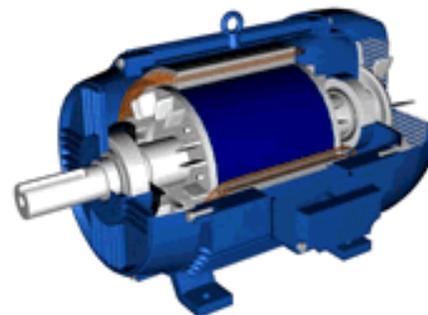
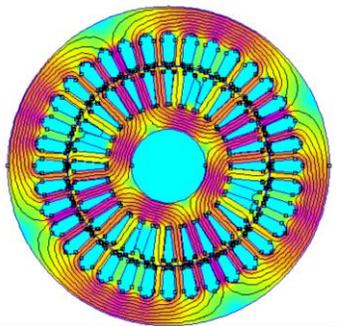


# Aula 14: Princípio de funcionamento da máquina de indução

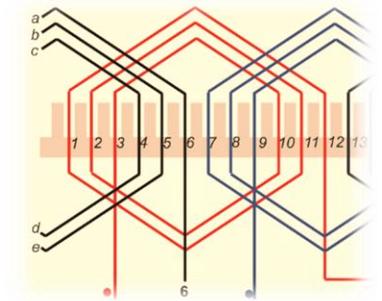
Prof. Allan Fagner Cupertino  
[afcupertino@ieee.org](mailto:afcupertino@ieee.org)



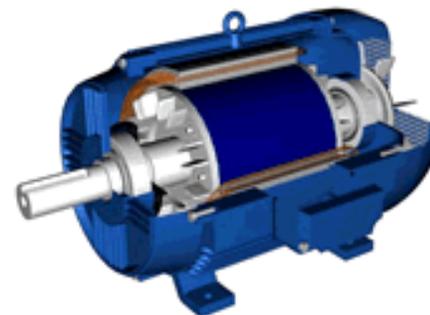
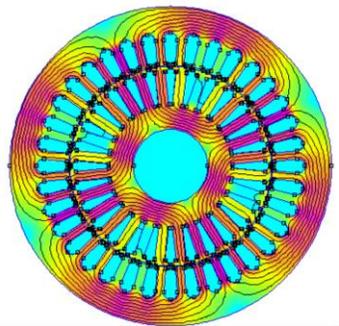
# Sumário

---

- ❑ Força de Lorentz;
- ❑ Princípio de funcionamento da máquina de indução;
- ❑ Escorregamento;
- ❑ Tensão e correntes induzidas no rotor;
- ❑ Inclinação das barras do rotor.



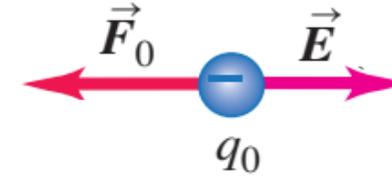
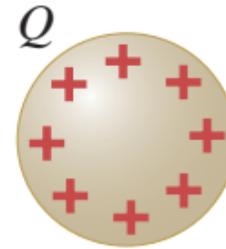
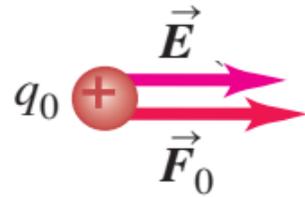
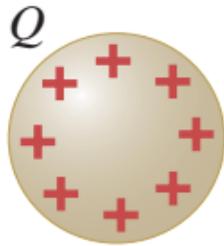
# Força de Lorentz



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



# Força elétrica

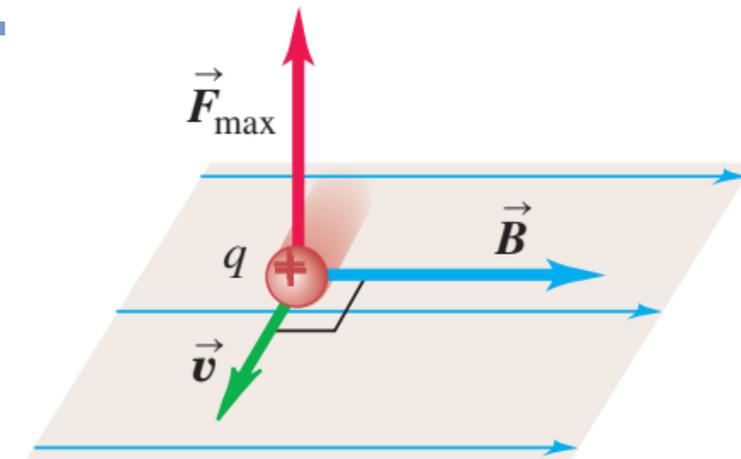
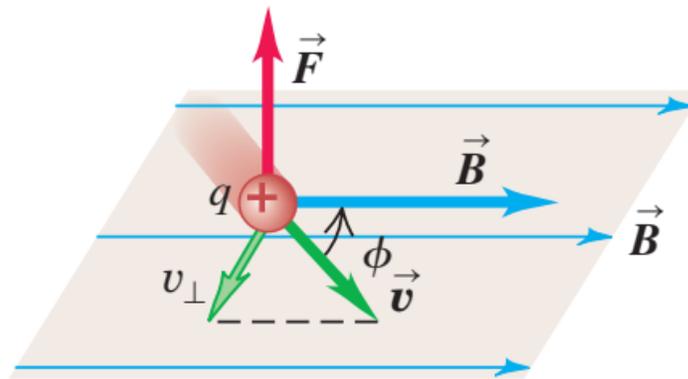
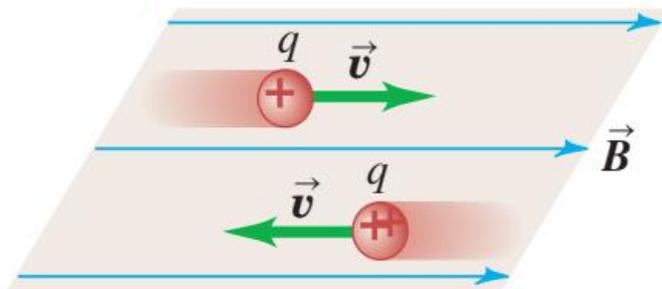


$$|\vec{F}_0| = q_0 |\vec{E}|$$

- ❑ Note que a existência de força elétrica depende de dois “ingredientes”:
  - Carga elétrica;
  - Campo elétrico externo.
  
- ❑ Note que a força elétrica tem **a mesma direção** do campo elétrico!

Young and Freedman. “Física III: Eletromagnetismo”.

# Força magnética

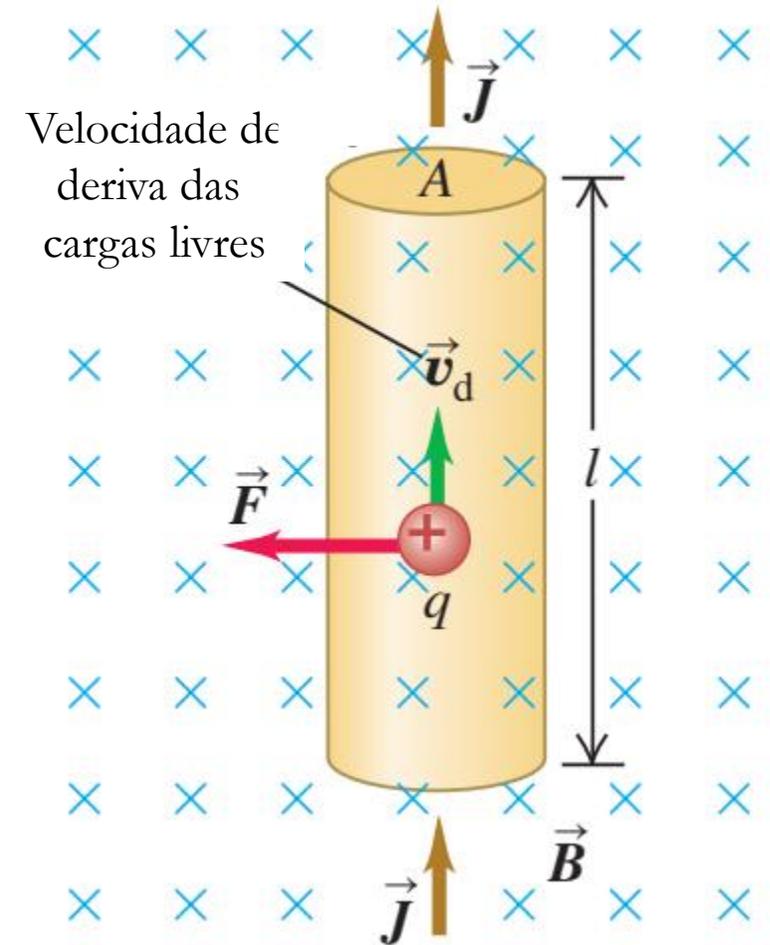


$$|F_{mag}| = qvB \sin \phi$$

- Note que a existência de força magnética depende de três “ingredientes”:
  - Carga elétrica;
  - Campo magnético externo (representado pela densidade de fluxo  $B$ );
  - Componente de velocidade de movimentação das cargas perpendicular ao campo.
  
- Note que a força magnética é perpendicular ao plano formado entre  $\vec{v}$  e  $\vec{B}$ .

# Força magnética em um fio percorrido por corrente

- ❑ Corrente elétrica → movimentação de cargas;
- ❑ Cargas sofrerão ação de uma força;
- ❑ Consequentemente existirá uma força resultante no fio;
- ❑ Esta força é conhecida como Força de Lorentz!



Young and Freedman. "Física III: Eletromagnetismo".

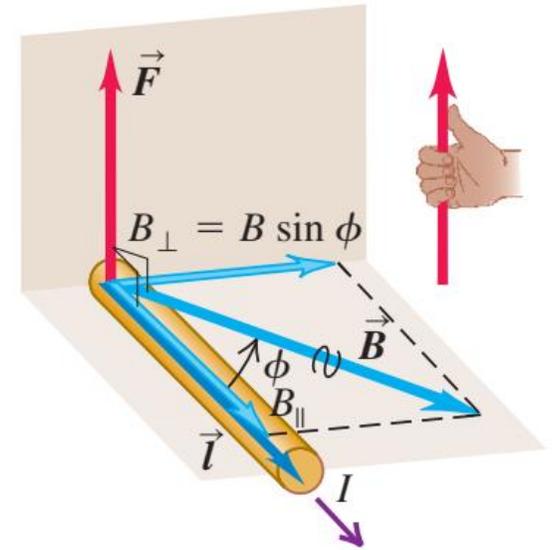
# Força de Lorentz

- Análoga a força magnética em uma carga;

$$|F_{mag}| = Bil \sin \phi$$

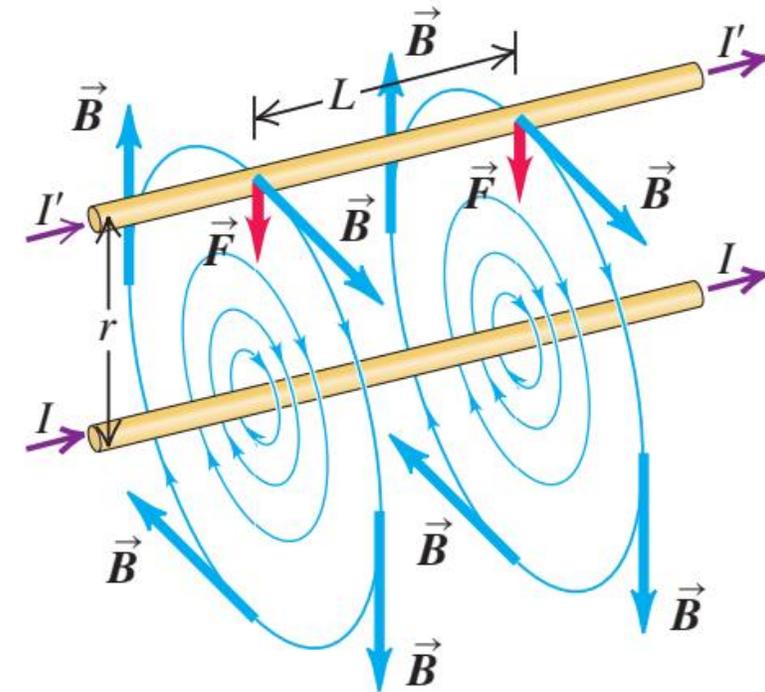
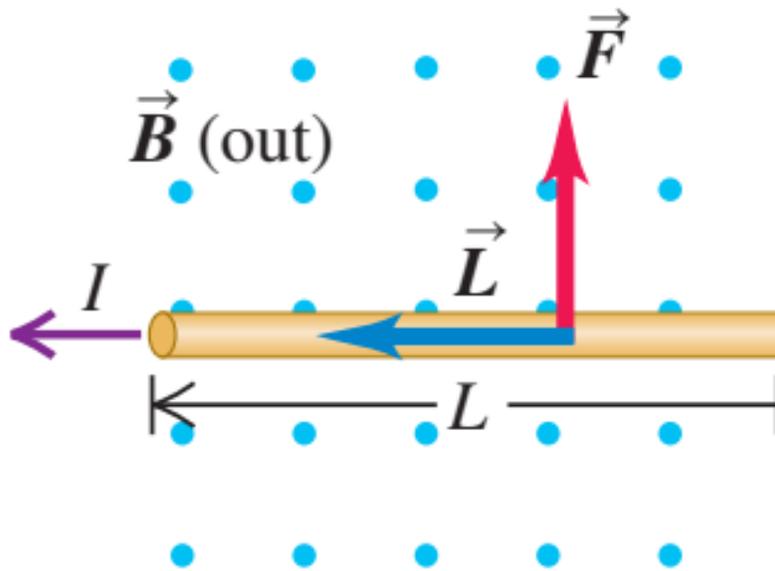
- Note que a existência de força de Lorentz depende de três “ingredientes”:
  - Corrente elétrica;
  - Campo magnético externo (representado pela densidade de fluxo  $B$ );
  - Corrente não pode estar paralela ao campo magnético.

- Note que a força de Lorentz é perpendicular ao plano formado entre  $\vec{l}$  e  $\vec{B}$ .

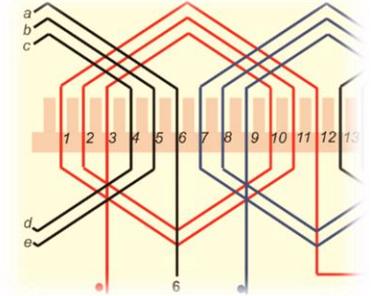


Young and Freedman. “Física III: Eletromagnetismo”.

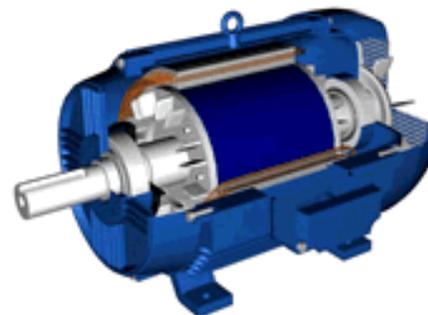
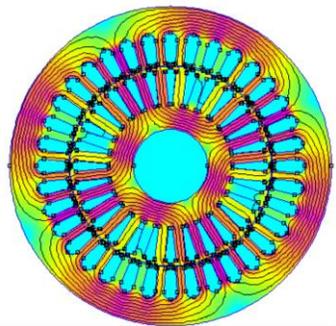
# Exemplos – Força de Lorentz



Young and Freedman. "Física III: Eletromagnetismo".



# Funcionamento da máquina de indução trifásica



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

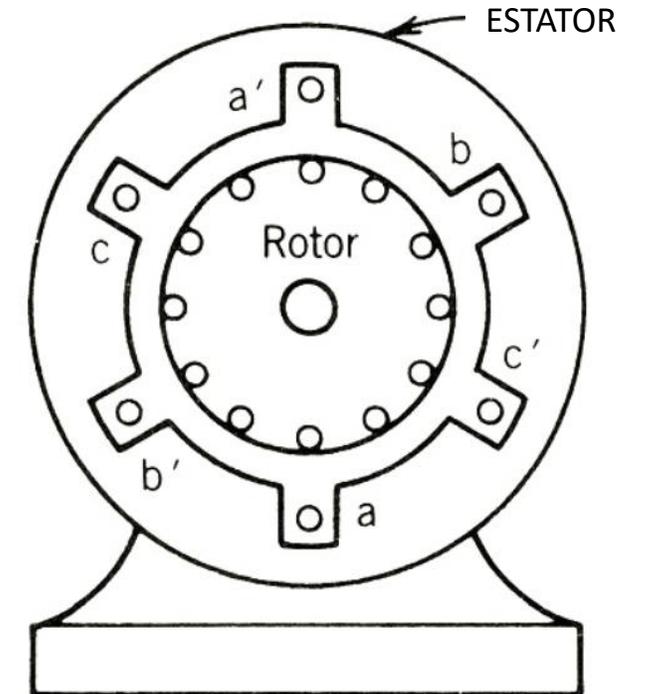


# Teoria do campo girante

- ❑ Bobinas de estator defasadas no espaço (120 graus para máquina de 2 polos);
- ❑ Correntes defasadas de 120 graus;
- ❑ Geração de um campo girante;
- ❑ Velocidade mecânica do campo girante:

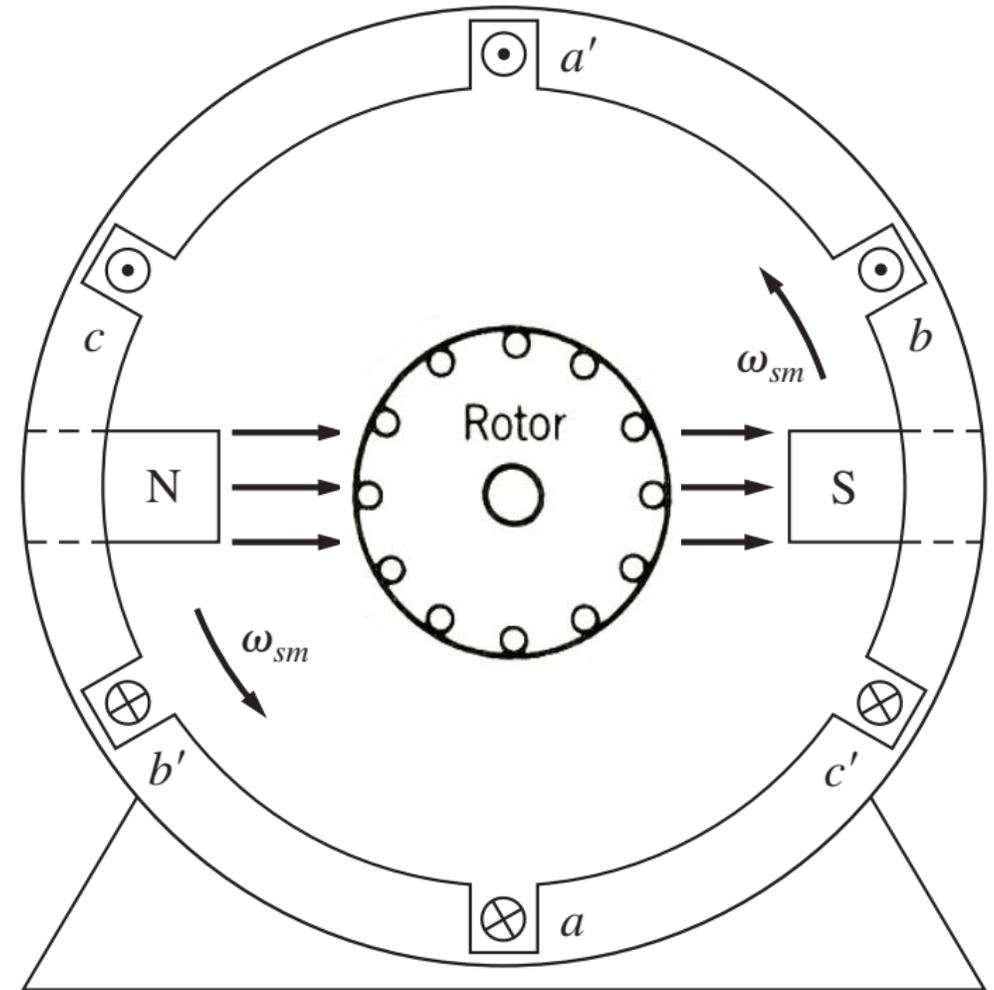
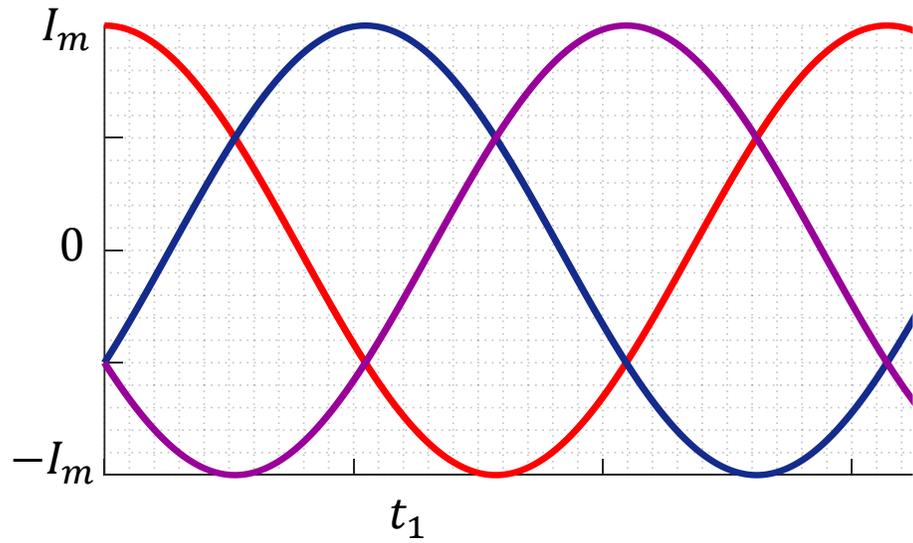
$$n_s = \frac{120 f}{p}$$

- ❑ Velocidade síncrona!



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

# Teoria do campo girante



Fonte: S. J. Chapman. "Fundamentos de Máquinas Elétricas".

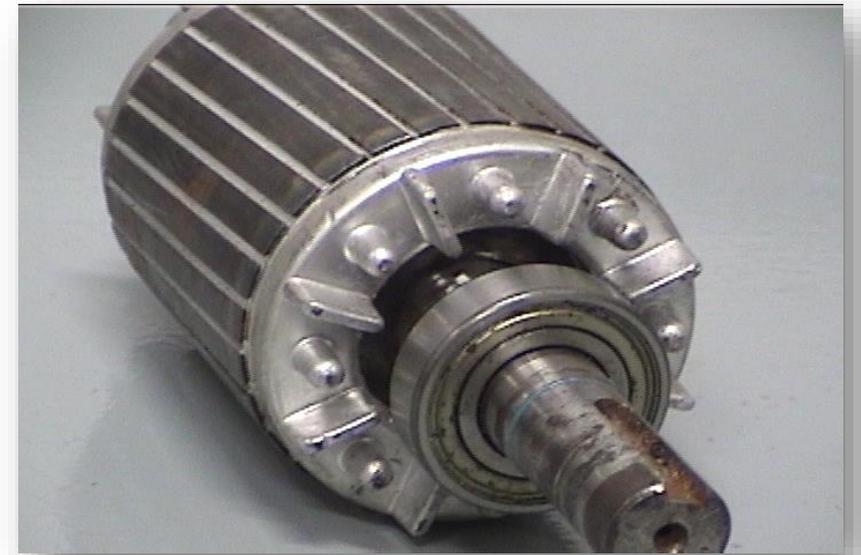
# Indução de tensão no rotor

❑ Note que as barras do rotor vão experimentar uma variação de fluxo;

❑ Lei de Faraday:

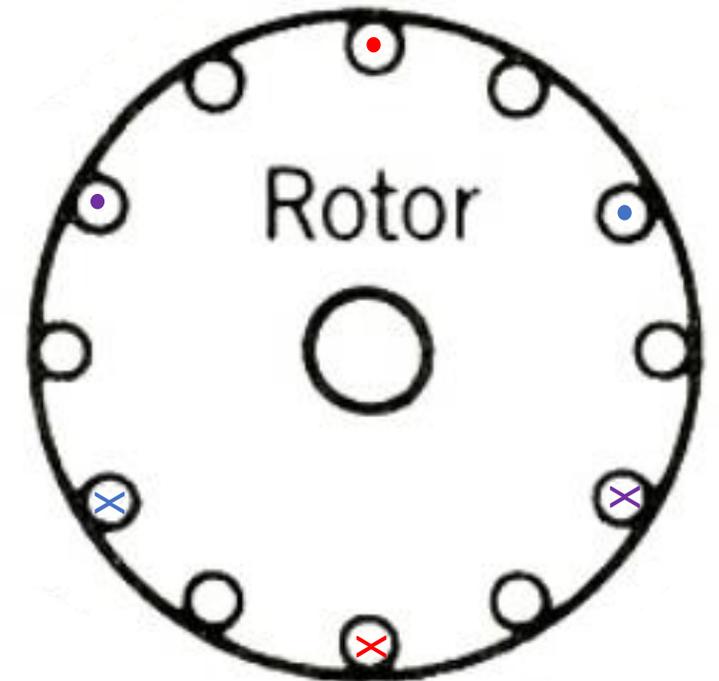
$$V_{ind} = -N \frac{\Delta\phi}{\Delta t}$$

❑ Existe uma tensão induzida no rotor da máquina!



# Correntes induzidas no rotor

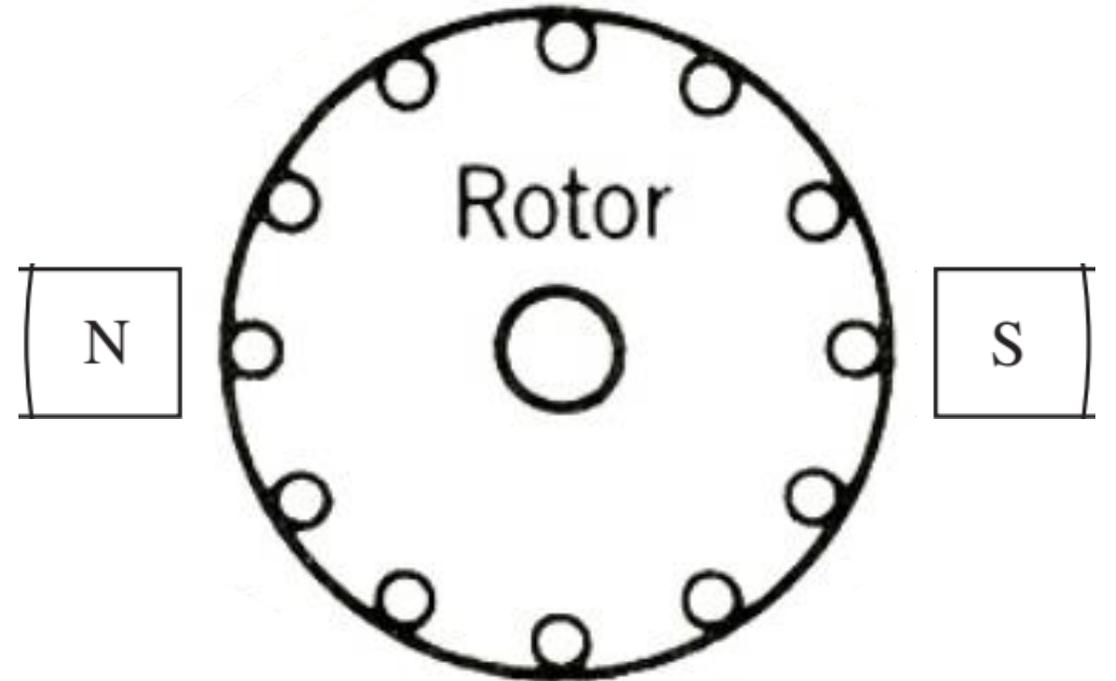
- ❑ Existe uma tensão induzida no rotor;
- ❑ Note que o rotor é um circuito fechado;
- ❑ As barras do rotor apresentam uma impedância;
- ❑ Pela Lei de Ohm, haverá uma corrente induzida!



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

# Geração de força

- ❑ Corrente induzida nas barras do rotor;
- ❑ Campo magnético (próprio campo girante);
- ❑ Note que o campo é na direção radial;
- ❑ A corrente é normal a página, i.e., perpendicular a  $B$ ;
- ❑ Força de Lorentz:  $|F| = Bil$ ;
- ❑ Qual a direção da força?



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

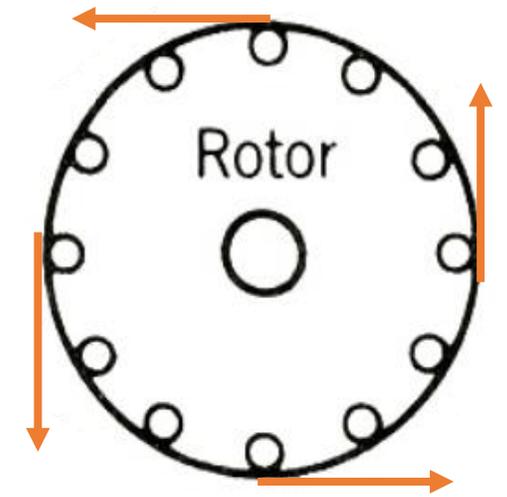
# Geração de conjugado

- ❑ Note que a força é tangencial ao rotor;
- ❑ Como a força está a uma distância do eixo, teremos um conjugado dado por:

$$T = F r$$

Onde  $r$  é o raio do motor.

Este é o princípio de funcionamento da máquina de indução!

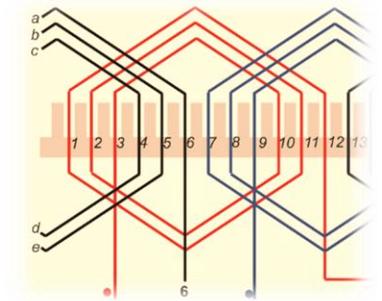


Fonte: P. C. Sen. "Principles of Electrical Machines and Power Electronics".

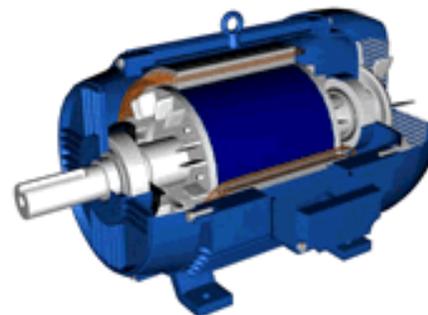
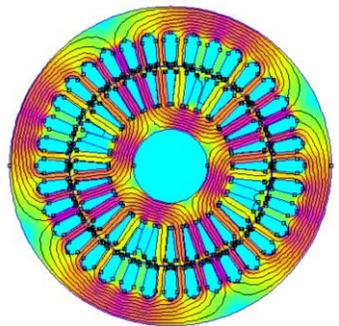
# Princípio de funcionamento - Resumo

- ❑ Alimentação trifásica no estator gera um campo girante;
- ❑ Pela Lei de Faraday, será induzida uma tensão no rotor;
- ❑ Pela Lei de Ohm, a tensão induzida gera uma corrente induzida;
- ❑ A corrente induzida interage com o campo girante;
- ❑ Aparece a força de Lorentz que coloca o rotor em rotação.





# Escorregamento



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



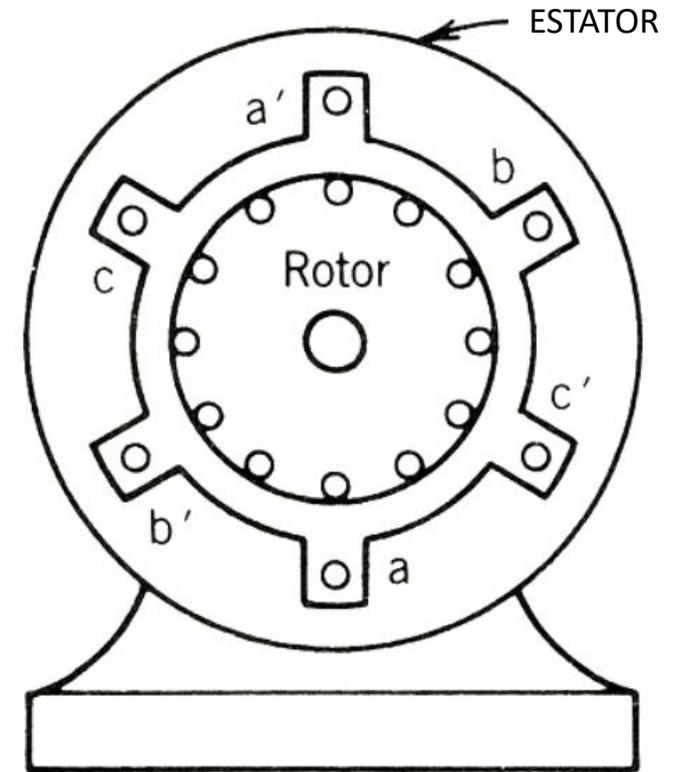
# Velocidade mecânica e variação de fluxo

- ❑ Composição de velocidades na máquina;
- ❑ Note que o rotor e o campo magnético giram;
- ❑ Velocidade relativa ou velocidade de escorregamento:

$$n = n_s - n_m$$

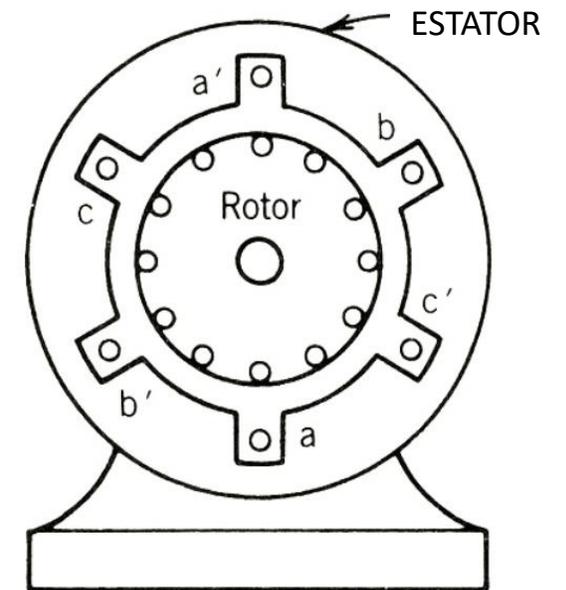
onde  $n_m$  é a velocidade mecânica e  $n_s$  a velocidade síncrona.

- ❑ Note que a variação de fluxo depende da diferença de velocidade!



# Limite de operação

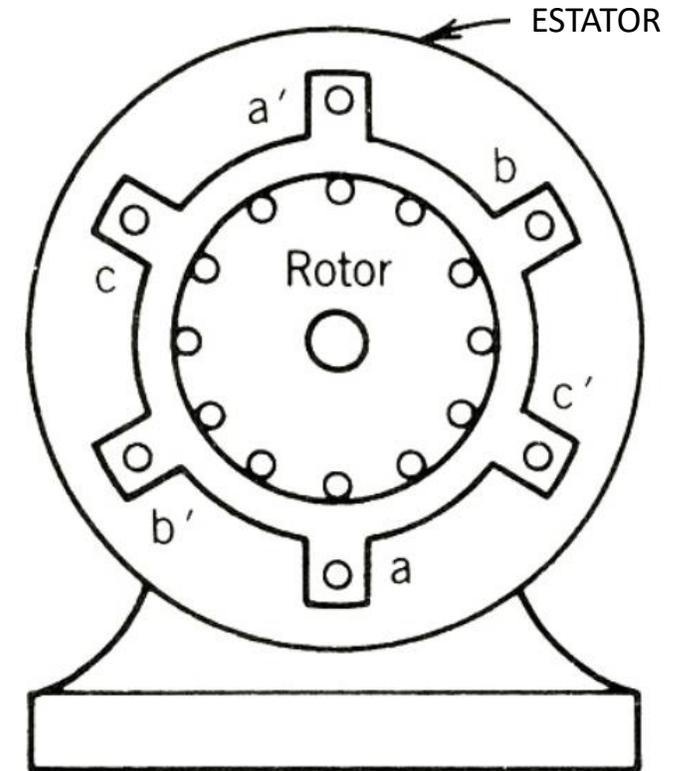
- ❑ A velocidade do campo girante é  $n_s$ ;
- ❑ Suponha que o motor atinja a velocidade  $n_s$ ;
- ❑ Neste caso, não haverá velocidade relativa entre o campo girante e o rotor;
- ❑ Não existirá variação de fluxo;
- ❑ Sem variação de fluxo, sem conjugado!
- ❑ Máquina de indução ou máquina assíncrona.



# Escorregamento

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

- ❑ Na partida:  $n_m = 0 \rightarrow s = 1$ ;
- ❑ Na velocidade síncrona:  $n_m = n_s \rightarrow s = 0$ ;
- ❑ Veremos que o escorregamento depende da carga no eixo!
- ❑ Máquinas de baixa potência: 3 a 5 %;
- ❑ Máquinas de alta potência: 1 %.



# Obrigado pela Atenção



[www.gesep.ufv.br](http://www.gesep.ufv.br)



<https://www.facebook.com/gesep>



[https://www.instagram.com/gesep\\_vicosa/](https://www.instagram.com/gesep_vicosa/)



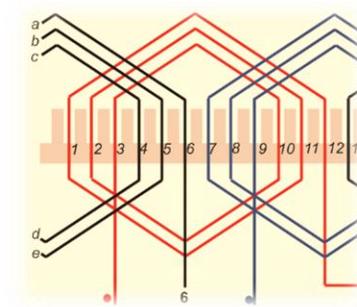
[https://www.youtube.com/channel/UCe9KOSGORXh\\_hDBIcxMU2Nw](https://www.youtube.com/channel/UCe9KOSGORXh_hDBIcxMU2Nw)



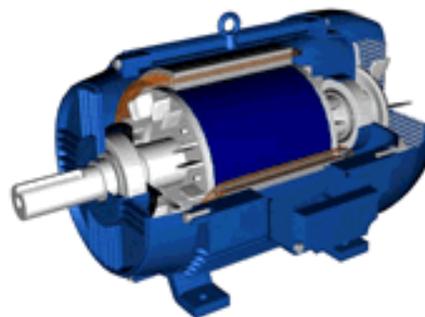
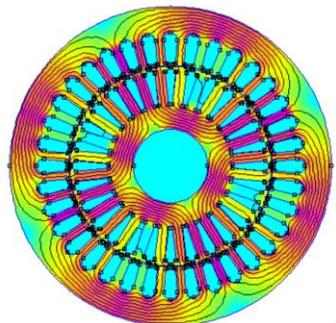
Estimate - Sistemas  
Fotovoltaicos



<https://play.google.com/store/apps/details?id=br.developer.gesep.estimate>



# Tensão e corrente induzida no rotor

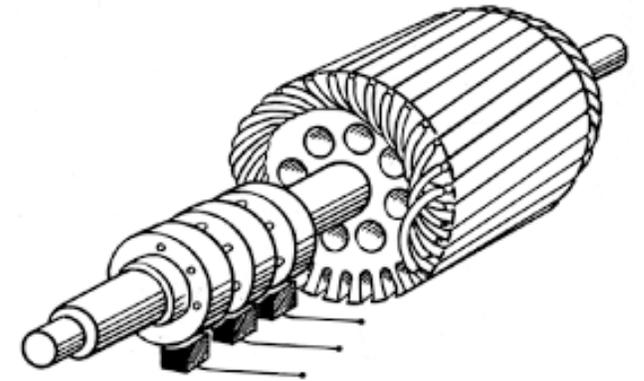
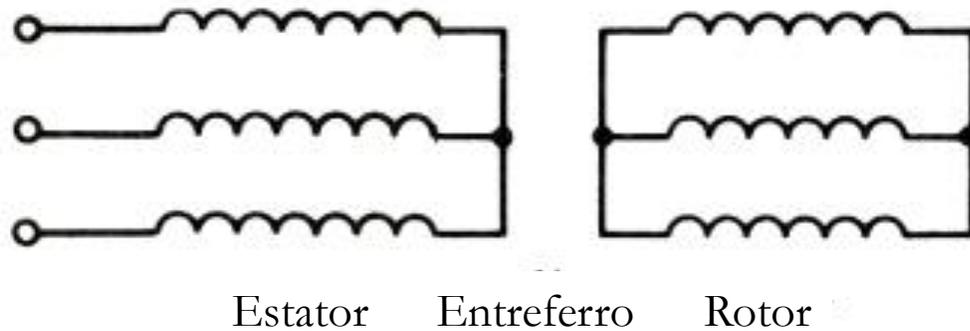


<http://www.semage.com.br/calternada.ph>



# Análise da tensão induzida no rotor

- ❑ Vamos assumir inicialmente uma máquina de rotor bobinado (sem perda de generalidade);



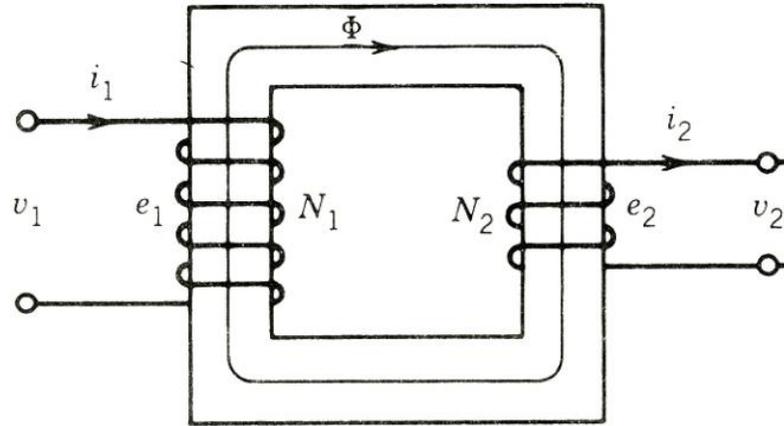
- ❑ Variação de fluxo do estator atinge o rotor;

- ❑ Similar ao transformador!!!

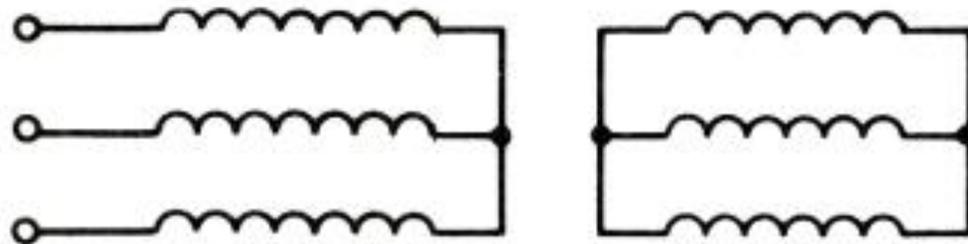


Fonte: P. C. Sen. "Principles of Electrical Machines and Power Electronics".

# Tensão induzida no rotor – rotor travado



$$\frac{E_2}{E_1} = \frac{N_2}{N_1}$$



Estator    Entreferro    Rotor

$$\frac{E_r}{E_s} = \frac{N_r}{N_s}$$

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

# Tensão induzida – máquina girando

- ❑ Para o rotor travado,  $n_m = 0 \rightarrow s = 1$ ;
- Neste caso, a tensão induzida no rotor será:

$$E_r = \frac{N_r}{N_s} E_s$$

- ❑ Para o rotor na velocidade síncrona,  $n_m = n_s \rightarrow s = 0$ ;
- Neste caso, a tensão induzida no rotor será:

$$E_r = 0$$

- ❑ Para o rotor em uma velocidade  $0 \leq n_m \leq n_s$  tem-se que:

$$E_r = s \frac{N_r}{N_s} E_s$$

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

# Frequência das tensões e correntes induzidas

❑ Para o rotor travado:  $n_m = 0 \rightarrow s = 1$

➤ Neste caso, a máquina comporta-se como um transformador:

$$f_r = f_s$$

❑ Para o rotor em uma velocidade  $n_m$

➤ Variação de fluxo na velocidade de escorregamento  $n = n_s - n_m$

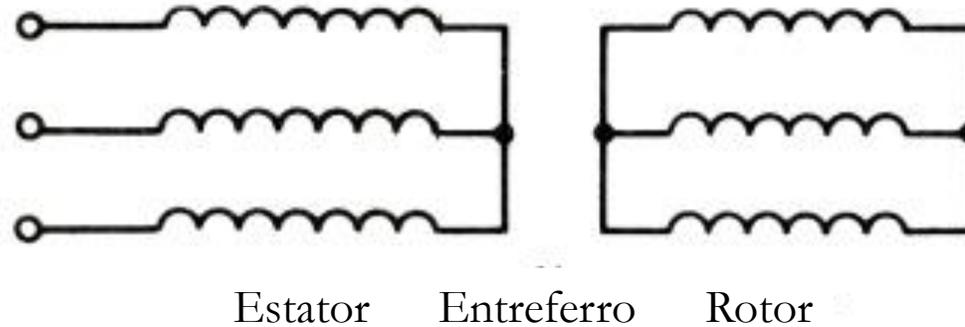
❑ Portanto,

$$\boxed{f_r = s f_s}$$

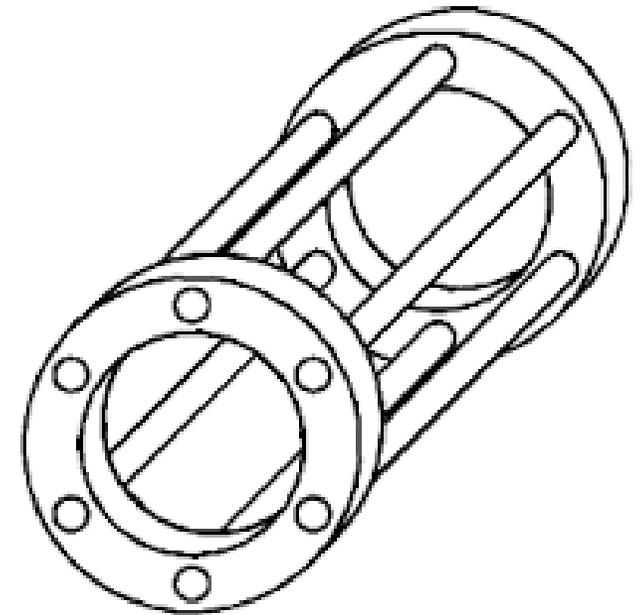
❑ Note que a frequência das correntes do rotor é menor que a frequência do estator da máquina!

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

# E para o rotor com gaiola de esquilo?



Gaiola de Esquilo



- ❑ Mesmas equações podem ser aplicadas;
- ❑ Existirá um número de espiras  $N_r$  equivalente;
- ❑ Correntes na gaiola de esquilo: correntes trifásicas!
- ❑ Argumentos: 1) Simetria; 2) Soma das correntes deve ser zero!

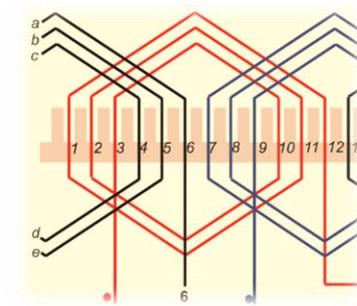
Fonte: P. C. Sen. "Principles of Electrical Machines and Power Electronics".

# Exemplo

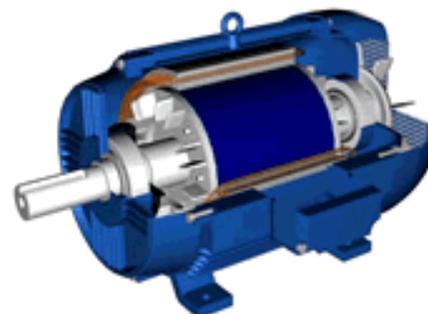
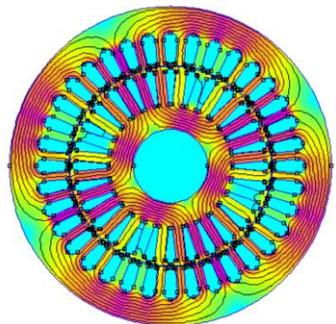
Considere um motor de indução de 460 volts, 100 HP, 60 Hz e 4 polos. Esta máquina opera com carga nominal e seu escorregamento é 5 %.

Determinar:

- a) A velocidade síncrona e a velocidade mecânica;
- b) A velocidade mecânica do campo girante;
- c) A frequência das correntes no rotor da máquina.



# Inclinação das barras do rotor

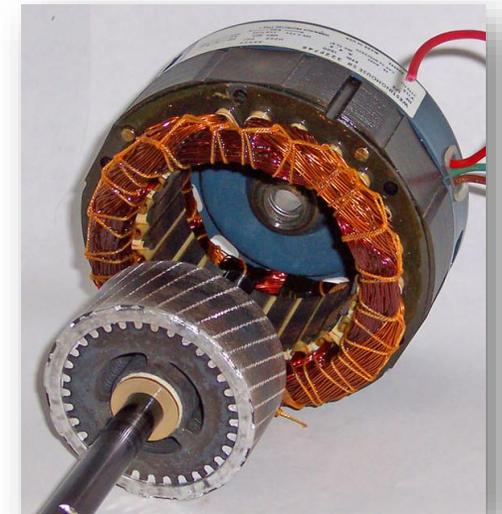
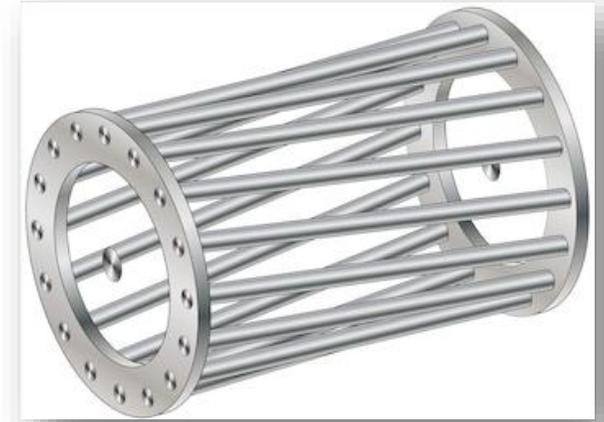


<http://www.semage.com.br/calternada.ph>

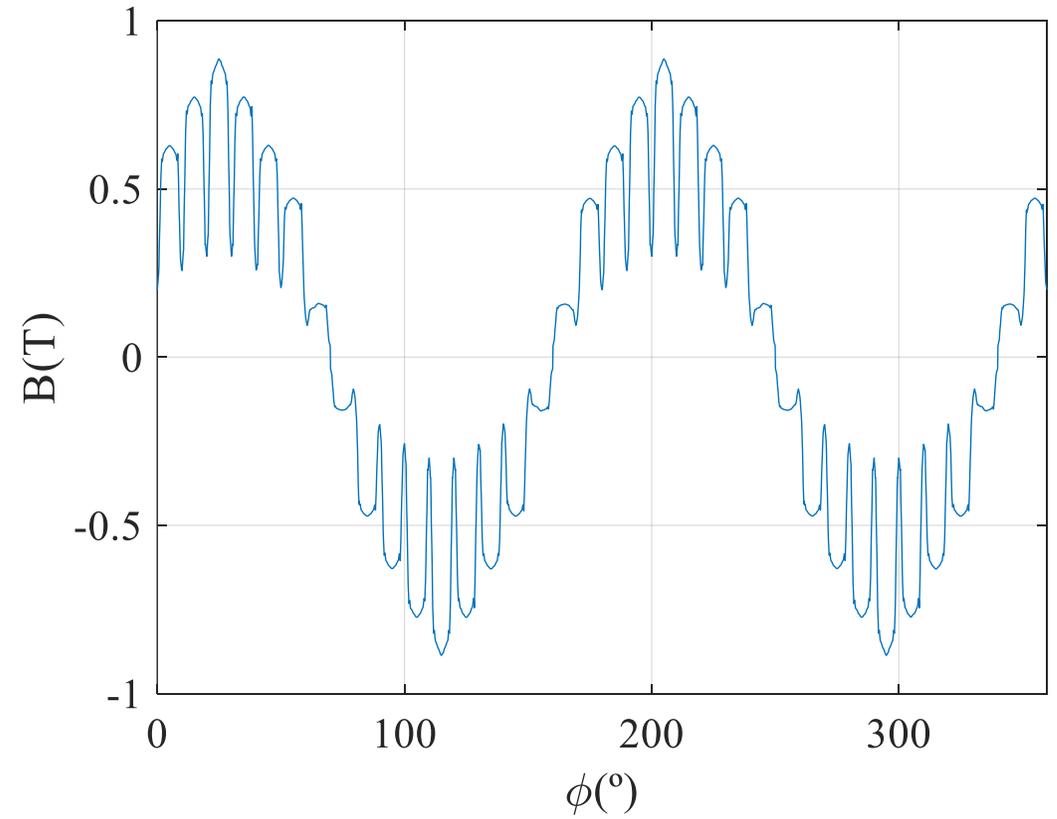
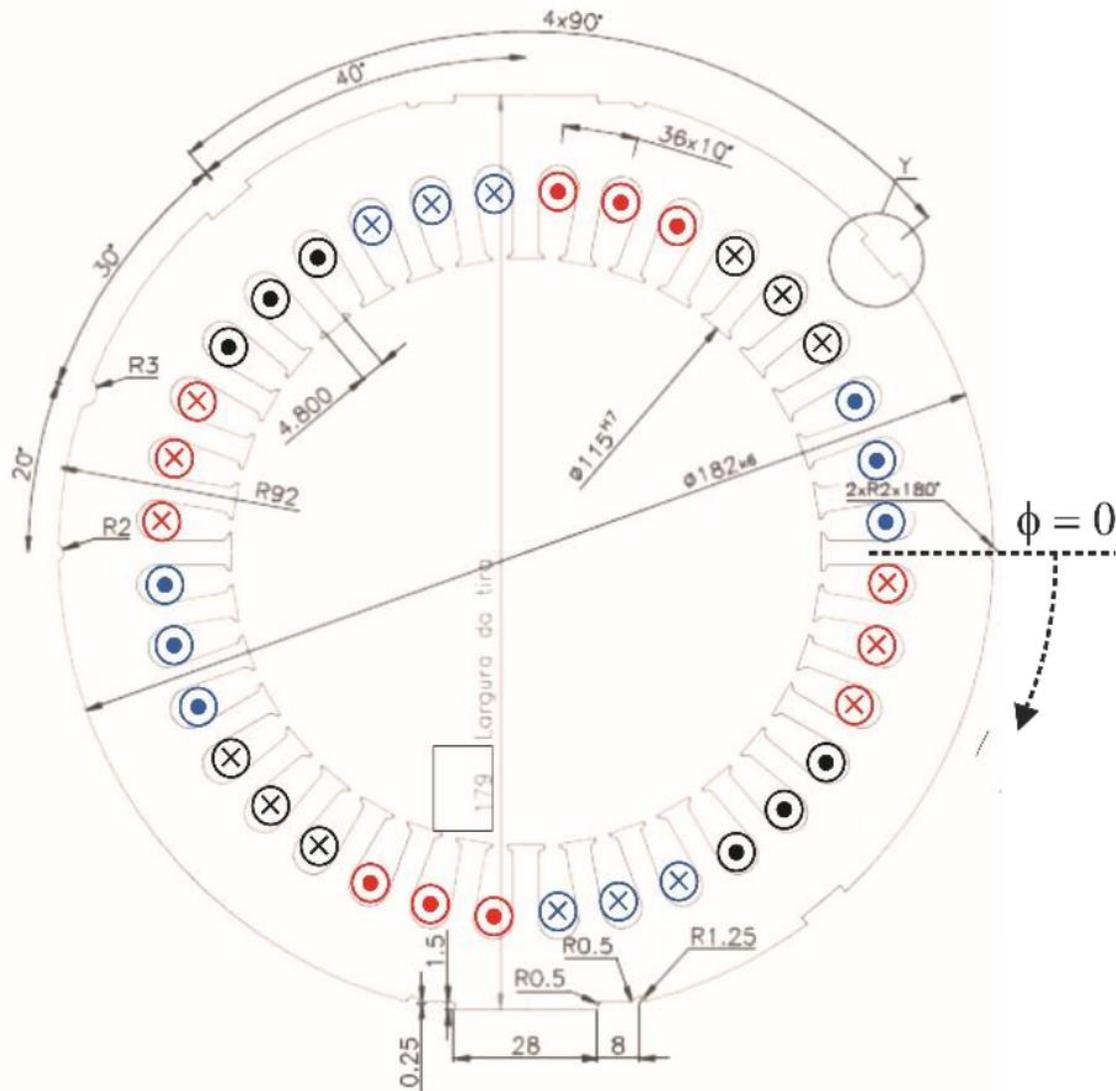


# Barras do rotor

- ❑ Em motores comerciais, as barras de rotor não são exatamente na direção do eixo;
- ❑ De fato, estas são enviesadas com um ângulo;
- ❑ Esta inclinação reduz a vibração da máquina;
- ❑ Vamos entender como isso acontece de maneira simplificada.



# Densidade de fluxo – máquina de 4 polos

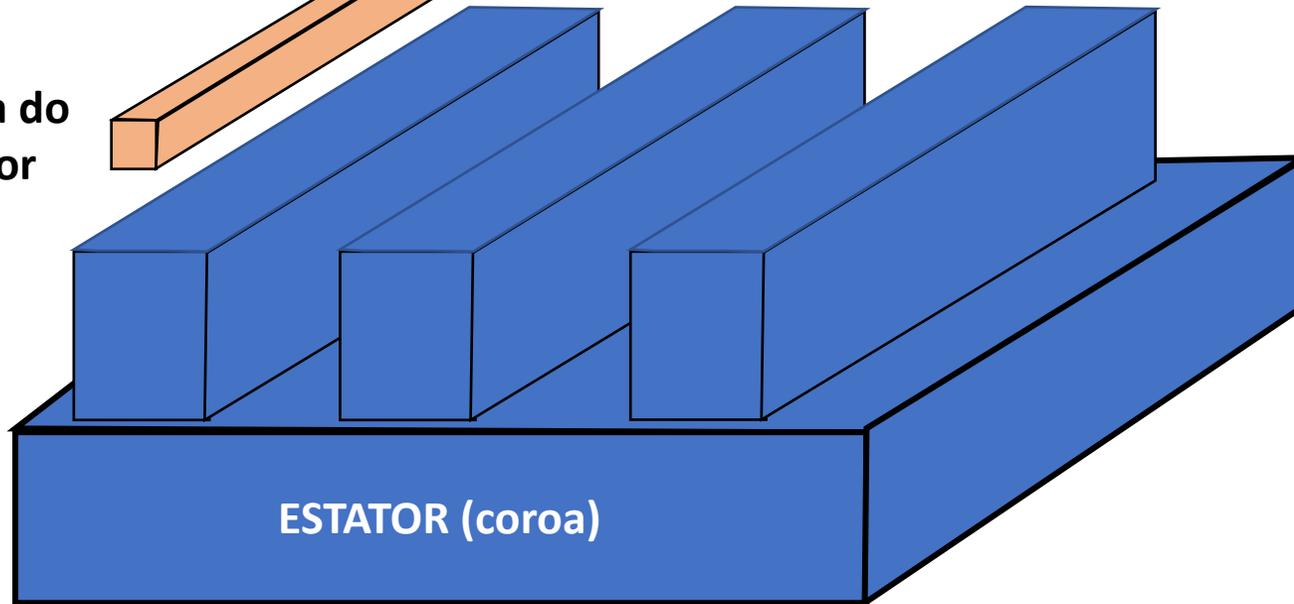
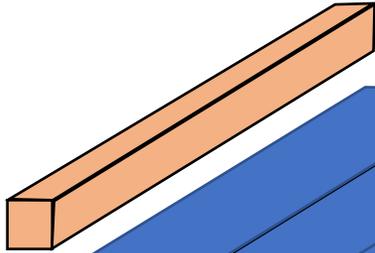


# Barras paralelas ao eixo

Sentido de movimentação do rotor

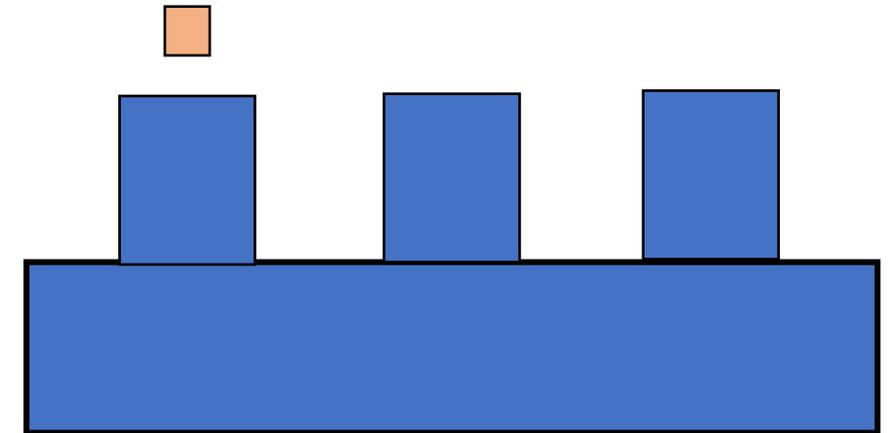


Barra do rotor

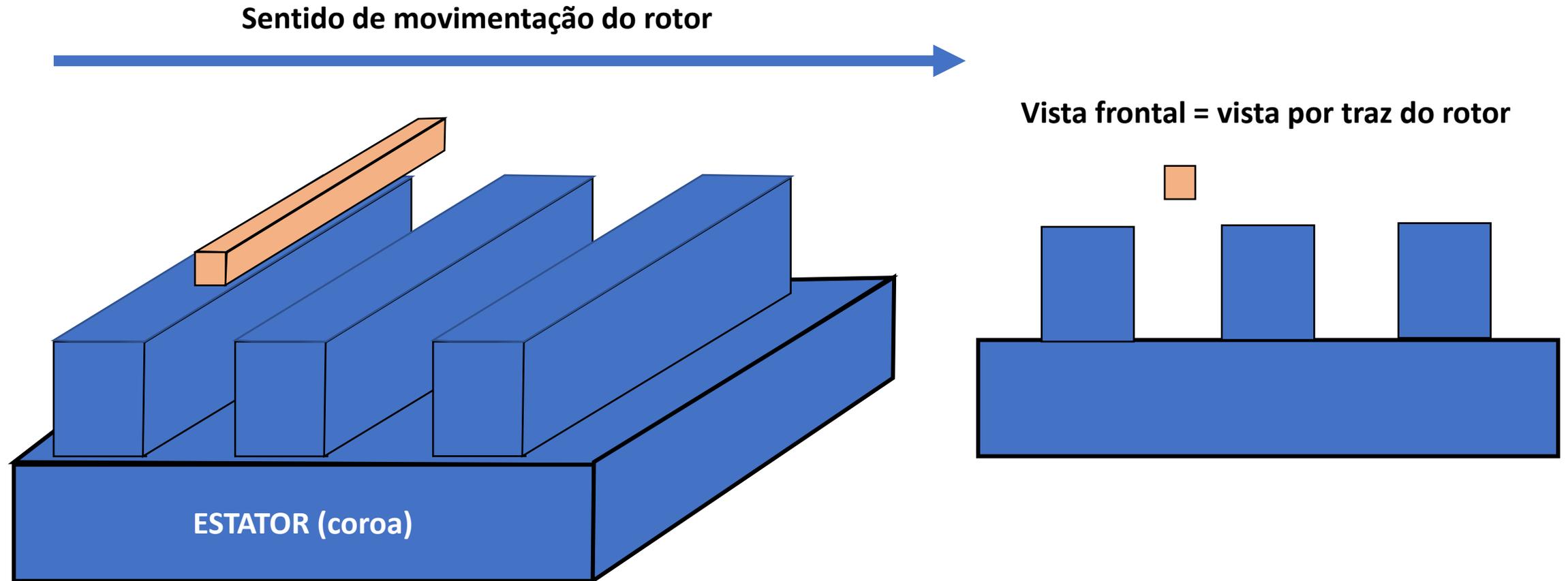


ESTATOR (coroa)

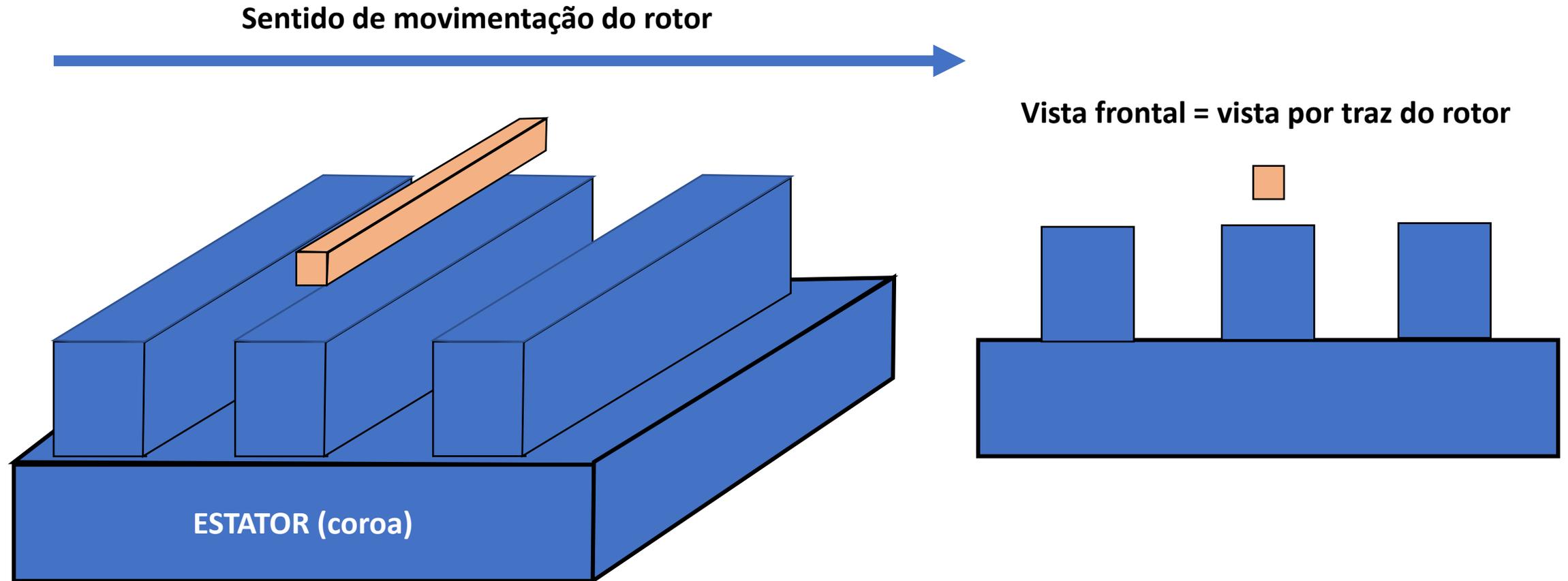
Vista frontal = vista por traz do rotor



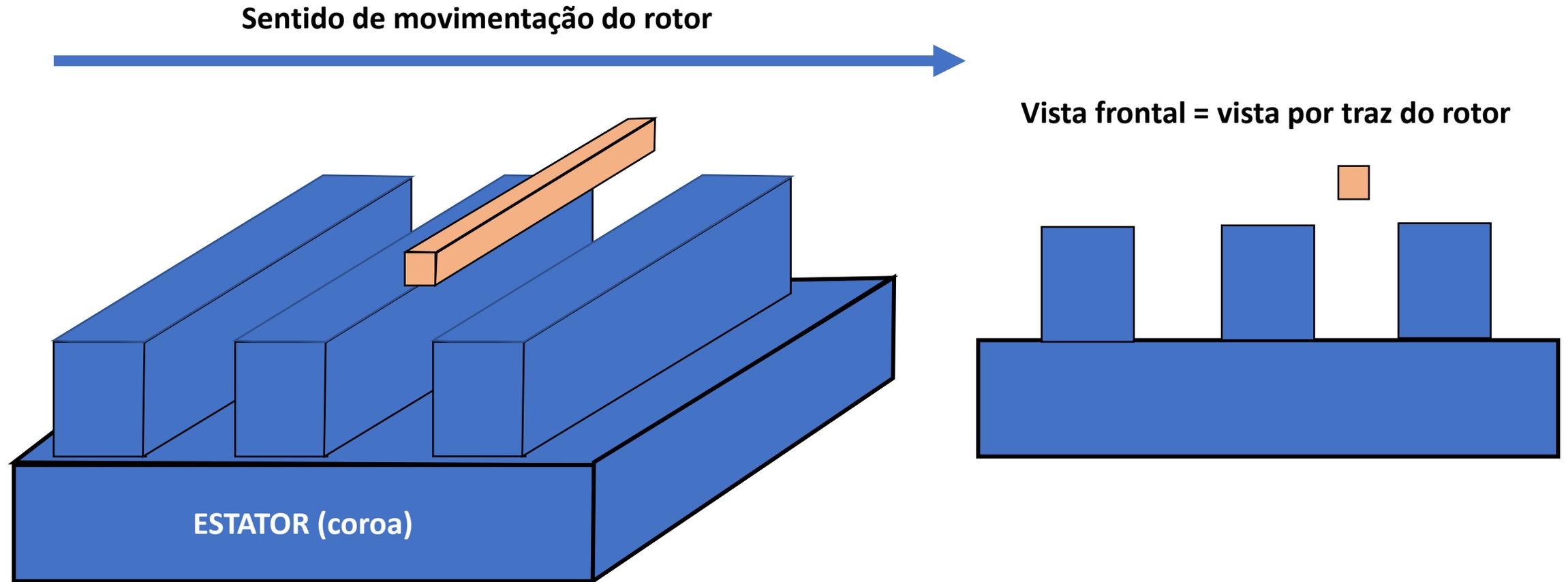
# Barras paralelas ao eixo



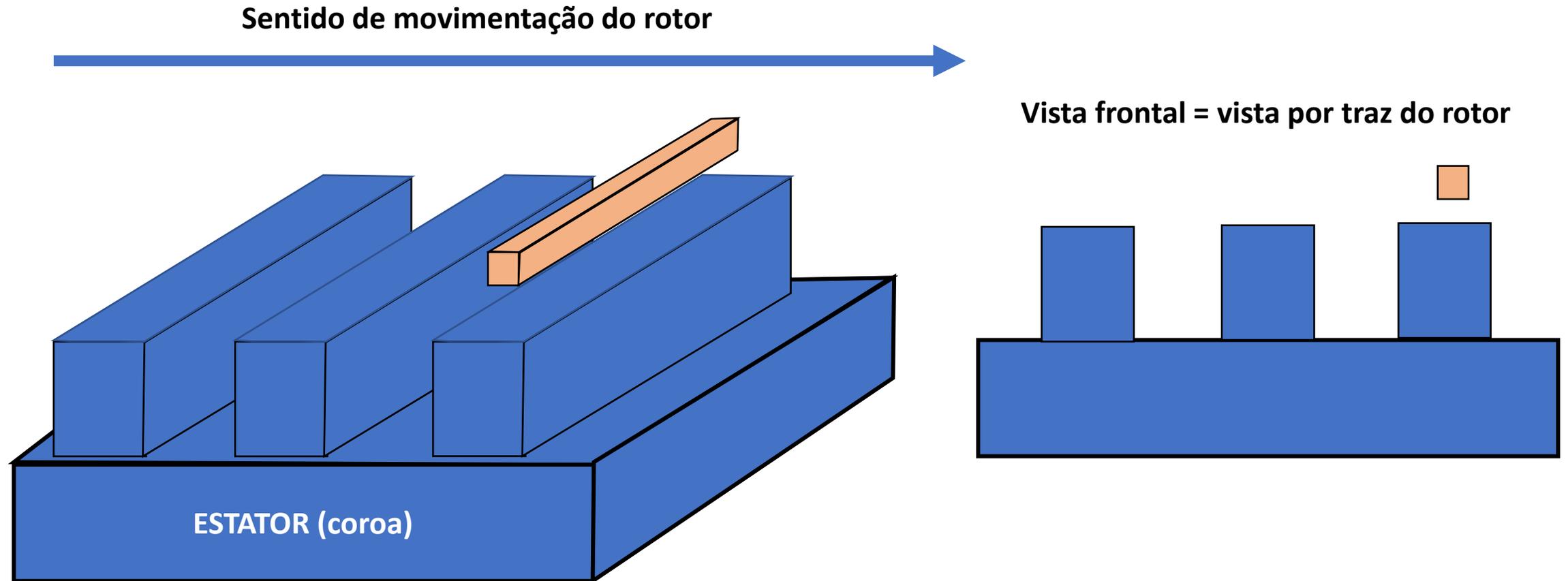
# Barras paralelas ao eixo



# Barras paralelas ao eixo



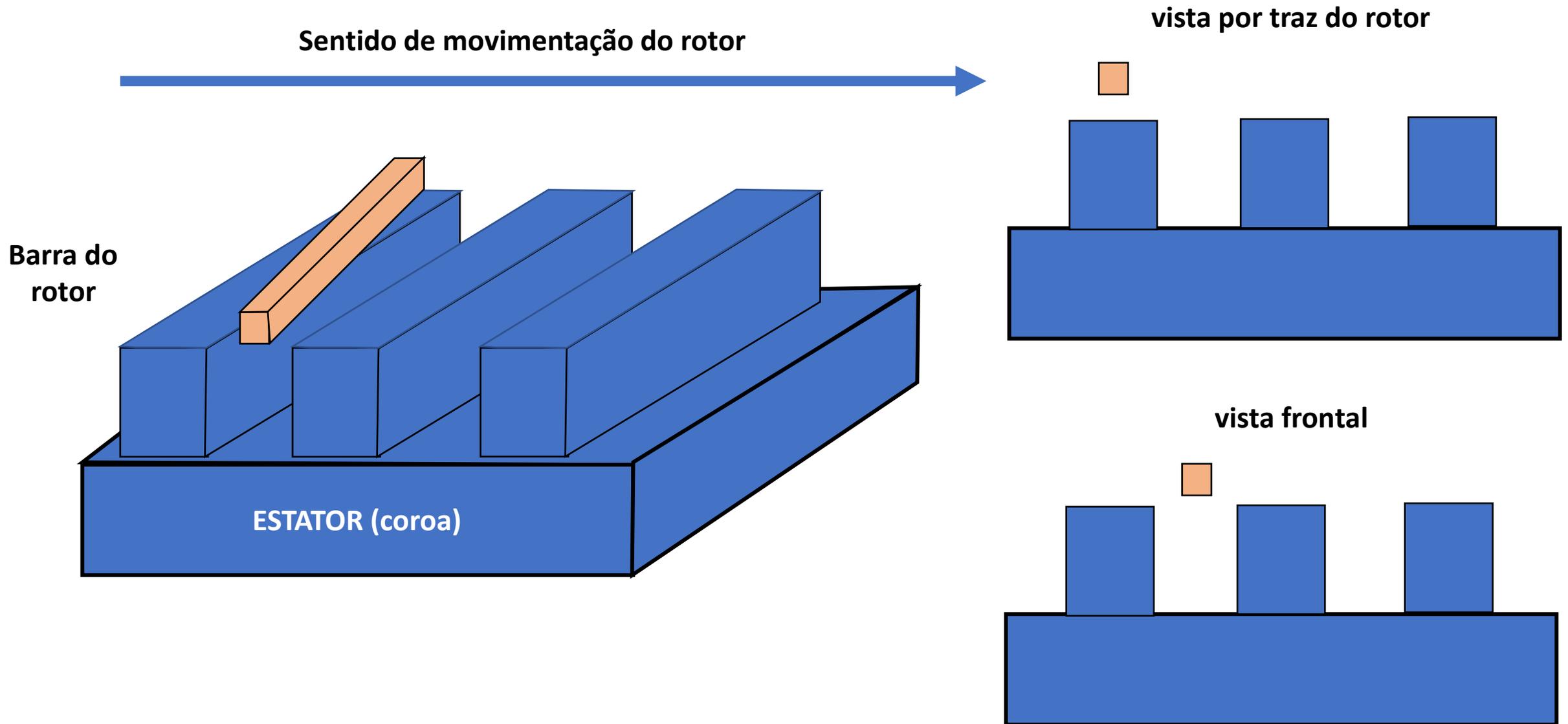
# Barras paralelas ao eixo



# Efeito das ranhuras na amplitude do campo magnético

- Toda vez que uma barra do rotor desloca de uma ranhura para um dente, haverá um aumento de fluxo;
- Toda vez que uma barra do rotor desloca de um dente para uma ranhura, haverá uma redução de fluxo;
- Conseqüentemente haverá uma corrente induzida em uma frequência associada ao número de ranhuras;
- Isto vai gerar uma oscilação de conjugado → vibração;
- Solução: Inclinar as barras do rotor. 

# Efeito da inclinação das barras

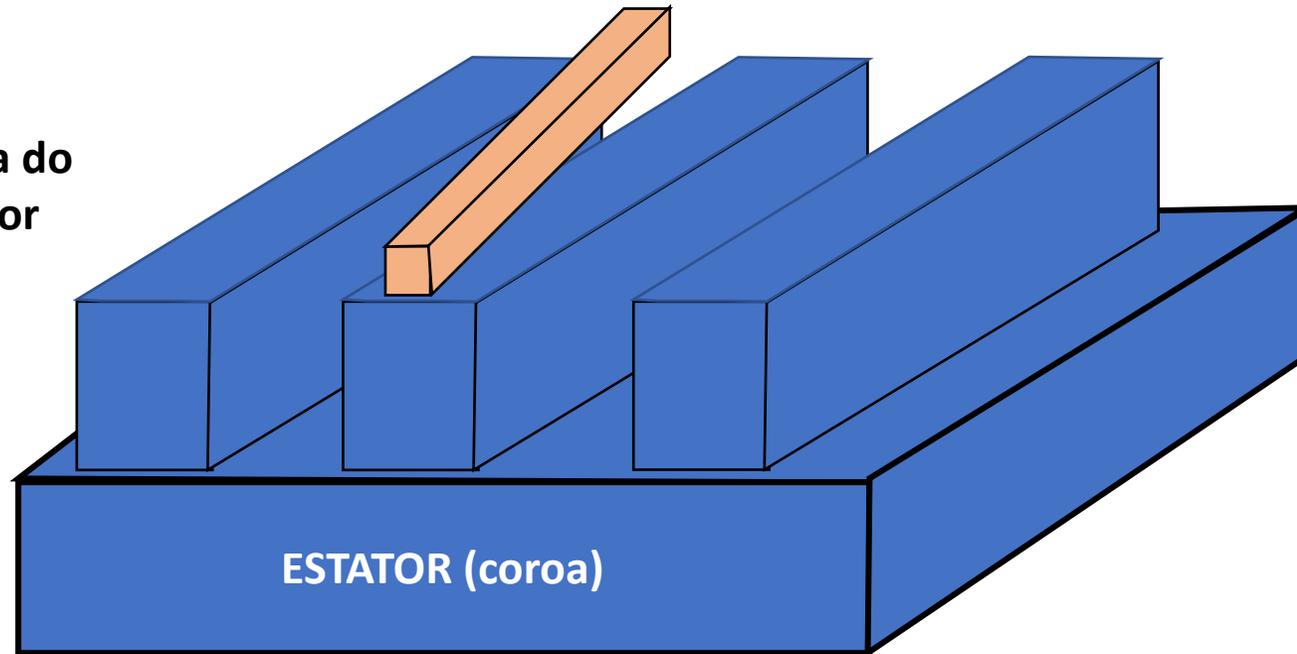


# Efeito da inclinação das barras

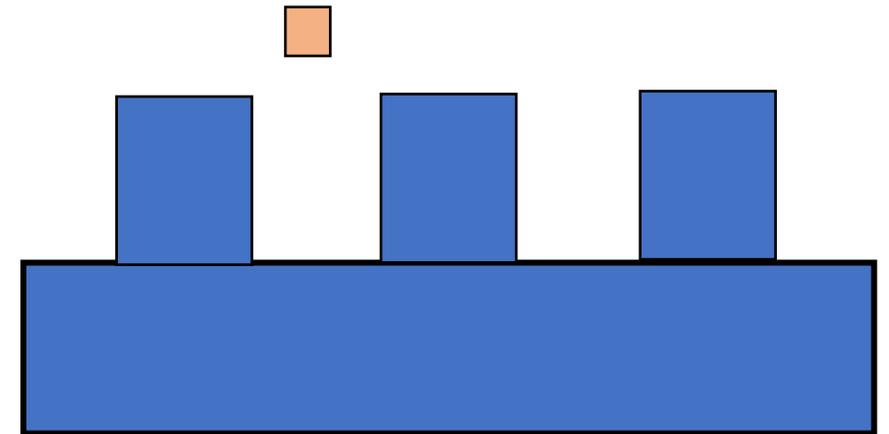
Sentido de movimentação do rotor



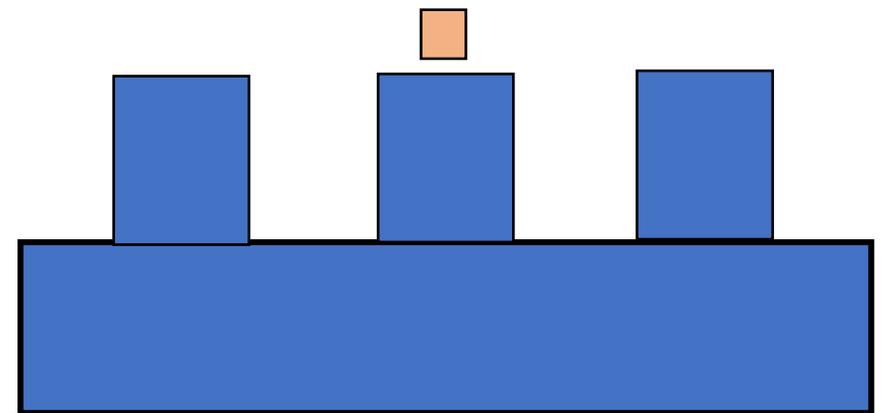
Barra do rotor



vista por traz do rotor



vista frontal

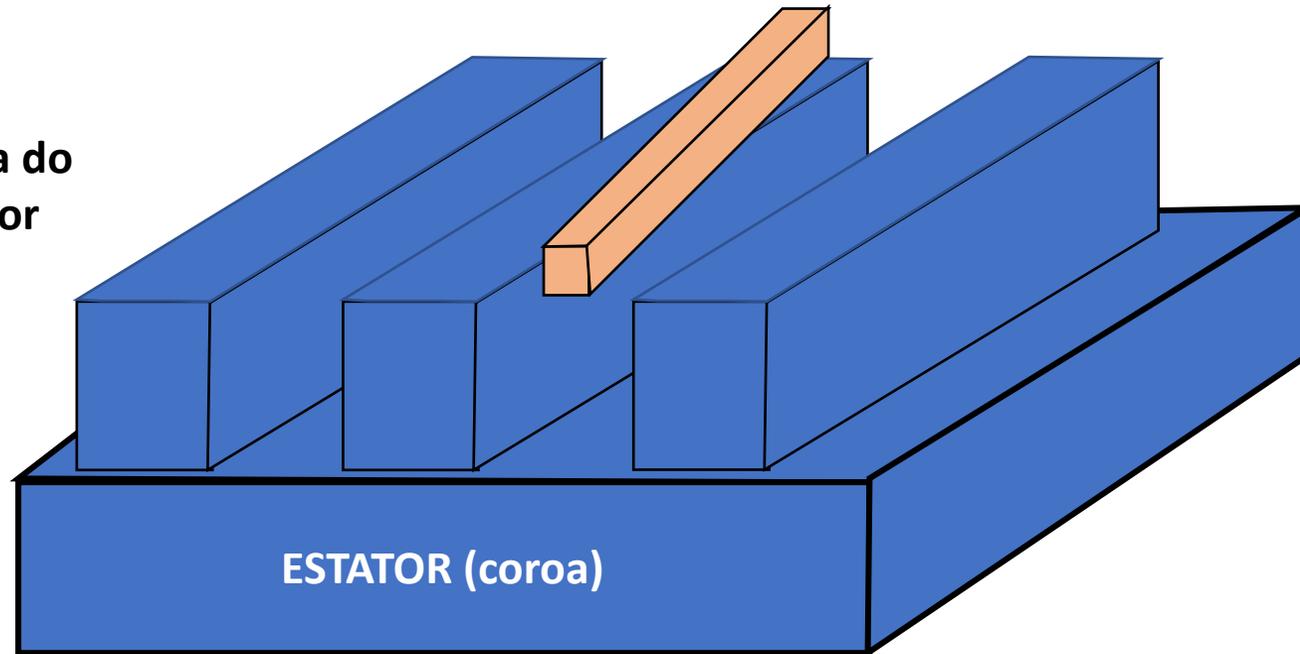


# Efeito da inclinação das barras

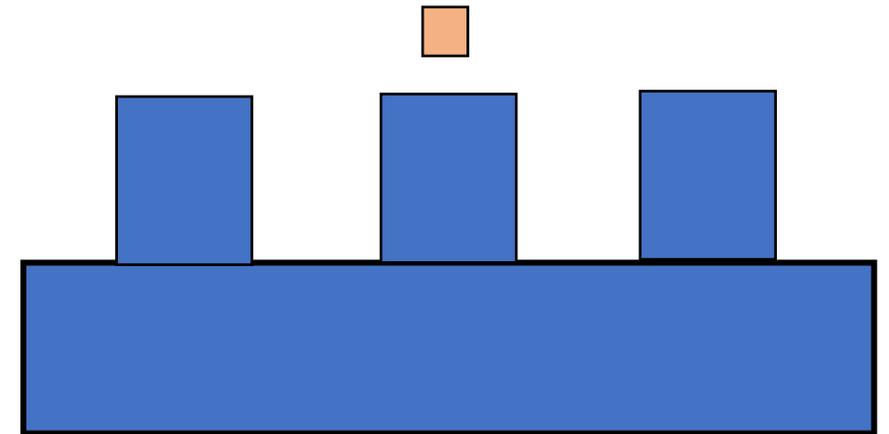
Sentido de movimentação do rotor



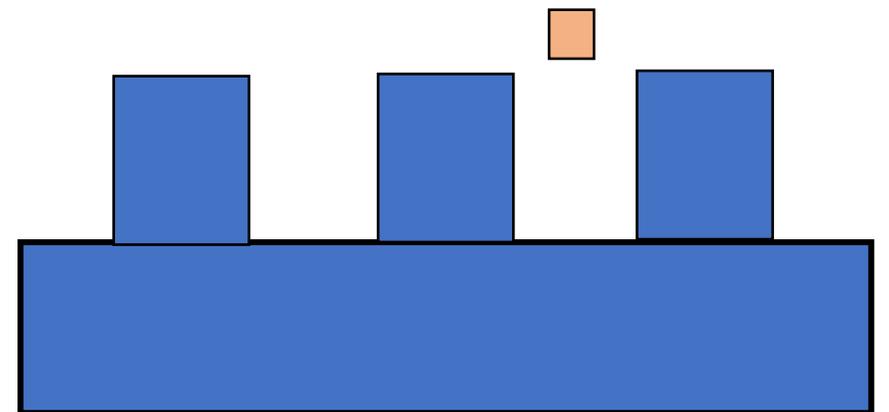
Barra do rotor



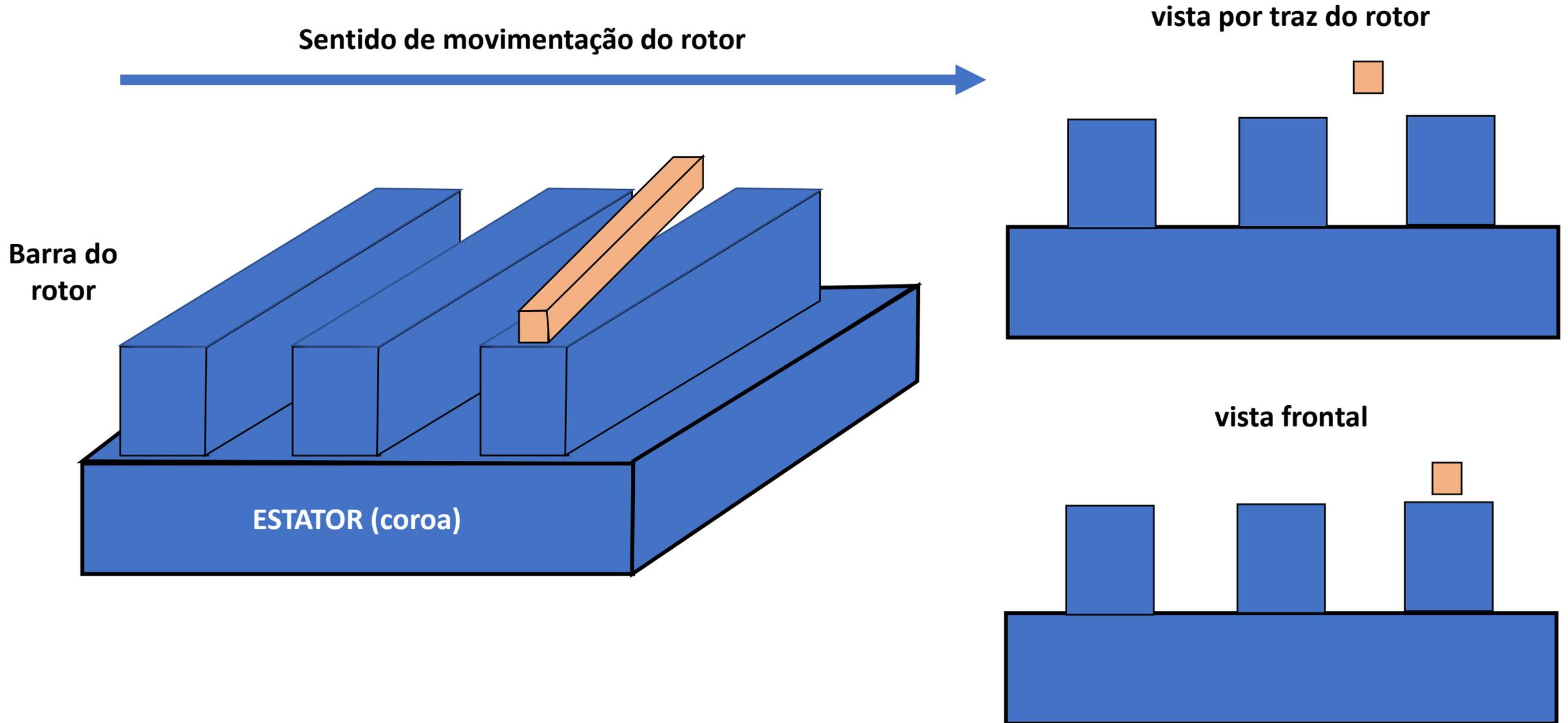
vista por traz do rotor



vista frontal



# Efeito da inclinação das barras



# Efeito da inclinação das barras de rotor

---

- ❑ Note que uma parte da barra verá uma variação de fluxo positiva;
- ❑ A outra metade verá uma variação de fluxo negativa;
- ❑ Haverá um cancelamento da tensão induzida ao longo do comprimento da barra;
- ❑ Isto atenua a componente oscilante do conjugado e reduz a vibração do motor!

# Obrigado pela Atenção



[www.gesep.ufv.br](http://www.gesep.ufv.br)



<https://www.facebook.com/gesep>



[https://www.instagram.com/gesep\\_vicosa/](https://www.instagram.com/gesep_vicosa/)



[https://www.youtube.com/channel/UCe9KOSGORXh\\_hDBIcxMU2Nw](https://www.youtube.com/channel/UCe9KOSGORXh_hDBIcxMU2Nw)



Estimate - Sistemas  
Fotovoltaicos



<https://play.google.com/store/apps/details?id=br.developer.gesep.estimate>