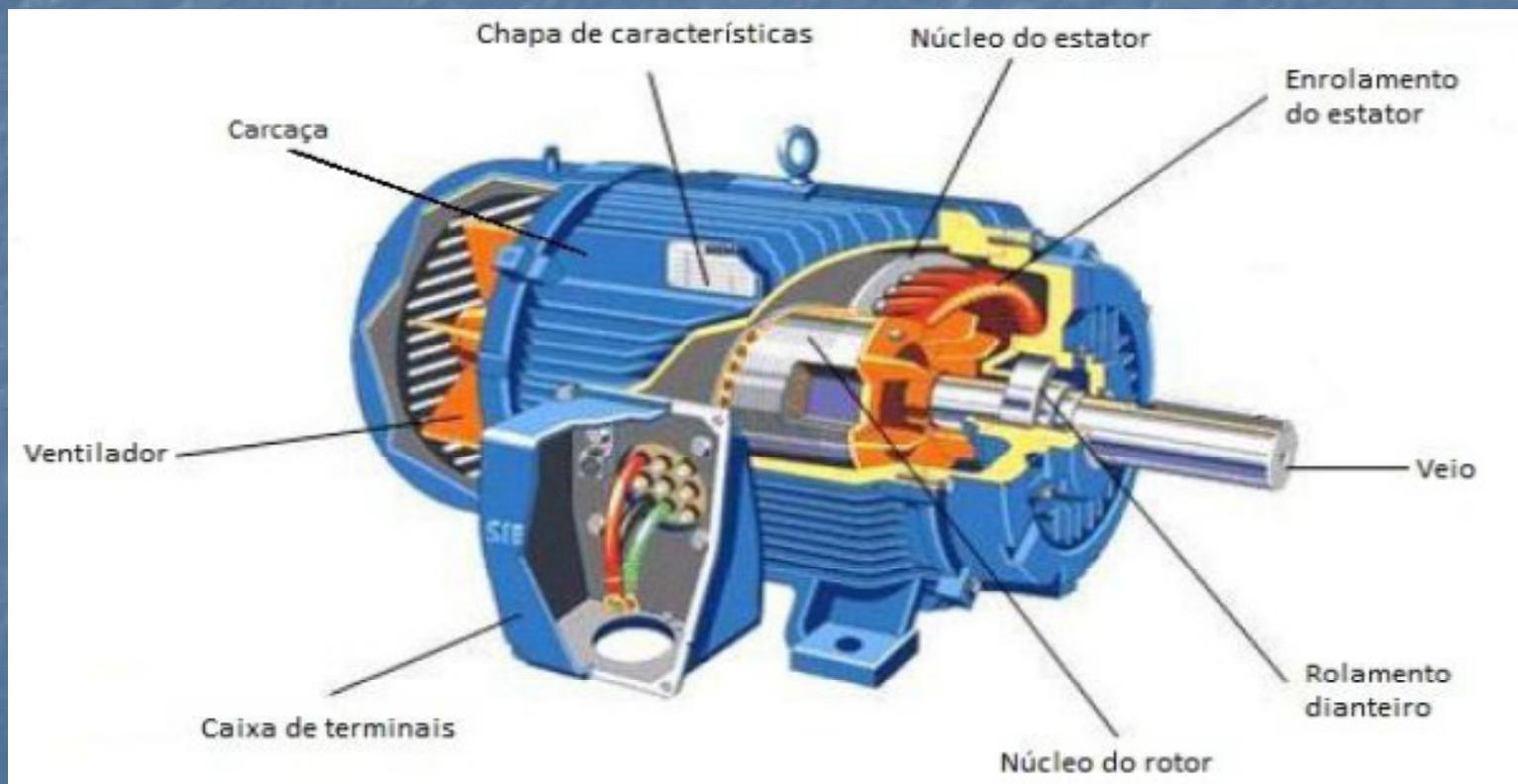


Máquinas Síncronas

Aspectos Construtivos e
Princípios de Funcionamento

Visão Geral da Máquina



Tipicamente

- Enrolamento do Rotor
 - alimentado em corrente contínua
 - É o enrolamento indutor
- Enrolamento do Estator
 - É o enrolamento induzido
 - Usualmente Enrolamento Trifásico

O Acesso ao Enrolamento do Rotor: os anéis

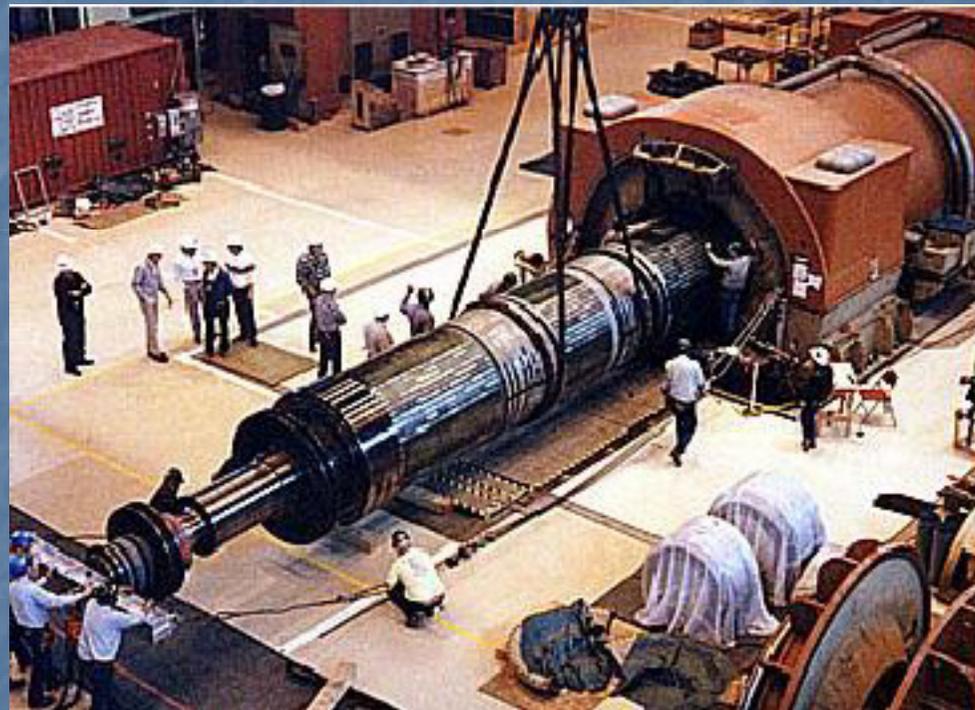


O Rotor de Polos Lisos

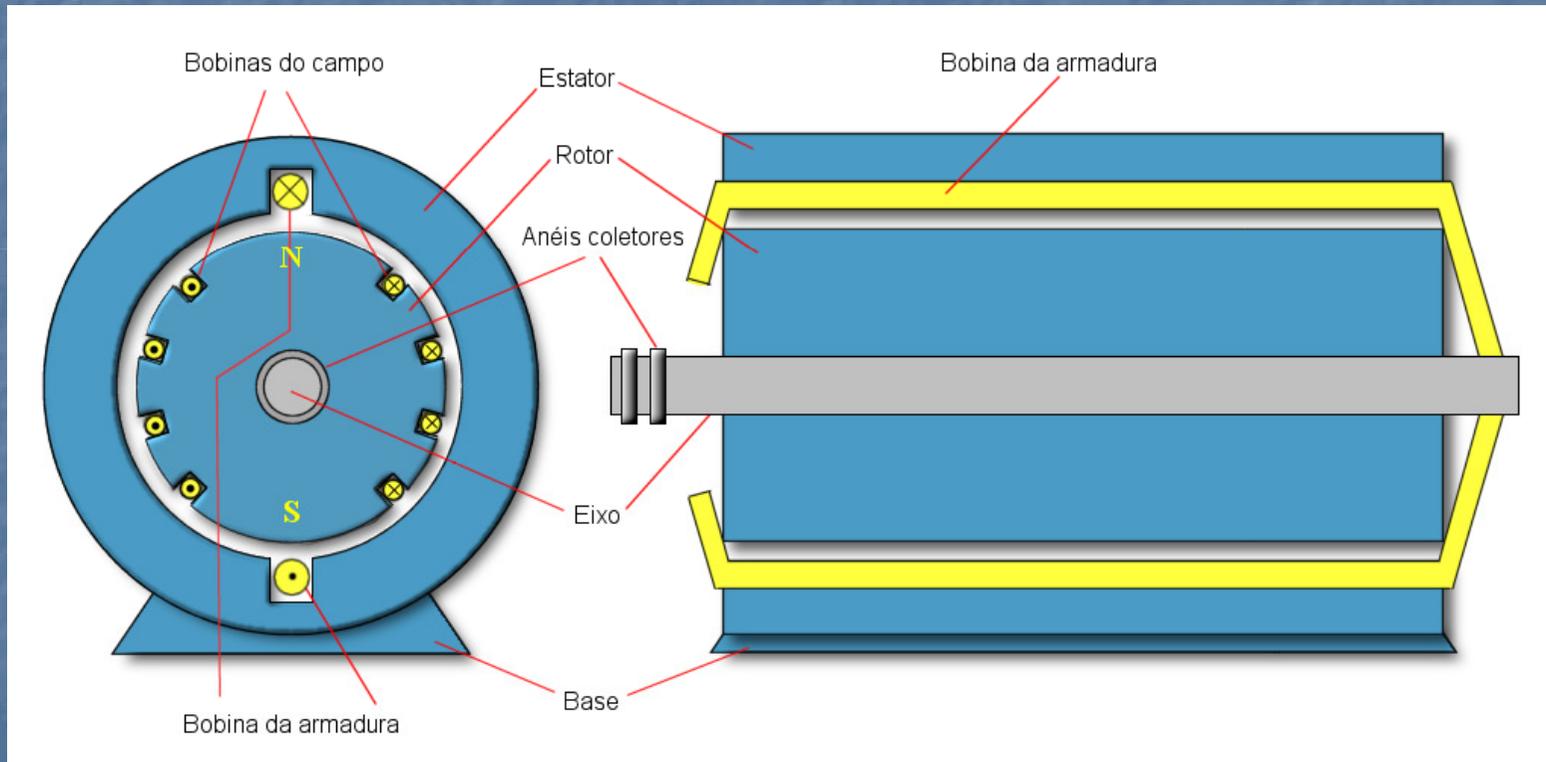


Em geral para geradores de alta velocidade (turbogeneradores)

Montagem de um Turbogenerador: Polos Lisos



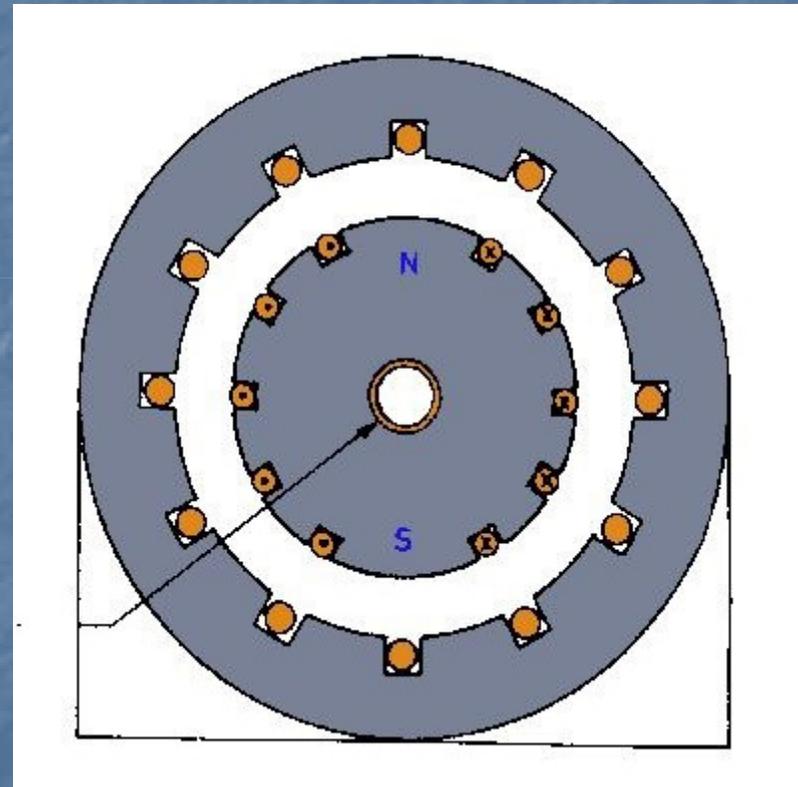
Visão Esquemática de uma Máquina Síncrona de Polos Lisos



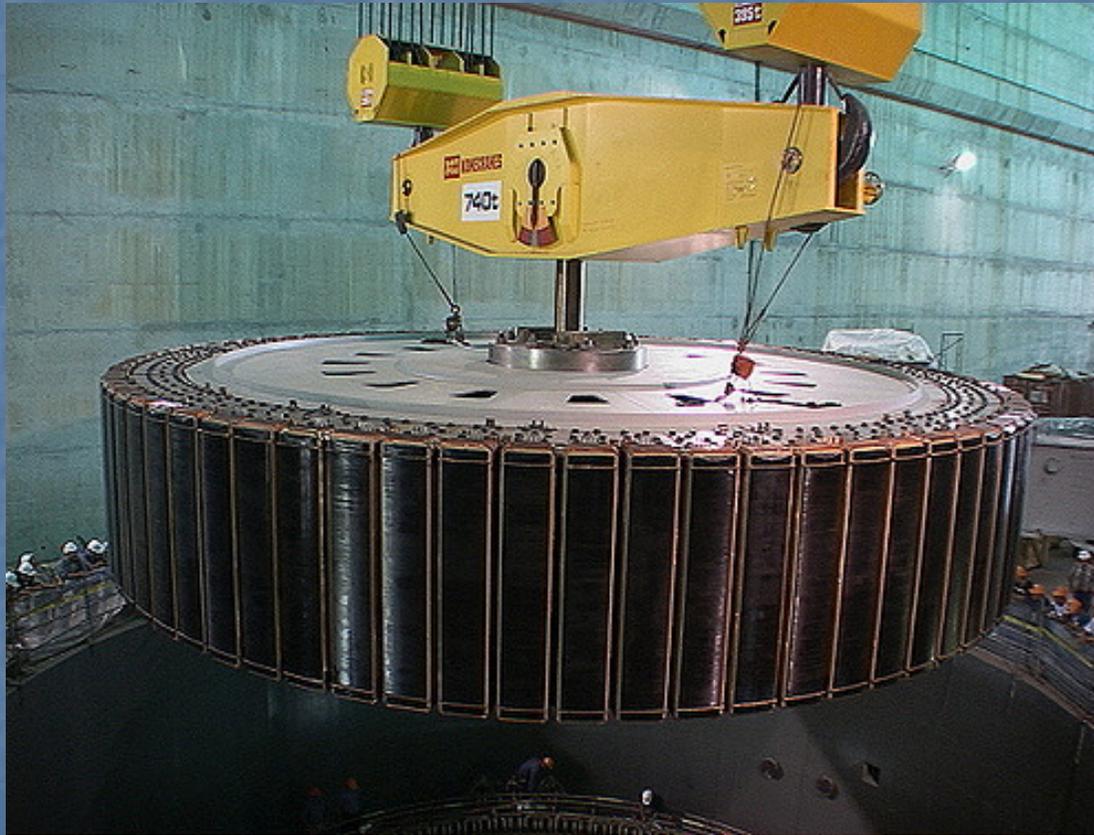
O Rotor de Polos Lisos: esquemáticamente

- Indutância Estator **Constante**
- Indutância Rotor **constante**
- Somente conjugado de mútua

$$C = i_1 i_2 \frac{dM}{d\theta}$$

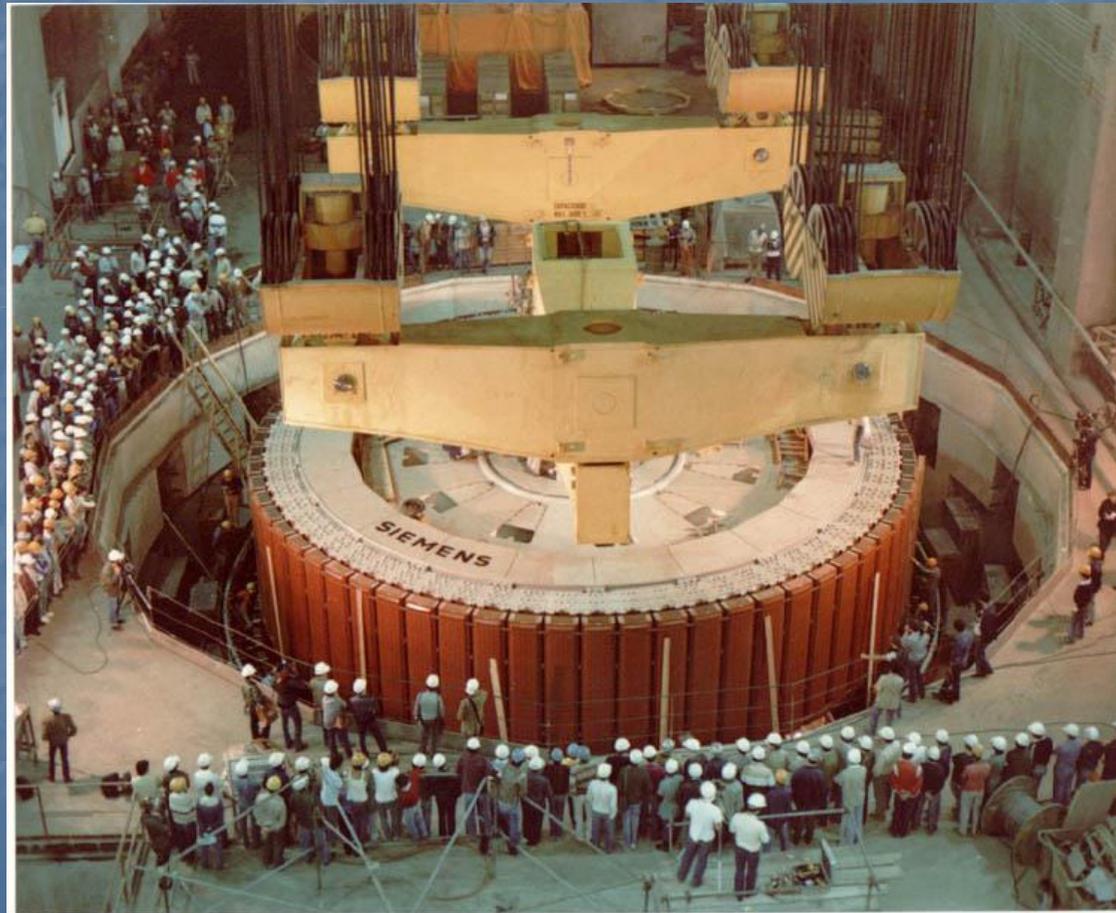


O Rotor de Polos Salientes



76 polos
Em geral para
Hidrogeradores

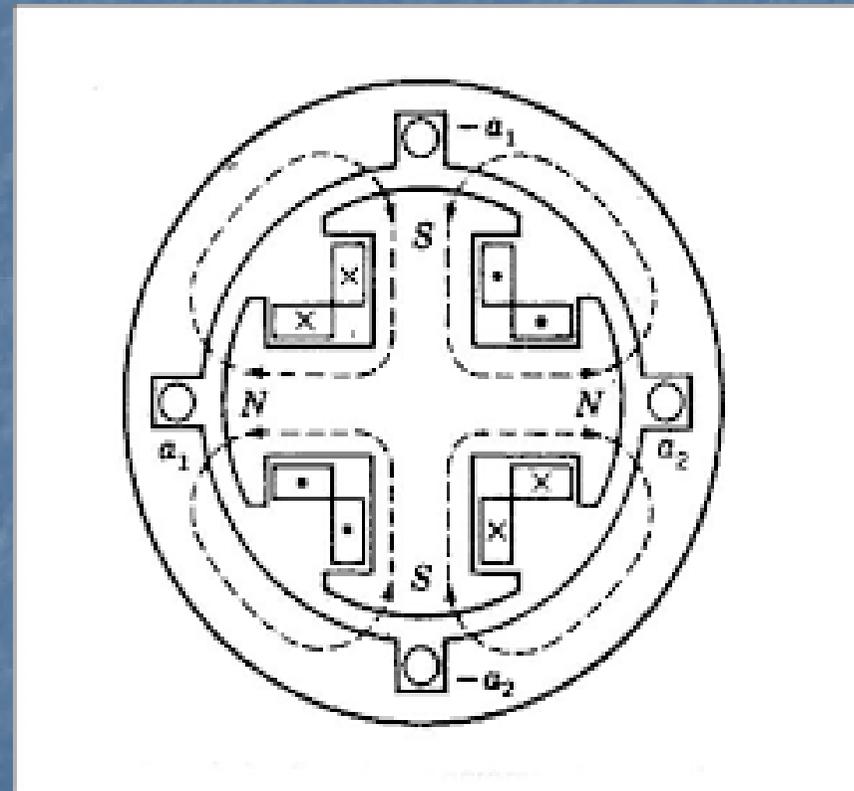
Máquina de Itaipu



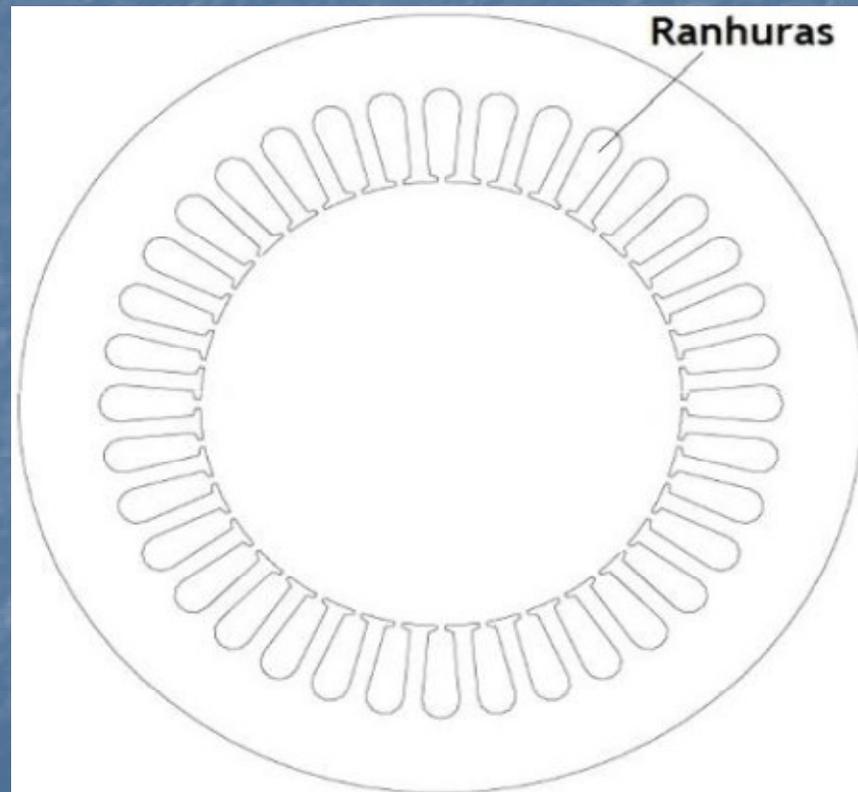
O Rotor de Polos Salientes: desenho esquemático

- Indutância Estator **Variável**
- Indutância Rotor **Constante**
- Conjugado de Relutância e de Mútua

$$C = \frac{1}{2} i_1^2 \frac{dL_1}{d\theta} + i_1 i_2 \frac{dM}{d\theta}$$



As Chapas do Estator



A montagem do Enrolamento do Estator



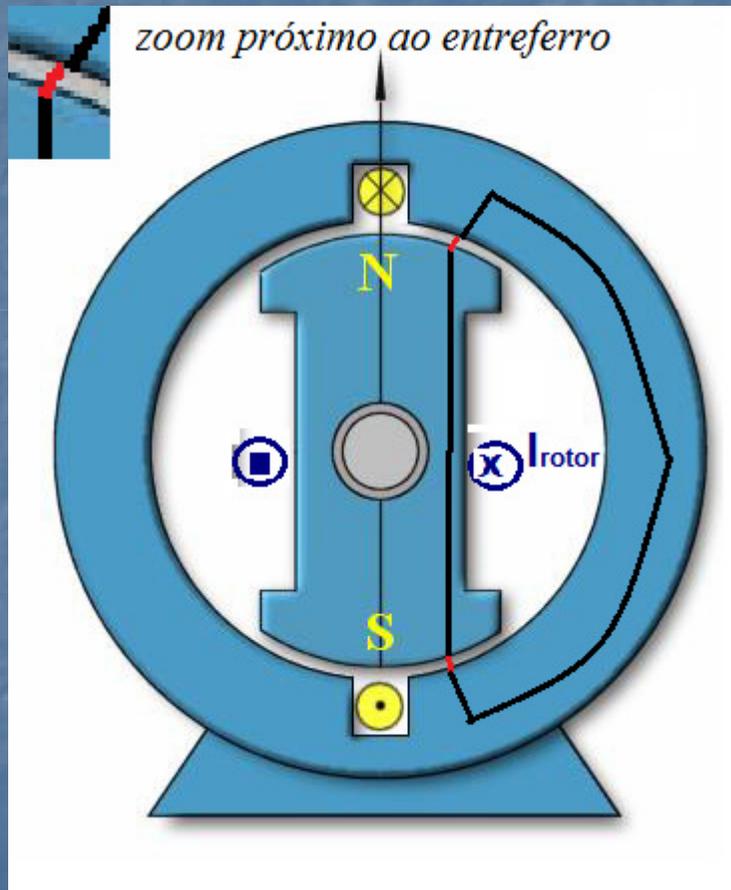
Uma típica bobina do estator



Montagem das Bobinas no Estator



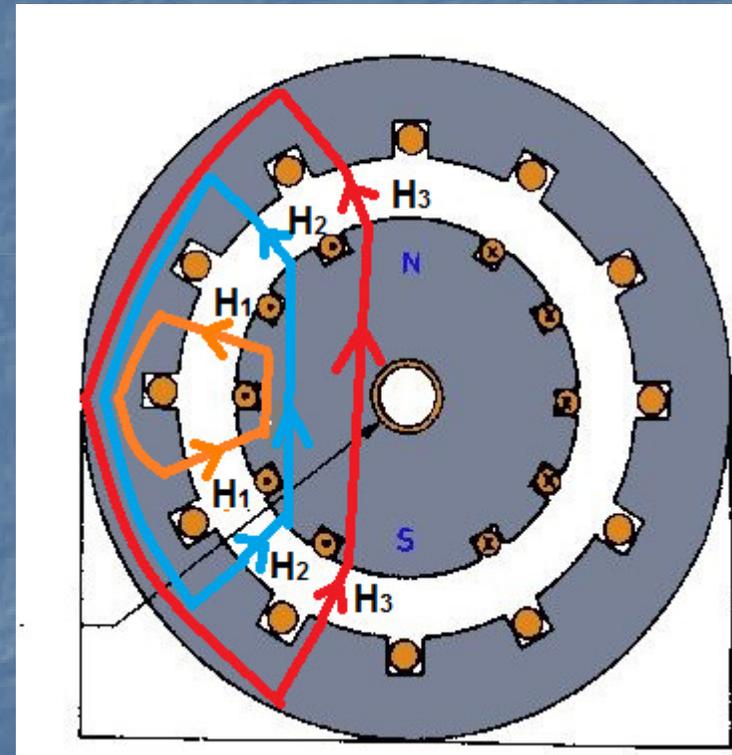
B espacial cossenoidal → Polos Salientes



- **Hipótese:** $\mu_{\text{ferro}} \rightarrow \infty$.
- Logo:
- $2 H_{\text{entreferro}}(\theta) e = NI$
 - I (rotor) constante (DC)
 - N – Número de espiras Rotor
- Para $H(\theta) \rightarrow$ cossenoidal
- $e(\theta) = k / \cos(\theta)$

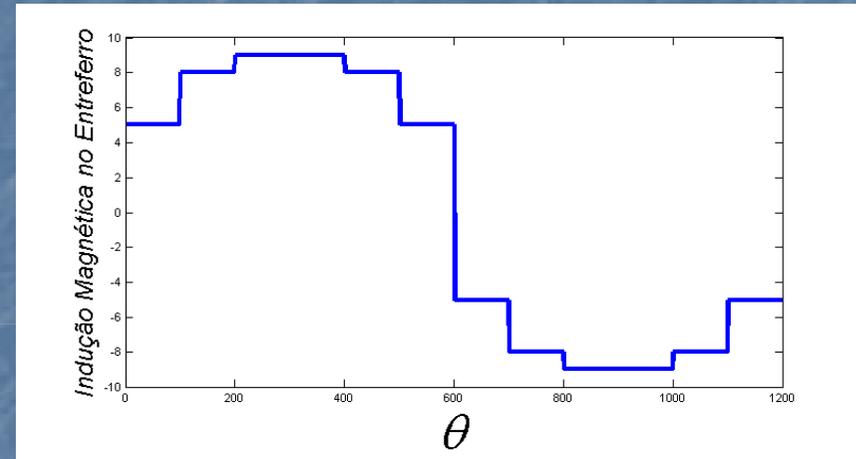
B espacial cossenoidal → Polos Lisos

- Na circuitação 1
 - $2H_1 e = N_1 I$
- Na circuitação 2
 - $2H_2 e = (N_1 + 2N_2) I$
- Na circuitação 3
 - $2H_3 e = (N_1 + 2N_2 + 2N_3) I$
- Como escolher N_1, N_2 e N_3 ?



B espacial cossenoidal p/ Polos Lisos: a escolha de N_1, N_2 e N_3

- Na circuitação 1
 - $2B_1 e = \mu_0 N_1 I$
- Na circuitação 2
 - $2B_2 e = \mu_0 (N_1 + N_2) I$
- Na circuitação 3
 - $2B_3 e = \mu_0 (N_1 + N_2 + N_3) I$

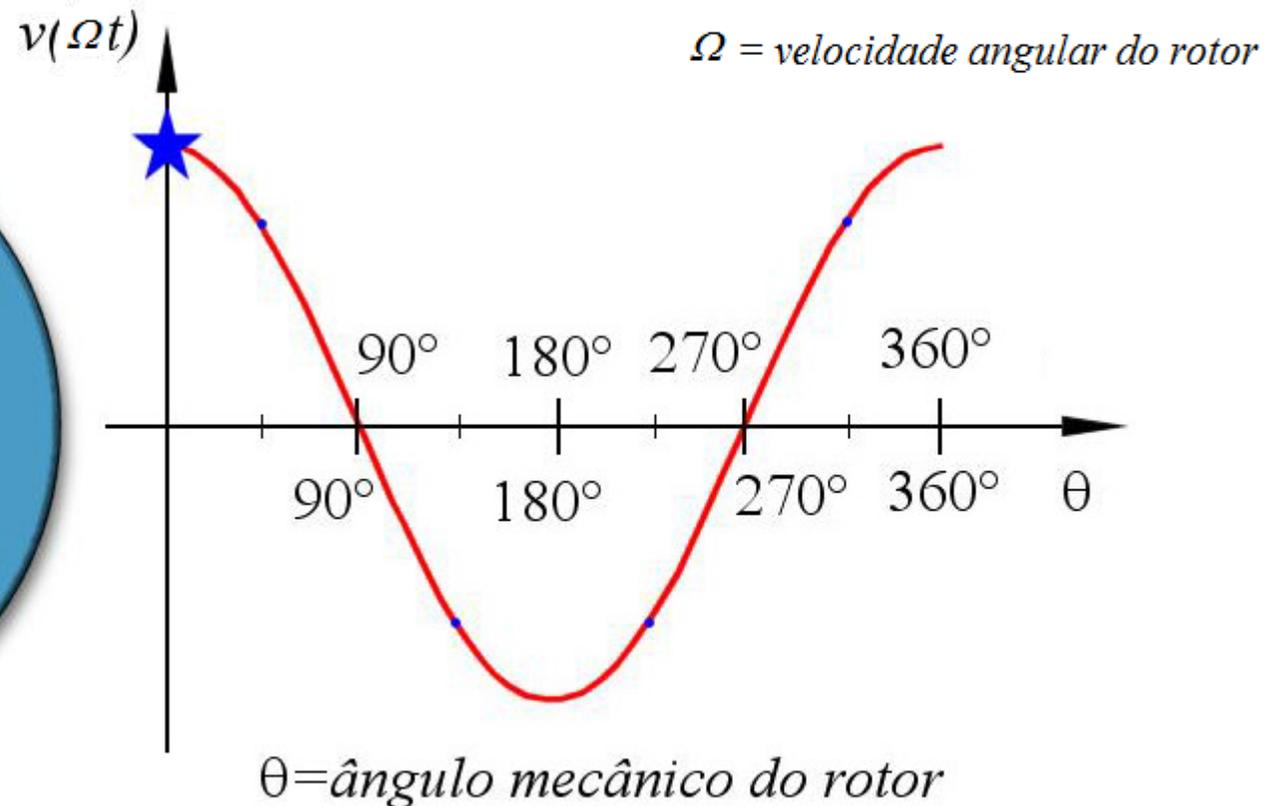
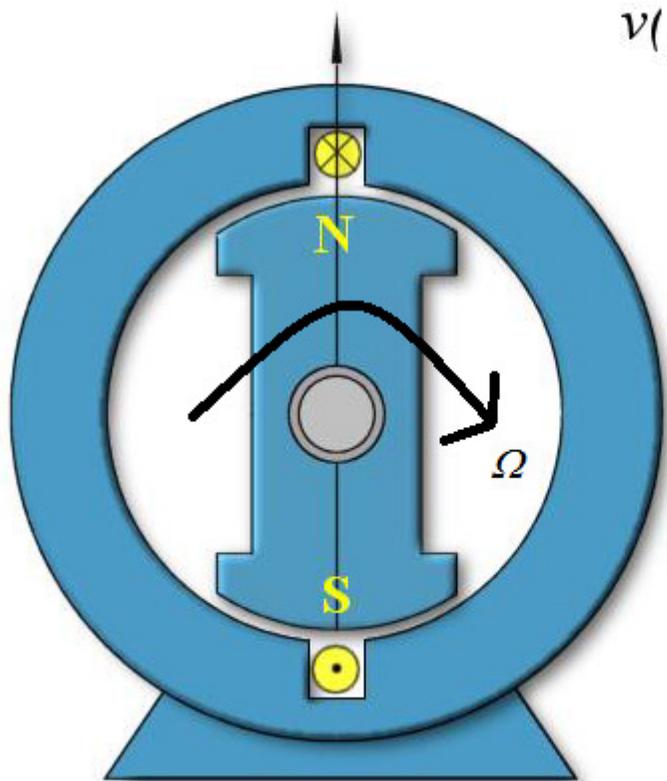


Para obter uma senoide:

- N_1 grande \rightarrow variação grande de B
- N_2 médio \rightarrow variação média em B
- N_3 pequeno \rightarrow variação pequena em B:

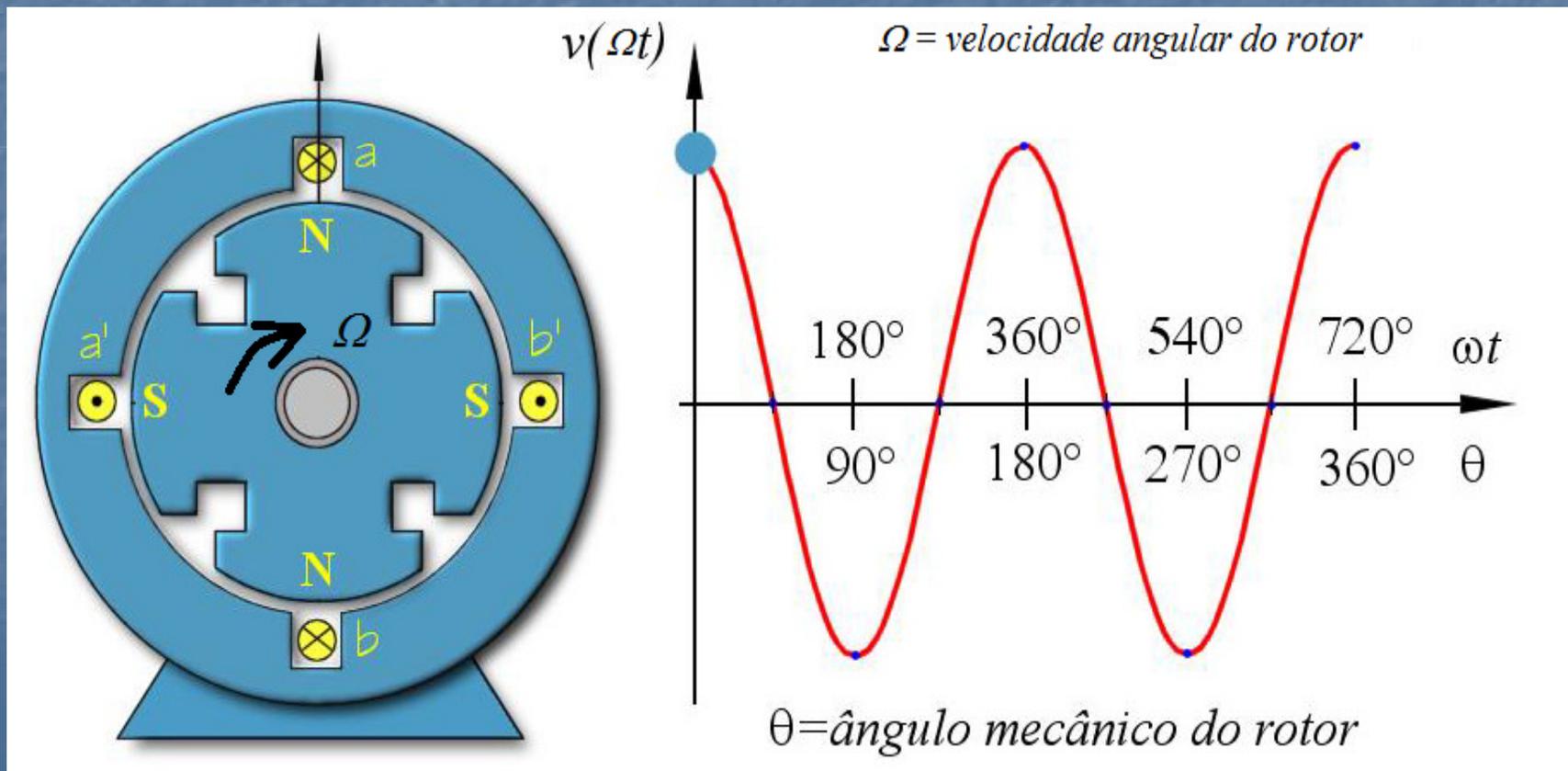
Máquina Síncrona: frequência e a tensão induzida no estator **2 polos**

- Se B no entreferro for cossenoidal...



Máquina Síncrona: frequência e a tensão induzida no estator **4 polos**

- Se B no entreferro for cossenoidal...



Frequência da Tensão Induzida

- Pode-se perceber que para uma mesma velocidade de rotação:
 - A frequência das tensões induzidas no estator para o caso de quatro polos é o dobro da frequência das tensões induzidas para dois polos.
- Para dois polos $f = n = \Omega/2\pi$
- Para quatro polos $f = 2n = 2\Omega/2\pi$

Generalizando: Frequência da Tensão Induzida

- $f = pn$
 - f (frequência) em Hz
 - n (rotação por segundo) em rps
 - p = número de pares de polos
- Para Altas Rotações
 - Poucos polos (2 ou 4). Polos Lisos → Turbogeneradores
- Para Baixas Rotações
 - Muitos polos. Polos Salientes → Hidrogeradores

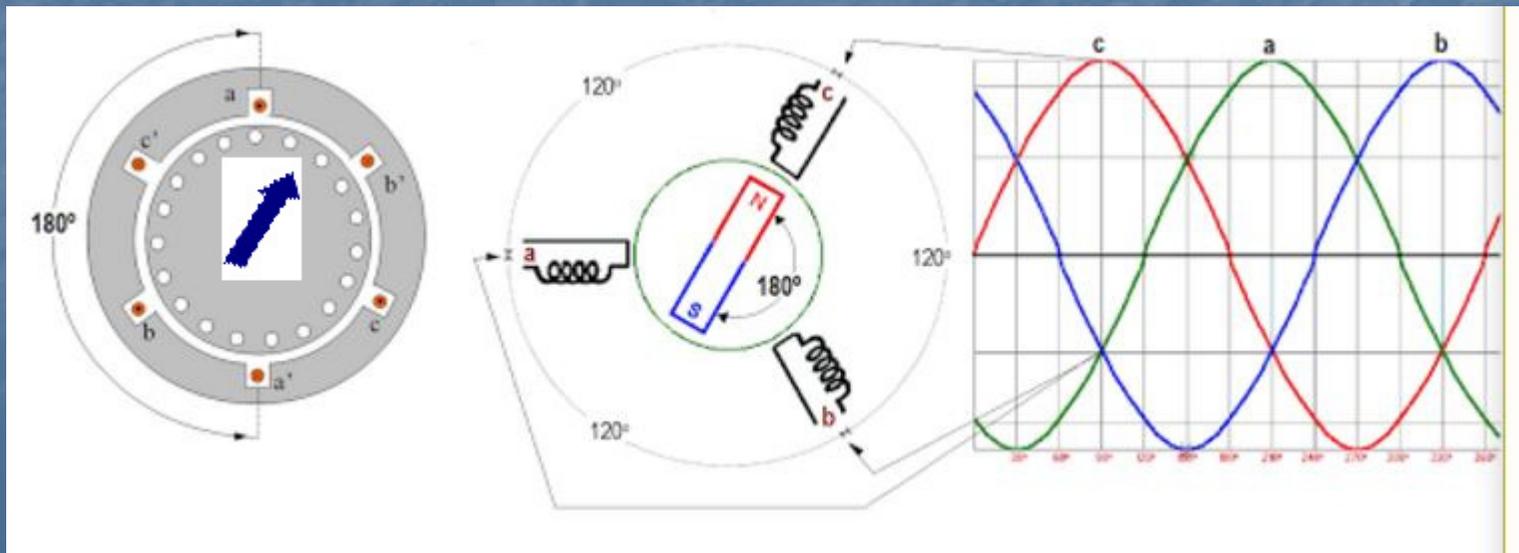
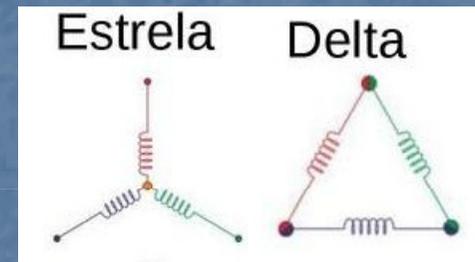
Tensão Induzida

- O Fluxo varia **senoidalmente** no tempo.
- Logo, a tensão induzida pode ser posta na forma:
- Note que a tensão aumenta se:
 - a rotação aumenta ($f=pn$)
 - a corrente de excitação (DC) aumenta, ou seja o fluxo aumenta

$$E = 4.44 fN\phi$$

O Enrolamento do Estator ou o Enrolamento Trifásico

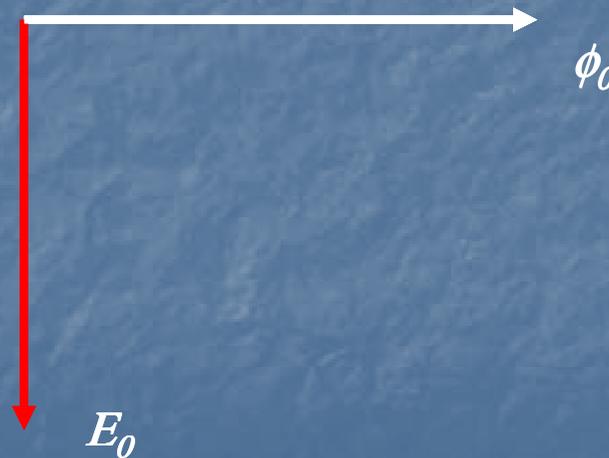
- O conceito:
 - Três bobinas defasadas no **espaço** de 120°
 - Ligadas em Estrela ou Delta
 - Três tensões de mesma amplitude, mas defasadas no **tempo** de 120°



O circuito equivalente

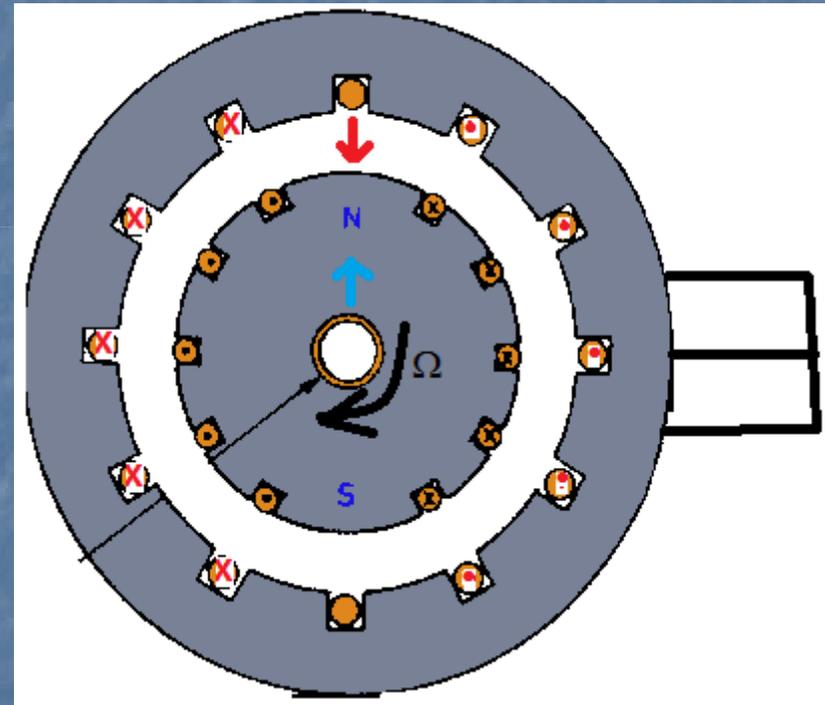
- Supõe-se carga equilibrada, logo basta representar uma única fase.
- Em vazio

$$E_0 = -jN\omega\phi_0$$



Em curto-circuito trifásico

- Antes do curto no estator, não se tem corrente, apenas corrente de campo e fluxo do rotor ϕ_0
- Após o curto, surgem correntes no estator (I_a) que tendem a anular a ação do fluxo ϕ_0 : o fluxo ϕ_a



Proposta de Circuito Equivalente por fase para a Máquina Síncrona

- “Equivalente Thévenin da Maq. Síncrona”
- Qual o valor da impedância Z do circuito equivalente por fase?
- Como determinar E_0 ?

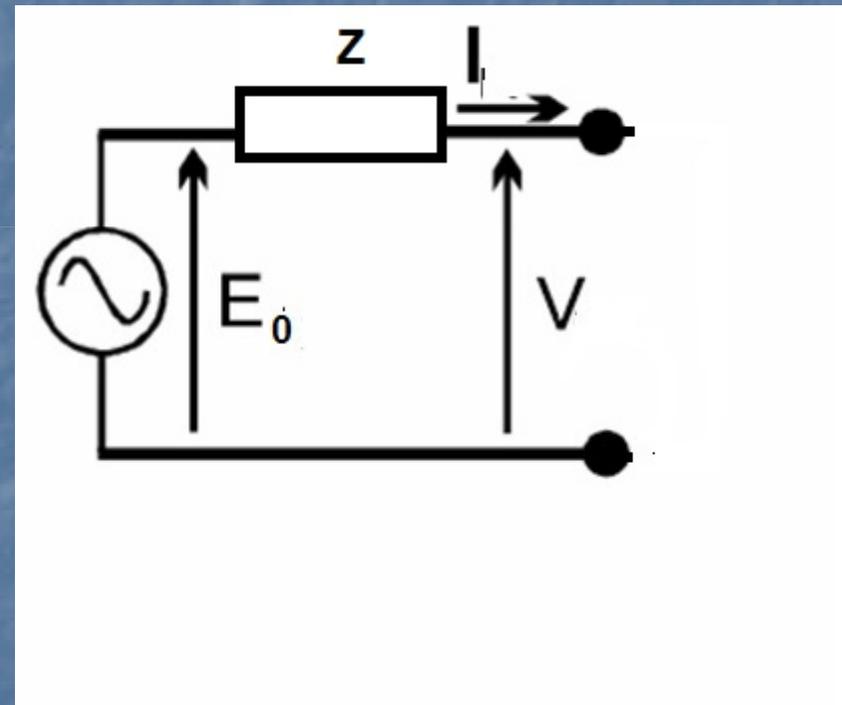
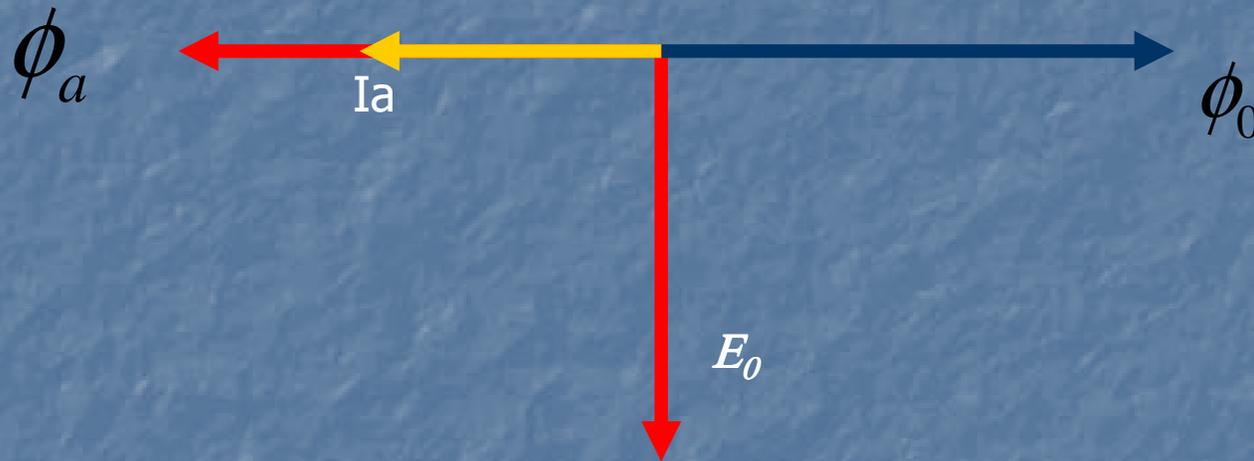
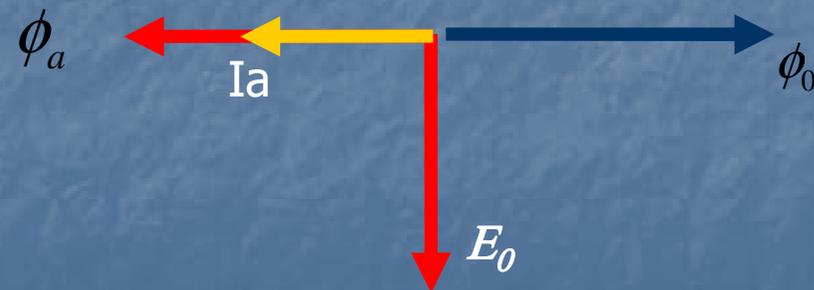
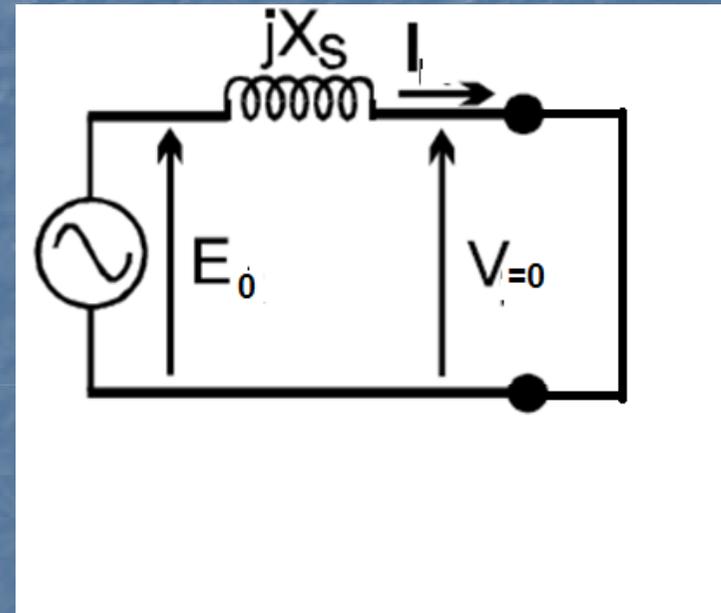


Diagrama de Fasores para a Máquina Síncrona em Curto



Circuito Equivalente em Curto

- Em vazio: E_0
- Em curto: I
- Qual o valor da impedância Z ?
- Como E_0 e I estão defasados de 90° , quando a máquina está em curto, então a impedância (por fase) é uma reatância indutiva.



Reatância Síncrona

- Denomina-se X_s como reatância síncrona
- X_s não é o mero produto da indutância própria de uma fase por ω .
- Note que ela representa a ação conjunta das três fases

