

Máquinas Síncronas

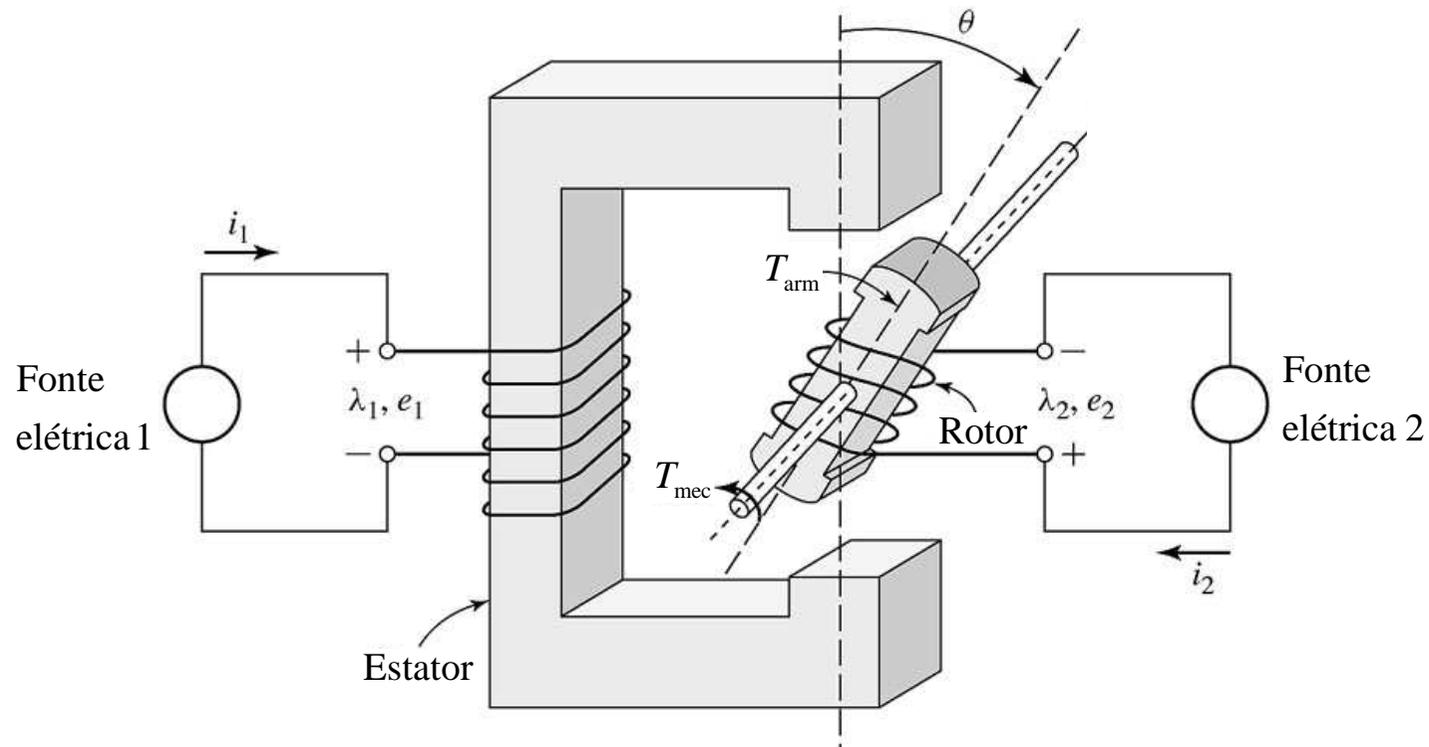
- Motivações para o estudo de máquinas síncronas.
- Introdução.
- Tensão induzida.
- Gerador e Motor síncrono.
- Circuito equivalente.
- Comentários gerais.
- Curiosidade.

Motivações

- Por que precisamos estudar este tópico?
 - As máquinas síncronas são as mais importantes fontes de geração de energia elétrica.
 - Aproximadamente +99 % de toda a potência é gerada por máquinas síncronas.
 - Entender os aspectos básicos do funcionamento da operação das máquinas síncronas.

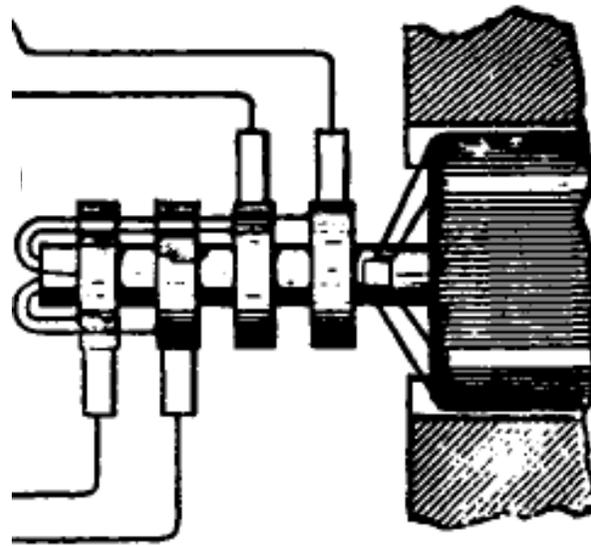
Introdução (1/2)

- A maior parte dos conversores eletromecânicos de energia de alta potência são baseados em movimento rotacional.
- São compostos por duas partes principais:
 - Parte fixa, ou **ESTATOR**
 - Parte móvel, ou **ROTOR**



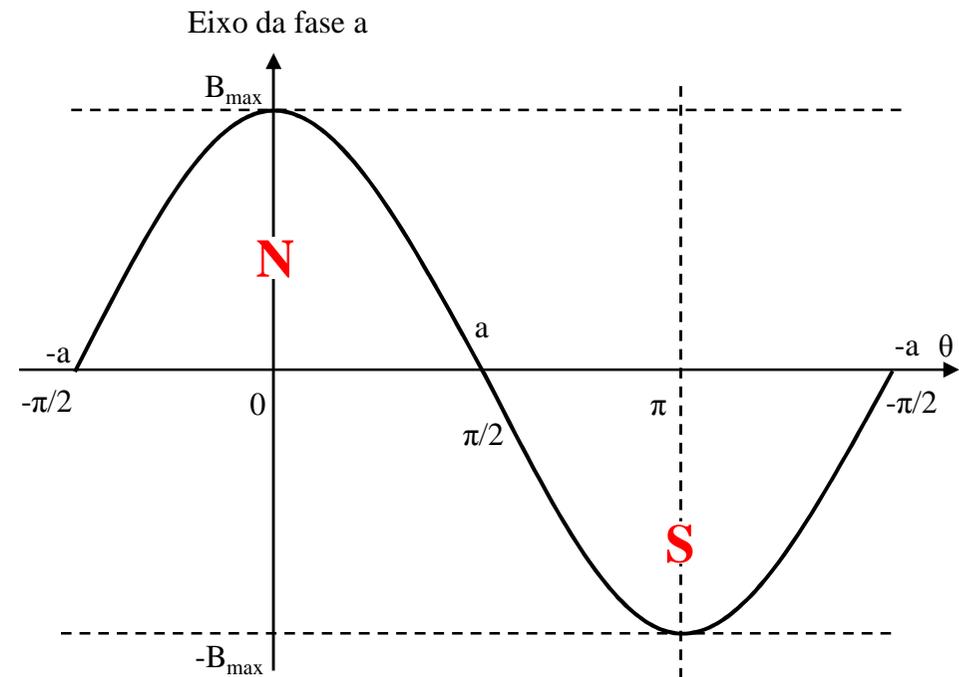
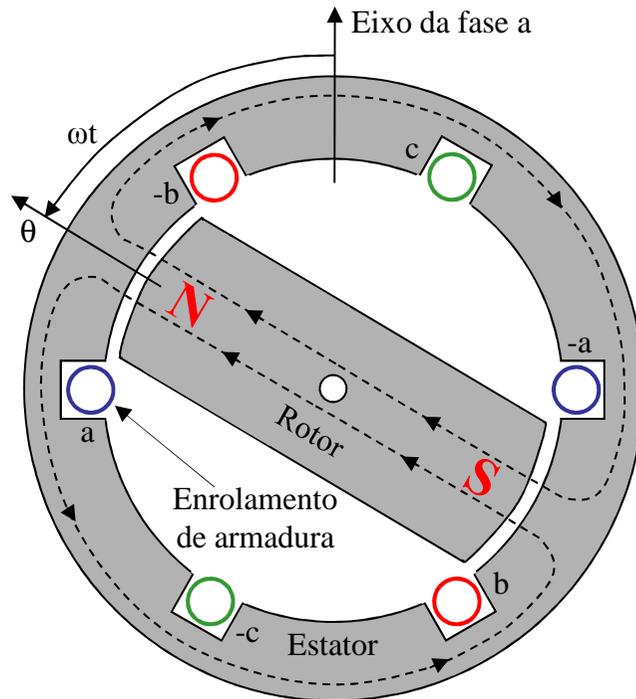
Introdução (2/2)

- O rotor é montado sobre um eixo, e é livre para girar entre os pólos do estator.
- De forma geral existem enrolamentos transportando corrente elétrica tanto no estator como no rotor.
- O enrolamento do rotor pode ser alimentado através de anéis coletores e escovas de grafite.



Tensão induzida

- Um campo magnético girante pode ser criado pela rotação de um par magnético.



- O campo girante induzirá tensões nos enrolamentos a-a, b-b e c-c.
- As tensões induzidas podem ser obtidas da lei de indução de Faraday.

Tensão induzida

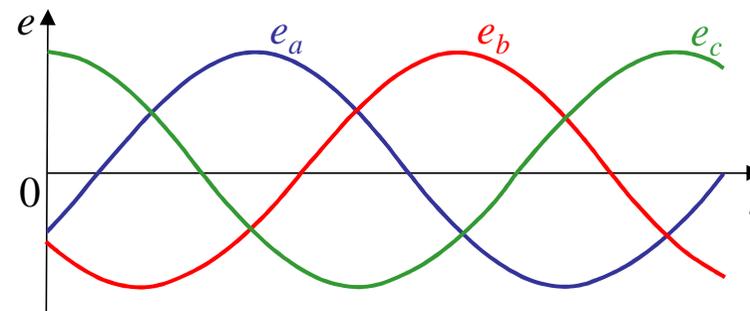
- À medida que o rotor gira, o fluxo magnético concatenado varia senoidalmente entre os eixos magnéticos das bobinas do estator (defasadas de 120° geométricos) e do rotor.
- Se o rotor está girando a uma velocidade angular constante ω_m , pela lei de indução de Faraday, a tensão induzida na fase “a” é:

$$e_a = E_{\max} \sin \omega_m t$$

- A tensão induzida nas outras fases são também senoidais, mas defasadas 120° elétricos em relação a da fase “a”.

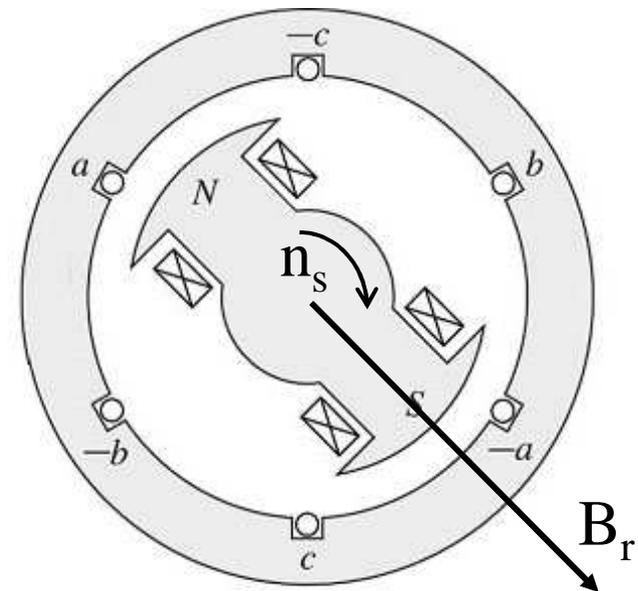
$$e_b = E_{\max} \sin(\omega_m t - 120^\circ)$$

$$e_c = E_{\max} \sin(\omega_m t + 120^\circ)$$



Gerador síncrono

- Estator com três enrolamentos defasados de 120° geométricos.
- Rotor constituído por um enrolamento energizado em corrente contínua (fonte cc externa), produzindo um campo constante no entreferro (B_r) é colocado em movimento por uma máquina primária (turbina hidráulica, gás ou vapor) de forma que B_r tenham um movimento relativo aos enrolamentos do estator.
- Devido ao movimento relativo de B_r , a intensidade do campo magnético que atravessa os enrolamentos do estator irá variar no tempo. E pela lei de Faraday, teremos uma tensão induzida nos terminais dos enrolamentos do estator.
- A frequência elétrica da tensão induzida está “sincronizada” com a velocidade mecânica.



Velocidade síncrona

- Velocidade síncrona: Velocidade do campo girante em uma máquina multi-pólos:

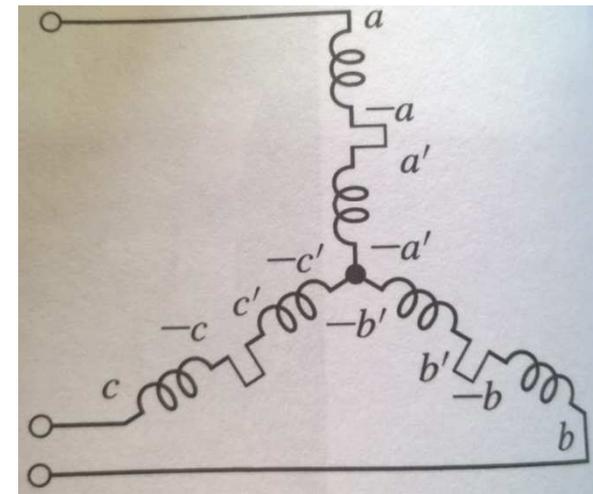
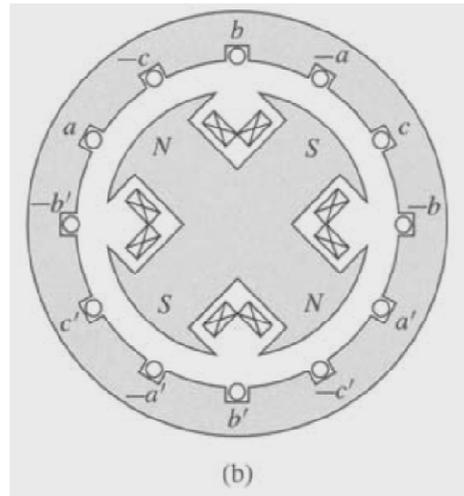
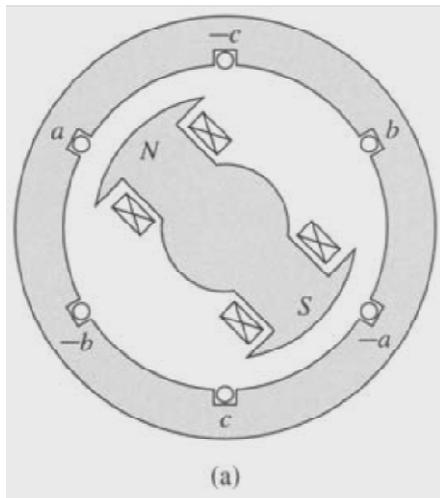
$$n_s = \frac{120 \cdot f_e}{P} \text{ (rpm)} \quad \Leftrightarrow \quad n_s = n_m \text{ (Máquina Síncrona)}$$

- Campo girante é uma onda de f.m.m. que se desloca ao longo do entreferro com velocidade síncrona $120f/P$ formando “P” pólos girantes ao longo do entreferro;
- Considerando a frequência de alimentação de 60 Hz pode-se montar a seguinte tabela:

Nº pólos	2	4	6	8
n_s (rpm)	3.600	1.800	1.200	900

Gerador síncrono

- Se os terminais dos condutores alimentam uma carga elétrica surgirá uma corrente, fornecida pelo gerador elétrico.
- O enrolamento do estator (armadura) é trifásico e distribuído e é ligado diretamente à carga;

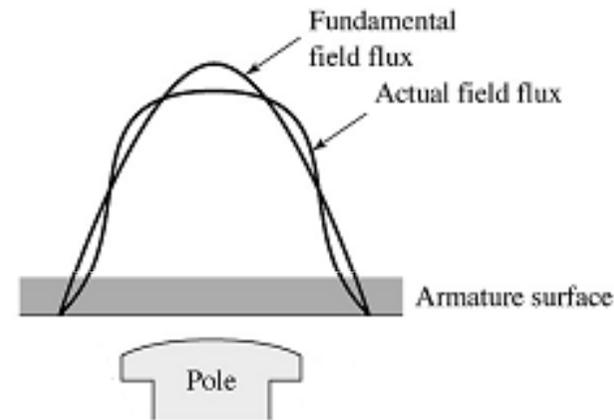
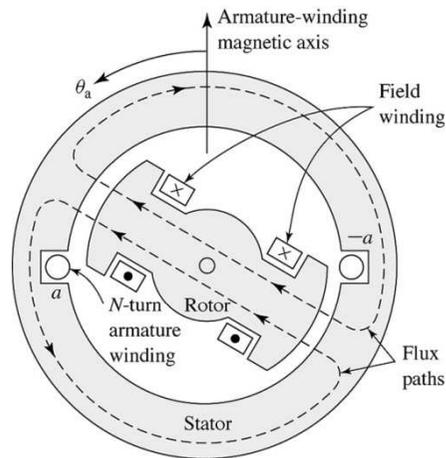


- Os enrolamentos da armadura são posicionados com diferença angular de 120° , de forma que a tensão induzida nos três enrolamentos serão defasadas de 120° ;
- Pode ser conectado em Y ou em Δ ;

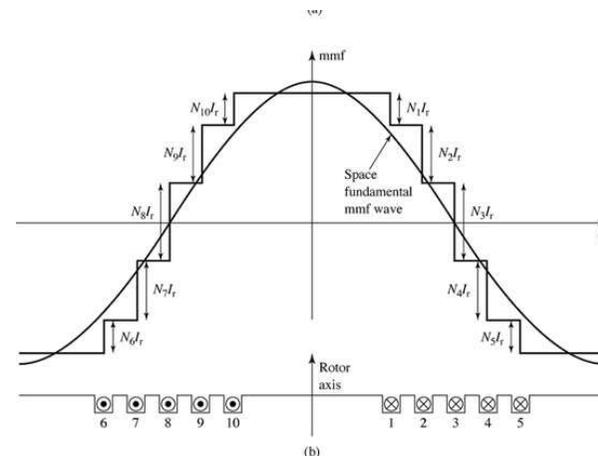
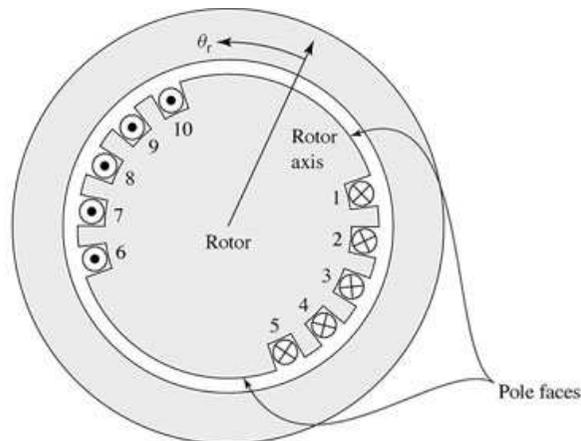
Gerador síncrono

- O enrolamento de campo (do rotor) é alimentado em CC e produz campo aproximadamente senoidal no entreferro;

Pólos Salientes: através de gap variável nas faces polares;



Pólos lisos: através da distribuição das bobinas na superfície do rotor



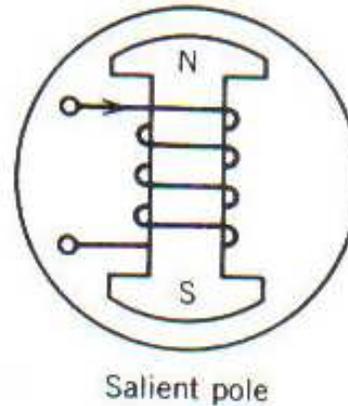
Gerador síncrono

- Máquinas com muitos pólos e baixa velocidade, em geral tem o rotor de pólos salientes;

diâmetro grande

comprimento pequeno

eixo vertical

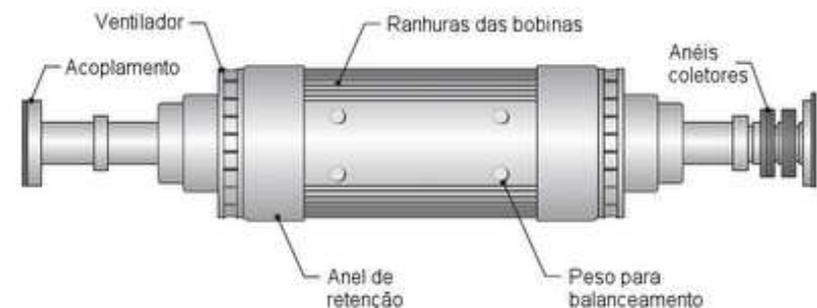
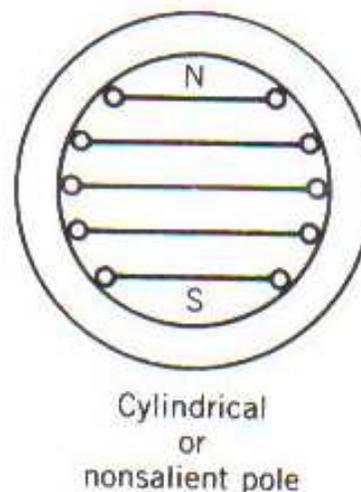


- Máquinas com poucos pólos e alta velocidade, em geral tem o rotor cilíndrico;

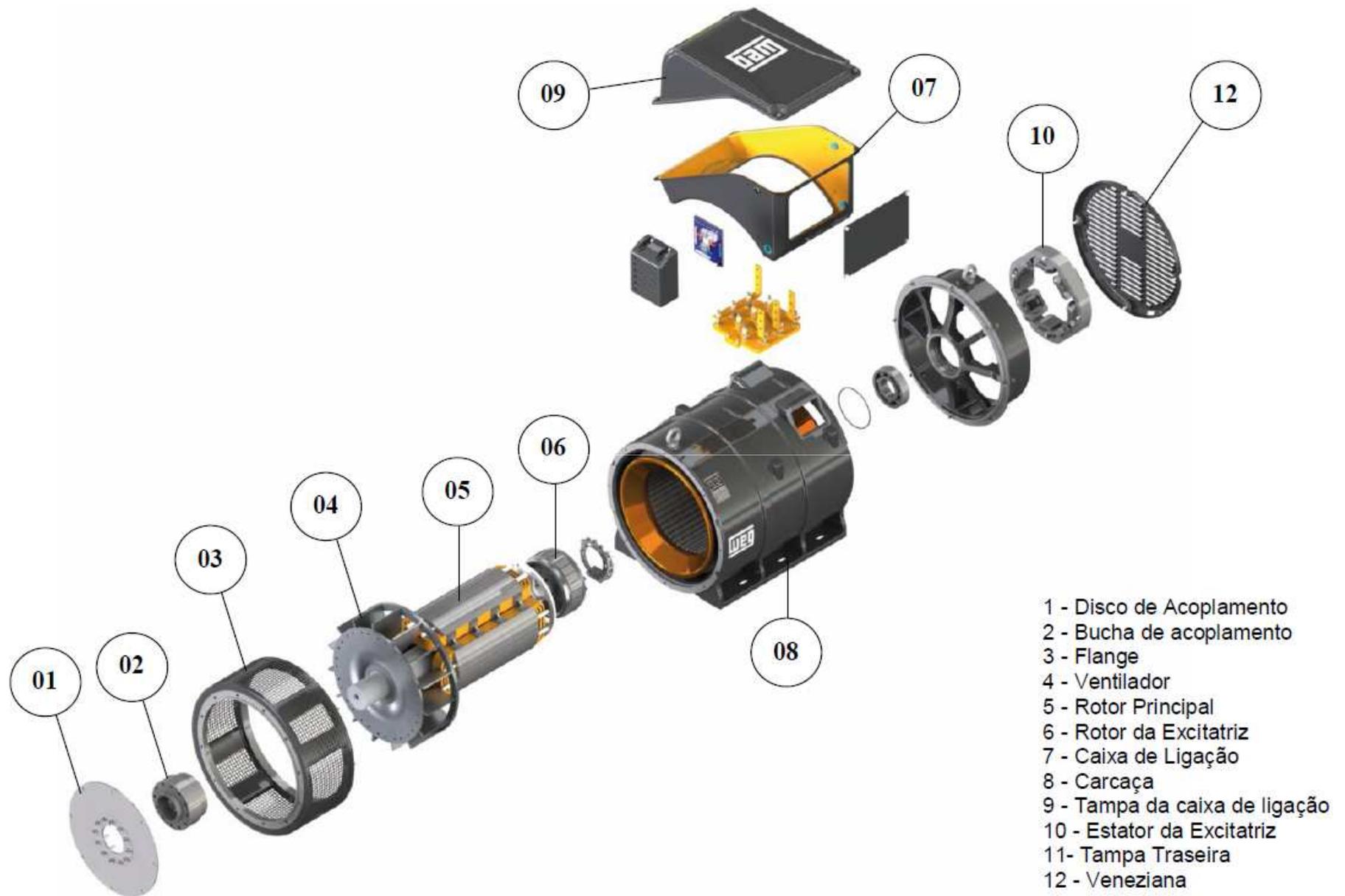
diâmetro pequeno

comprimento grande

eixo horizontal



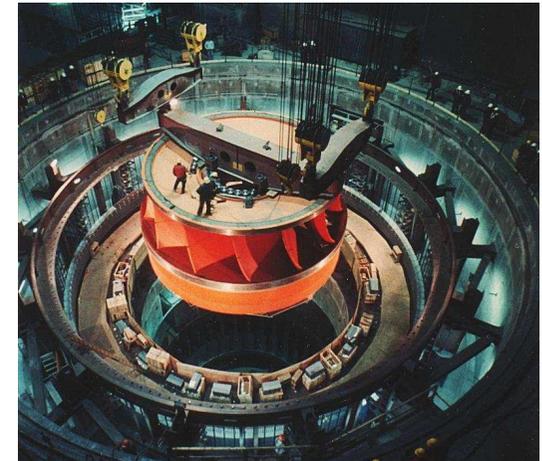
Gerador síncrono



Partes integrantes do gerador WEG Linha AG10 (modelo AG10 280).

Gerador síncrono

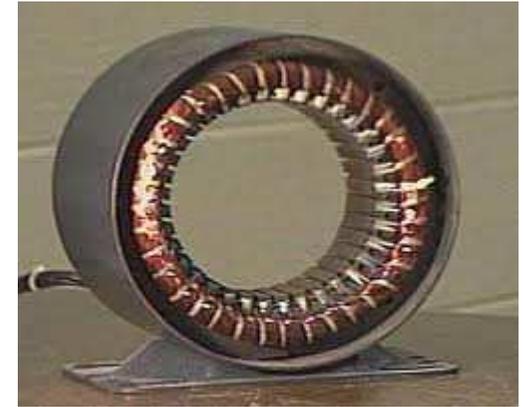
- Um dos tipos mais importantes de máquinas elétricas rotativas.
- Geradores síncronos são utilizados em usinas hidrelétricas e termelétricas.
 - Usinas hidrelétricas :
 - Máquinas de eixo vertical.
 - Rotor de pólos salientes e de grande diâmetro.
 - Grande número de pólos.
 - Velocidades de 100-360 RPM.
 - Usinas termelétricas:
 - Máquina de eixo horizontal.
 - Rotor cilíndrico e de pouco diâmetro.
 - Usualmente de 2 ou 4 pólos.
 - Velocidades de 1800-3600 RPM.



Animação Gerador Síncrono (alternador): <http://www.learnengineering.org/>

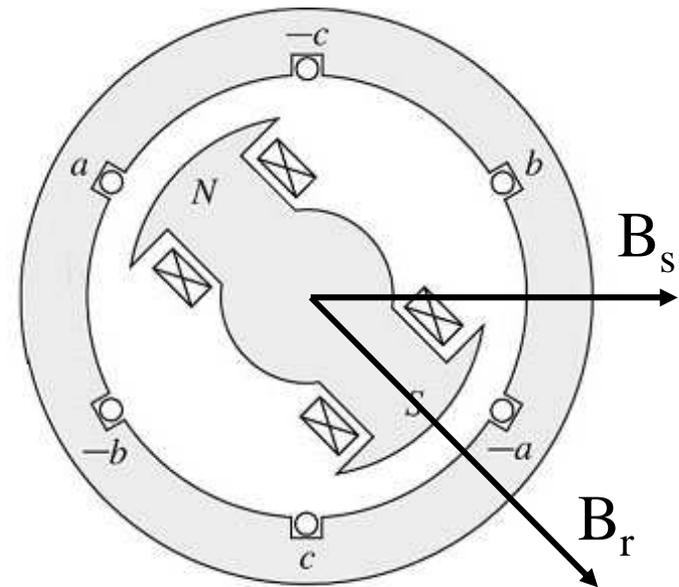
Motor síncrono

- Estator constituído por três enrolamentos defasados de 120 graus energizados por uma fonte trifásica.
- O fluxo produzido nos enrolamentos do estator (B_s) é girante com a velocidade síncrona da tensão de alimentação.



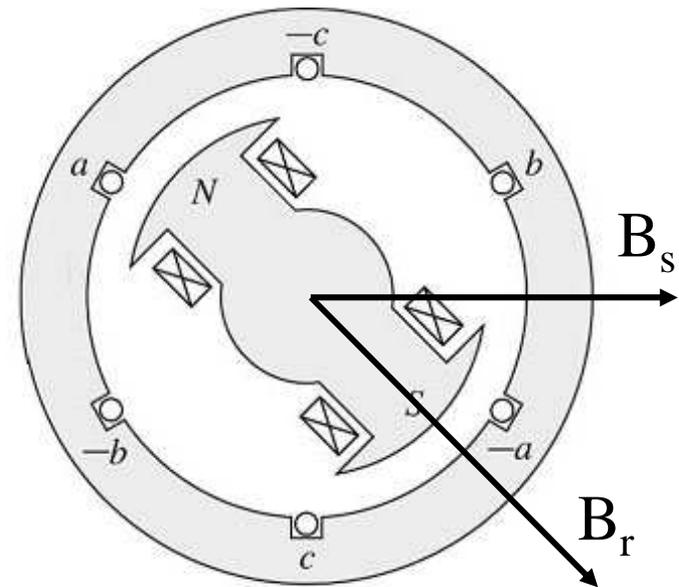
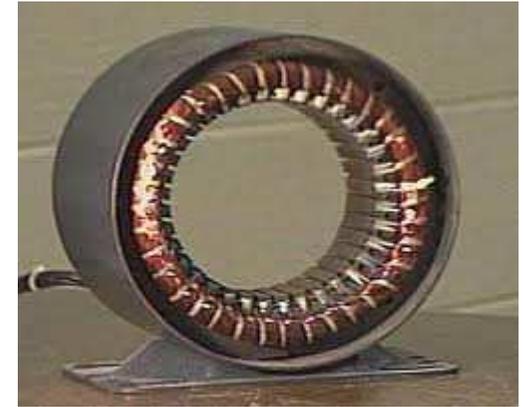
$$n_s = \frac{120 \cdot f_e}{P} \text{ (rpm)}$$

$$n_s = n_m \text{ (Máquina Síncrona)}$$



Motor síncrono

- Rotor constituído por um enrolamento energizado em corrente contínua (fonte cc externa), produzindo um campo constante no entreferro (B_r).
- Interação entre o campo girante produzido pelas correntes do estator (B_s) e o campo constante produzido pela corrente do rotor (B_r) produz conjugado (alternativamente: interação entre o campo girante e a corrente percorrendo os condutores do rotor).

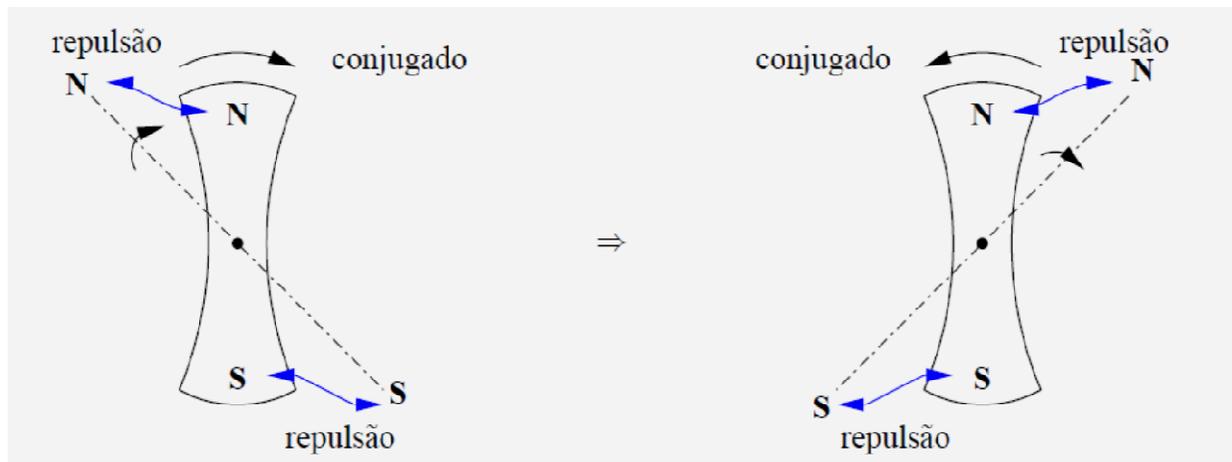


Motor síncrono

- Uma fonte de tensão trifásica é conectada aos três enrolamentos do estator produzindo um campo girante no entreferro (B_s).
- Uma fonte de corrente contínua é conectada ao enrolamento do rotor produzindo um campo no entreferro (B_r).
- A interação entre o campo magnético do estator (B_s) e do rotor (B_r) produzirá um conjugado mecânico que tentará alinhar os dois campos.
- Este conjugado mecânico fará com que o rotor gire na mesma velocidade do campo girante (B_s) mas com um atraso angular.
- O aumento da carga mecânica é refletido através de um aumento do ângulo entre os campos do estator e do rotor.
- Aplicações: em processos que demandam velocidade constante com carga variável; pode ser usado para fornecer compensação de potência reativa na indústria.

Motor síncrono

- A velocidade do rotor é constante e igual a velocidade do campo girante independentemente do conjugado mecânico.
- O motor síncrono não possui conjugado de partida (visto que no instante de partida o conjugado médio é nulo).

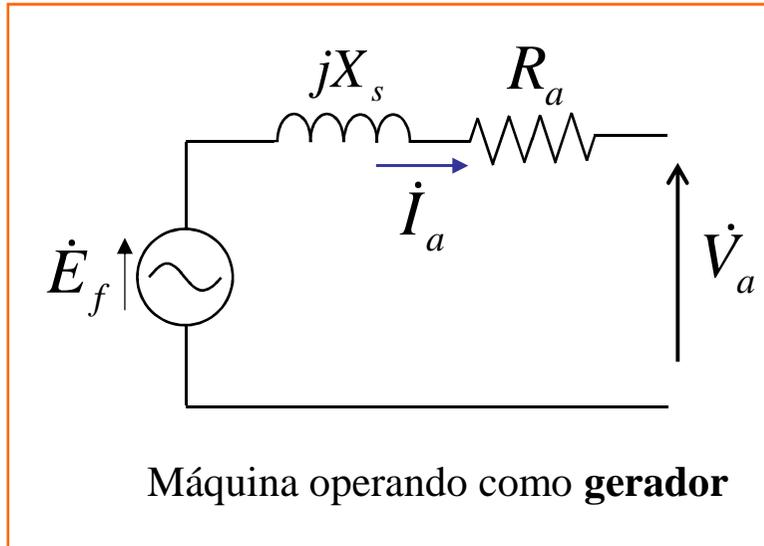


- Em máquinas comerciais usualmente há uma gaiola de esquilo no rotor para permitir a partida (não interfere na operação em regime)
- Devido ao campo do rotor ser fornecido através de uma fonte externa (independente) esta máquina pode operar com fator de potência indutivo, capacitivo ou unitário (sub/sobre-excitada)

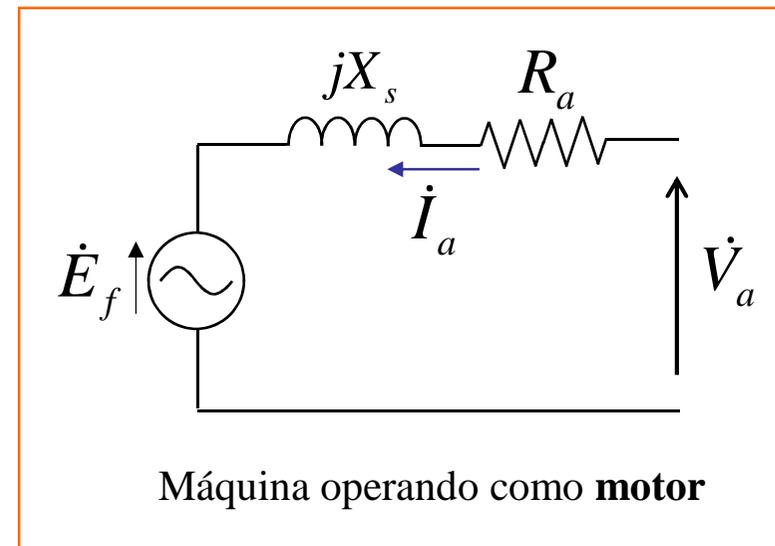


Animação Motor Síncrono: <http://www.learnengineering.org/>

Circuito equivalente



$$\dot{E}_f = R_a \dot{I}_a + jX_s \dot{I}_a + \dot{V}_a$$



$$\dot{V}_a = \dot{E}_f + R_a \dot{I}_a + jX_s \dot{I}_a$$

■ Em que:

\dot{E}_f : tensão interna (de excitação) da máquina síncrona.

\dot{V}_a : tensão nos terminais.

R_a : resistência do enrolamento de armadura.

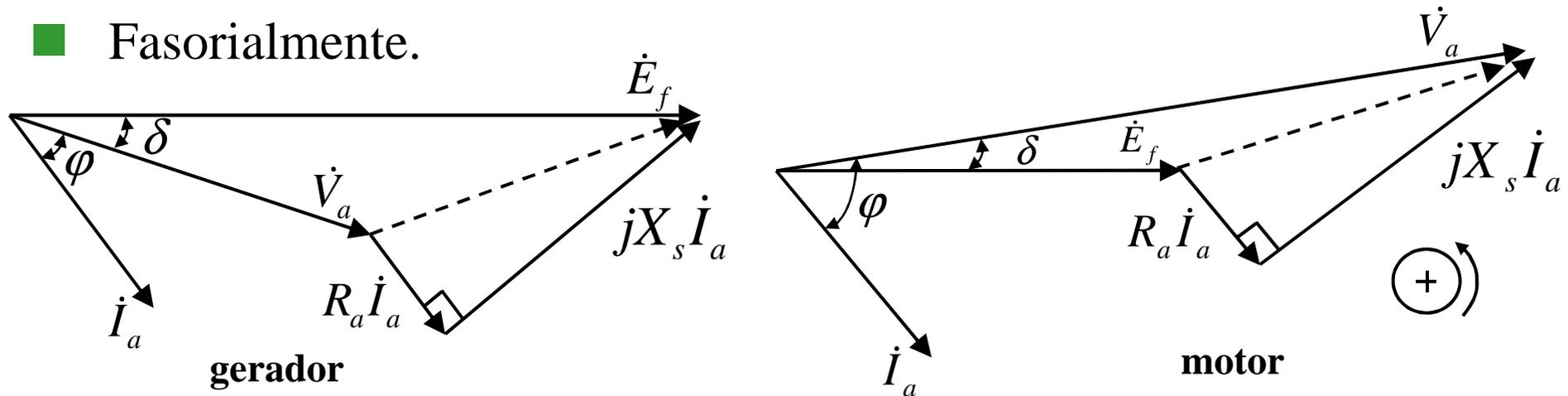
X_s : reatância síncrona.

Circuito equivalente

■ Gerador: $\dot{E}_f = R_a \dot{I}_a + jX_s \dot{I}_a + \dot{V}_a$

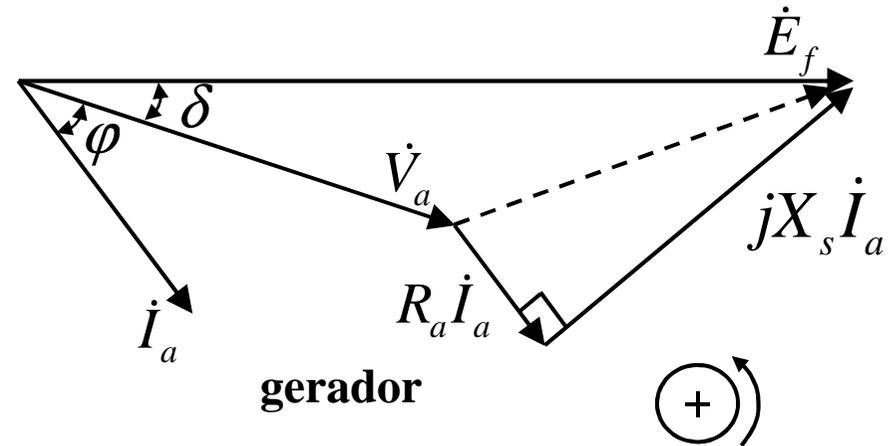
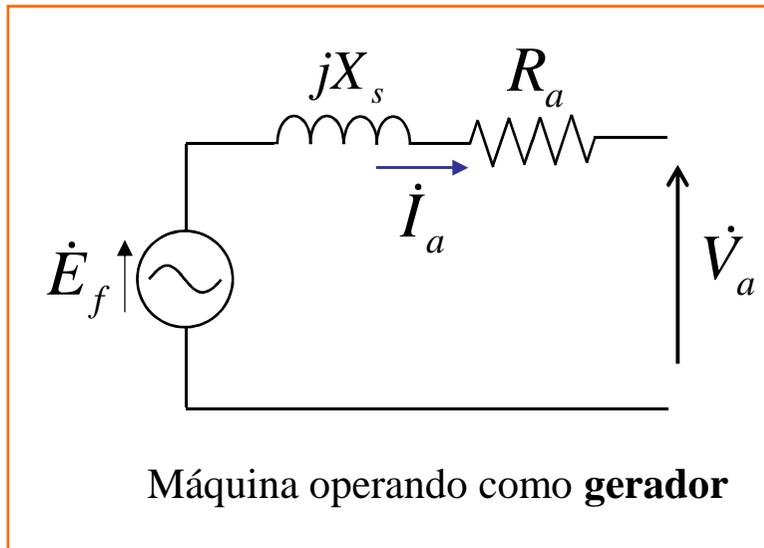
Motor: $\dot{V}_a = \dot{E}_f + R_a \dot{I}_a + jX_s \dot{I}_a$

■ Fasorialmente.



- O ângulo δ entre V_a e E_f define o ângulo de potência (de carga) da máquina;
- Quanto maior for o ângulo δ maior será a potência transferida para a rede pelo **gerador** ou maior será a carga no eixo do **motor** ;
- $\delta > 0$ para operação no modo **gerador** e $\delta < 0$ para operação no modo **motor**;
- $|E_f| > |V_a|$ no modo **gerador** (para fator de potência indutivo);
- $|E_f| < |V_a|$ no modo **motor** (para fator de potência indutivo);

GS – Características em regime permanente



$$\dot{E}_f = R_a \dot{I}_a + jX_s \dot{I}_a + \dot{V}_a$$

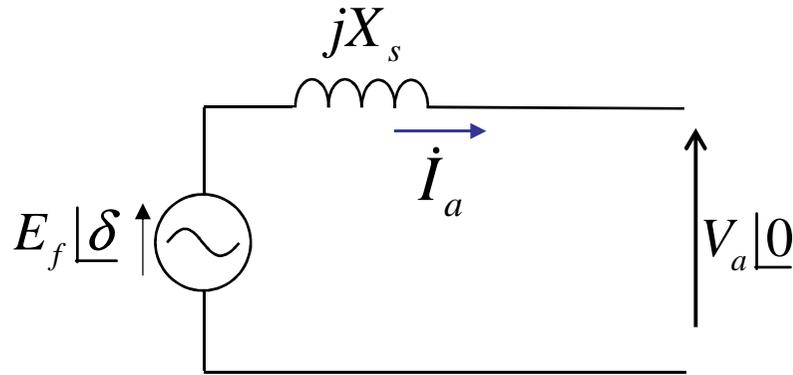
- **Regulação de Tensão:** Como no transformador podemos definir a regulação de tensão do gerador síncrono para determinada carga. Pode ser nula, positiva ou negativa dependendo do fator de potência e da carga.

$$R\% = \frac{E_f - V_a}{V_a} \times 100$$

- V_a : Valor eficaz da tensão terminal em carga (por fase);
- E_f : Valor eficaz da tensão de excitação em carga (por fase);

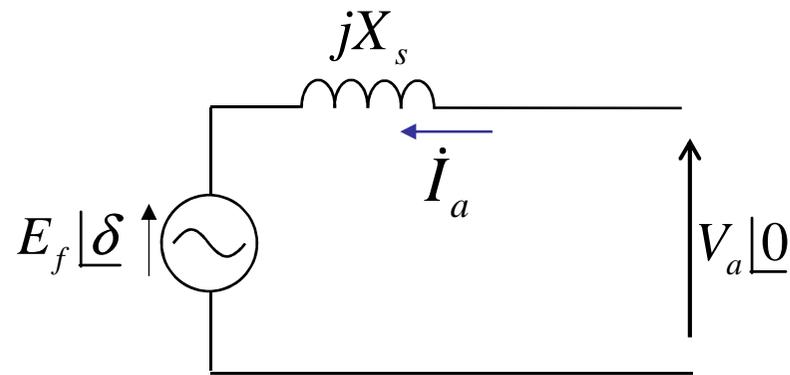
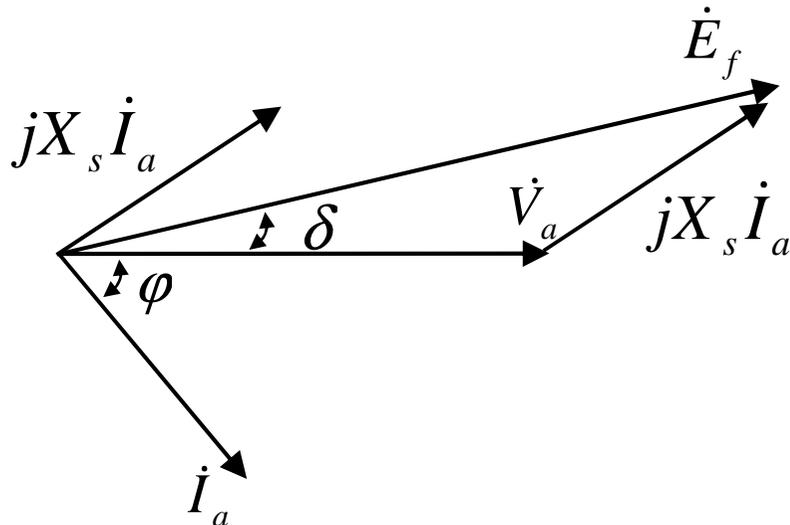
MS – Características em regime permanente

- Circuito equivalente em regime permanente, desprezando a resistência do estator.



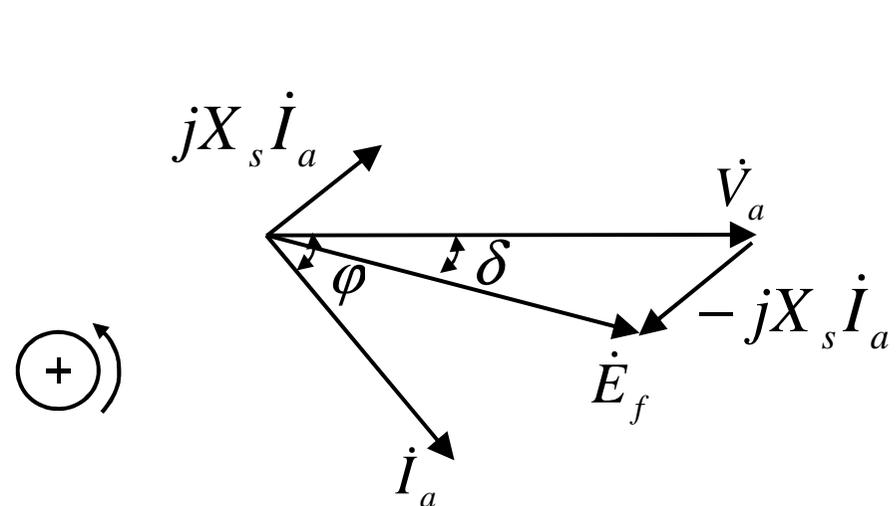
Máquina operando como **gerador**

$$\dot{E}_f = jX_s \dot{I}_a + \dot{V}_a$$

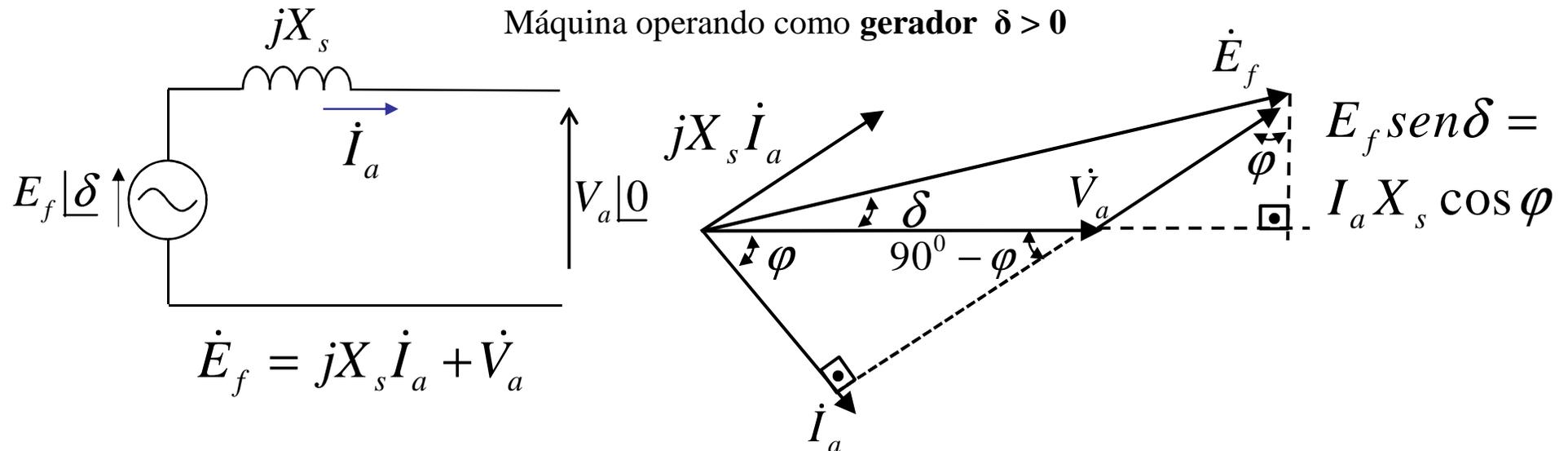


Máquina operando como **motor**

$$\dot{E}_f = \dot{V}_a - jX_s \dot{I}_a$$



MS – Potência em Regime Permanente



- Do diagrama fasorial temos:

$$E_f \sin \delta = I_a X_s \cos \varphi \Rightarrow I_a \cos \varphi = \frac{E_f \sin \delta}{X_s} \quad (1)$$

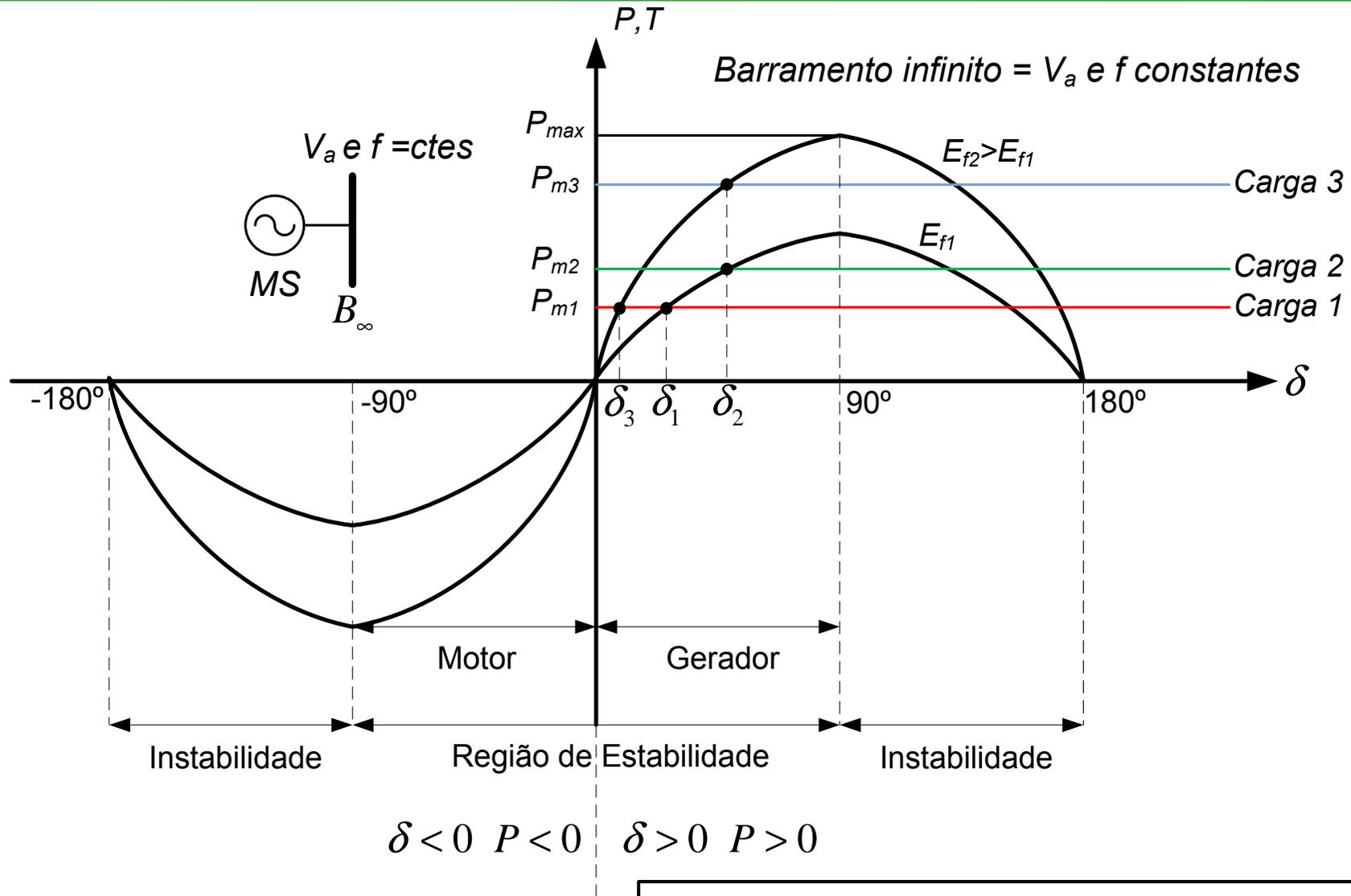
- A potência ativa desenvolvida pelo gerador por fase é dada por:

$$P = V_a I_a \cos \varphi \quad (2)$$

- Substituindo (1) em (2) temos:

$$P = \frac{V_a E_f \sin \delta}{X_s} \quad (3)$$

MS - Pólos Lisos - Operação em Regime Permanente



$$P = \frac{V_a E_f \text{sen} \delta}{X_s} \quad (3)$$

$P_a = P_m - P$ (Potência Acelerante)

$P_m > P \Rightarrow P_a > 0 \Rightarrow$ Máquina acelera $\Rightarrow \delta \uparrow$

$P_m < P \Rightarrow P_a < 0 \Rightarrow$ Máquina desacelera $\Rightarrow \delta \downarrow$

Gerador Síncrono – Fator de potência

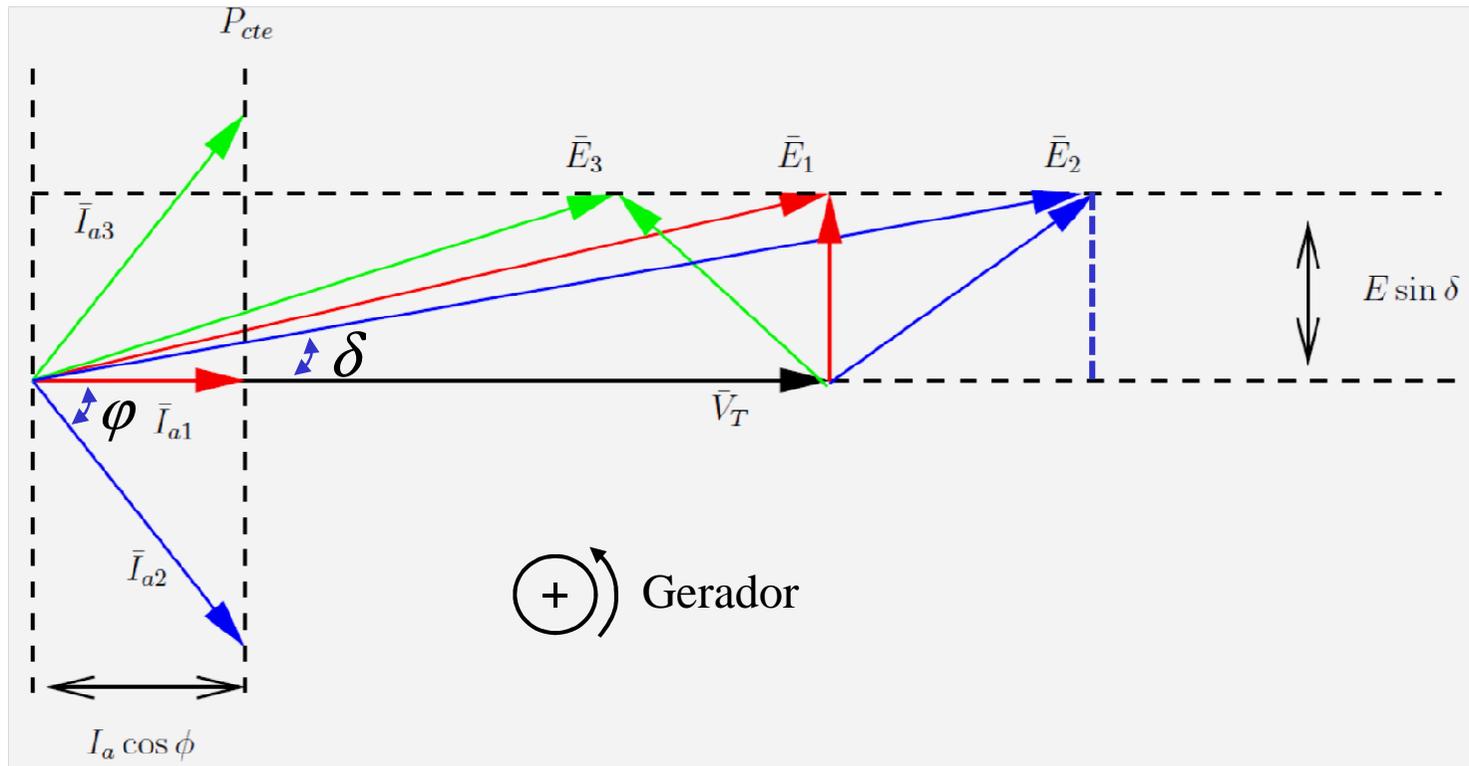
■ Controle de potência reativa (diagrama fasorial – potência ativa constante)

- Potência ativa constante $\rightarrow I_a \cos \phi = \text{constante}$ $P = V_T I_a \cos \phi$
 - Potência ativa constante $\rightarrow E \sin \delta = \text{constante}$ $P = \frac{V_T E}{X_S} \sin \delta$
- } Barramento infinito:
 V_T e f constantes

■ I_{a1} em fase com V_T (fator de potência unitário – $Q = 0$: excitação normal)

■ I_{a2} atrasado em relação à V_T (fator de potência indutivo – $Q > 0$: sobre-excitado)

■ I_{a3} adiantado em relação à V_T (fator de potência capacitivo – $Q < 0$: subexcitado)



Motor Síncron – Fator de potência

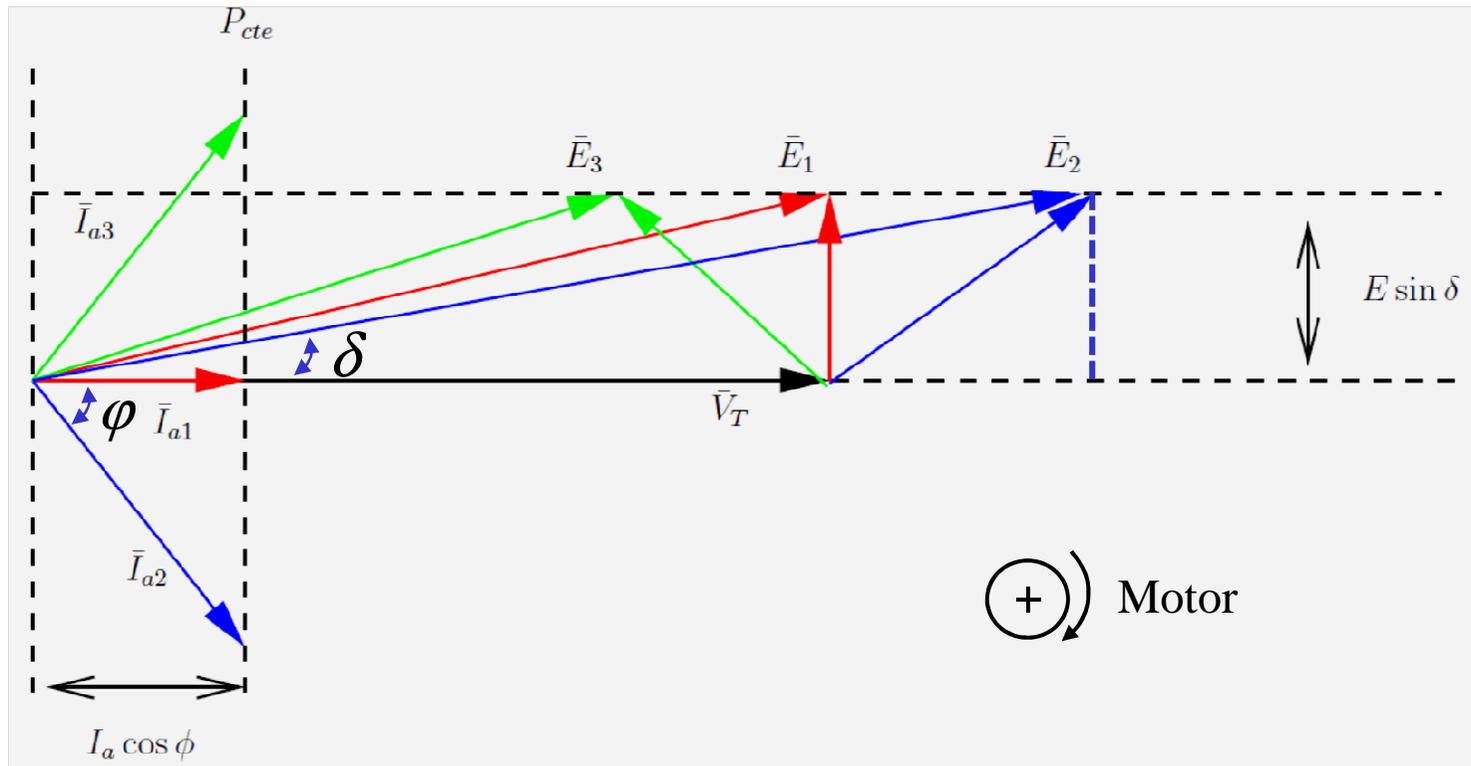
- Controle de potência reativa (diagrama fasorial - potência ativa constante)

- Potência ativa constante $\rightarrow I_a \cos \phi = \text{constante}$ $P = V_T I_a \cos \phi$
 - Potência ativa constante $\rightarrow E \sin \delta = \text{constante}$ $P = \frac{V_T E}{X_s} \sin \delta$
- } Barramento infinito:
 V_T e f constantes

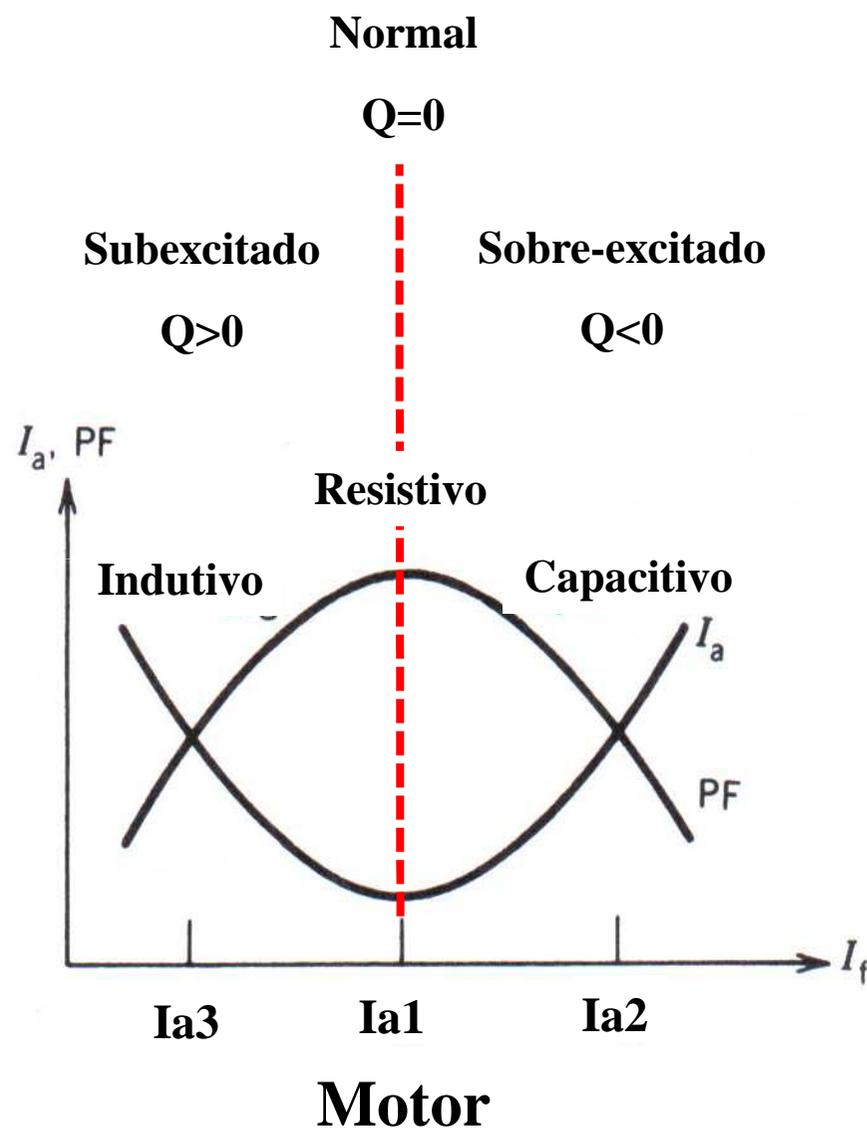
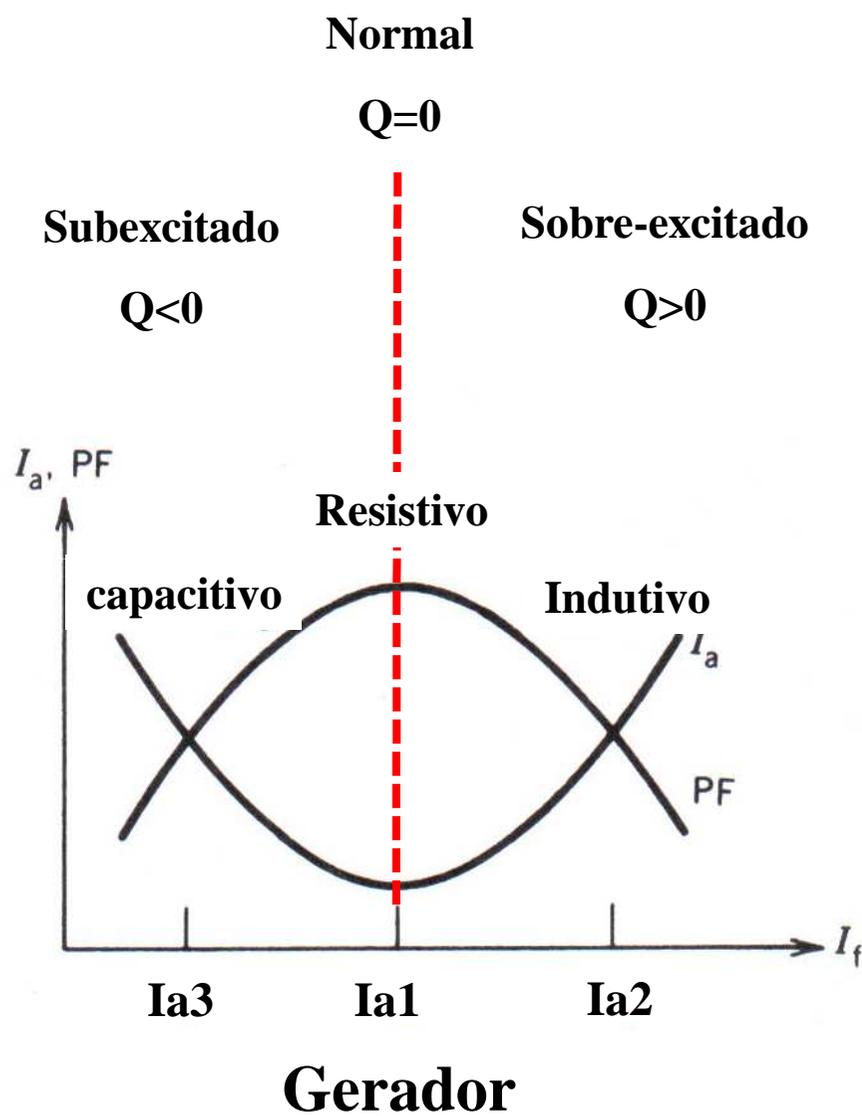
- I_{a1} em fase com V_T (fator de potência unitário – $Q = 0$: excitação normal)

- I_{a2} adiantado em relação à V_T (fator de potência capacitivo – $Q < 0$: sobre-excitado)

- I_{a3} atrasado em relação à V_T (fator de potência indutivo – $Q > 0$: subexcitado)

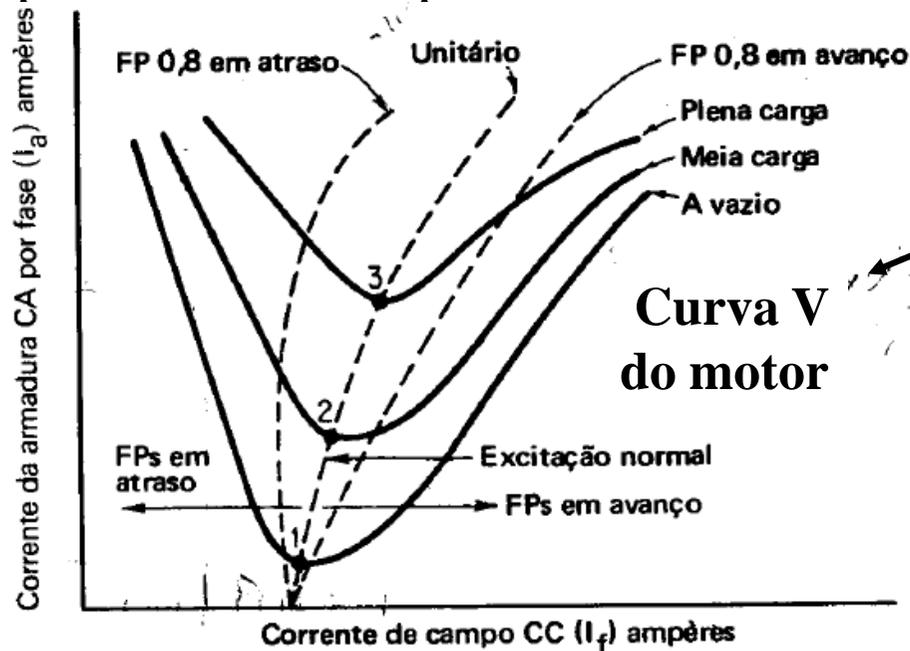


Curva V da máquina síncrona → controle do fator de potência



Aplicação máquina síncrona - Motor usado na indústria para controle do FP

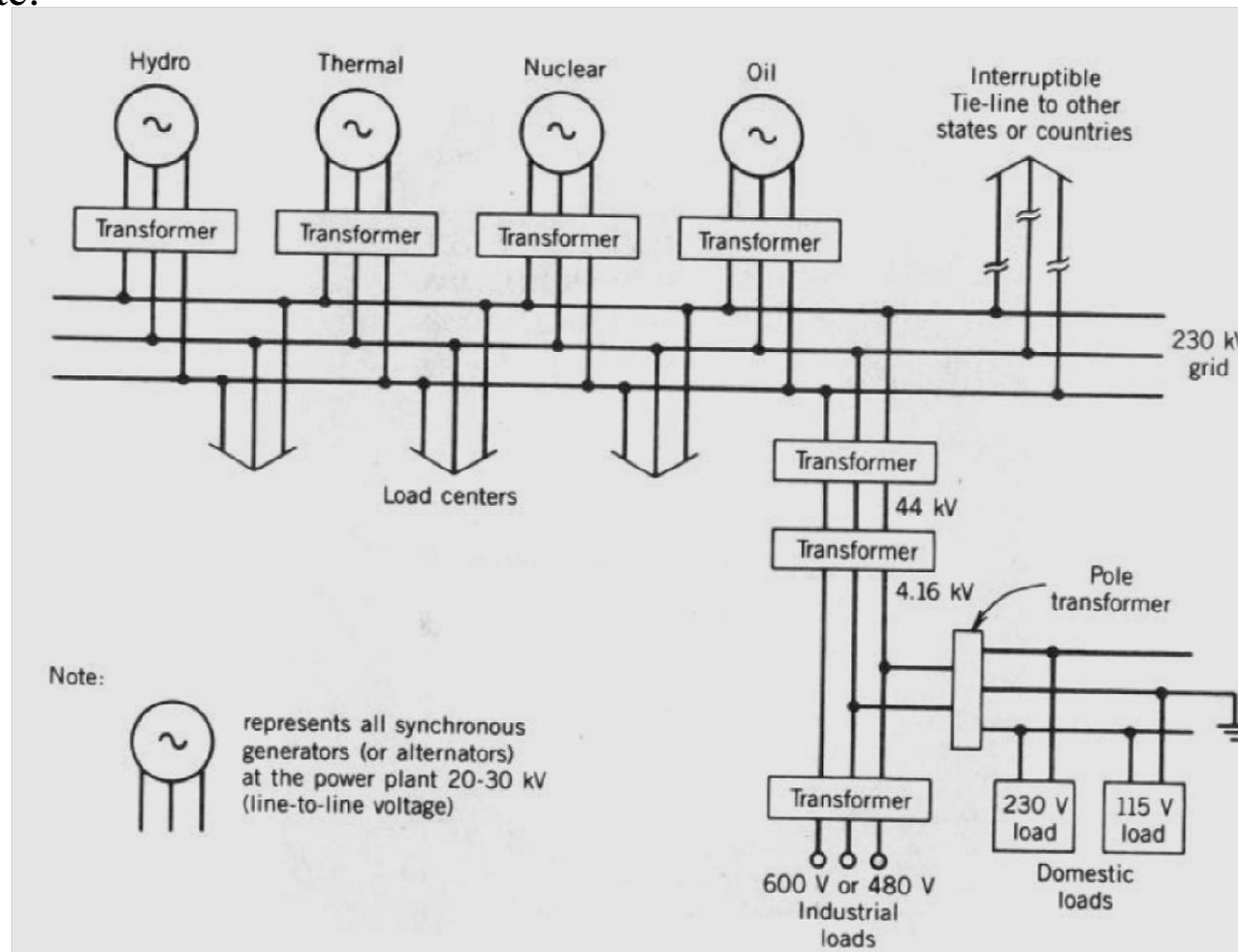
- O controle independente da corrente de campo permite que o motor/gerador síncrono opere com fator de potência indutivo ou capacitivo, absorvendo ou injetando potência reativa;
- Condensador Síncrono: máquina síncrona girando em vazio com controle automático de I_f para controle de tensão;
- Na indústria, motores síncronos operam sobre-excitados, ou seja, fornecendo potência capacitiva, com o objetivo de compensar a potência indutiva consumida pelos motores de indução, melhorando, assim, o fator de potência total da planta.



-As linhas tracejadas mostram como a corrente de campo deve ser variada à medida que a carga (corrente de armadura) é alterada de modo a manter constante o fator de potência.

Operação do gerador síncrono em uma rede interligada

- Geradores síncronos são raramente conectados a cargas individuais. Esses são conectados a uma rede interligada, a qual contém vários geradores operando em paralelo.
- A operação em paralelo de geradores traz as seguintes vantagens: vários geradores podem atender a uma grande carga, aumento da confiabilidade, um ou mais geradores podem ser desligados para manutenção sem causar a interrupção total da demanda da carga, maior eficiência etc.

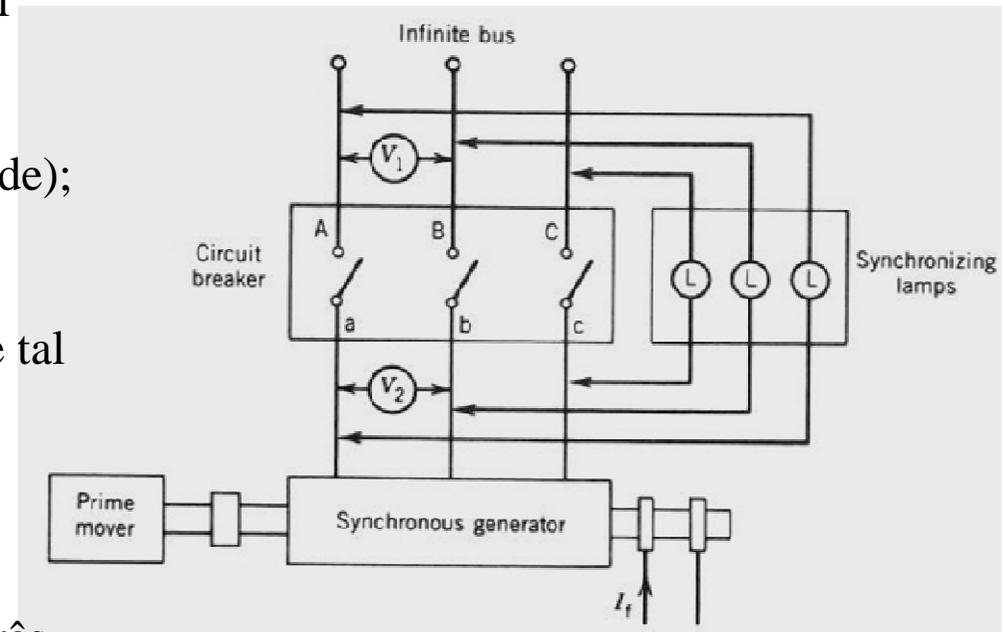


Sincronização do gerador síncrono com uma rede interligada

- Geradores síncronos podem ser conectados ou desconectados da rede interligada, dependendo da demanda de carga. A operação, na qual os geradores são conectados a rede é chamada **sincronização**.
- Para que o gerador síncrono possa ser conectado a rede, **ambos os sistemas** devem ter:
 - A mesma magnitude de tensão RMS (eficaz);
 - A mesma frequência;
 - A mesma sequência de fases;
 - A mesma fase.

Sincronização do gerador síncrono com uma rede interligada

- Um conjunto de lâmpadas pode ser utilizado para verificação visual dessas quatro condições, como mostrado na figura.
1. A máquina primária (*prime mover*) pode ser um motor de CC ou de indução, que é empregado para ajustar a velocidade do gerador ao valor síncrono (frequência da rede);
 2. A corrente de campo I_f pode ser ajustada de tal maneira que a magnitude das tensões do gerador e da rede sejam as mesmas;
 3. Se a sequência de fases estiver correta, as três lâmpadas devem acender e apagar em sincronia.



Sincronização do gerador síncrono com uma rede interligada

- Em plantas industriais, essas condições podem ser verificadas através do uso de um *sincroscópio*;
- A posição do indicador mostra a diferença de fase entre as tensões da máquina e da rede. Esse dispositivo não verifica a sequência de fases;
- O sentido de rotação do indicador mostra se a frequência da máquina é maior ou menor que a da rede;
- Quando o indicador se movimenta lentamente, isto é, a frequência da rede e da máquina são quase iguais, e passa pelo marcador vertical, o disjuntor pode ser fechado, e a máquina é conectada a rede.
- Plantas industriais modernas empregam sincroscópios automáticos, os quais enviam sinais para o sistema de excitação e de regulação de velocidade do gerador para alterar a frequência e a tensão do gerador.
- Para operação remota do disjuntor, relés de cheque de sincronismo (*synch check relays*) são empregados para supervisionar o fechamento dos disjuntores.



Gerador síncrono (GS)

■ Vantagens:

- é a tecnologia mais empregada para a conversão de energia mecânica em elétrica (amplamente utilizada para geração)
- possui capacidade de compensação de potência reativa
- permite energização/sincronização suave (sem transitórios)

■ Desvantagens:

- a velocidade mecânica e elétrica são sincronizadas levando a maiores transitórios eletromecânicos durante variação da potência mecânica da fonte primária (e.g., geradores eólicos)
- alto custo inicial e de manutenção

Comentários gerais

- A principal aplicação da máquina síncrona é como gerador (alternador) nas usinas geradoras de energia elétrica.
- A magnitude e a frequência da tensão gerada variam com a velocidade do rotor e com a magnitude da corrente de campo.
- Para que a máquina síncrona opere como motor, é necessário algum artifício para o seu acionamento pois pela sua própria característica física, ele não tem partida própria.
- O motor síncrono gira com velocidade constante e idêntica à velocidade do campo girante (velocidade síncrona). Assim sendo, quando em operação, a velocidade do rotor do motor síncrono é função somente da frequência da rede elétrica.
- Enquanto o motor de indução apresenta um comportamento exclusivamente indutivo, o motor síncrono pode operar com fator de potência indutivo, capacitivo ou unitário, mediante ajustes na magnitude da corrente de campo. Quanto maior esta corrente, a tendência do motor síncrono é apresentar um comportamento capacitivo.

Curiosidade (1/3)

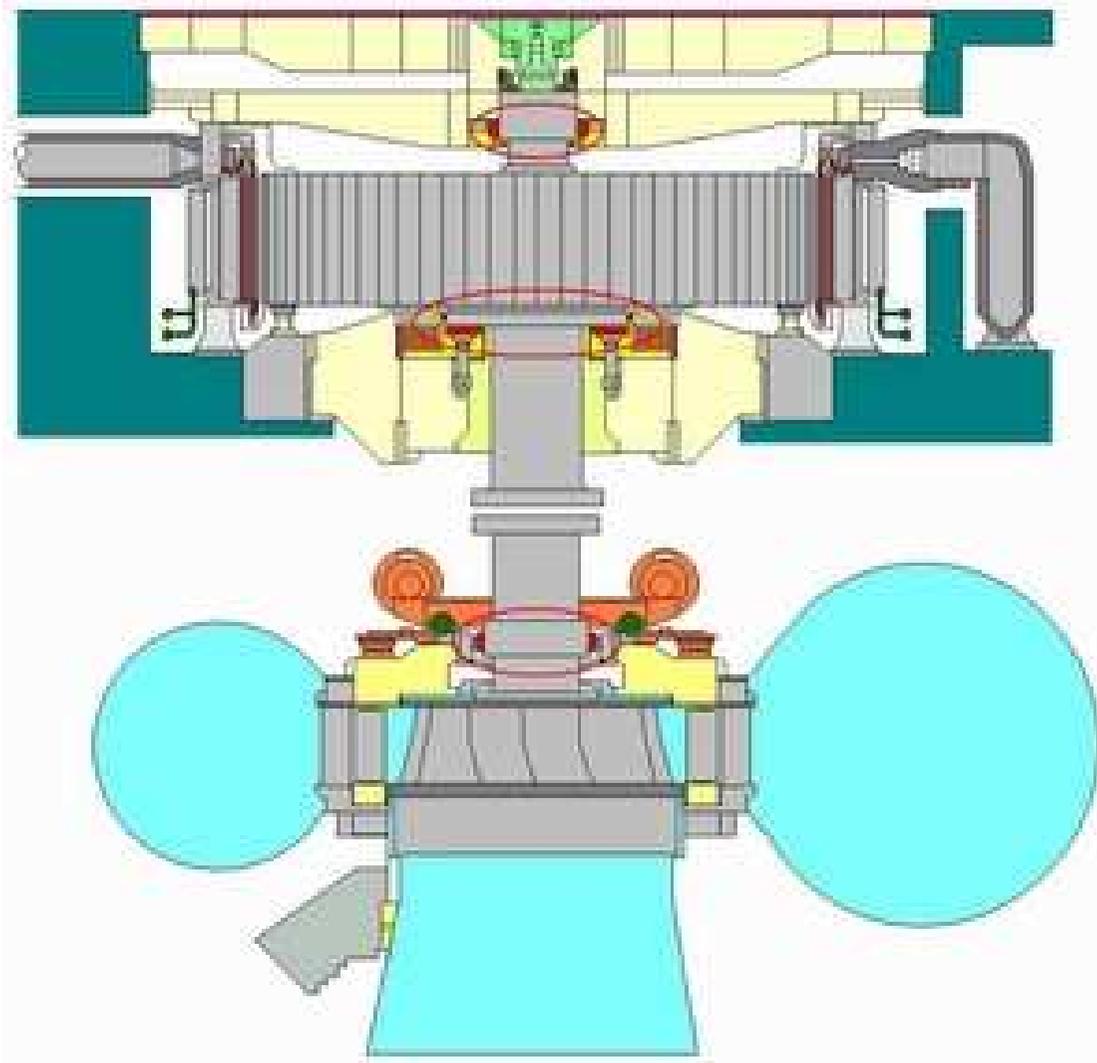
- Gerador de Itaipú



20 unidades geradoras de 700 MW

Curiosidade (2/3)

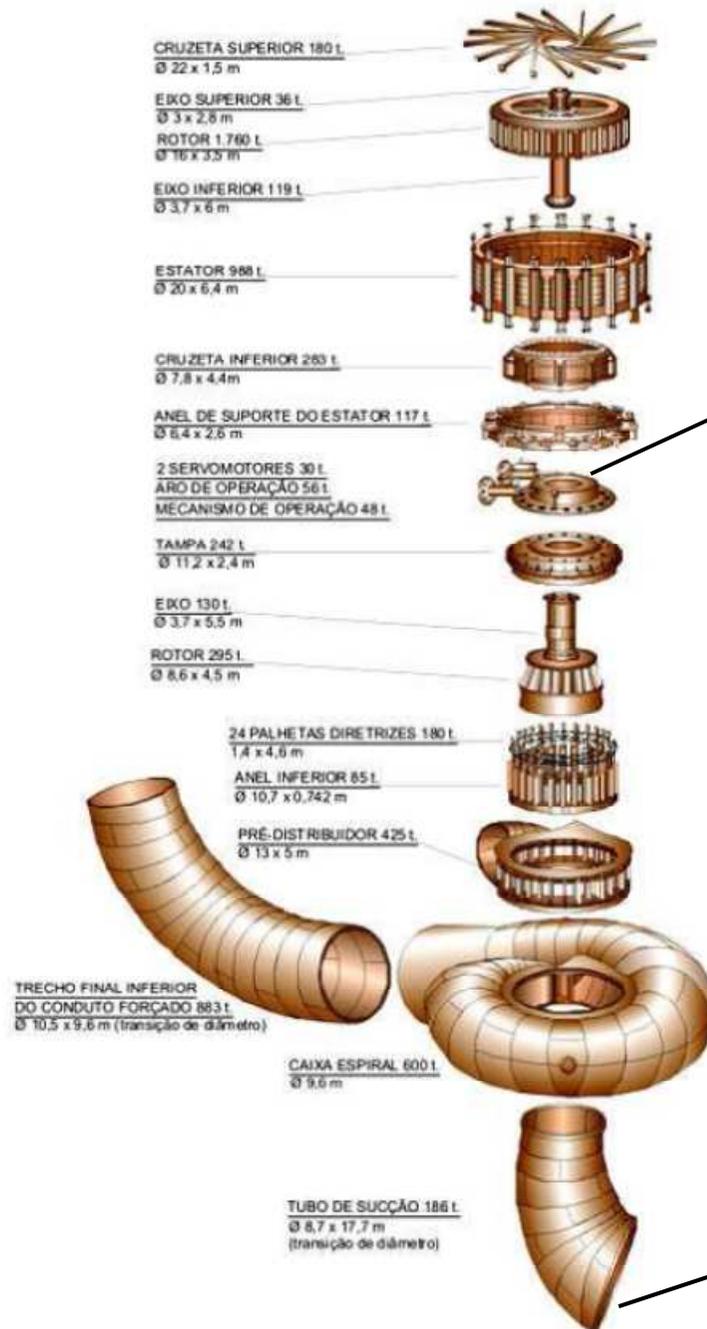
• Gerador de Itaipú



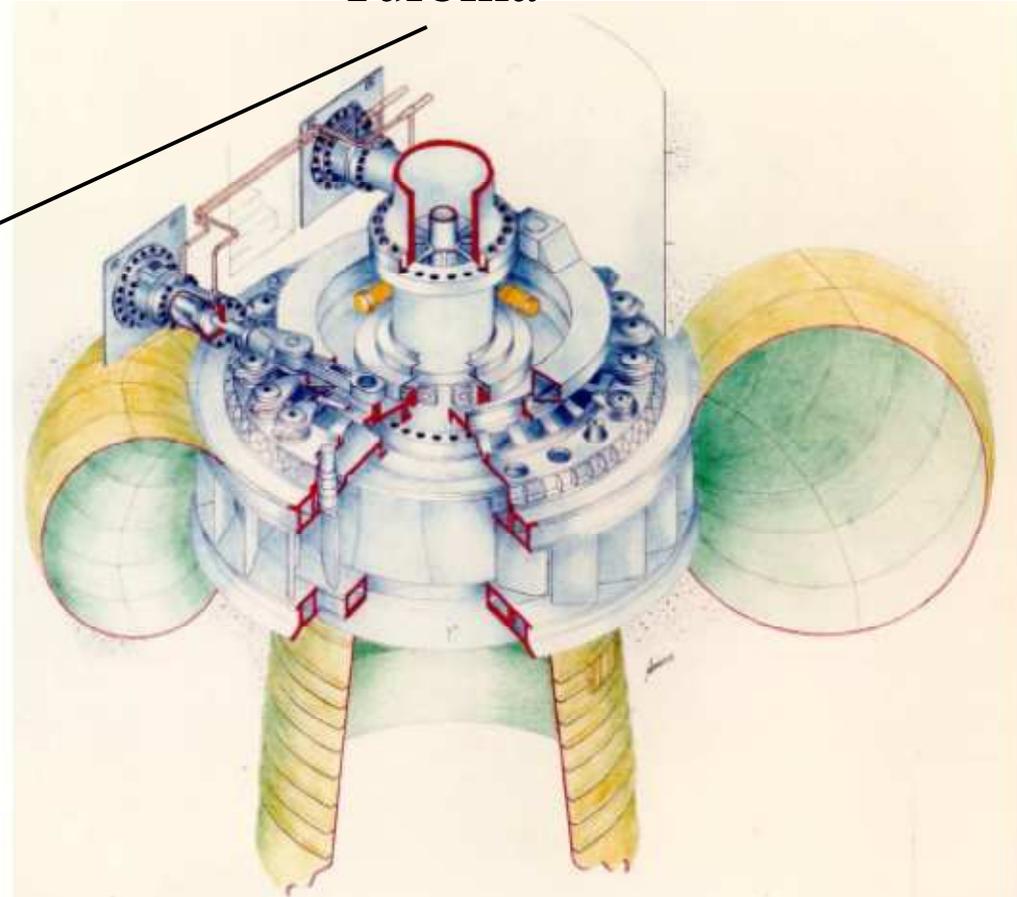
20 unidades geradoras de 700 MW

- 20 unidades geradoras: 10 em 50 Hz e 10 em 60 Hz.
- As unidades de 50 Hz têm 66 pólos, potência nominal de 823,6 MVA, fator de potência de 0,85 e peso de 3.343 toneladas.
- As unidades de 60 Hz têm 78 pólos, potência nominal de 737,0 MVA, fator de potência de 0,95 e peso de 3.242 toneladas.
- Todas as unidades têm tensão nominal de 18 kV.
- As turbinas são do tipo francis, com potência nominal de 715 MW e vazão nominal de 645 metros cúbicos por segundo.
- Transmissão: dois elos CC de 600 kV e 3 linhas CA de 750 kV

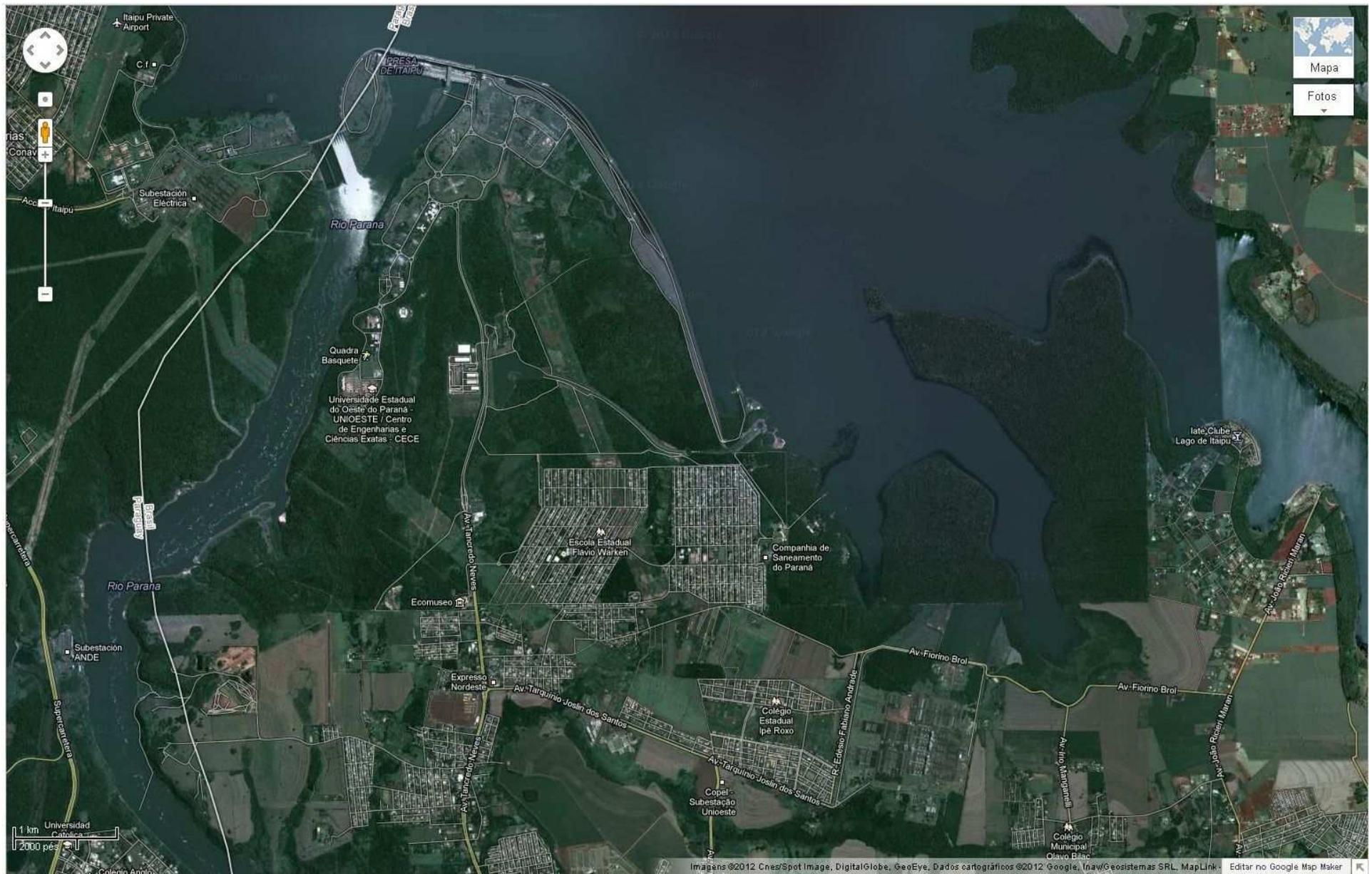
Curiosidade (2/3)



•Turbina



Curiosidade (3/3)



Exercícios

1. Do ponto de vista prático, o que se pode afirmar a respeito da variação da frequência e da magnitude da tensão gerada no alternador quando são alteradas a velocidade do rotor e a intensidade da corrente contínua no circuito de campo?
2. Em uma fazenda está instalado um alternador cujo rotor é acionado por uma turbina, aproveitando-se uma queda d'água, sendo que o circuito de campo é energizado por um conjunto de baterias em série com um reostato (resistor variável de baixa potência).
 - a) Justificando, descreva as possíveis alternativas de controle da frequência e da magnitude da tensão gerada para este alternador.
 - b) Considere que ao se ligar uma bomba d'água, ocorre uma diminuição simultânea da magnitude e da frequência da tensão gerada. Qual o procedimento mais adequado para que sejam restabelecidos os respectivos valores nominais? Justifique procedimento proposto.

Exercícios

4. Um gerador síncrono trifásico, ligação estrela, rotor cilíndrico, 10 kVA, 500 V, tem uma reatância síncrona de $2,4 \Omega$ por fase e uma resistência de armadura de $0,5 \Omega$ por fase. Pede-se:
- Calcule a regulação de tensão percentual quando o gerador está a plena carga com fator de potência de 0,8 atrasado e as potências ativa e reativa gerada e entregue a carga;
 - Repita a) considerando o fator de potência de 0,8 adiantado;
5. Um motor síncrono trifásico, ligação estrela, 5kVA, 220V, tem uma reatância síncrona de $2,5 \Omega$ por fase e 10 pólos. Pede-se:
- Calcule a frequência necessária de modo que o motor tenha uma velocidade de rotação constante de 500 RPM.
 - Calcule a tensão de excitação e o ângulo de carga da máquina sob condições nominais de carga considerando que o motor está subexcitado com fator de potência de 0,85;
 - Calcule a potência ativa que o motor está demandando da rede nas condições do item b);