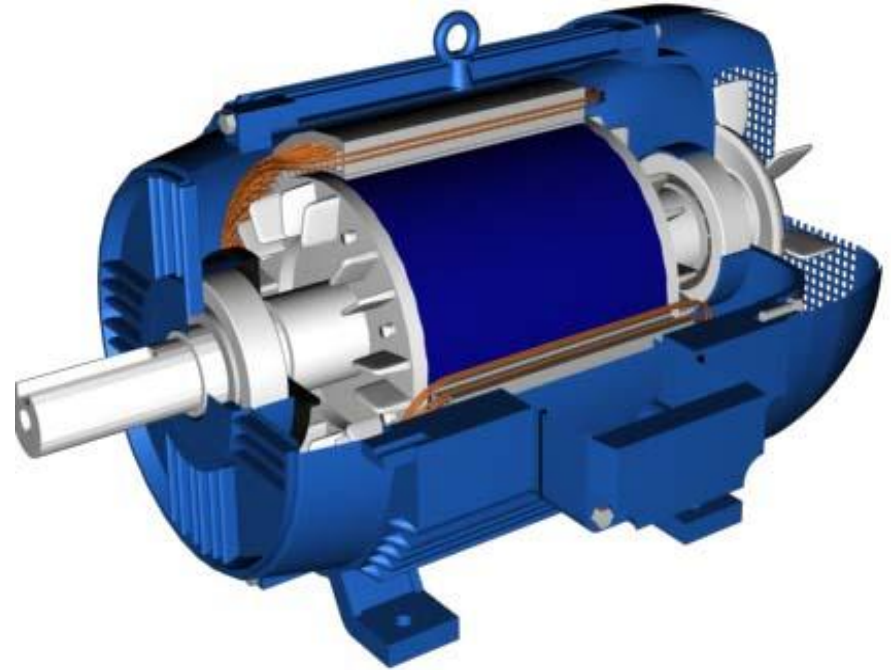


Motor Indução

Matheus Gustavo Alves Sasso 158257
Iuri Mandello 170214

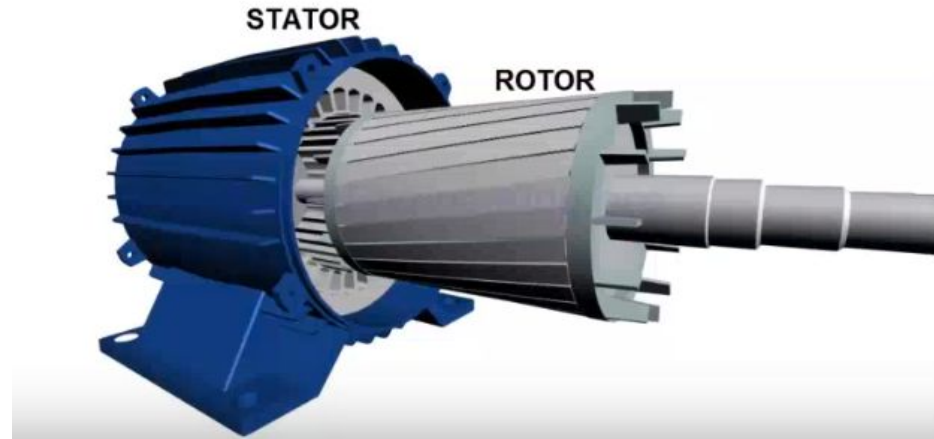
- 1.Princípio de Funcionamento
- 2.Técnicas de Controle
- 3.Aplicações
- 4.Desvantagens
- 5.Dimensionamento
- 6.Redução de Harmônicos



Princípio de Funcionamento: Estator x Rotor

ESTATOR

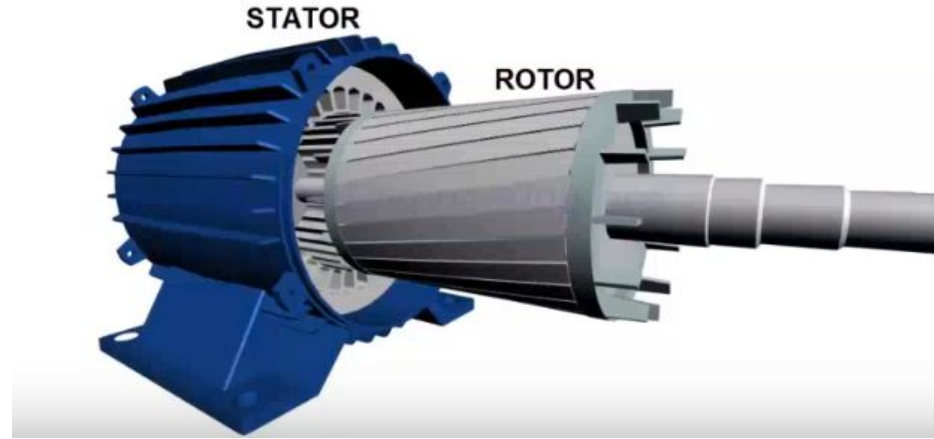
- Formado por três enrolamentos deslocados de 120°
- O fluxo produzido nos enrolamentos do estator por uma corrente alternada trifásica, e que atravessa o entreferro e o rotor, é girante com a velocidade da frequência da tensão de alimentação.
- O campo girante induz tensão no enrolamento do rotor → Energização por indução



Princípio de Funcionamento: Estator x Rotor

Rotor

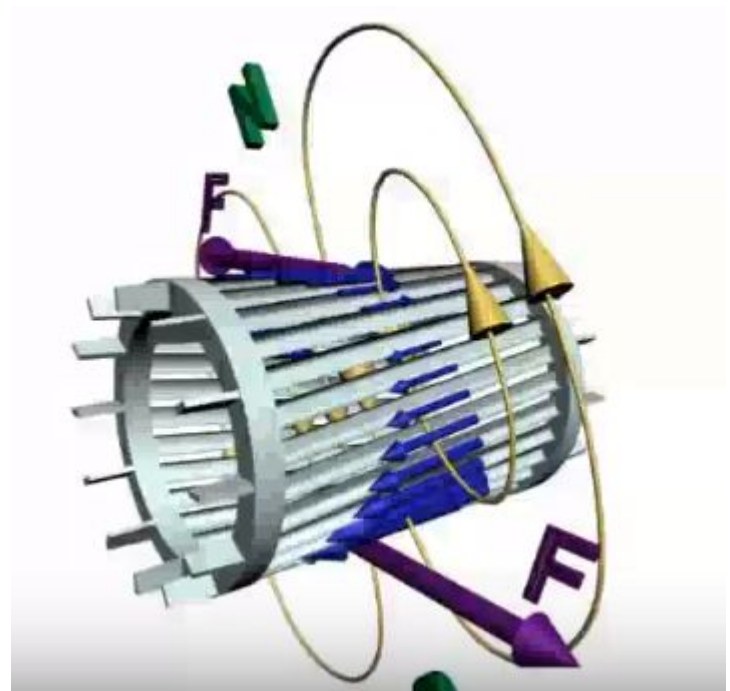
- O campo girante do estator induz tensão no enrolamento do rotor
- Em caso do rotor curto circuitado, correntes induzidas farão surgir um campo magnético no rotor, que ao se opor ao campo do estator, produz torque e velocidade.
- Denominada máquina assíncronas, pois só há torque quando a velocidade do rotor é diferente da velocidade do campo girante, quando iguais, torque nulo.



Princípio de Funcionamento: A indução

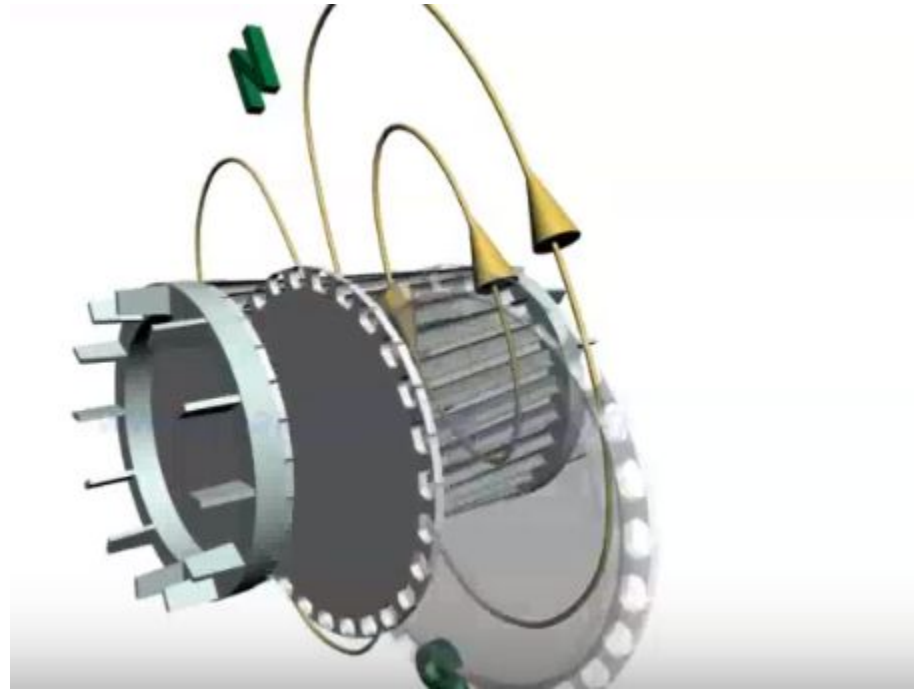
A eletricidade (\mathcal{F}_{em}) é induzida no rotor é gerada pela Força de Lorentz, descrita pela equação:

$$\mathbf{F} = q(\mathbf{E} + \mathbf{v} \times \mathbf{B}).$$



Princípio de Funcionamento: A indução

Lâminas de ferro são inseridas para evitar a Corrente de Foucault, a qual produz um campo magnético contrário, diminuindo o torque.



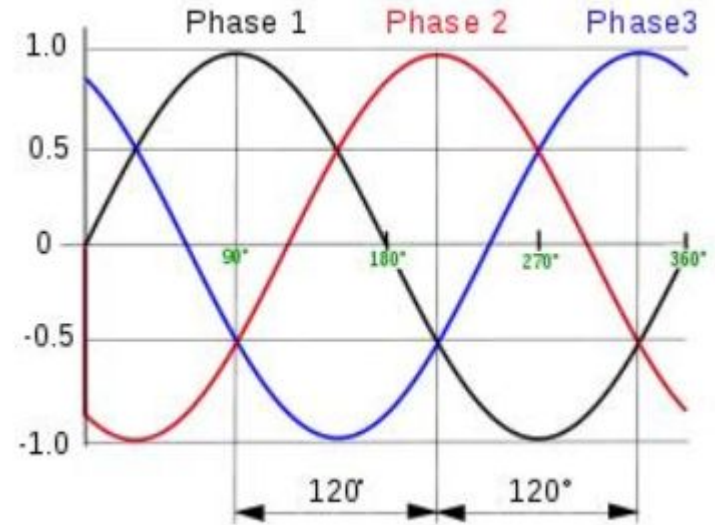
Princípio de Funcionamento: Campo Girante

Como cada componente da corrente tem uma força magnetomotriz, após manipulações matemáticas temos que:

$$F(\theta, t) = \frac{3}{2} NI_m \cos(\omega t - \theta)$$

Consequentemente, por Lawrance:

$$B(\theta, t) = B_{\text{máx}} \cos(\omega t - \theta)$$



Princípio de Funcionamento: Campo Girante

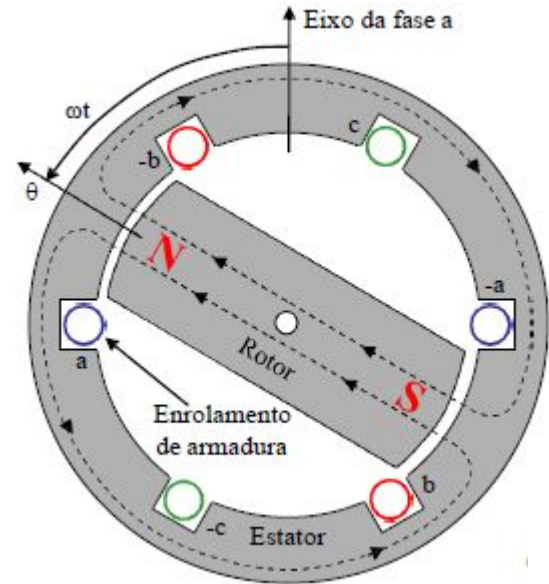
Levando em conta o alinhamento entre o rotor e o estator, pela lei de Faraday, o fluxo será máximo se $\omega t = 0^\circ$ e nulo para $\omega t = 90^\circ$:

$$\lambda_a = N\phi_p \cos \omega t$$

E assim a tensão da fase a é dada por :

$$e_a = -\frac{d\lambda_a}{dt} = \omega N\phi_p \sin \omega t = E_{\max} \sin \omega t$$

$$\phi_p = \frac{E_{RMS}}{4,44 f N_{ph} k_w} \propto \frac{E}{f}$$



Princípio de Funcionamento: Velocidades

A velocidade do campo em RPM é dada por:

$$n = \frac{120f}{P}$$

O rotor chega a uma velocidade de equilíbrio em regime permanente n menor do que a velocidade síncrona n_s do campo girante do estator, que é:

$$n_s = \frac{120f_1}{p}$$

$f_1 \rightarrow$ frequência do campo girante do estator

Se $n = n_s$, o torque é nulo, logo o motor desacelera. Ao desacelerar, n fica diferente de n_s e temos novamente uma força para girar o rotor. Na gaiola de esquilo isso acontece para cada “grade”, fazendo com que o movimento de rotação seja suave.

Princípio de Funcionamento: Velocidades

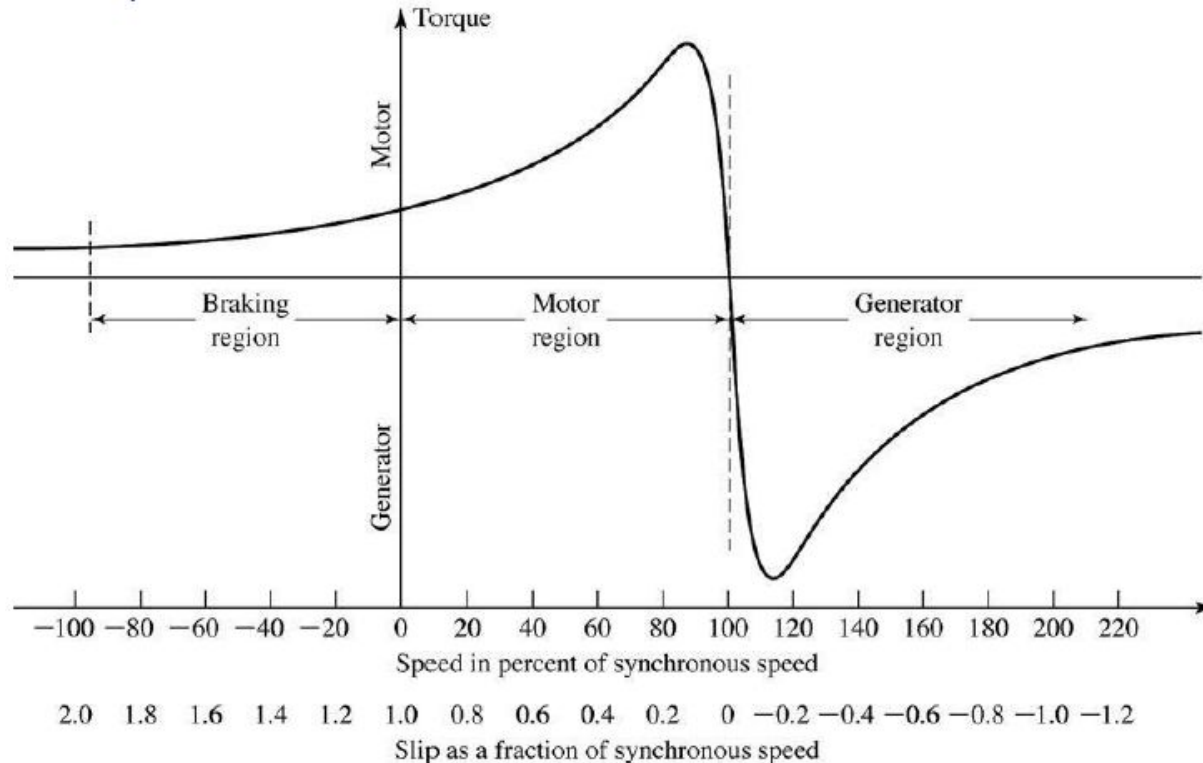
A diferença do campo produzido pelo estator e a velocidade do rotor é o escorregamento:

$$s = \frac{n_s - n}{n_s} = \frac{\omega_s - \omega}{\omega_s}$$

A frequência f_2 da tensão e da corrente induzidas no rotor vem do escorregamento:

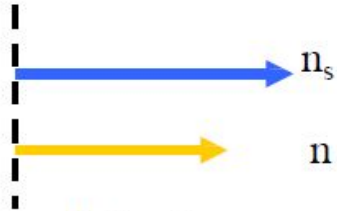
$$f_2 = \frac{p}{120} (n_s - n) = \frac{p}{120} s n_s = s f_1$$

Princípio de Funcionamento: Tipos de Operação



Princípio de Funcionamento: Tipos de Operação

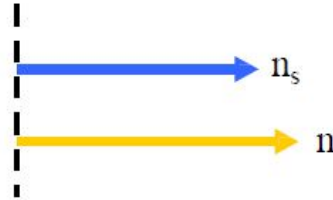
Operação Motor



$$0 \leq n \leq n_s$$

$$1 \geq s \geq 0$$

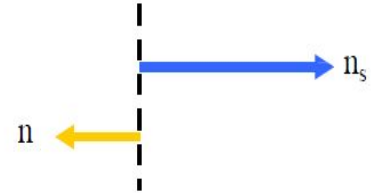
Operação Gerador



$$n > n_s$$

$$s < 0$$

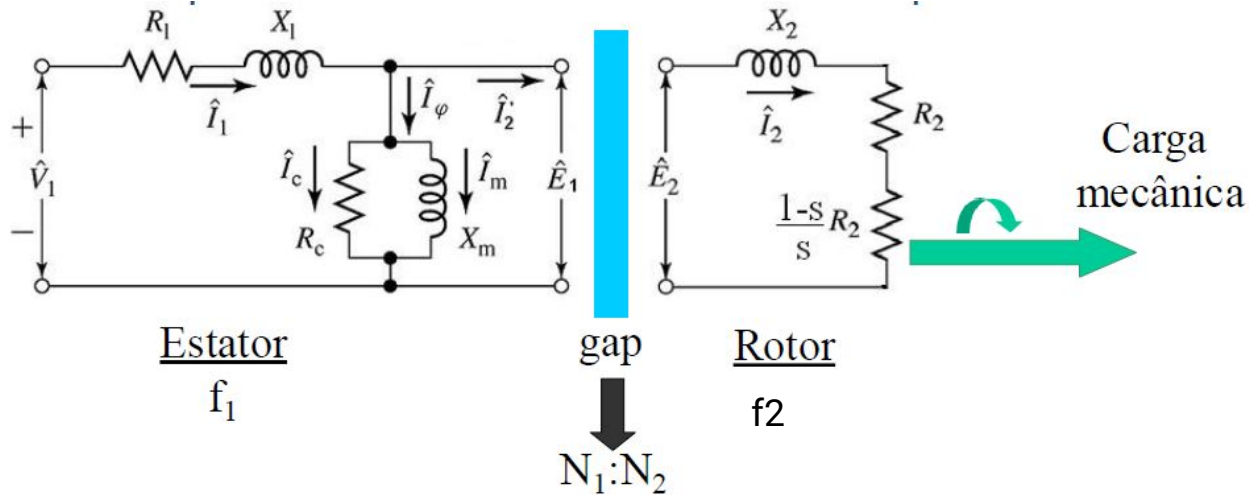
Operação de frenagem



$$n < 0$$

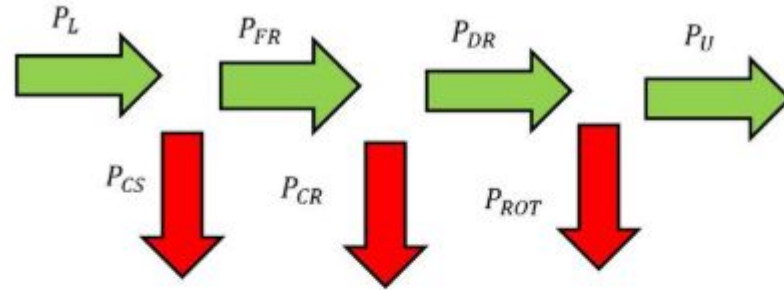
$$s > 1$$

Princípio de Funcionamento: Modelagem



Rotor e estator estão em diferentes frequências

Princípio de Funcionamento: Modelagem

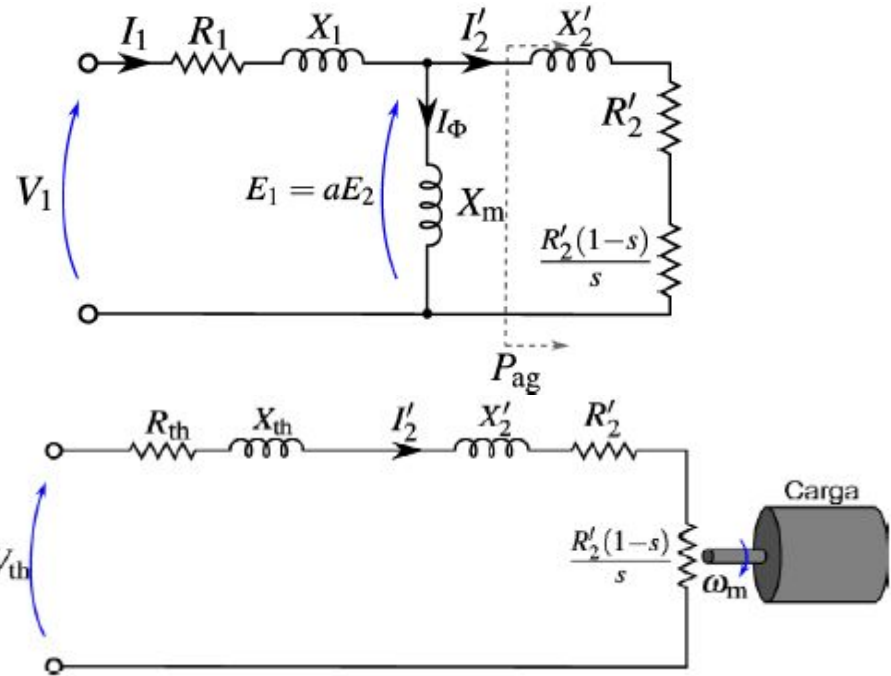


- Potência absorvida da rede de alimentação (P_L):
- Perdas no cobre do estator (P_{CS}):
- Potência fornecida ao rotor ou Potência eletromagnética (P_{FR}):
- Perdas no cobre do rotor (P_{CR}):
- Potência desenvolvida pelo rotor ou potência interna (P_{DR}):
- Perdas rotacionais (P_{ROT}):
- Potência útil ou de saída (P_U):

Princípio de Funcionamento: A corrente na partida

$$I_1 = \frac{V_1}{Z_1} = I_\Phi + I_2'$$

$$T_{\text{mec}} = \frac{3}{\omega_s} \frac{V_{\text{th}}^2}{\left(R_{\text{th}} + \frac{R_2'}{s} \right)^2 + (X_{\text{th}} + X_2')^2} s$$



Técnicas de Controle

Sabe-se que o motor a indução é modelado pelo Torque mecânico e pela tensão induzida/ variação de fluxo no rotor:

$$T_{\text{mec}} = \frac{3}{\omega_s} \frac{V_{\text{th}}^2 R_2'}{\left(R_{\text{th}} + \frac{R_2'}{s} \right)^2 + \left(X_{\text{th}} + X_2' \right)^2}$$

$$\phi_p = \frac{E_{RMS}}{4,44 f N_{ph} k_w} \propto \frac{E}{f}$$

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

Assim as técnicas de controle serão variações desses parâmetros:

- Controle via mudança de pólos
- Controle via variação da resistência do rotor
- Controle via variação da magnitude da tensão terminal
- Controle via variação da frequência (e magnitude) da tensão terminal V/Hz constante.
- Controle Vetorial

Técnicas de Controle: Mudança de Pólos

Uma das técnicas de controle se baseia em alterar o número de pólos, para uma frequência constante para mudar a velocidade.

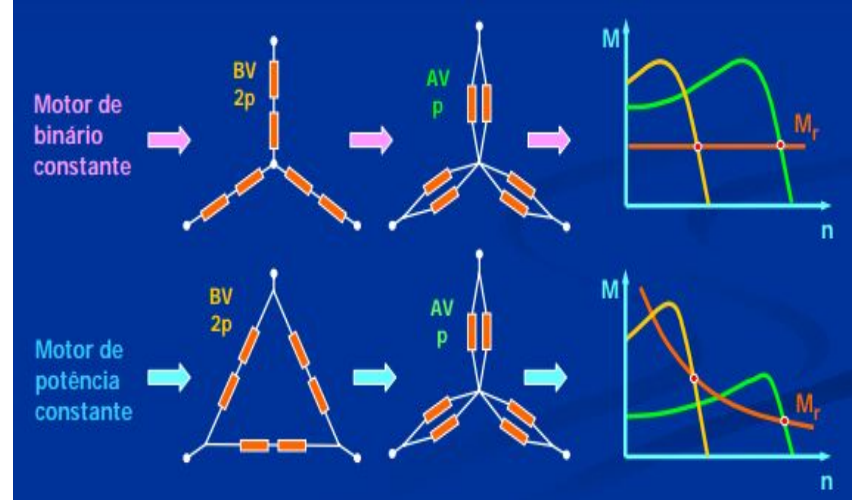
$$n = (1-s) \times \frac{120 \times f}{p}$$

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

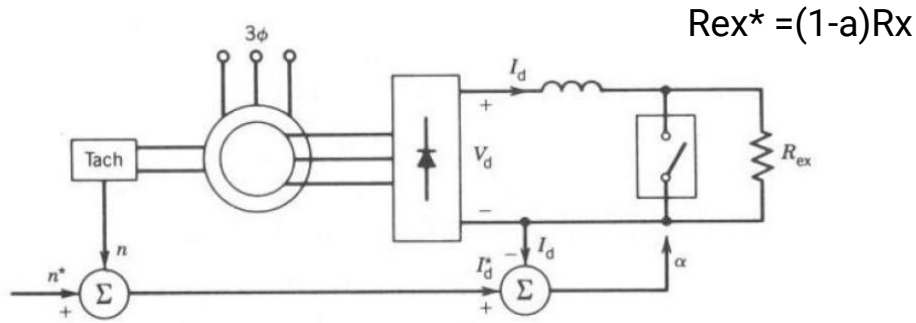
Desvantagem

Baixíssima flexibilidade

$$T_{\text{mec}} = \frac{3}{\omega_s} \frac{V_{\text{th}}^2}{\left(R_{\text{th}} + \frac{R_2'}{s} \right)^2 + \left(X_{\text{th}} + X_2' \right)^2} \frac{R_2'}{s}$$



Técnicas de Controle: Variação da resistência

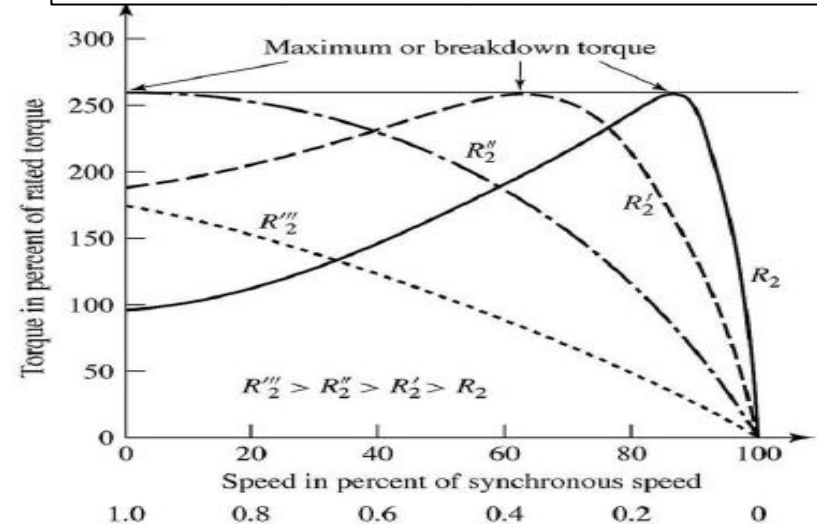


Por meio da inserção de resistências podemos incrementar a resistência do rotor para suportar **maiores torques de partida**

Desvantagem

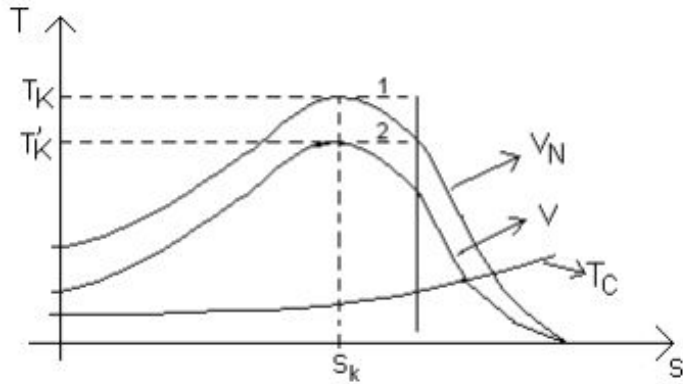
Conforme R fica maior, a variação no torque influencia cada vez mais na variação da velocidade

$$T_{mec} = \frac{3}{\omega_s} \frac{V_{th}^2}{\left(R_{th} + \frac{R_2'}{s} \right)^2 + (X_{th} + X_2')^2} s$$



Técnicas de Controle: Tensão de Alimentação

Reduzir a tensão de alimentação provoca a redução o torque, interferindo na velocidade!



$$T_{\text{mec}} = \frac{3}{\omega_s} \frac{V_{\text{th}}^2 R'_2}{\left(R_{\text{th}} + \frac{R'_2}{s} \right)^2 + \left(X_{\text{th}} + X'_2 \right)^2 s}$$

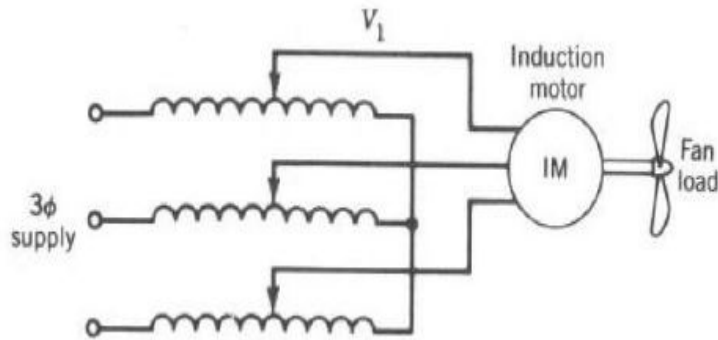
$$V_1 = V_N \cdot \sqrt{\frac{\frac{s}{s_K} + \frac{s_K}{s}}{\frac{s_N}{s_K} + \frac{s_K}{s_N}}} \cdot \left(\frac{T}{T_N} \right)$$

Desvantagem

Aumento no
escorregamento

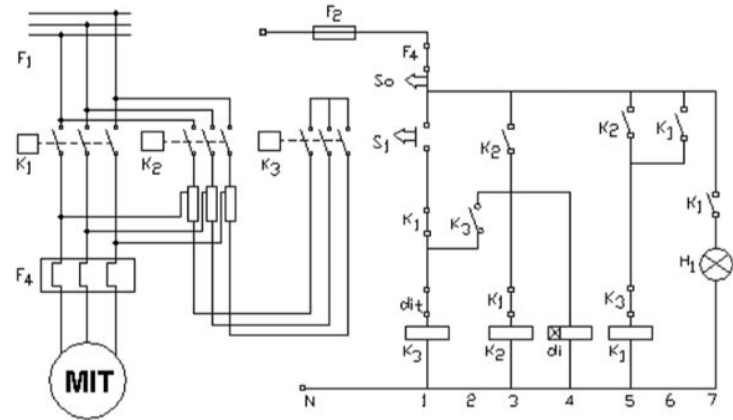
Técnicas de Controle: Tensão de Alimentação

Autotransformador



- Para motores de potência elevada, acima de 50 CV
- Termostato de Proteção

Chave compensadora



- Custo mais caro;
- Ocupa maior espaço

Técnicas de Controle: Tensão de Alimentação

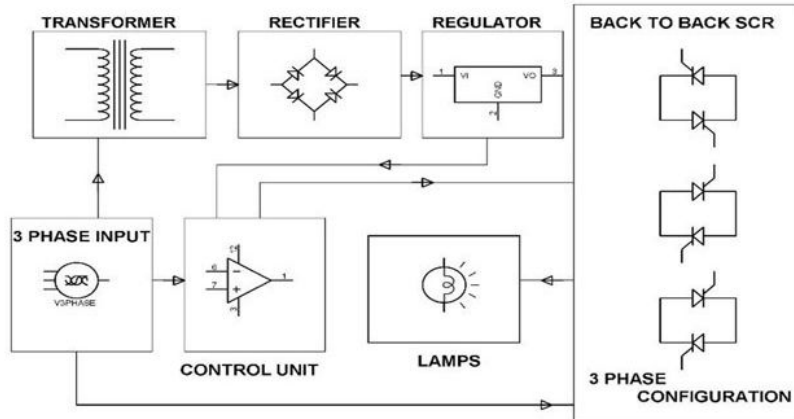
Soft-Starter

Ponte de tiristores (SCR's), regulador de tensão aliada a unidades de controle eletrônico

Controlar a tensão de partida do motor, bem como sua desenergização.

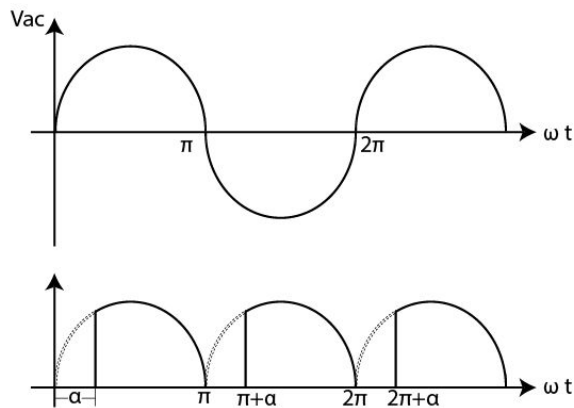
Principais aplicações

- Bombas centrífugas (saneamento, irrigação, petróleo);
- Ventiladores, exaustores e sopradores;
- Compressores de ar e refrigeração;
- Misturadores e aeradores;
- Britadores e moedores;
- Fornos rotativos;
- Serras e plainas (madeira);

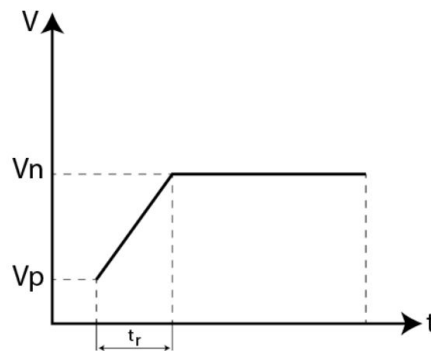


Técnicas de Controle: Tensão de Alimentação

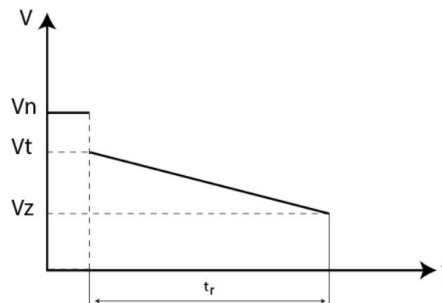
O “ α ” é reduzido no decorrer do tempo, fazendo com que a tensão aumente gradativamente até alcançar o valor de alimentação total.



Soft-Starter



V_n =Tensão nominal
 V_p =Tensão de partida
 T_r =Tempo de rampa de energização



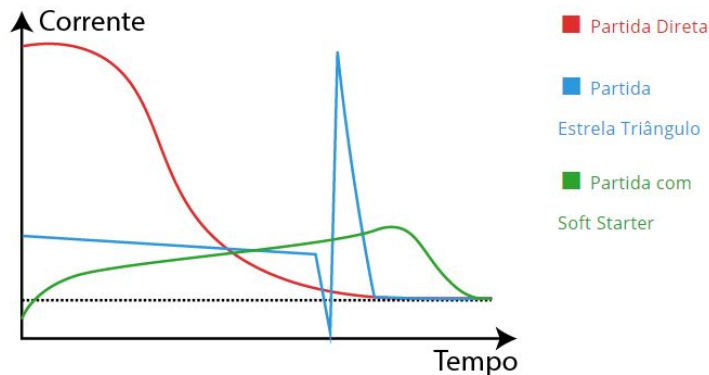
V_n =Tensão nominal
 V_t =Início da desenergização
 V_z =Tensão de parada do motor
 T_r =Rampa de

Técnicas de Controle: Tensão de Alimentação

Soft-Starter

Vantagens

É uma partida eletrônica fazendo com que a corrente de partida do motor tenha uma performance muito melhor que as demais partidas.



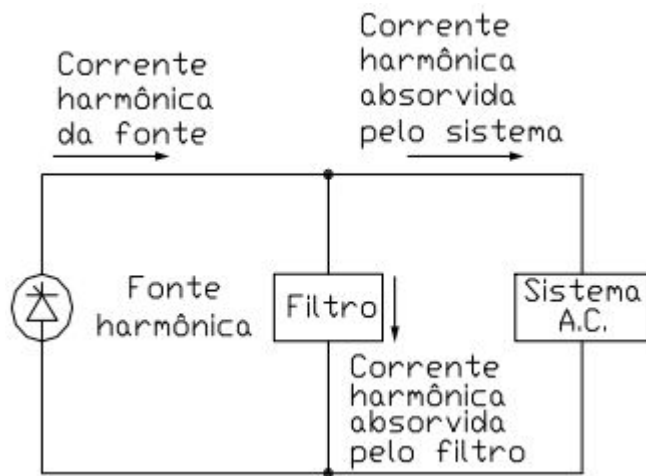
Desvantagens

Aplicações de pequeno porte:
tensão não é senoidal:

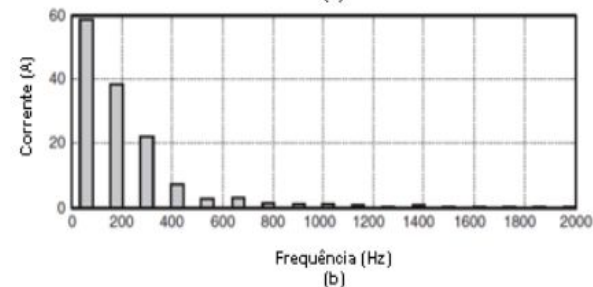
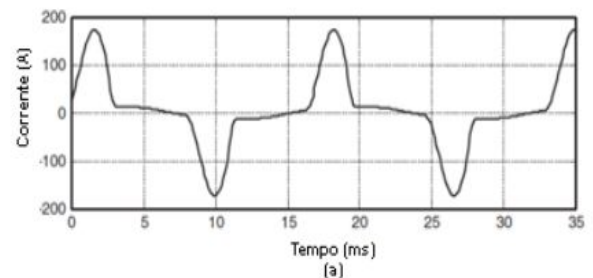
Aplicações de grande porte:
Harmônicas injetadas, um filtro harmônico é necessário na entrada do conversor

Técnicas de Controle: Tensão de Alimentação

Retenção de Harmônicos



Geração de harmônicos por retificador monofásico com filtro capacitivo [42]



Técnicas de Controle: Fluxo (V/Hz constante)

A variação da frequência de alimentação provoca uma variação no fluxo:



Aumento do fluxo devido a redução da frequência pode provocar saturação da máquina



$$\phi_p \propto \frac{V}{f}$$

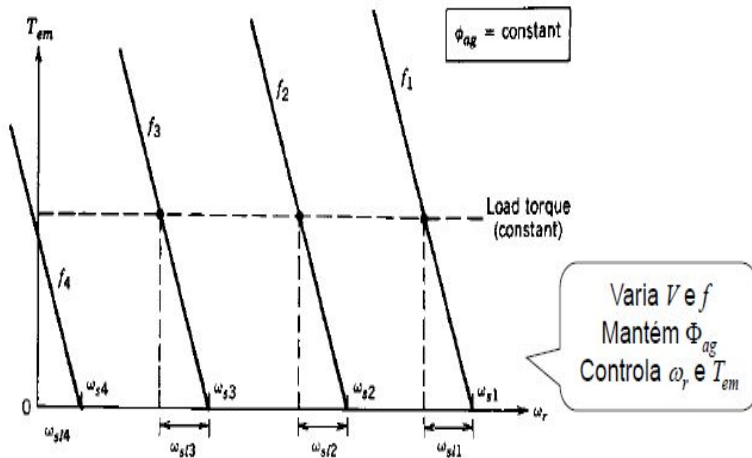
$$\phi_p = \frac{E_{RMS}}{4,44 f N_{ph} k_w} \propto \frac{E}{f}$$

$$T_{mec} = \frac{3}{\omega_s} \frac{V_{th}^2 R_2'}{\left(R_{th} + \frac{R_2'}{s} \right)^2 + \left(X_{th} + X_2' \right)^2 s}$$

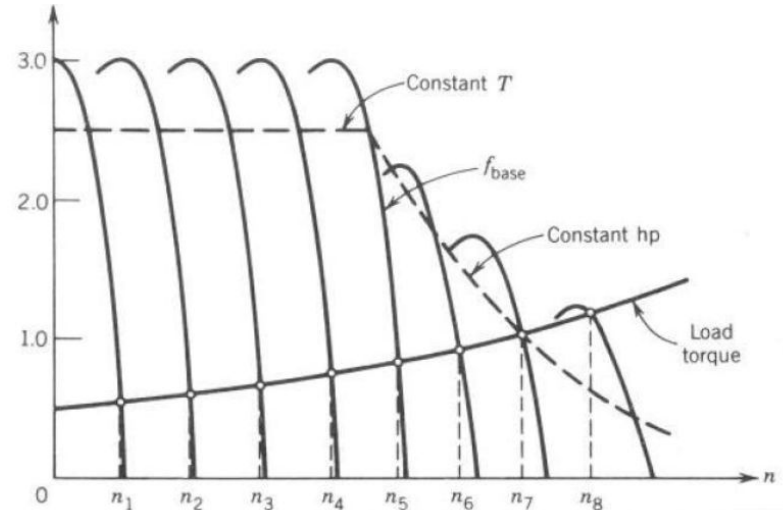
Técnicas de Controle: Fluxo (V/Hz constante)

Abaixo da frequência nominal, varia-se a tensão terminal de forma a manter a relação

V/f constante e igual ao valor nominal;

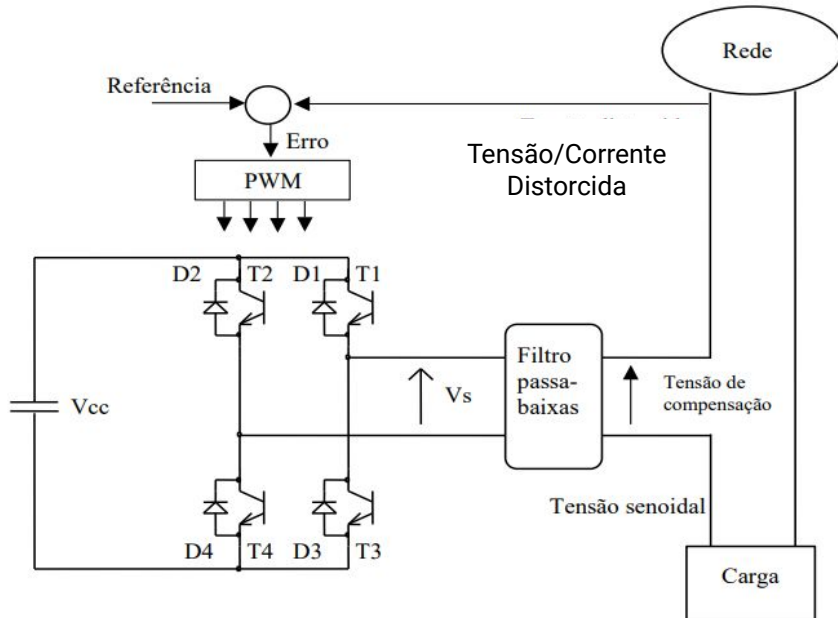


Acima da frequência nominal, a tensão é mantida no seu valor nominal.



Técnicas de Controle: Fluxo (V/Hz constante)

Retenção de Harmônicos



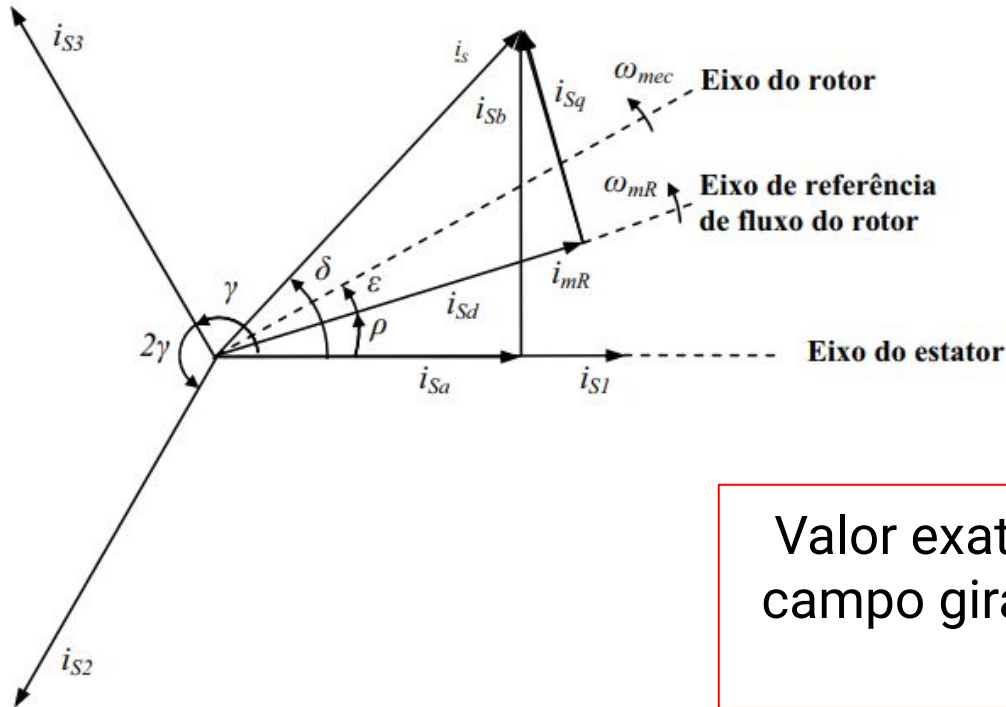
a) Filtro série

Minimizar a distorção da tensão de alimentação de uma carga, corrigindo as eventuais componentes harmônicas presentes na tensão da rede local

b) Filtro em derivação (*shunt*)

Minimizar a distorção da corrente que flui pela rede elétrica

Técnicas de Controle: Vetorial



Alto desempenho no regime permanente e transitório

Controle das correntes do estator da máquina

Desvantagem

Valor exato da magnitude e posição do campo girante → Sensores → Alto custo

Dimensionamento

Fatores que devem ser levados em conta:

- Temperatura do ambiente
- Altitude
- Potência Útil Necessária
- Potência Máxima
- Necessidade de proteção
- Precisão da velocidade
- Tensão da rede
- Umidade
- Presença de gases
- Frequência da rede
- Funcionamento contínuo ou em certos períodos



Referências Bibliográficas

https://pt.wikipedia.org/wiki/Corrente_de_Foucault

https://pt.wikipedia.org/wiki/For%C3%A7a_de_Lorentz

<https://www.saladaeletrica.com.br/o-que-e-um-soft-starter/>

<http://www.estgv.ipv.pt/PaginasPessoais/lpestanda/maquinas%20el%C3%A9ctricas%202/aulas%20te%C3%B3ricas/variacao%20velocidade.pdf>

<http://www.ifba.edu.br/professores/castro/MIT.pdf>

<https://www.mundodaeletrica.com.br/motor-eletrico-como-dimensionar/>

<ftp://ftp.ufrn.br/pub/biblioteca/ext/bdtd/FranciscoCHQ.pdf>