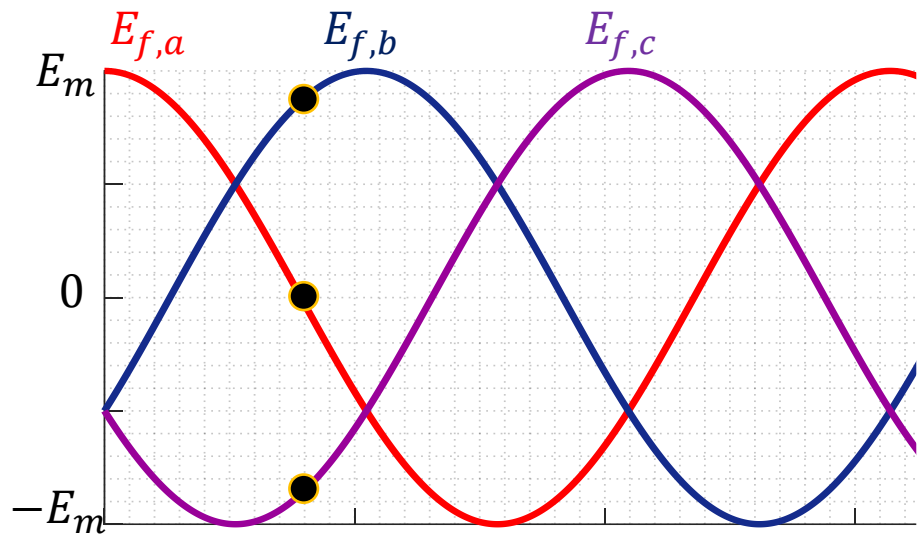
Tensão induzida no estator – máquina de 2 pólos



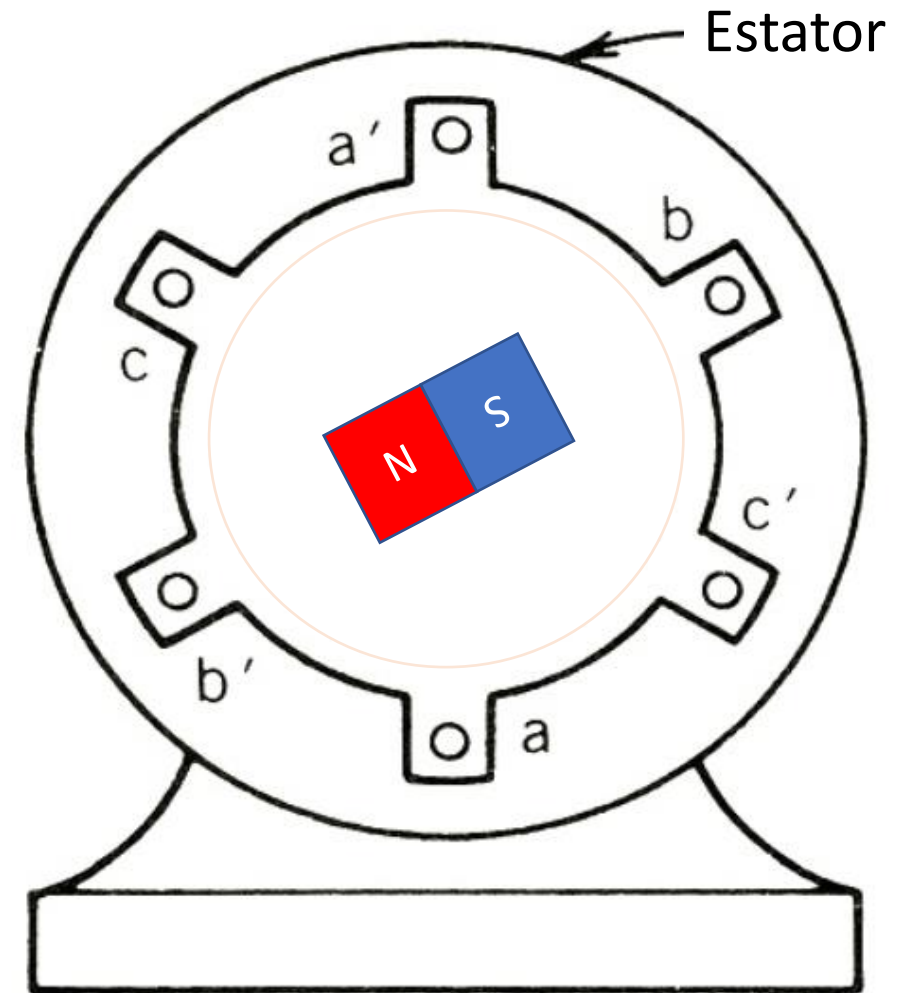
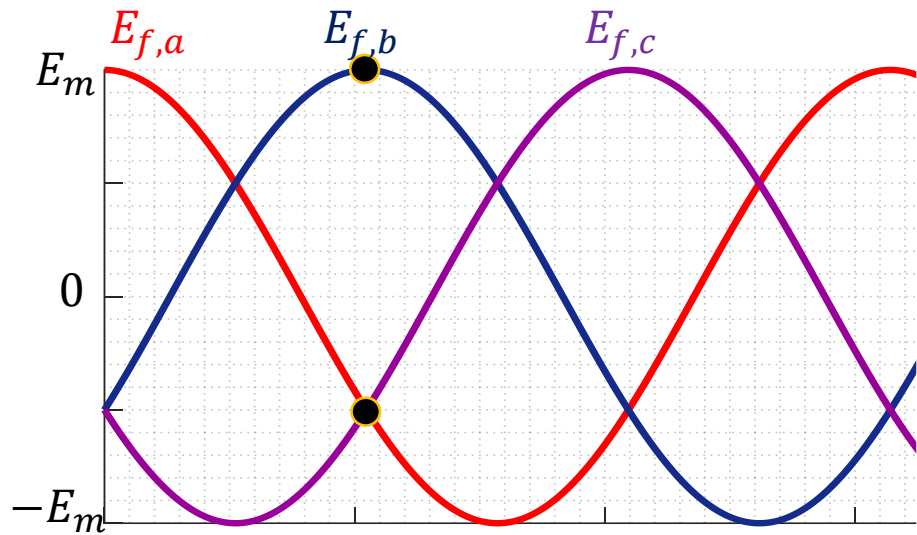
Tensão induzida no estator – máquina de 2 pólos



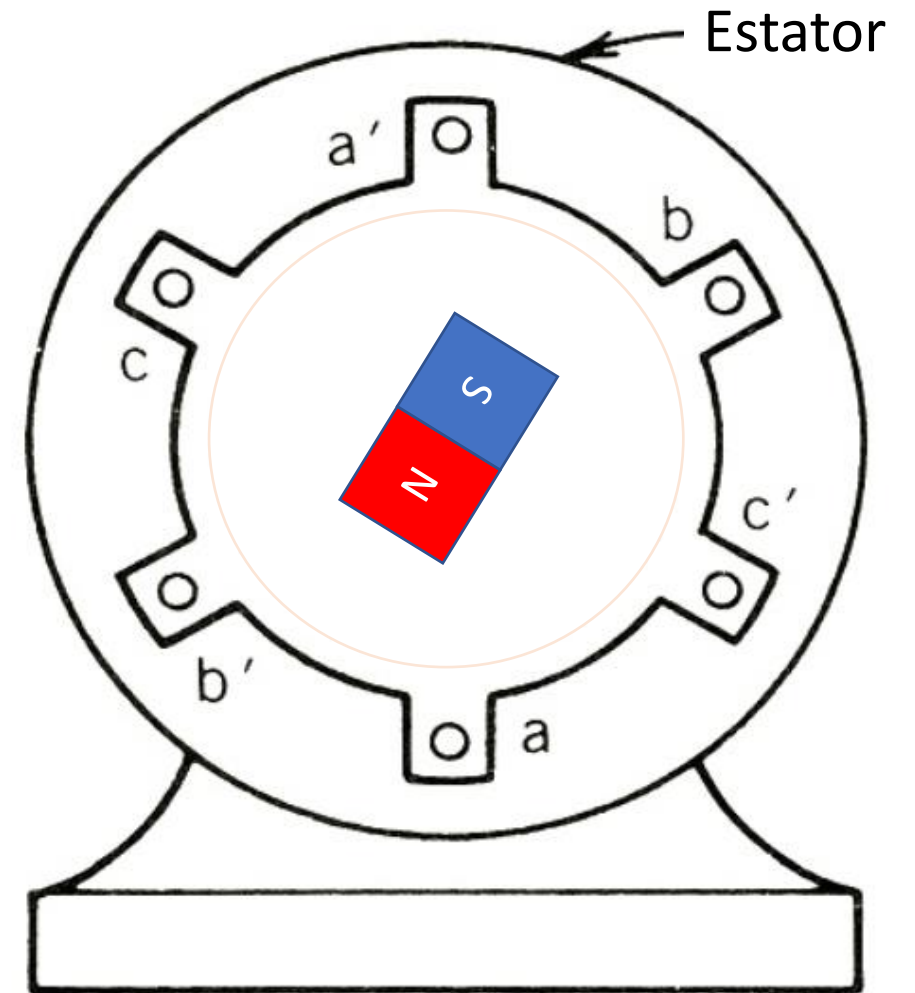
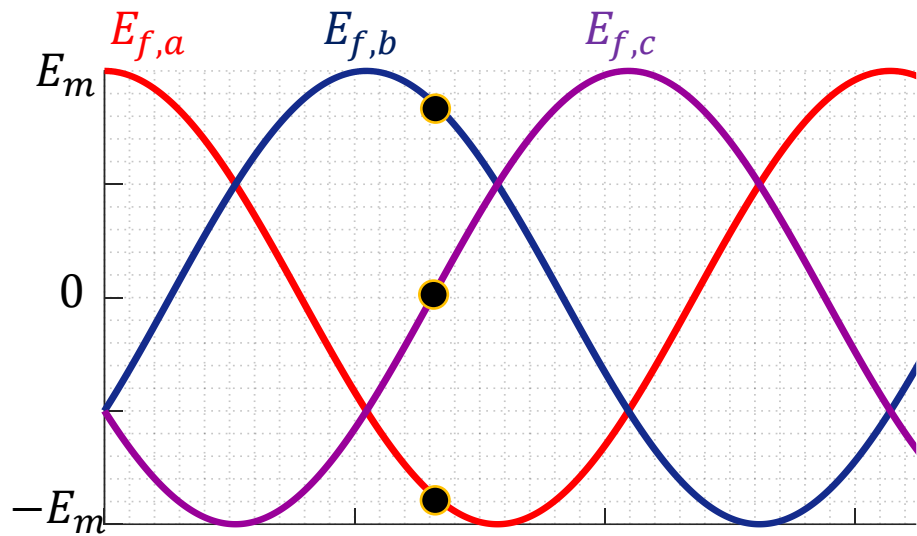
Tensão induzida no estator – máquina de 2 pólos



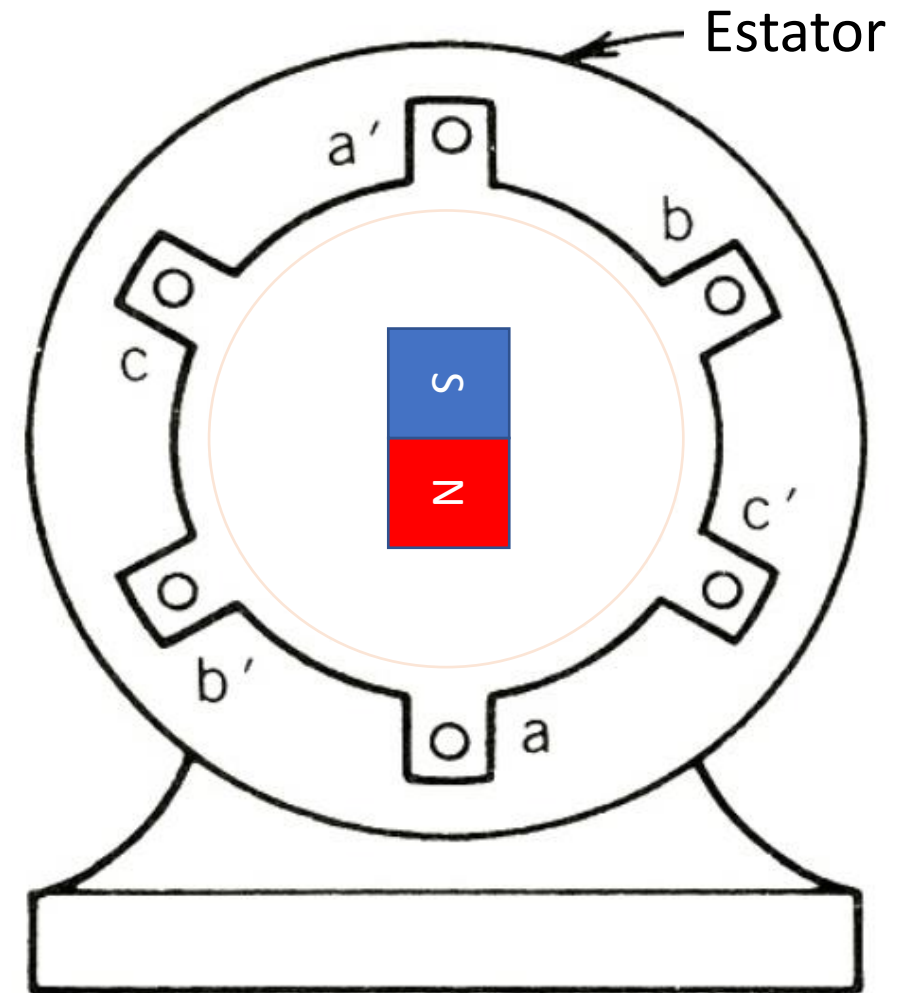
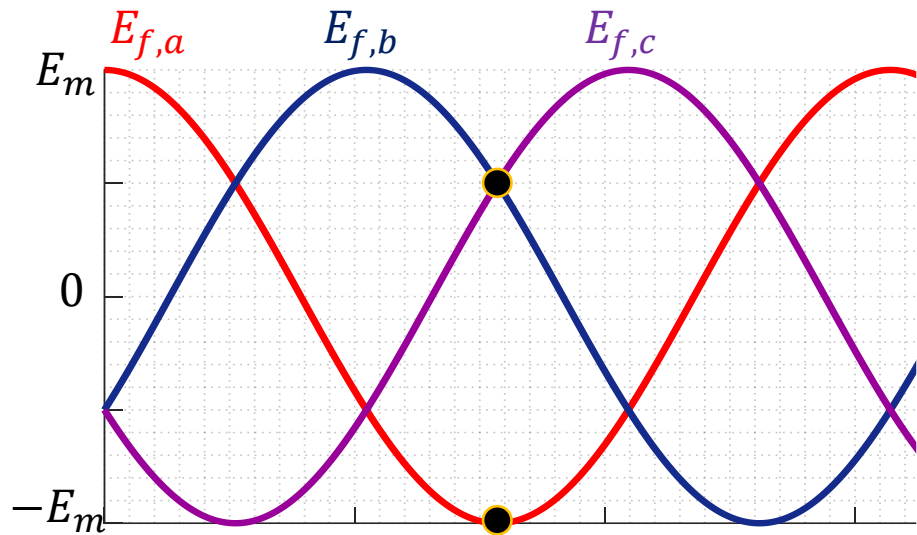
Tensão induzida no estator – máquina de 2 pólos



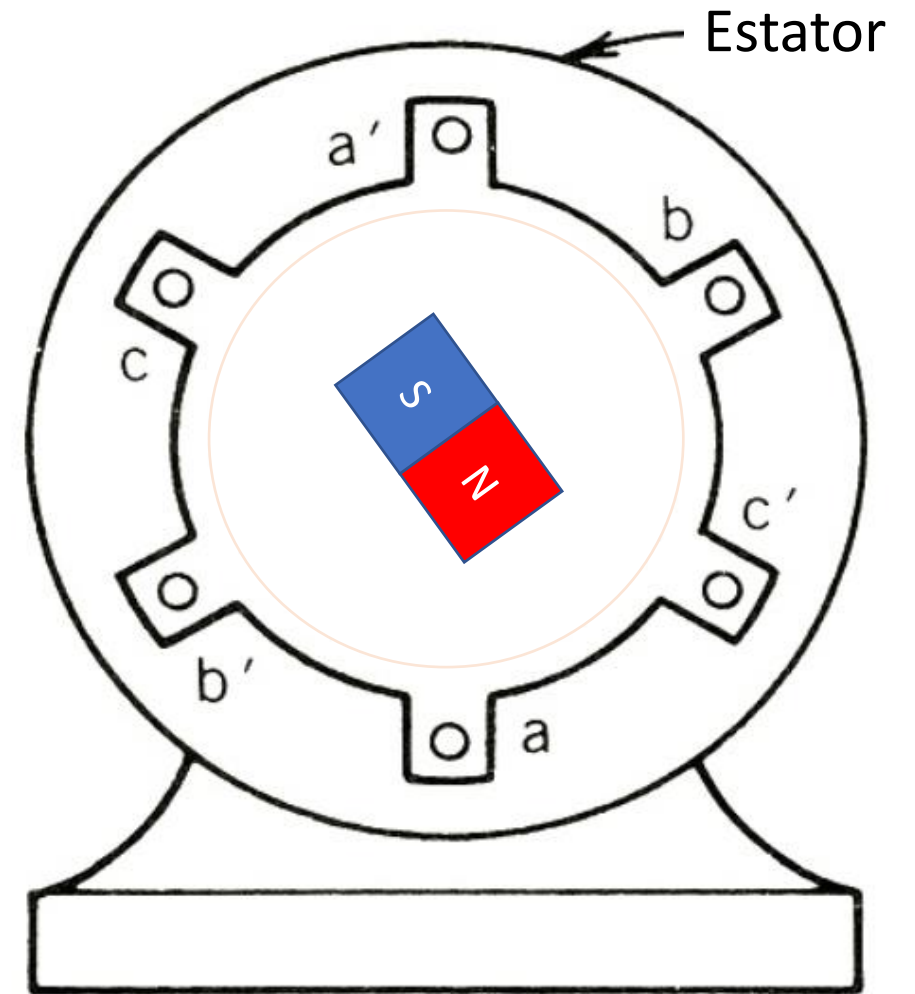
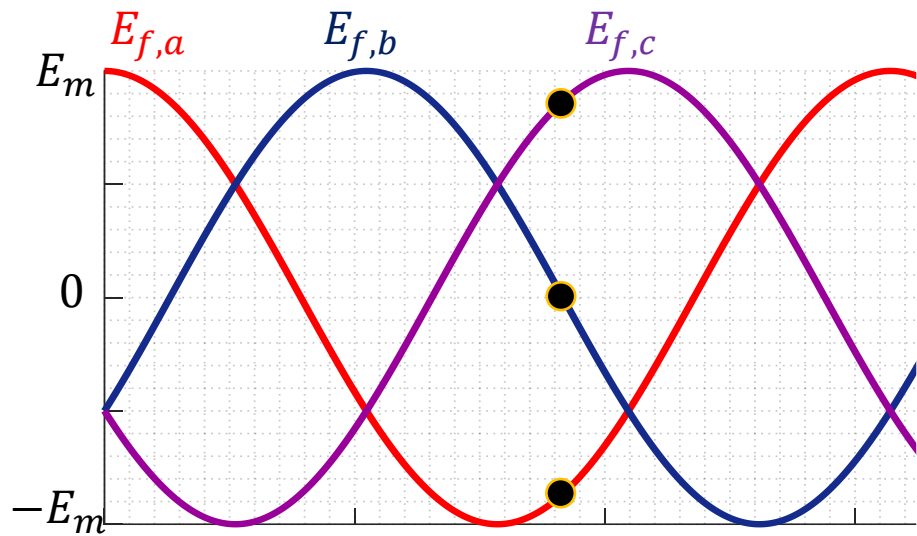
Tensão induzida no estator – máquina de 2 pólos



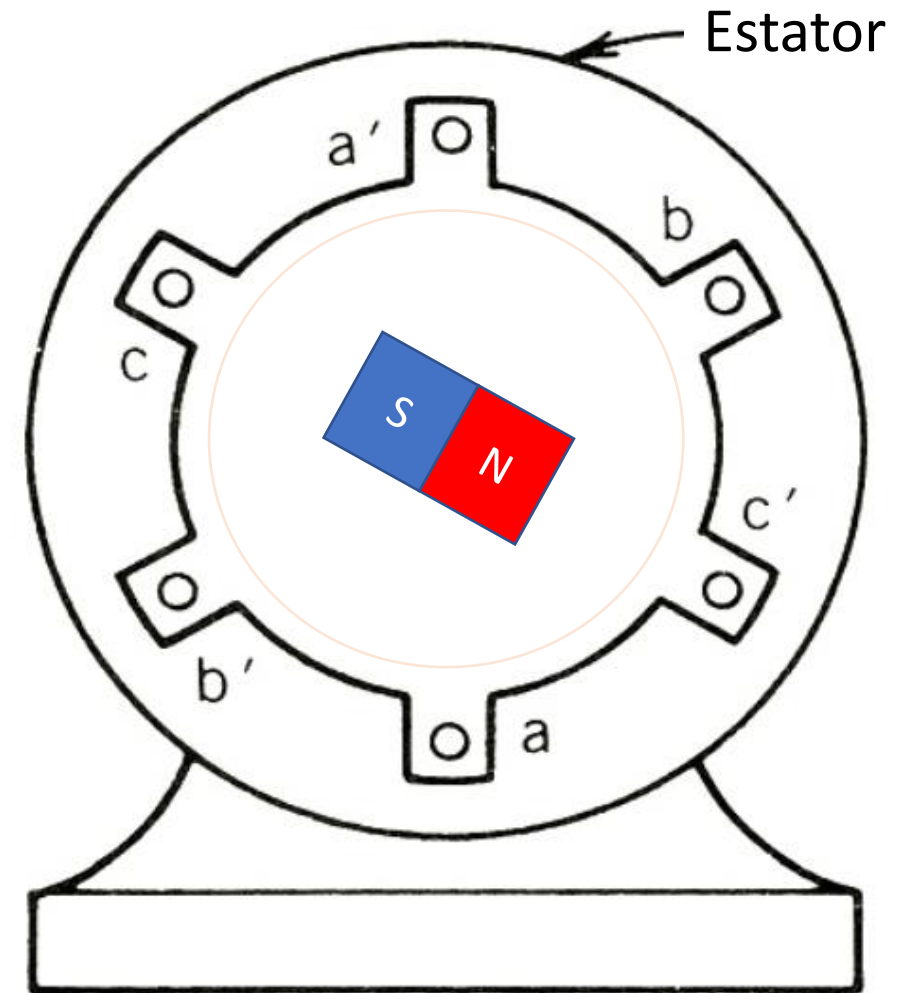
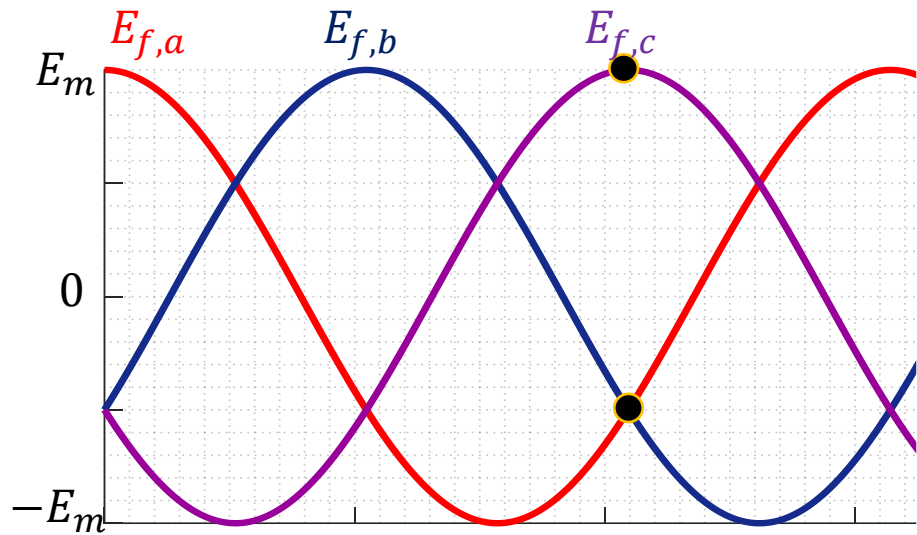
Tensão induzida no estator – máquina de 2 pólos



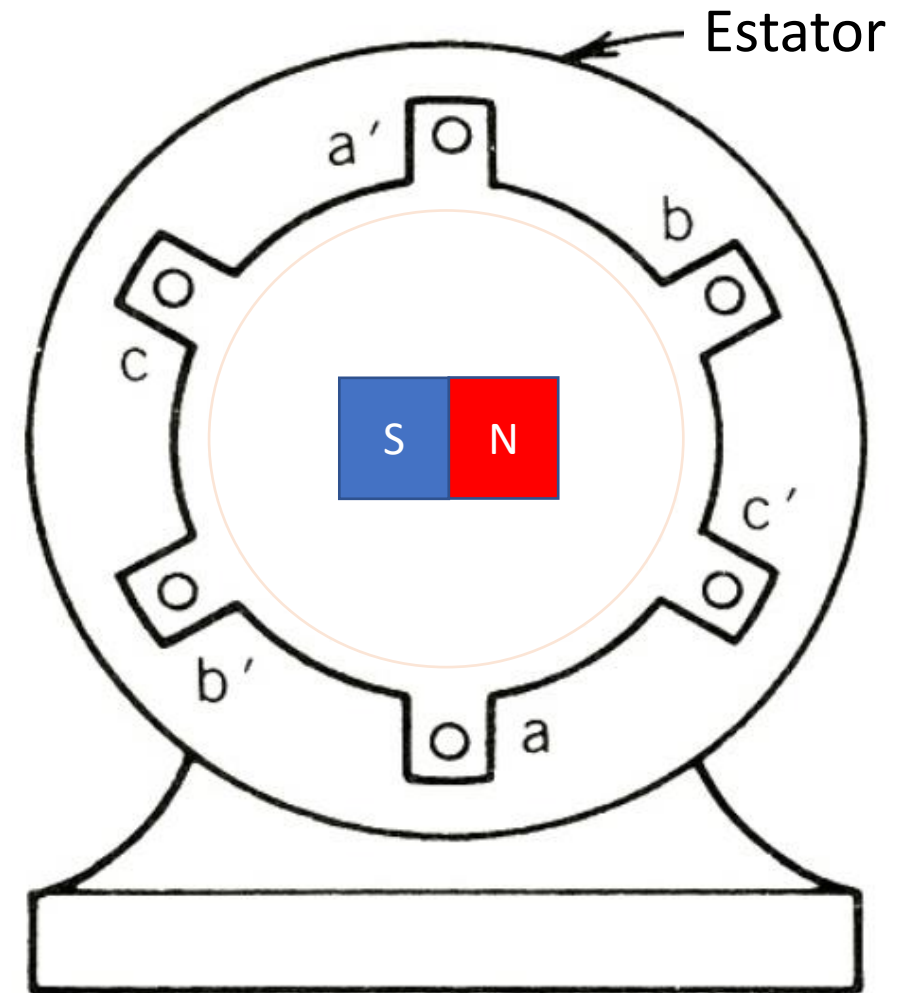
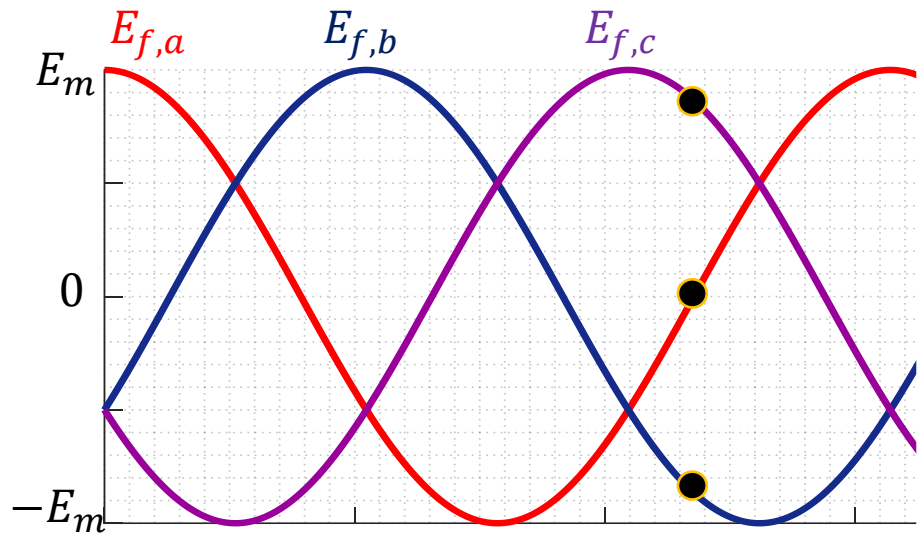
Tensão induzida no estator – máquina de 2 pólos



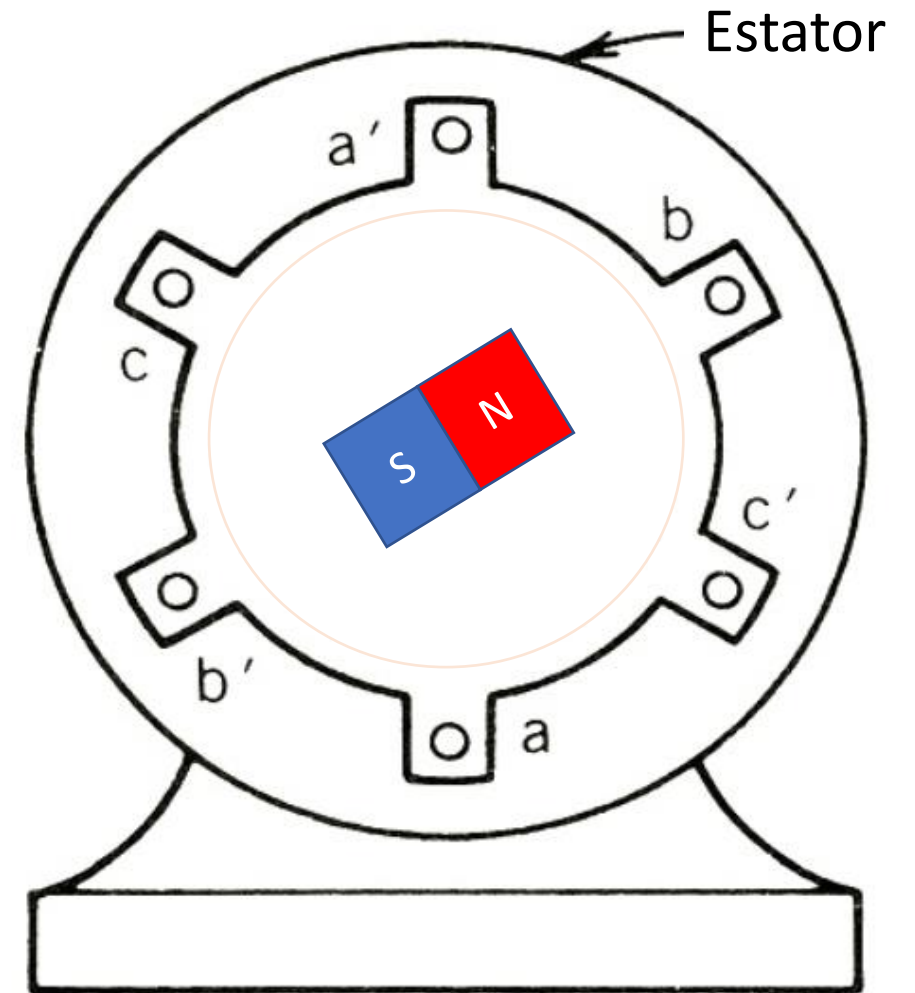
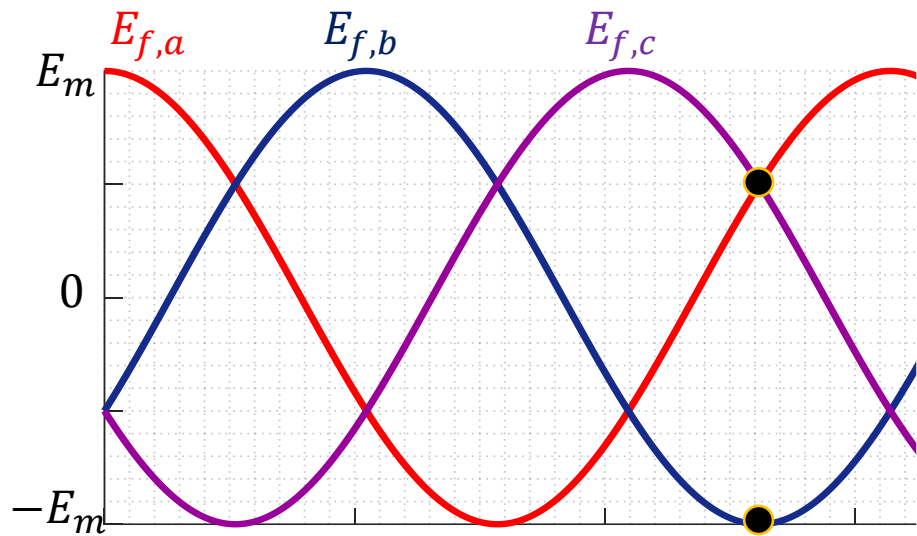
Tensão induzida no estator – máquina de 2 pólos



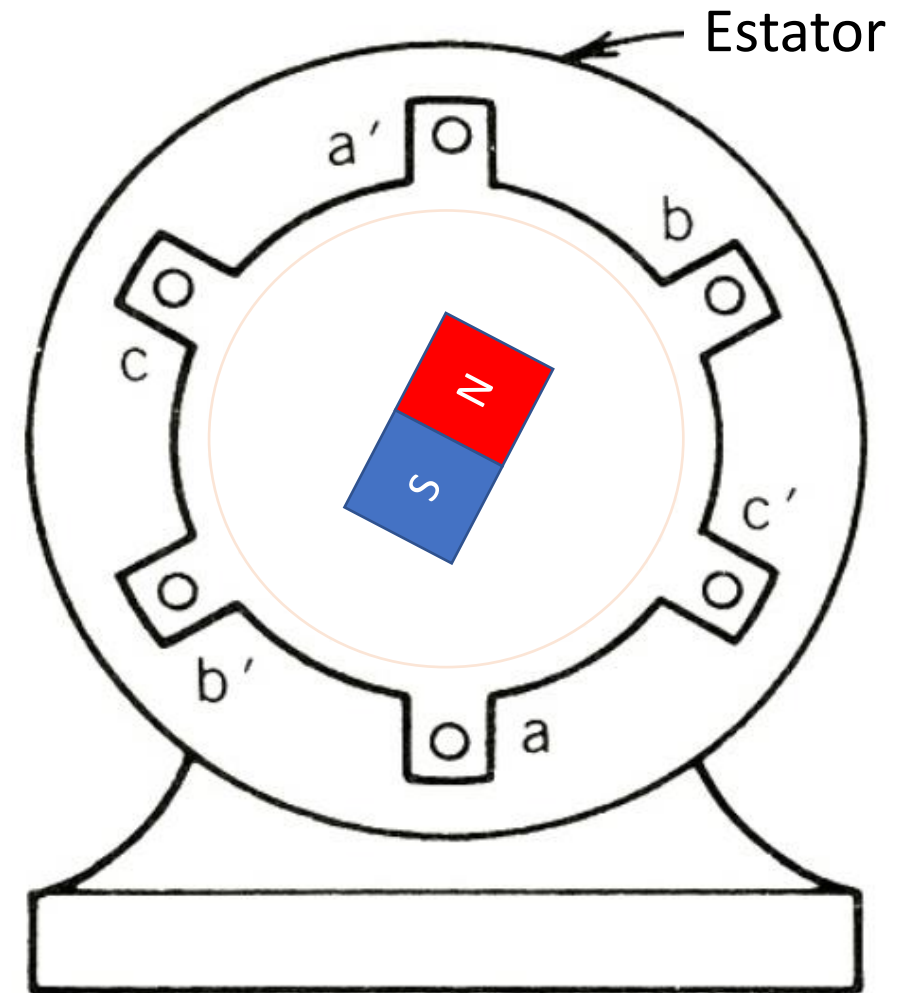
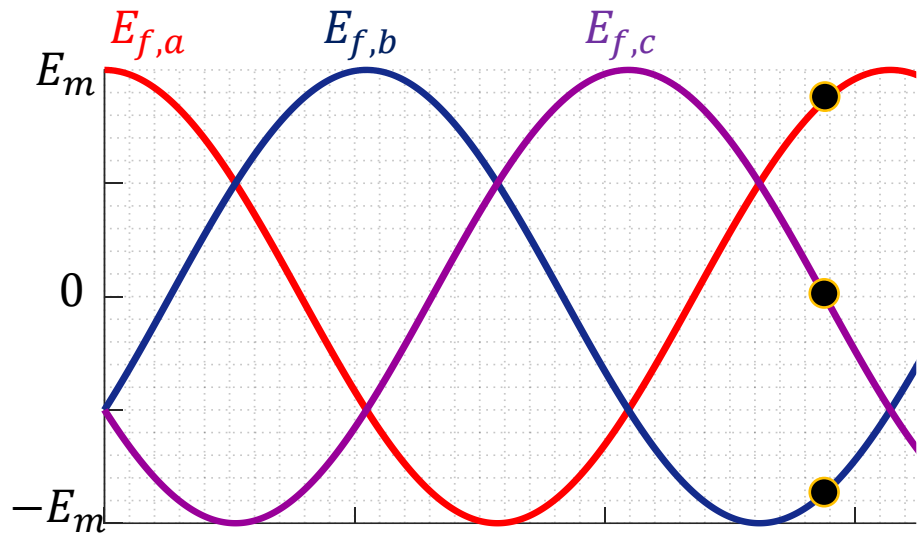
Tensão induzida no estator – máquina de 2 pólos



Tensão induzida no estator – máquina de 2 pólos



Tensão induzida no estator – máquina de 2 pólos



Relembrando a máquina de indução

$$\theta_e = \frac{p}{2} \theta_m$$

onde p é o número de polos da máquina.

A velocidade angular do campo girante em rpm é dada por:

$$n_s = \frac{120 f}{p}$$

onde f é a frequência das correntes de estator em Hz e p é o número de polos da máquina.

n_s é denominada **velocidade síncrona** da máquina.

□ Máquina de 4 polos e 60 Hz $\rightarrow n_s = 1800$ rpm.

Frequência induzida no estator

❑ Para a máquina síncrona, $n_m = n_s$;

❑ Portanto, a frequência induzida no estator da máquina é dada por:

$$f = \frac{n_m p}{120}$$

Conclusão: máquinas com elevado número de polos apresentam baixas velocidades nominais.

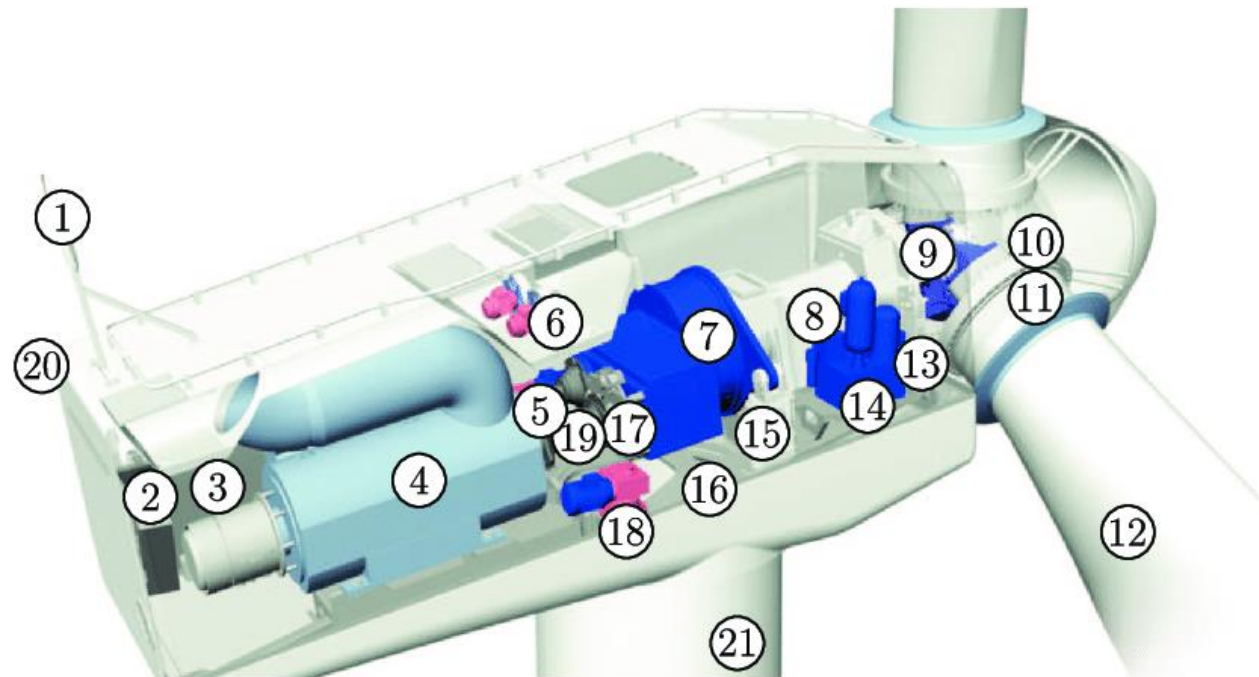
Exemplo

Exemplo: Suponha uma turbina eólica que apresenta uma velocidade nominal igual a 20 rpm. Calcule o número de polos do gerador síncrono para que a tensão induzida no estator apresente uma frequência de 15 Hz.

$$f = \frac{n_m p}{120} \Leftrightarrow 15 = \frac{20 p}{120} \Leftrightarrow \boxed{p = 90}$$

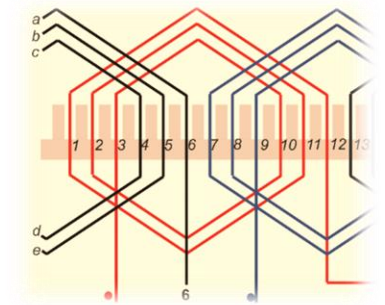
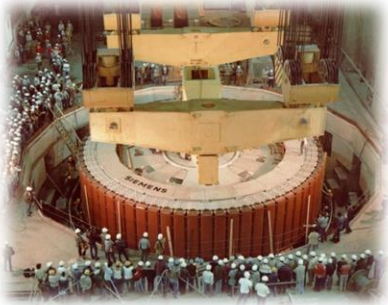


Solução alternativa – caixa de transmissão

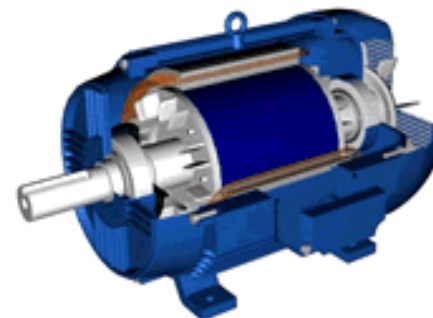
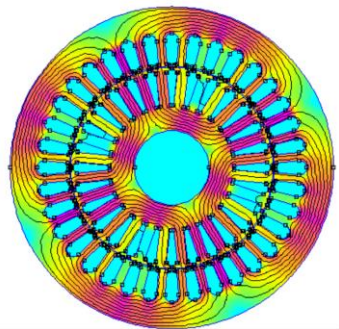


- | | | |
|---------------------------|----------------------------|-----------------------|
| ① Anemômetro | ⑧ Eixo de baixa velocidade | ⑮ Braço de torque |
| ② Sistema de Comunicação | ⑨ Controle de pitch | ⑯ Encaixe com a torre |
| ③ Conversor | ⑩ Cubo do rotor | ⑰ Freio mecânico |
| ④ Gerador | ⑪ Rolamento das pás | ⑱ Sistema de giro |
| ⑤ Cilindros de rotação | ⑫ Pás | ⑲ Luva de acoplamento |
| ⑥ Sistema de resfriamento | ⑬ Trava do rotor | ⑳ Nacele |
| ⑦ Caixa de engrenagens | ⑭ Sistema hidráulico | ㉑ Torre |

Fonte: Daniel A. F. Collier. “Modelagem e Controle de Retificadores PWM Trifásicos Conectados a Geradores Síncronos a Ímãs Permanentes em Sistemas de Conversão de Energia Eólica”. Dissertação de Mestrado. UFSC. 2011.



Funcionamento como motor



<http://www.semage.com.br/calternada.ph>

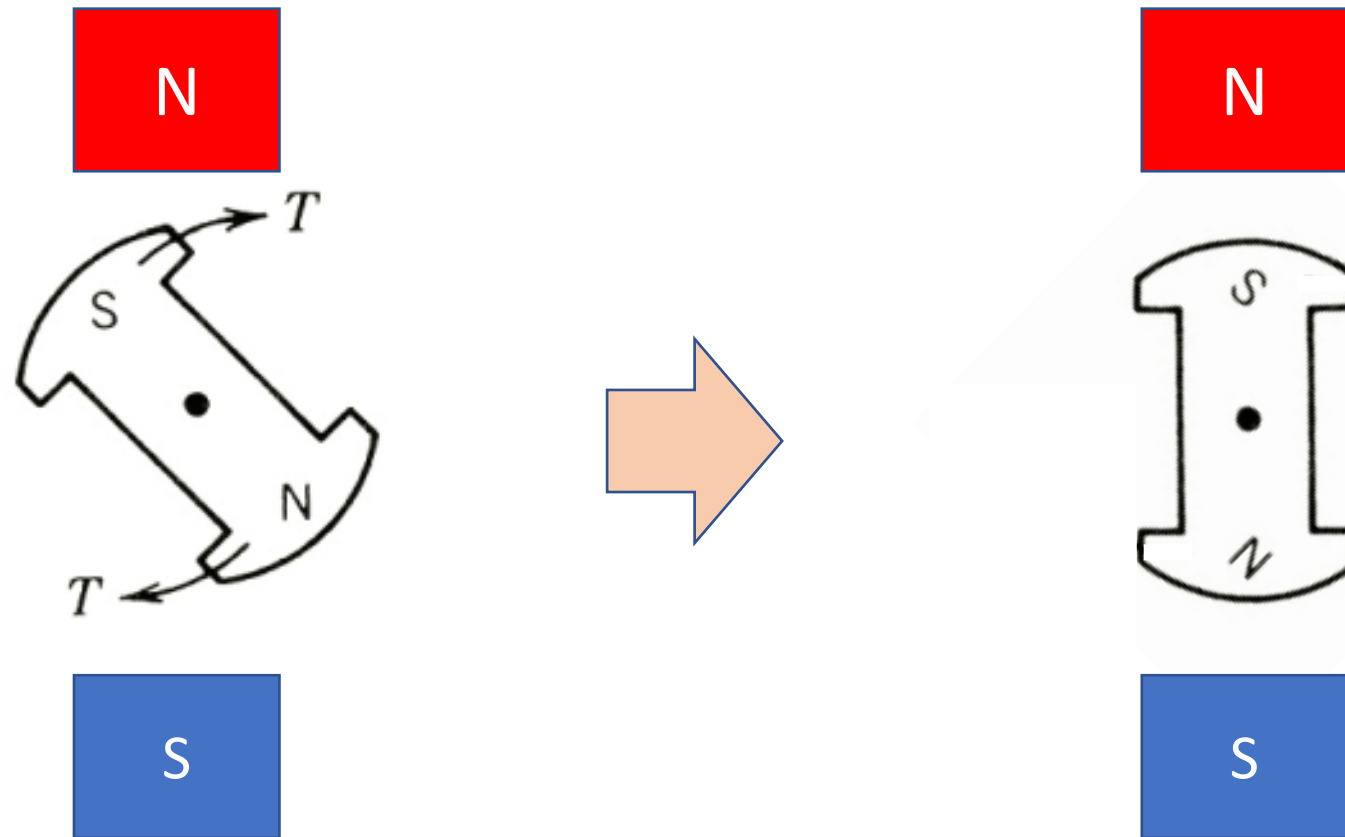


Funcionamento da máquina síncrona como motor

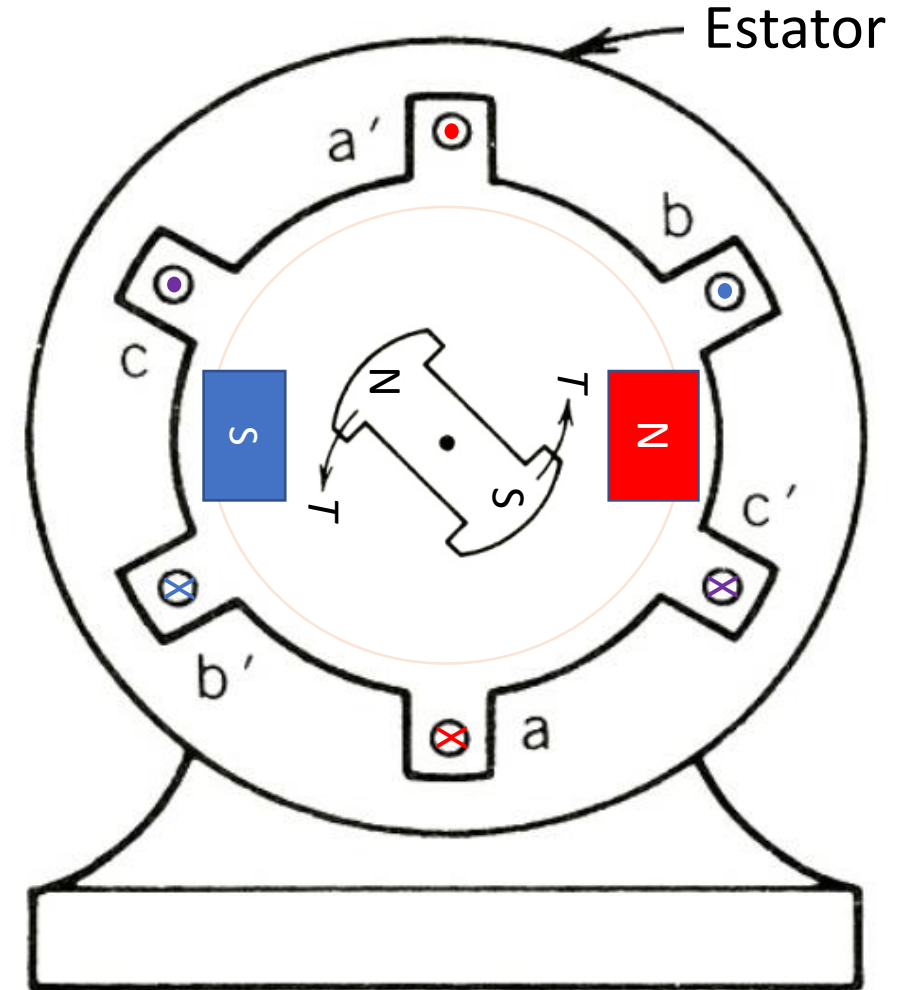
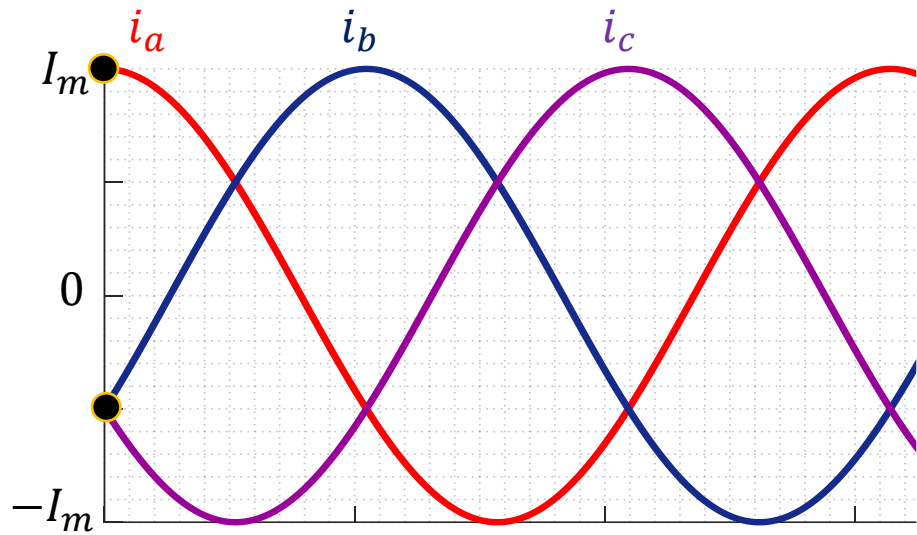
- ❑ Parte do pressuposto da existência de alimentação no estator e no rotor da máquina;
- ❑ Rotor alimentado em corrente contínua tem um comportamento similar a um ímã;
- ❑ Estator alimentado com correntes trifásicas → campo girante;
- ❑ Geração de conjugado → força de atração entre os ímãs!!!



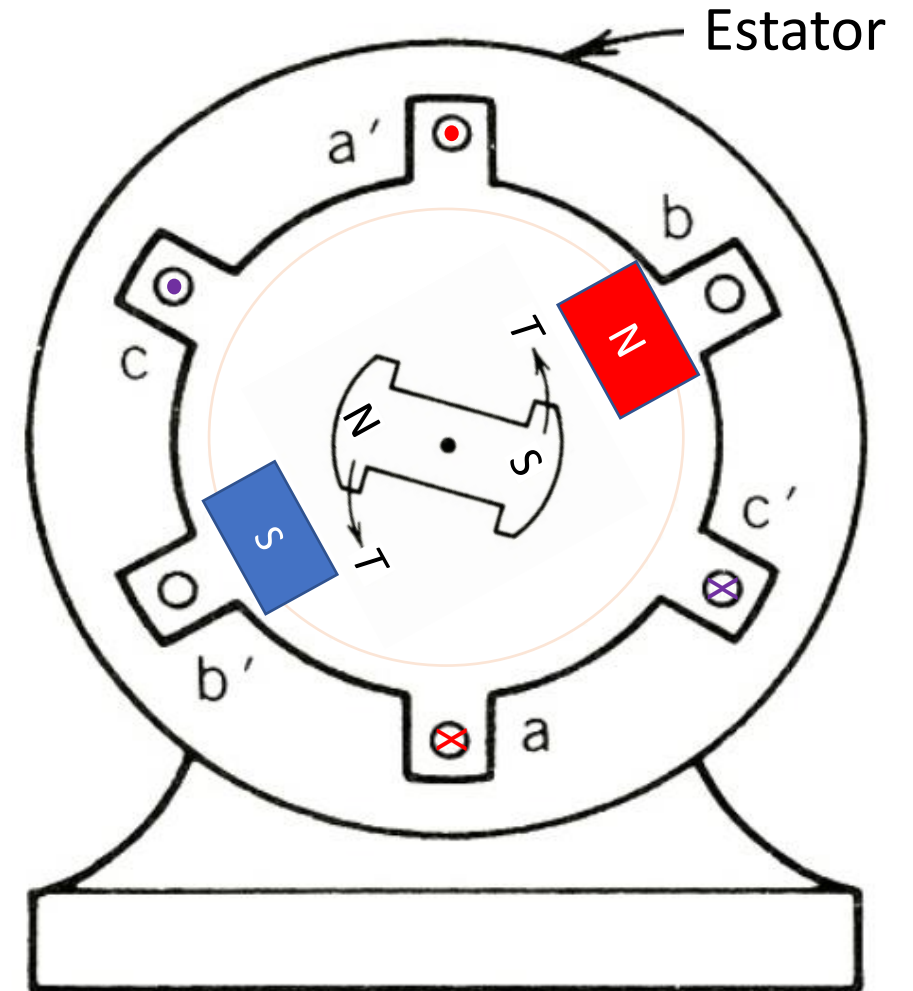
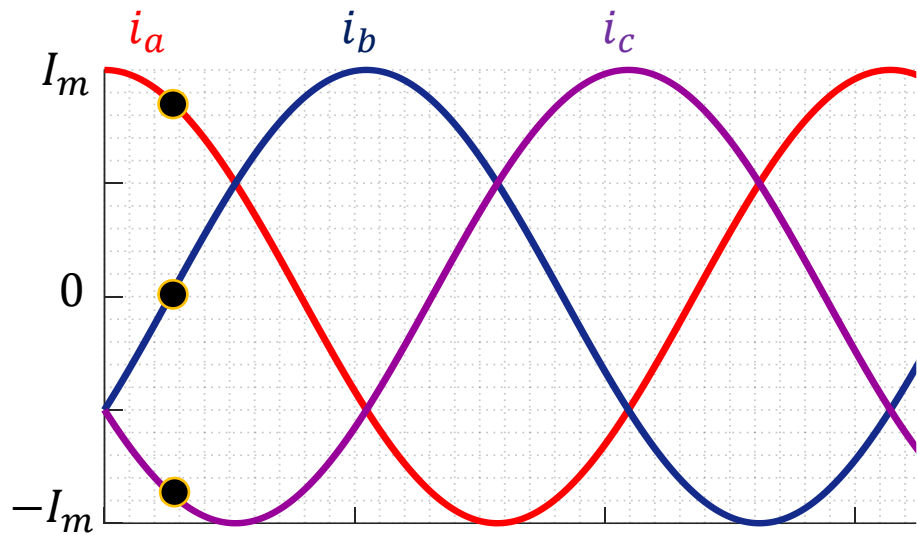
Princípio de geração de conjugado



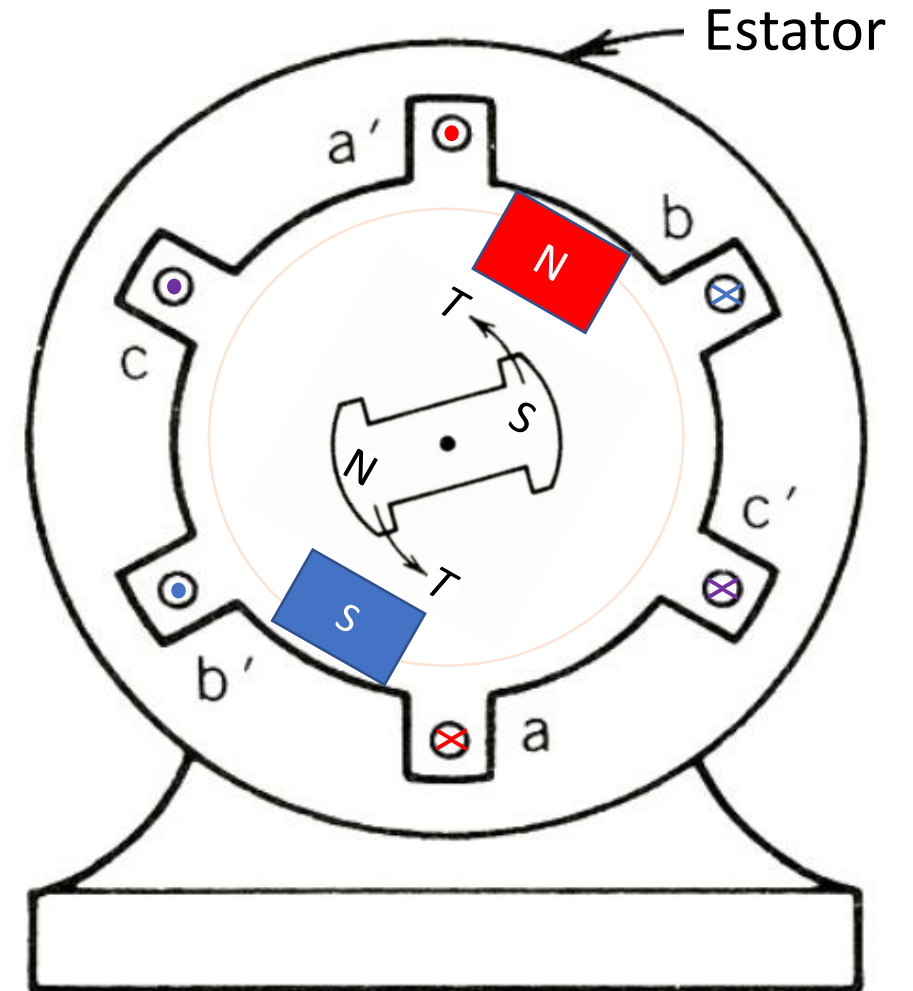
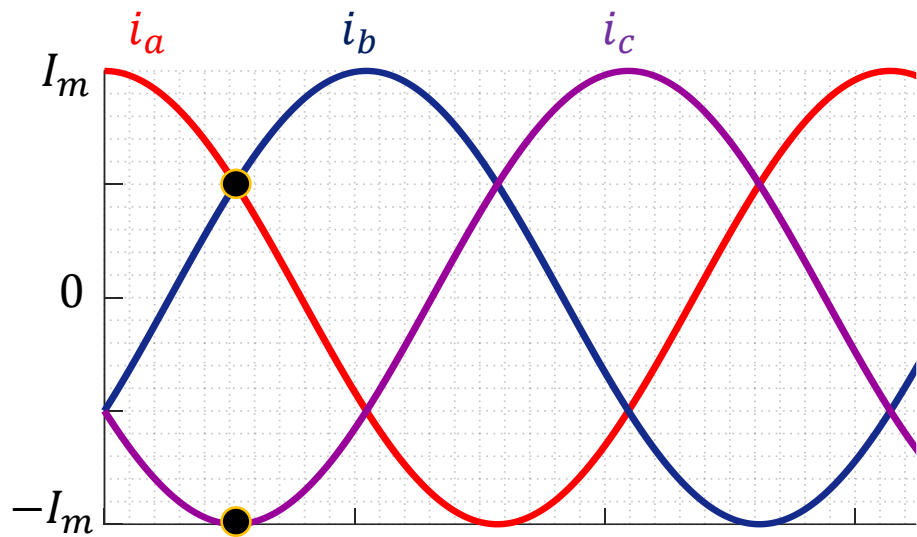
Campo girante – máquina de 2 pólos



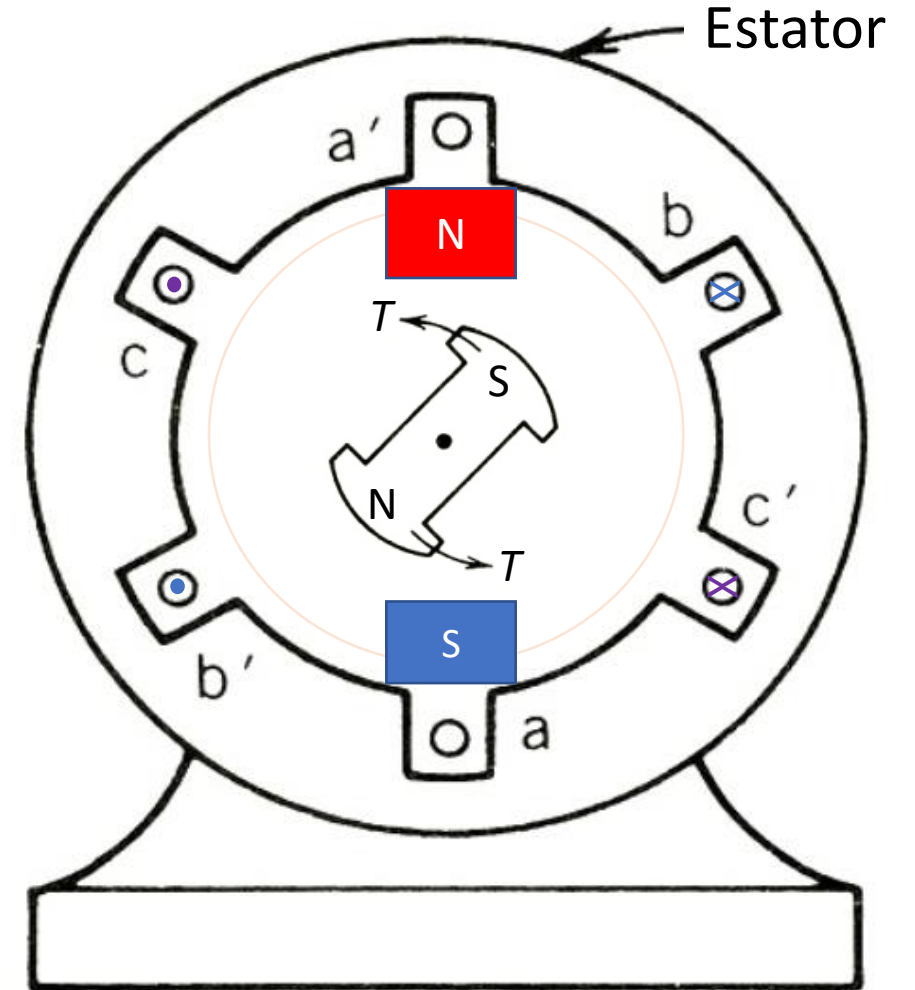
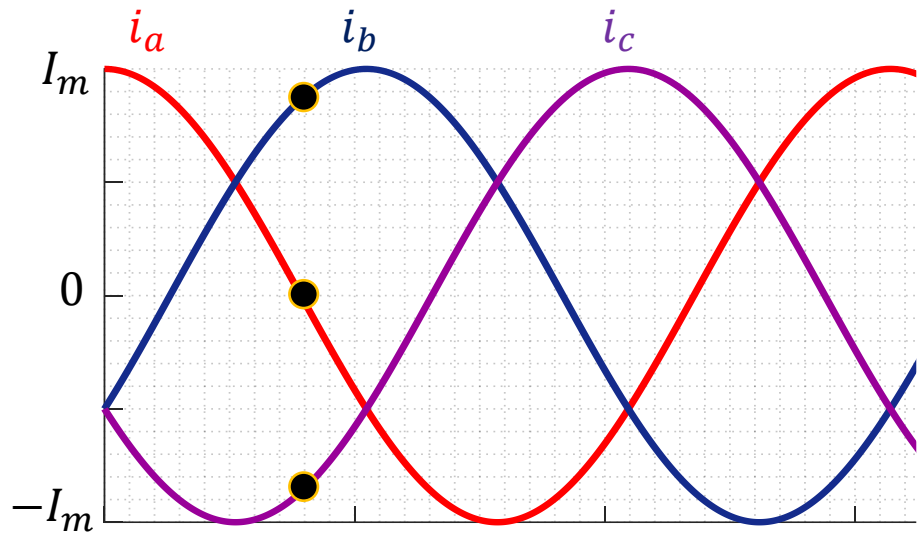
Campo girante – máquina de 2 pólos



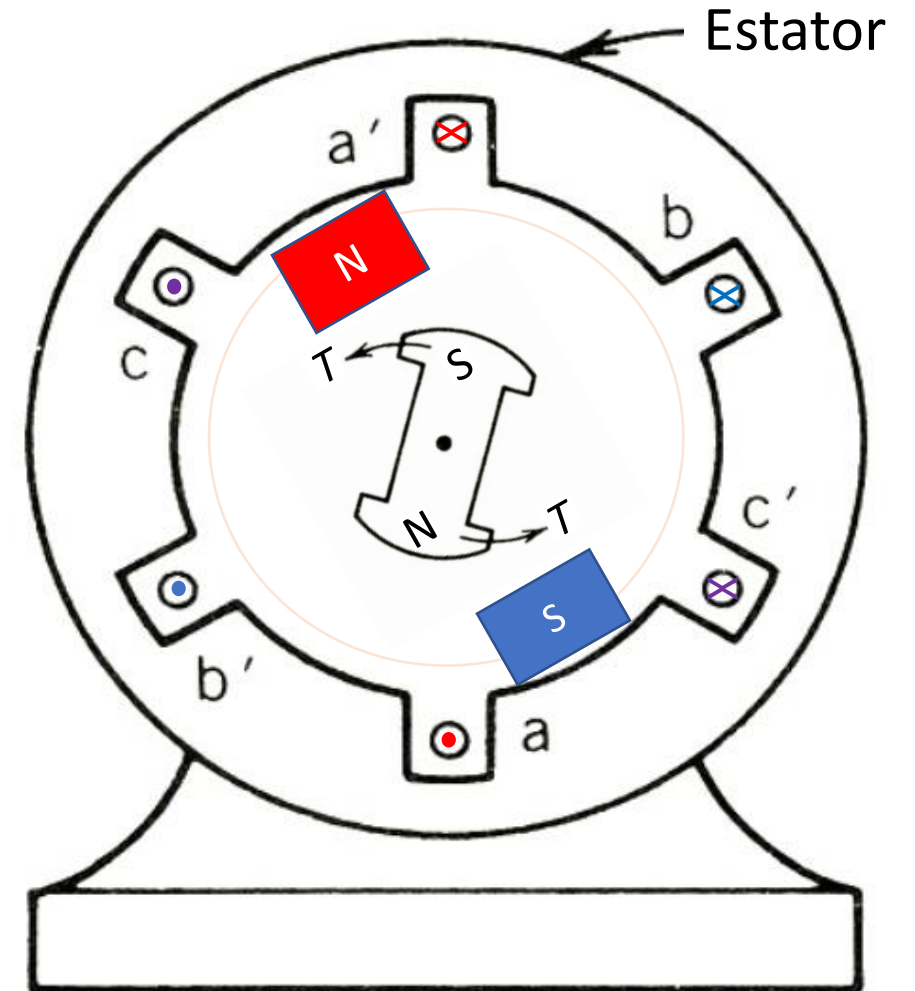
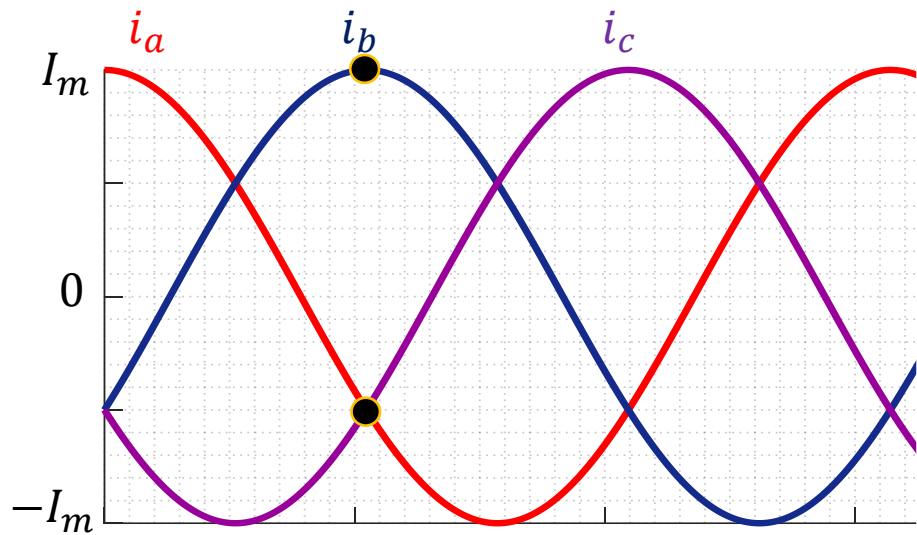
Campo girante – máquina de 2 pólos



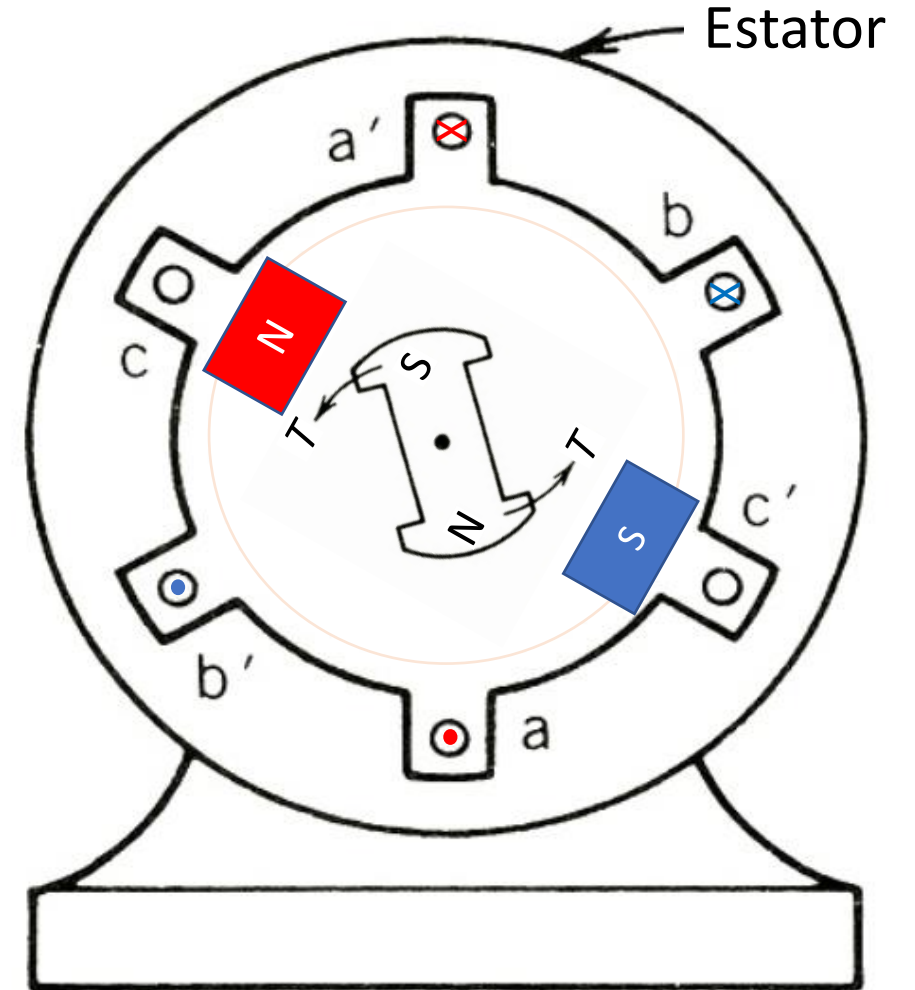
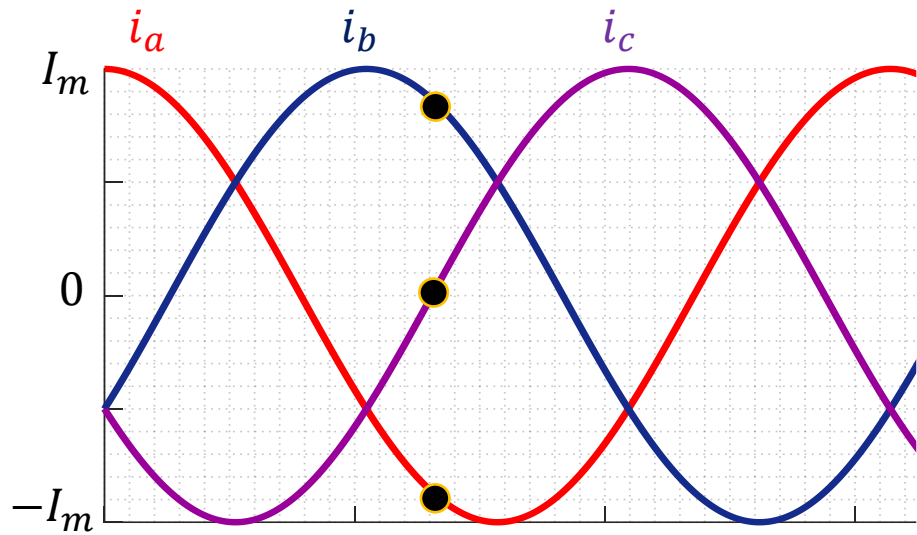
Campo girante – máquina de 2 pólos



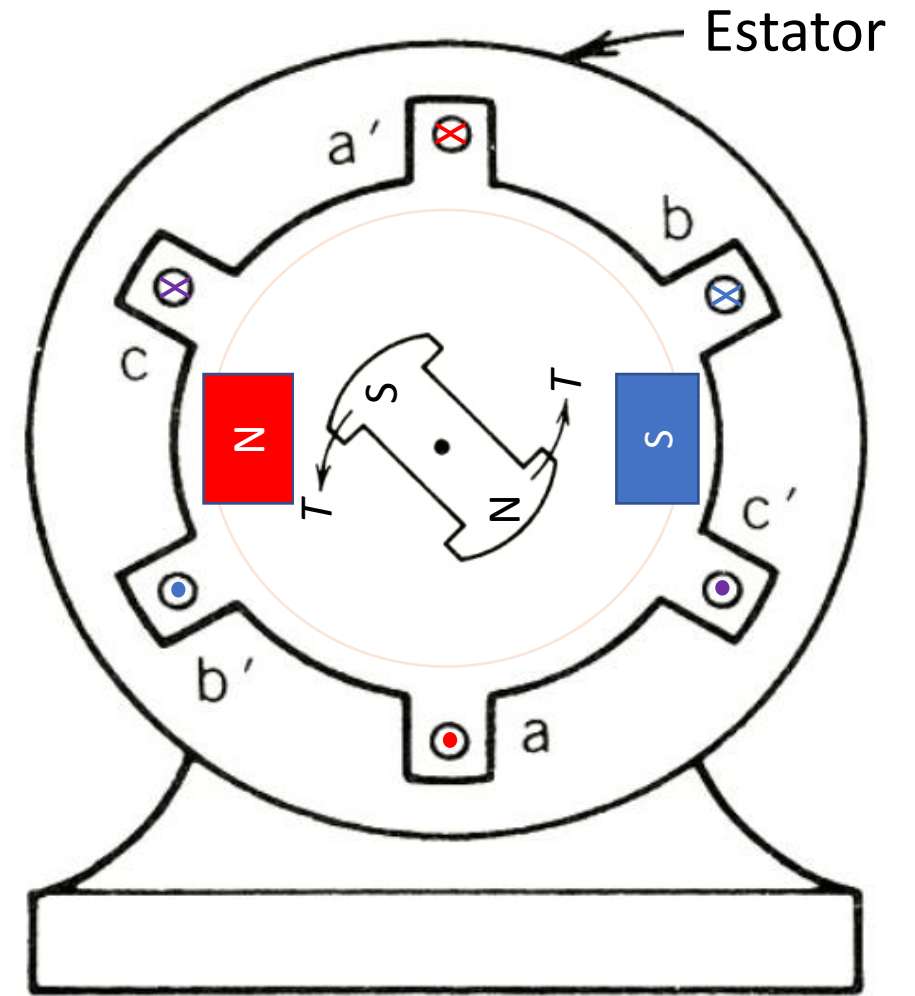
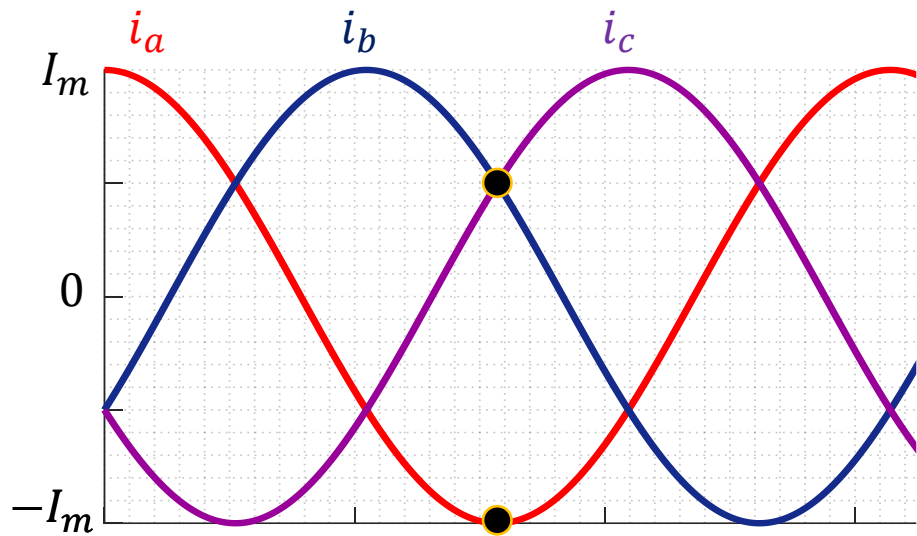
Campo girante – máquina de 2 pólos



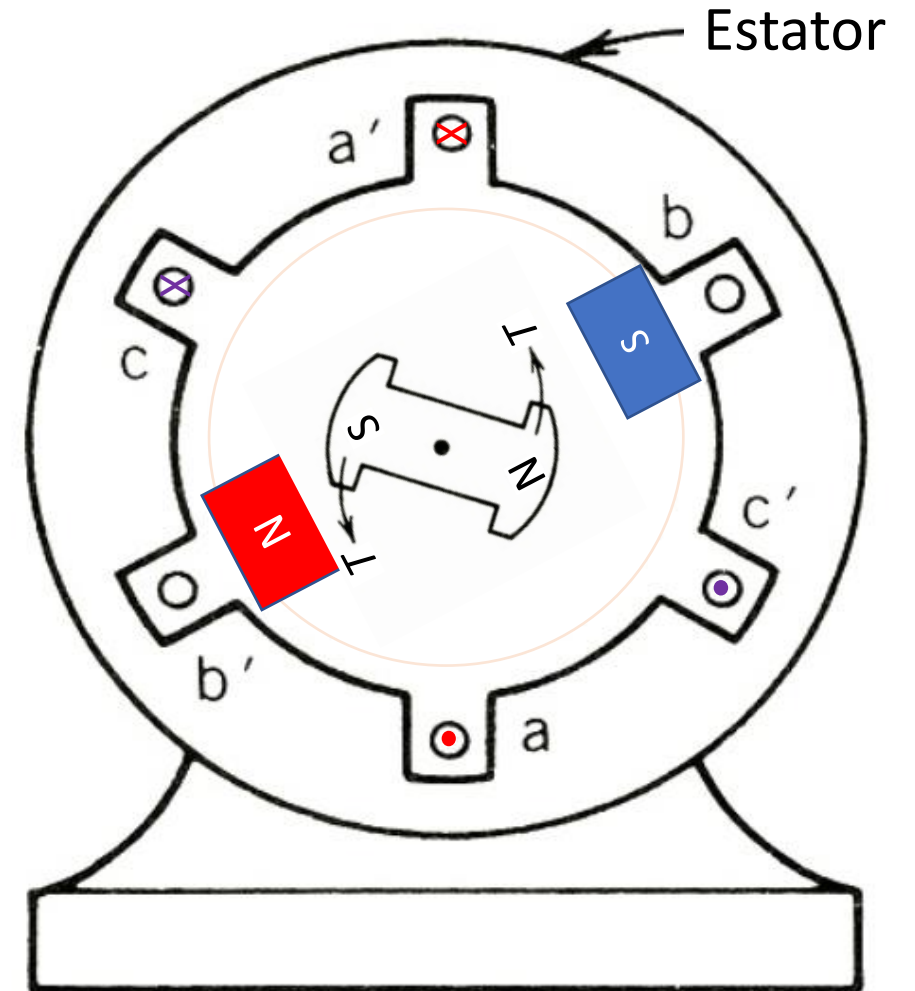
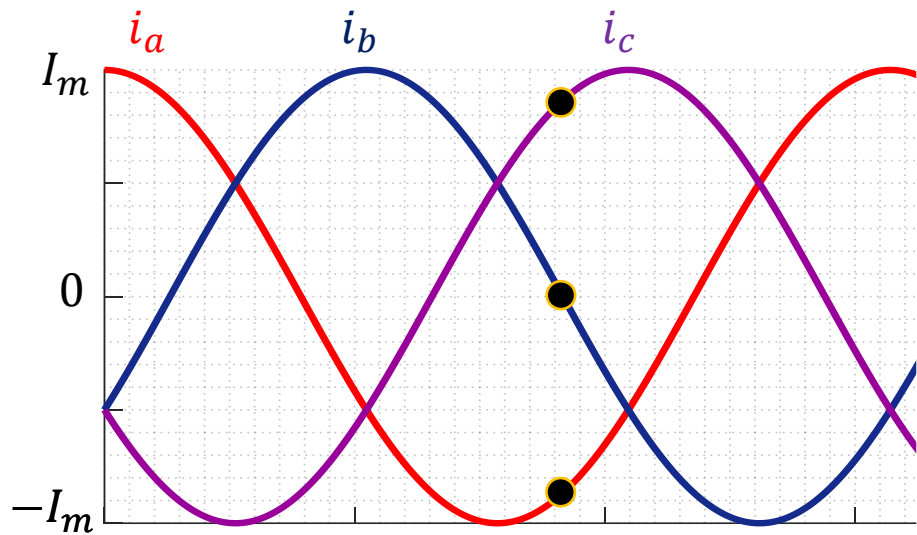
Campo girante – máquina de 2 pólos



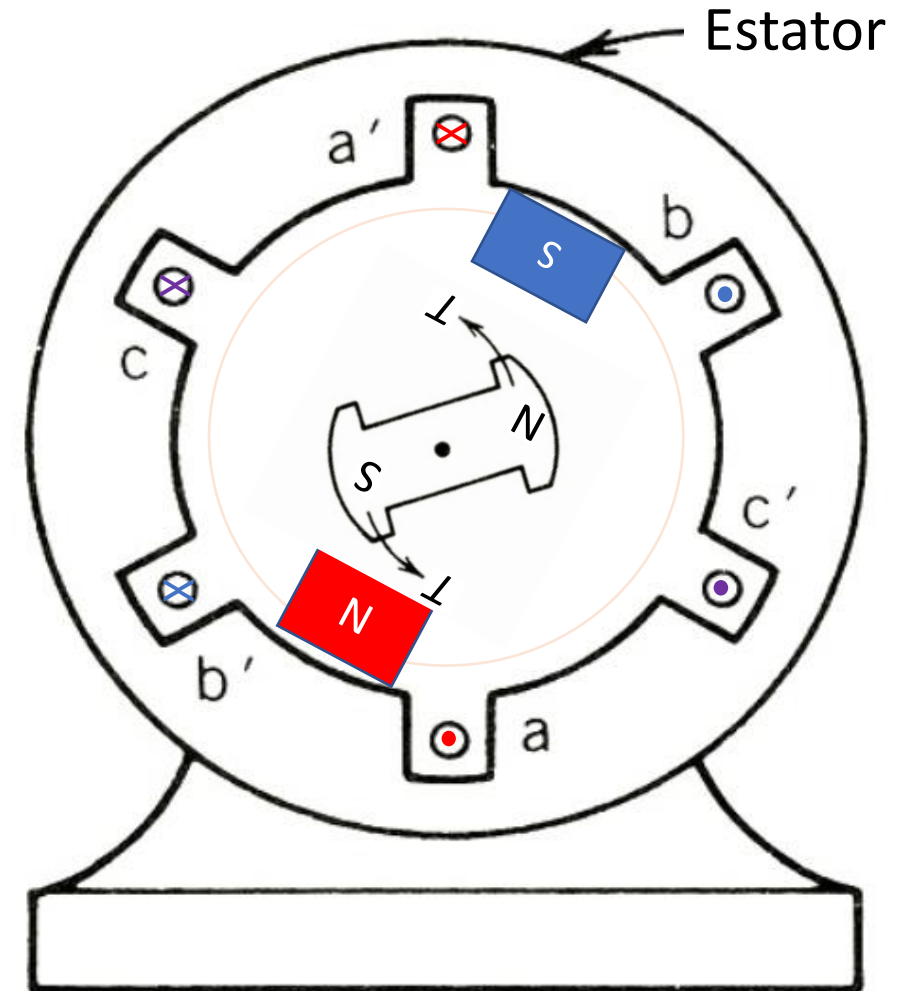
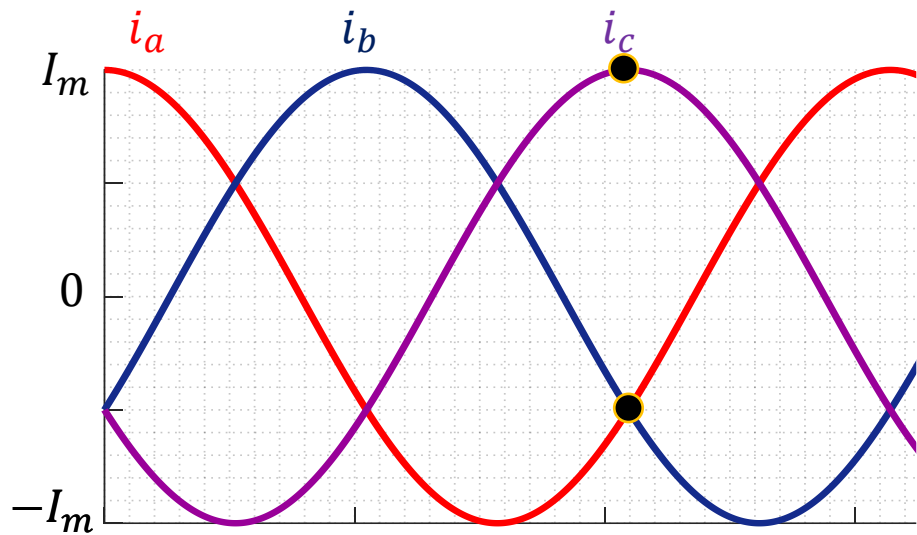
Campo girante – máquina de 2 pólos



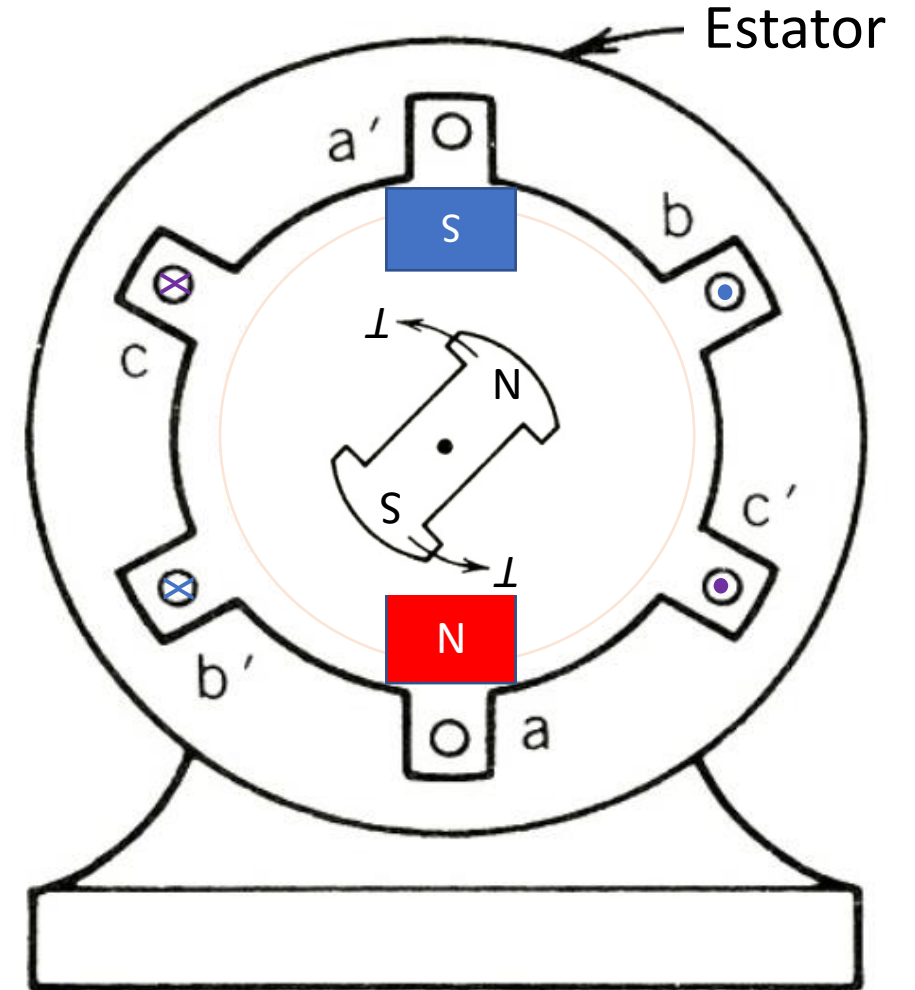
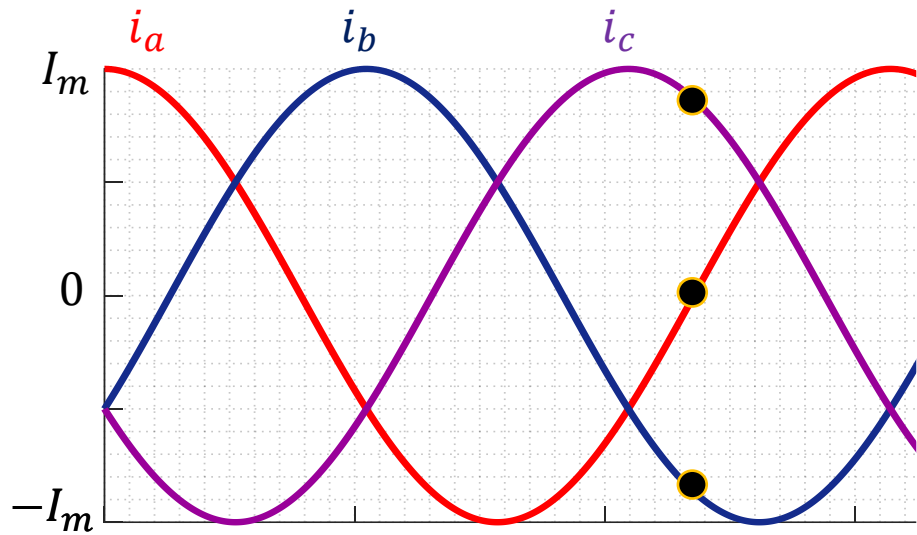
Campo girante – máquina de 2 pólos



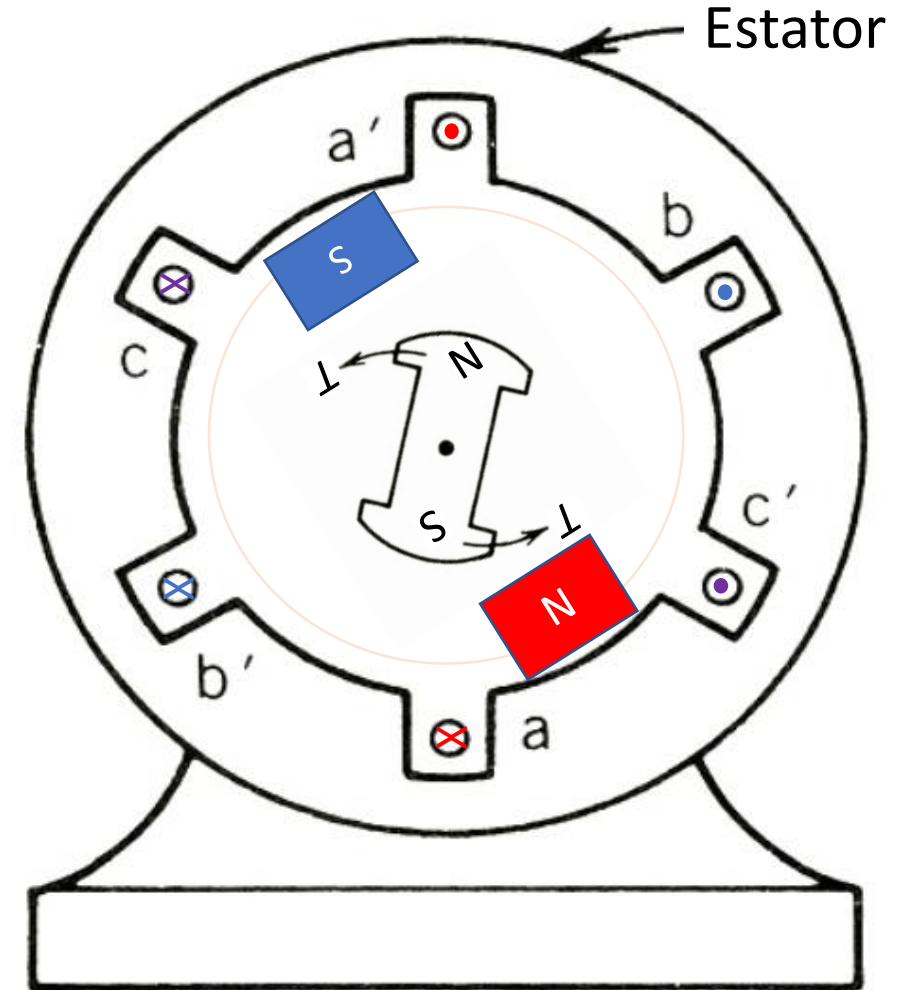
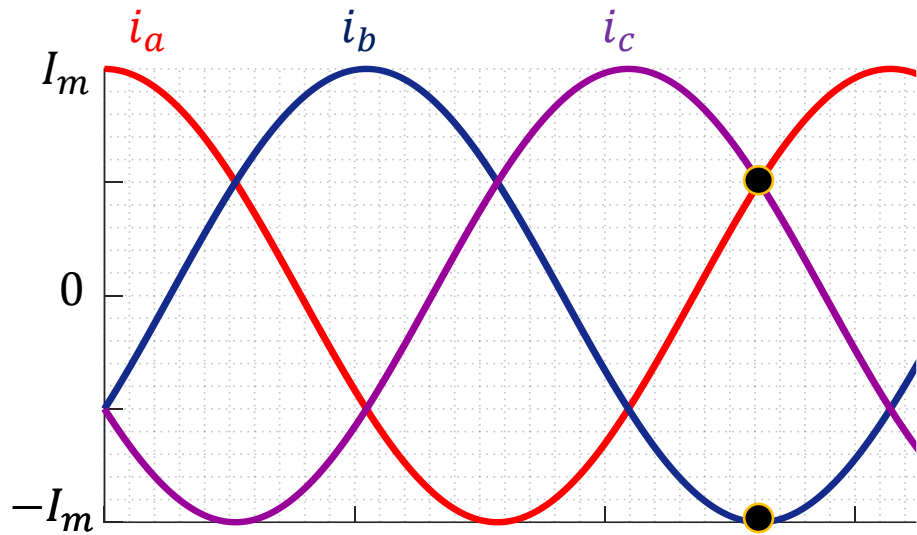
Campo girante – máquina de 2 pólos



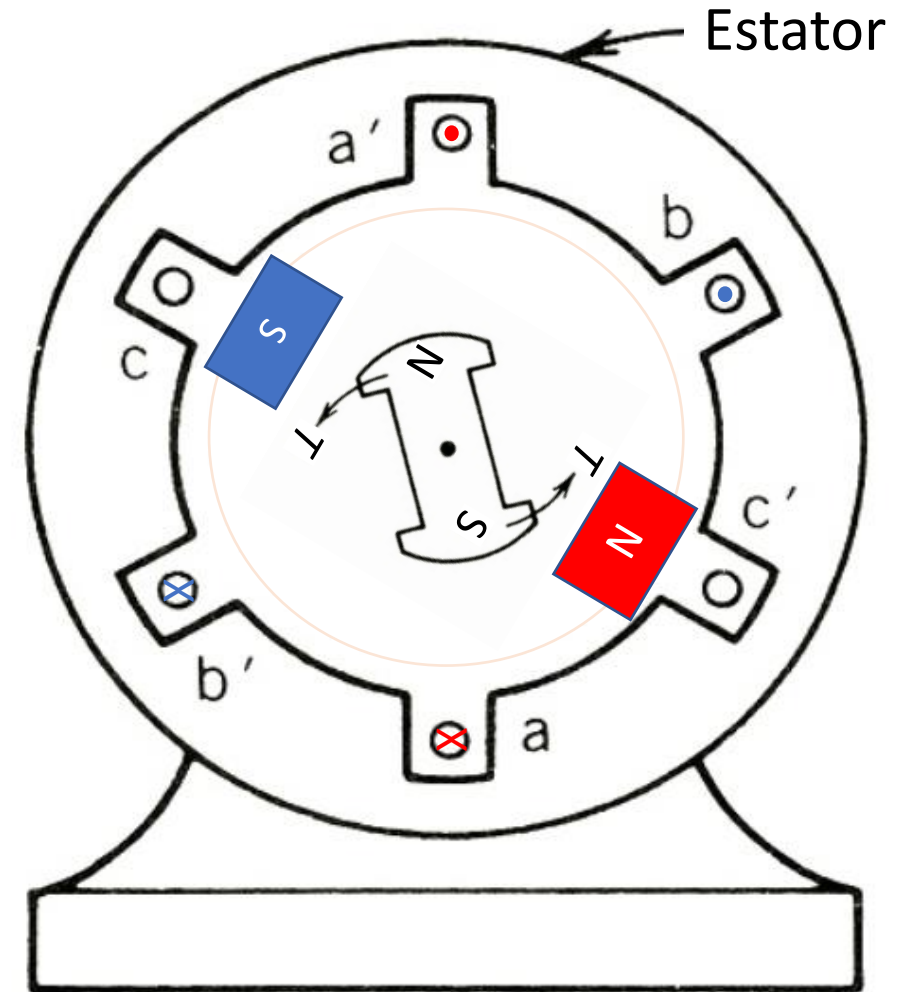
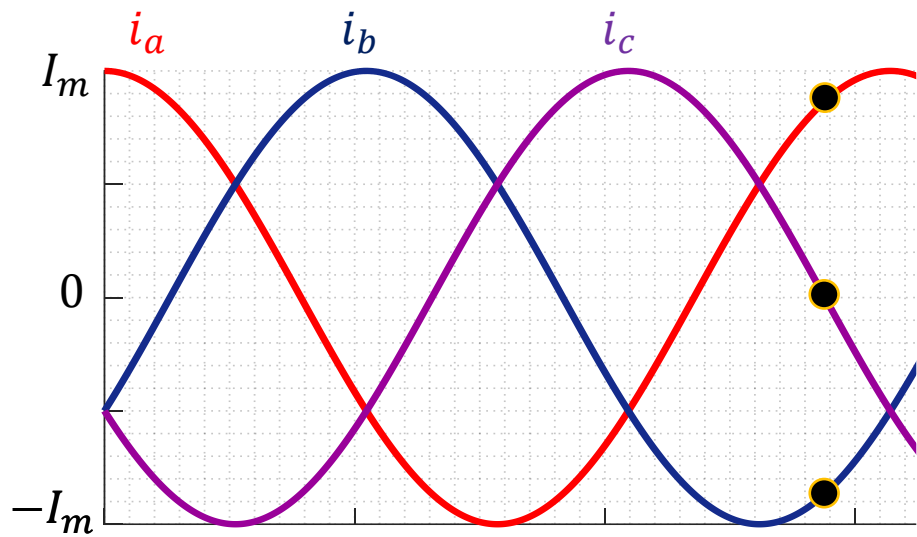
Campo girante – máquina de 2 pólos



Campo girante – máquina de 2 pólos



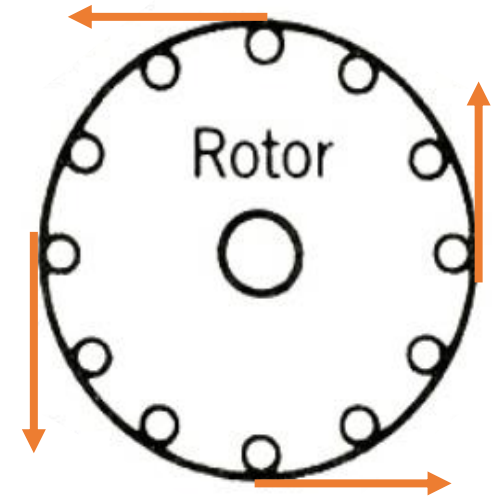
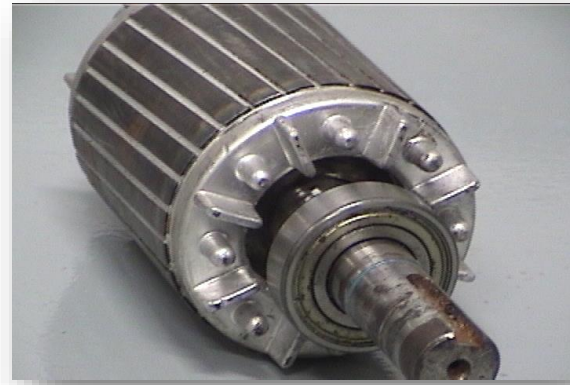
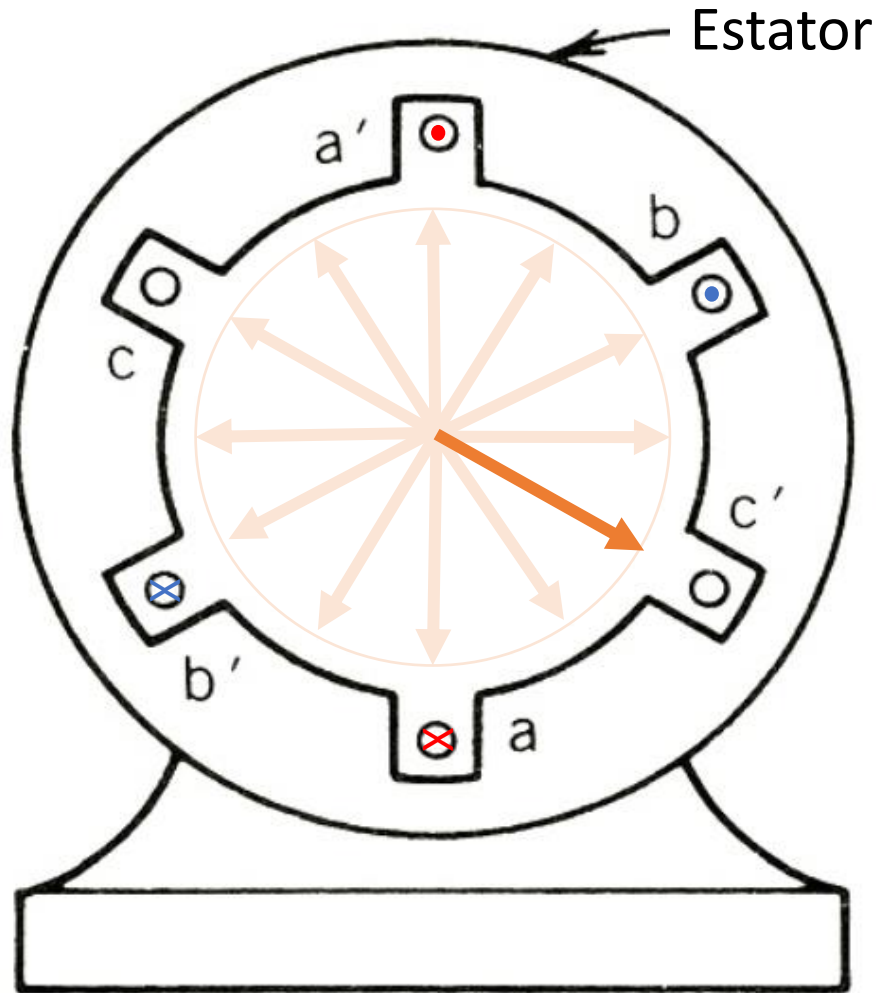
Campo girante – máquina de 2 pólos



Funcionamento da máquina síncrona como motor

- ❑ Note que a existência de conjugado não depende do fenômeno de indução!
- ❑ Princípio de atração entre os campos de estator e rotor;
- ❑ Seria possível aplicar este conceito na máquina de indução?

Relembrando a máquina de indução



$$n_s = \frac{120 f}{p}$$

$$s = \frac{n_s - n_m}{n_s}$$

$$f_r = s f_s$$

n. "Principles of Electrical Machines and Power Electronics".

Analizando o funcionamento do motor de indução

- ❑ Correntes induzidas no rotor são trifásicas (simetria) e $f_r = s f_s$;
- ❑ Existe um campo girante de rotor, cuja velocidade de giro é dada por:

$$n_{cgr} = \frac{120 f_r}{p} = s n_s$$

- ❑ Velocidade mecânica do rotor: $n_m = (1 - s)n_s$
- ❑ Velocidade do campo girante do rotor em relação ao estator:

$$n_{cgr-e} = s n_s + (1 - s)n_s = n_s \triangle!$$

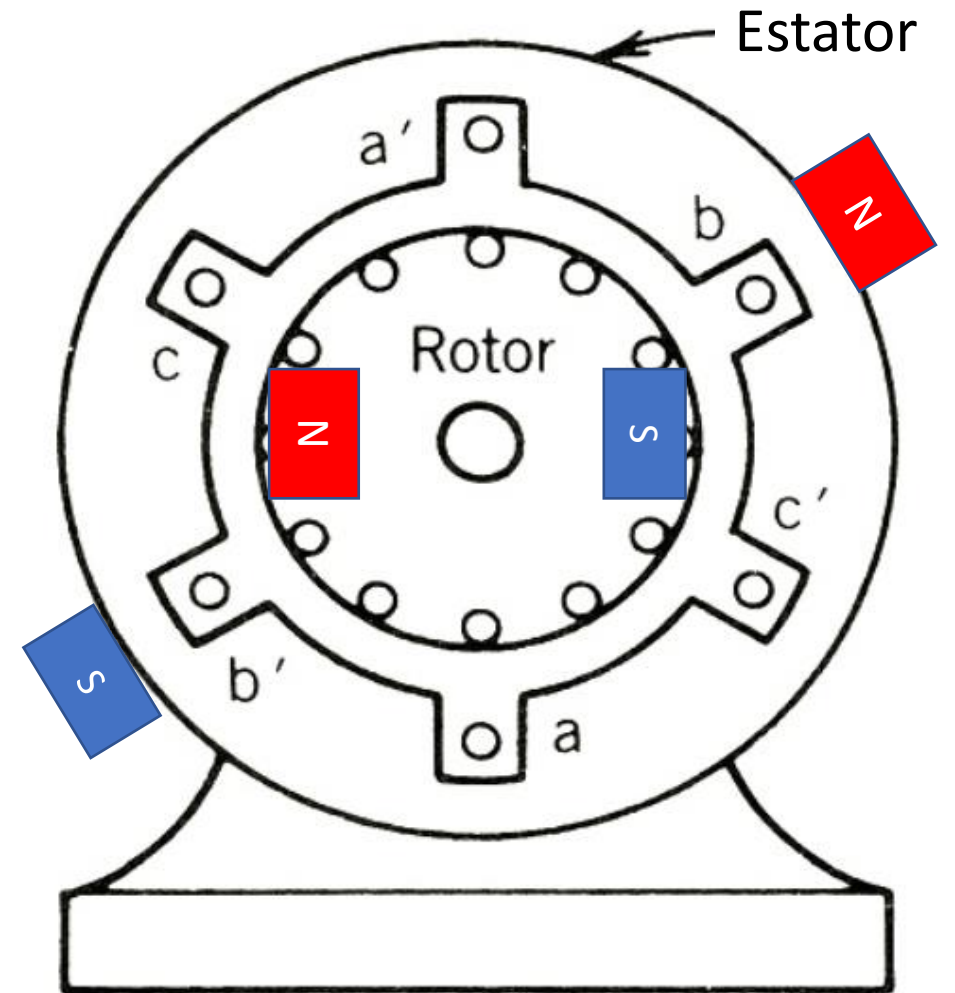
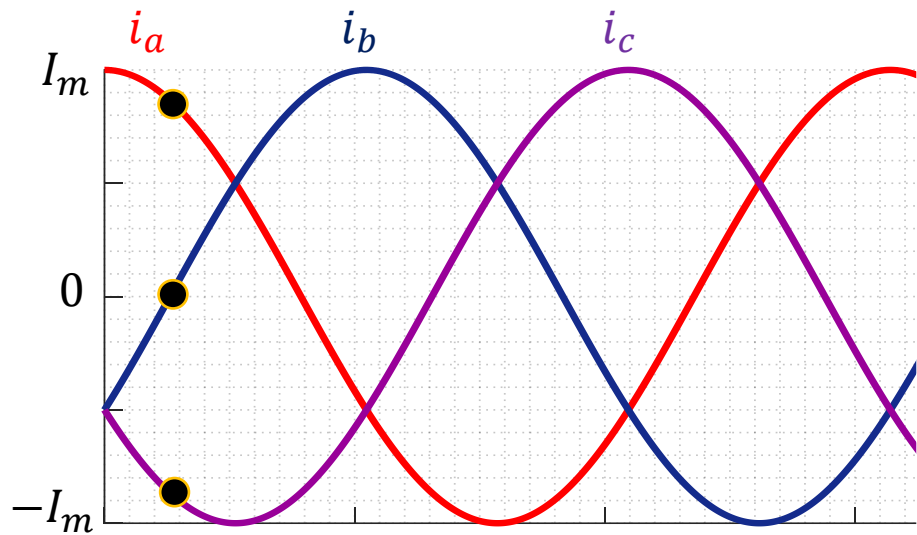
Analisando o funcionamento do motor de indução

$$n_{cgr-e} = n_s$$

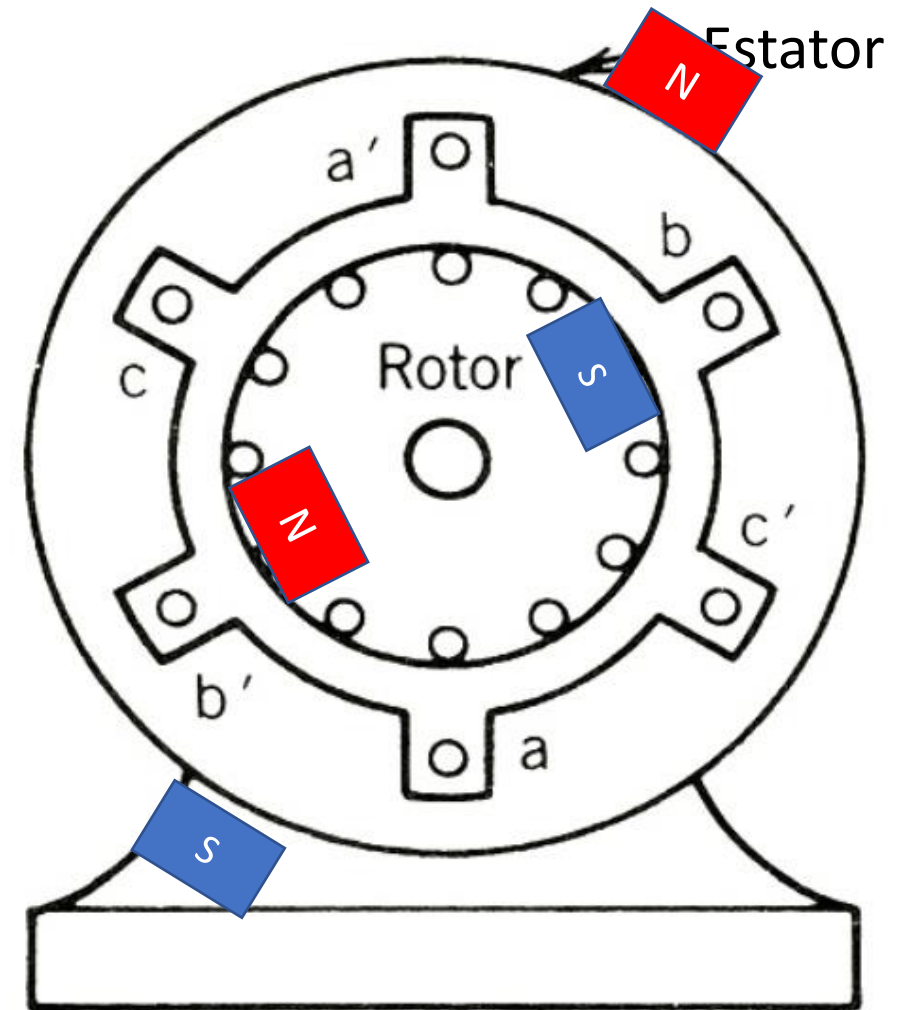
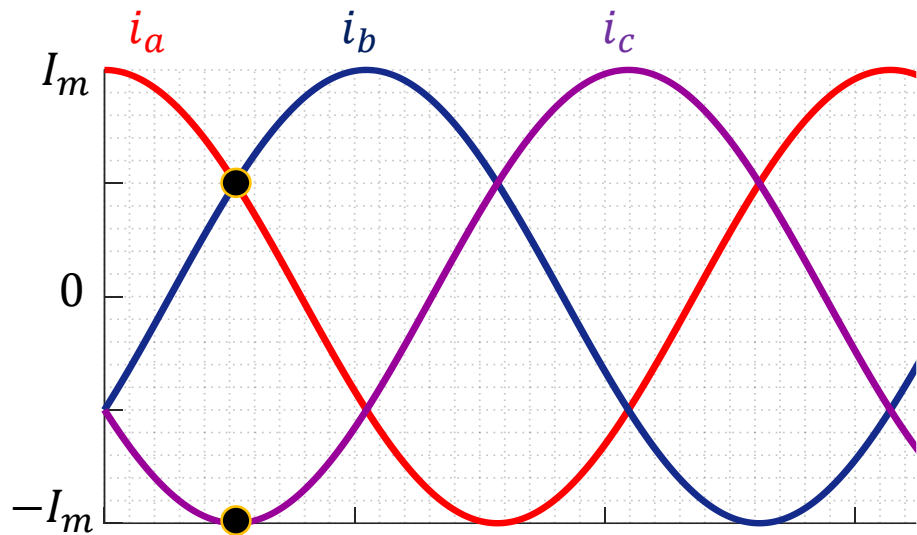
- ❑ Portanto, o campo magnético de estator e de rotor giram na mesma velocidade!
- ❑ A geração de conjugado pode ser explicada pela atração entre estes dois campos;
- ❑ Funcionamento análogo ao explicado para a máquina síncrona!
- ❑ Limitação: Deve existir escorregamento para existir corrente induzida!



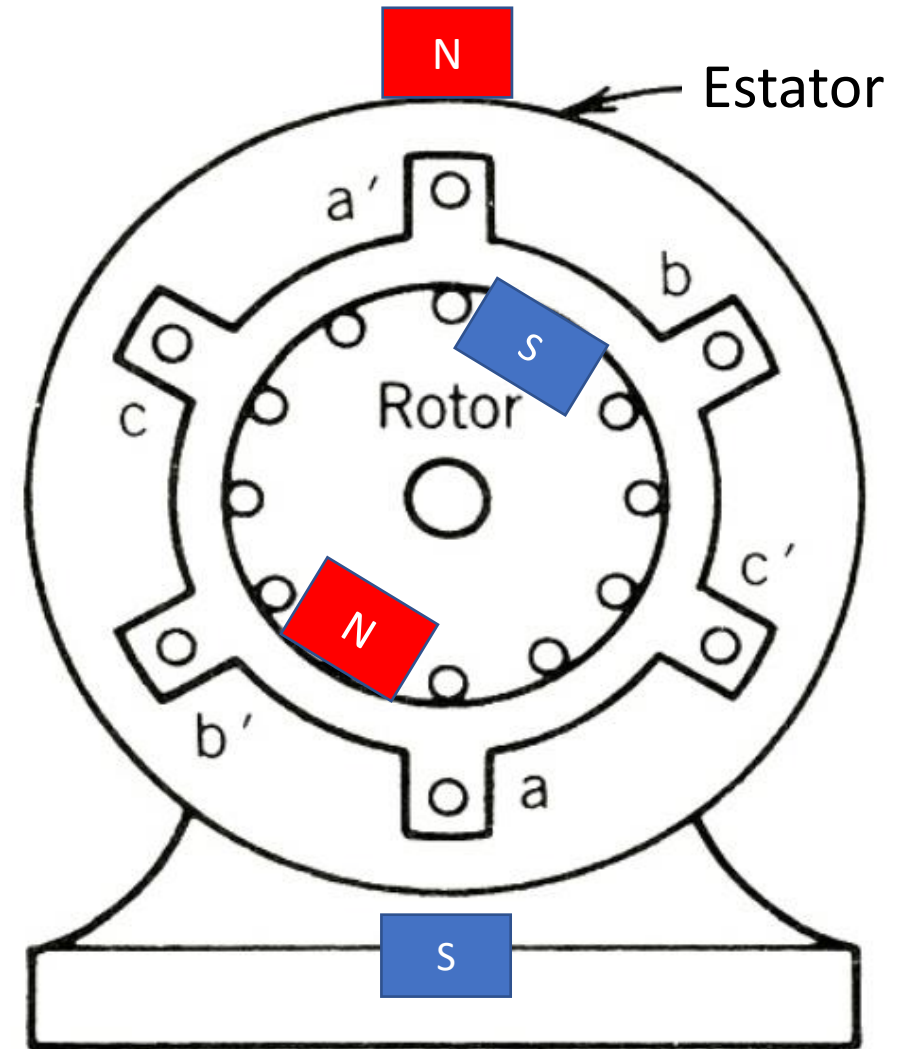
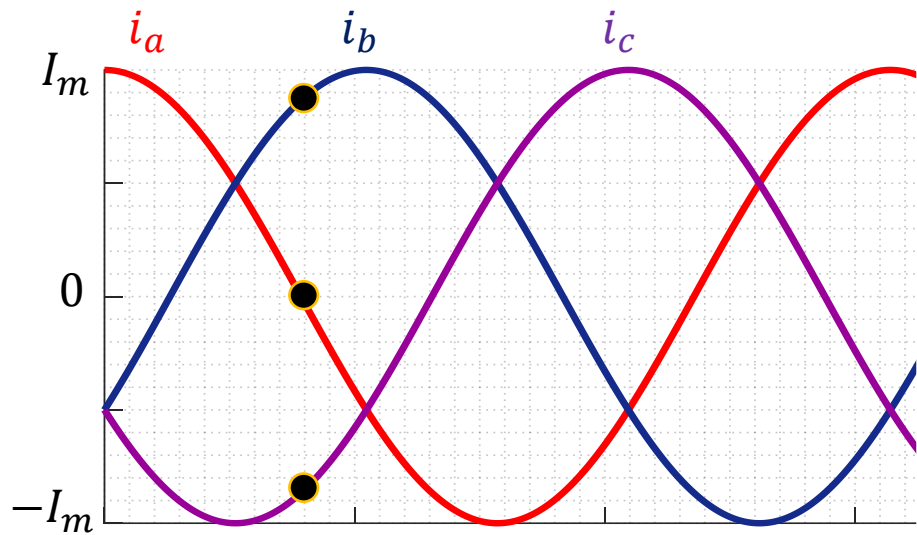
Analisando o funcionamento do motor de indução



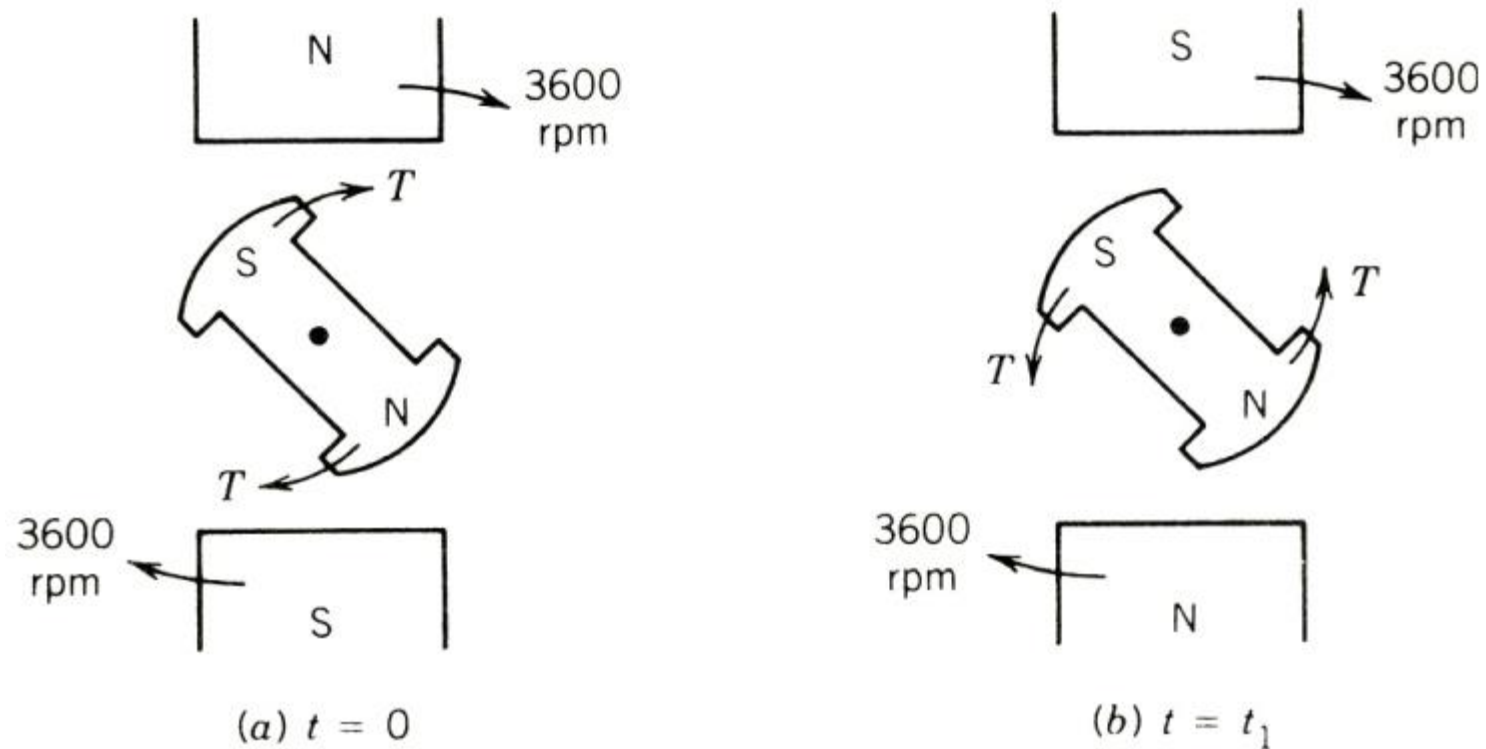
Analizando o funcionamento do motor de indução



Analisando o funcionamento do motor de indução



Problema inerente ao princípio de funcionamento - MS



❑ Não existe conjugado de partida no motor síncrono!

Fonte: P. C. Sen. "Principles of Electrical Machines and Power Electronics".

Obrigado pela Atenção



Bons estudos!



Dúvidas: afcupertino@ieee.org



www.gesep.ufv.br



@GESEP



@gesep_vicosa



Gesep



Pesquise por:
“GESEP UFV”



EStimate - Sistemas
Fotovoltaicos



Pesquise por:
“EStimate”