

# Máquinas Eléctricas I

## Máquinas Síncronas



# Máquinas Síncronas

## Resumo

- Generalidades
- Principio de funcionamento
- Aspectos construtivos
- O gerador síncrono em carga
  - com cargas isoladas
    - Curvas de regulação
  - ligado a um barramento (bus) potência infinita (rede)
    - Sincronização
    - Controlo de potência activa e reactiva
- Tamanho, potência e rendimento de máquinas eléctricas

# Máquinas Síncronas

## Generalidades

- Máquinas rotativas que giram à *velocidade de sincronismo*, ou seja à velocidade do *Campo Girante*.
- *Velocidade de sincronismo* – velocidade que resulta da expressão : 
$$n = \frac{f}{p}$$
em que:
  - $P = n.^{\circ}$  de pares de pólos da máquina.
  - $N =$  velocidade do rotor da máquina em r.p.s.
  - $F =$  frequência da corrente de carga.

# Máquinas Síncronas

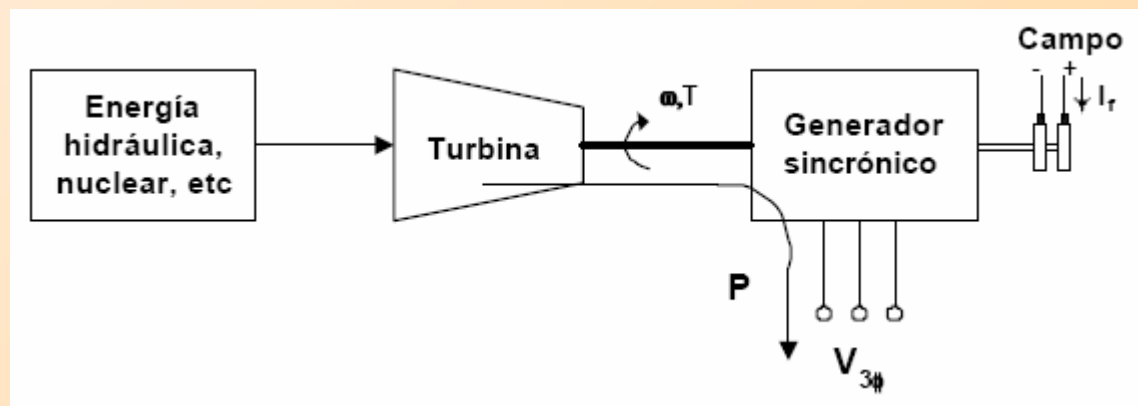
## Generalidades

- Os geradores síncronos trifásicos são a **principal fonte de energia eléctrica**
  - Potências até 1500 MW
  - Estátor idêntico às máquinas de indução
    - Enrolamento distribuído trifásico
    - Agrupado por pares de pólos
- normalmente, o **indutor** está no rotor
  - É de ímanes permanentes ou electromagnetes DC
  - N.º de pólos = n.º de conjuntos de enrolamentos do estátor

# Máquinas Síncronas

## Generalidades

- A frequência depende da velocidade de rotação e do n.º de pólos
  - A velocidade de rotação é a **velocidade de sincronismo**  $f = n_s \cdot P$
- Quanto maior o n.º de pólos, menor será a rotação.
  - Muitos pólos -> (baixa rotação -> grandes caudais).
  - Poucos pólos -> (alta rotação -> pequenos caudais).
- A máquina síncrona é uma máquina reversível, podendo funcionar como gerador, ou como motor.



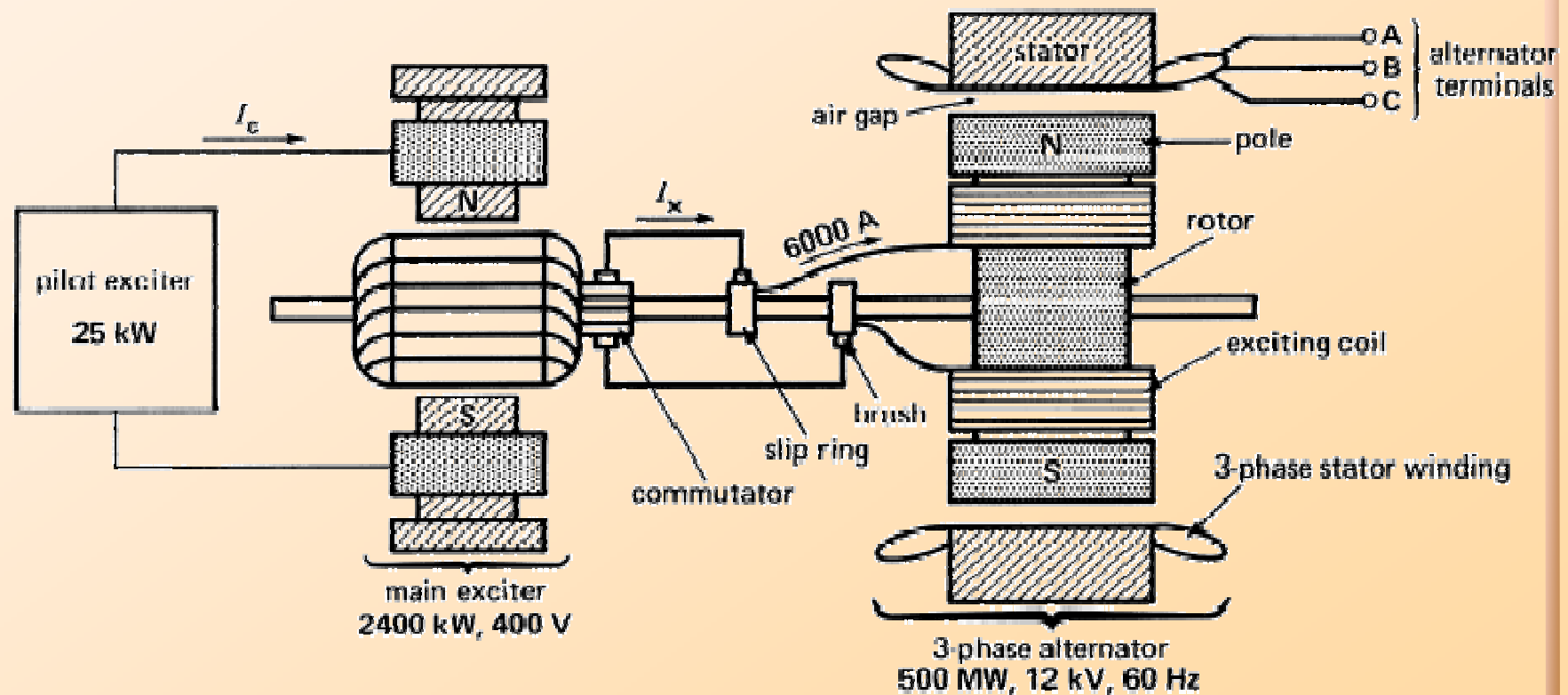
# Máquinas Síncronas

## Gerador Síncrono – “Alternador”

- Máquinas rotativas que produzem C.A.
- A C.A. é produto do princípio da indução magnética, tal como nos dínamos. (O alternador pode ser visto como um dínamo sem colector)
- Constituição: *Indutor, Induzido, Excitatriz*
  - Excitatriz – dínamo montado no mesmo eixo do alternador destinado a fornecer a C.C. Ao indutor.

# Máquinas Síncronas

## Gerador Síncrono – “Alternador”



# Máquinas Síncronas

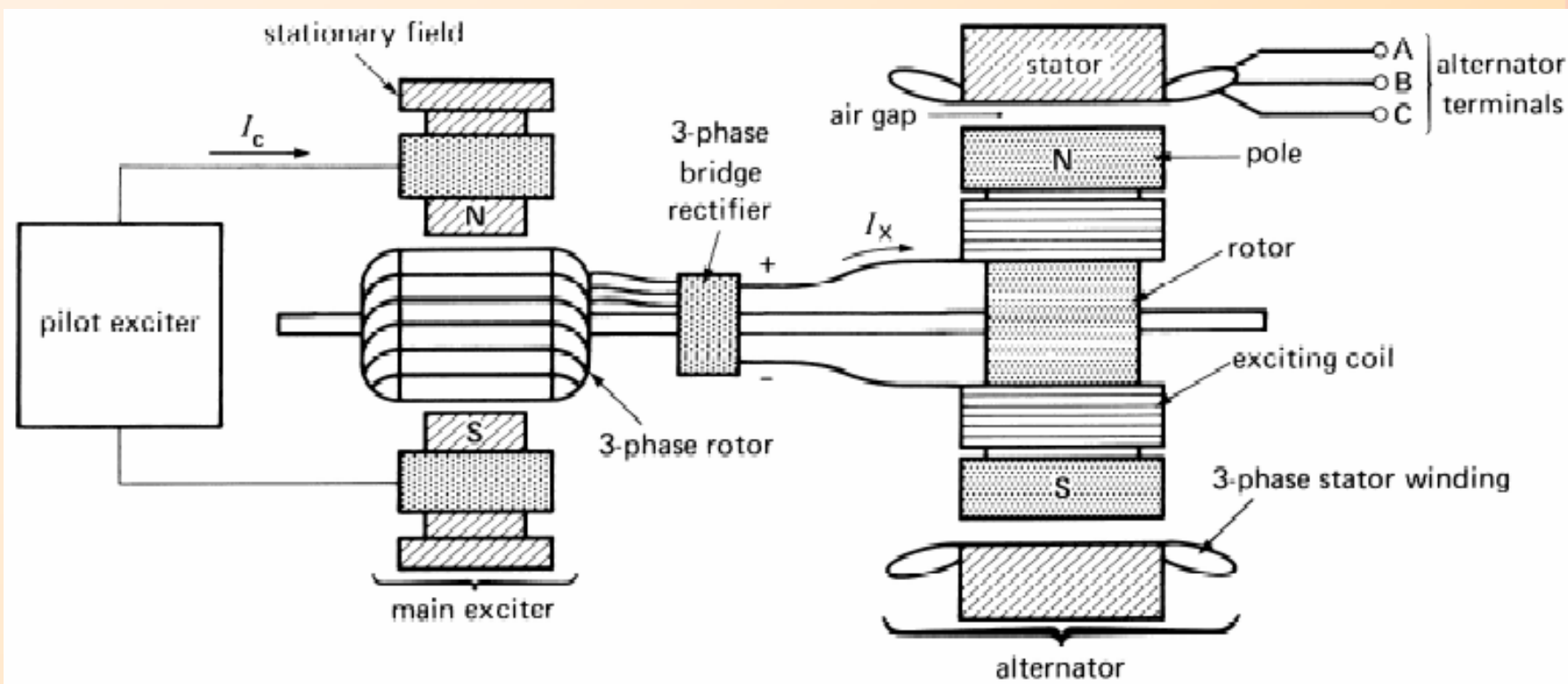
## Campo Indutor

- Três métodos de excitação
  - **Excitação separada**, (alimentação através de anéis no rotor)
  - **Excitatriz** (gerador **DC**)
    - Colocada no mesmo veio da máquina síncrona
    - O comutador alimenta os anéis da máq. Síncrona
  - **Excitatriz** sem escovas (**brushless**)
    - Alternador de indutor fixo (estátor) e induzido móvel (rótor, trifásico)
    - Rectificação por díodos ou tirístores que produz corrente contínua para o indutor da máquina síncrona



# Máquinas Síncronas

## Campo Indutor



## Excitação sem Escovas (Brushless)

# Máquinas Síncronas

## Gerador Síncrono – “Alternador”

- A f.e.m. induzida pode ser obtida pela variação da posição relativa do induzido relativamente ao indutor. (induzido fixo ou móvel).

# Máquinas Síncronas

## Disposição do Induzido (Fixo-Móvel)

- Vantagens do induzido fixo
  - Menor nível de isolamento (anéis e escovas dimensionados para menores correntes e tensões)
  - Maior facilidade de ligação ao exterior
  - Possibilidade de geração de Electricidade a níveis de tensão superiores.

# Máquinas Síncronas

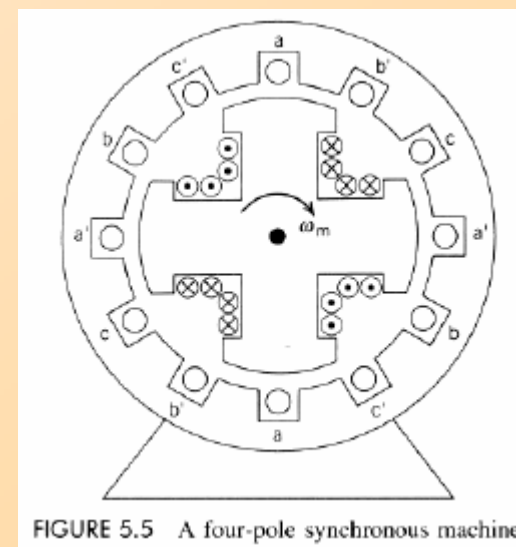
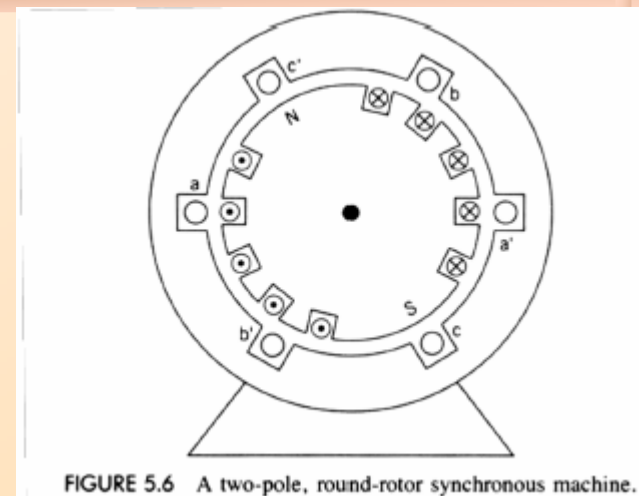
## Indutor (constituição)

- Rótor onde estão colocados os pólos indutores de forma alternada (*roda polar*).
  - *Pólos salientes* (utilizado em baixas velocidades => muitos pólos => grandes dimensões => muito peso).
  - *Pólos lisos* (rótor cilíndrico) (utilizado em altas velocidades => poucos pólos => rótor estreito e comprido).

# Máquinas Síncronas

## Indutor (constituição)

- 2 tipos genéricos
  - Pólos lisos (alta velocidade)
  - Pólos salientes (baixa velocidade)
- Enrolamentos alimentados a corrente contínua
  - criam o campo magnético (pólos N e S fixos)



# Máquinas Síncronas

## Rótor - Pólos salientes

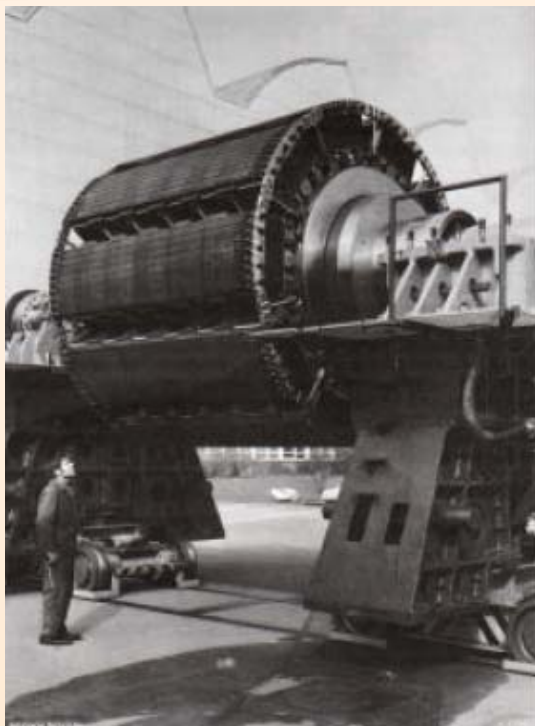
- Enrolamentos amortecedores
  - enrolamentos em gaiola de esquilo colocados nos pólos
    - Em condições normais, não transportam corrente
    - Quando ocorrem mudanças bruscas na carga, a velocidade do rotor começa a flutuar, produzindo variações de fluxo
    - Começam a circular correntes elevadas que produzem forças contrárias e amortecem as variações de velocidade



# Máquinas Síncronas

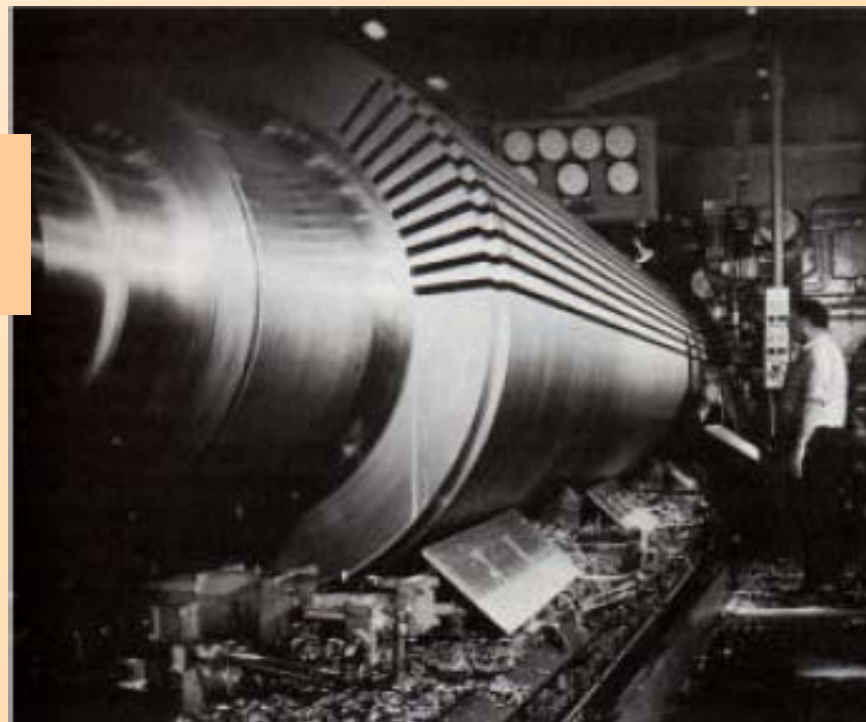
## Rótor - Pólos salientes

- Usam-se em máquinas de baixa velocidade e grande n.º de pólos (centrais hidroeléctricas)



## Rótor - Pólos lisos

- Usam-se em máquinas de alta velocidade (2 ou 4 pólos)
  - Turbinas de gás ou vapor (centrais térmicas)
  - Turbinas pelton (hidroeléctricas)



# Máquinas Síncronas

## Estátor (constituição)

- Do ponto de vista eléctrico, o estátor da máquina síncrona é idêntico ao da máquina assíncrona (indução)
  - Os enrolamentos, em geral, ligam-se em estrela (Y)
    - A tensão é  $1/\sqrt{3}$  ou 58% da tensão de linha, permitindo uma redução no isolamento eléctrico
  - Em carga, a tensão pode ficar distorcida e deixar de ser sinusoidal
    - A distorção é sobretudo devida ao 3.º harmónico (150 Hz)
    - Na ligação em estrela, o 3.º harmónico cancela-se na tensão entre linhas (tensão composta)
    - Na ligação em triângulo ( $\Delta$ ), os 3.ºs harmónicos de tensão somam-se e aparecem nas tensões compostas.



Montagem de enrolamentos no estátor de máquina síncrona (metade)



# Máquinas Síncronas

## Enrolamentos (tipos)

- Estatóricos
  - Imbricados
  - Ondulados
- Rotóricos
  - Espiralados
- O estátor (induzido) é constituído por chapas com ranhuras sobrepostas destinadas à colocação dos enrolamentos, sendo chapeado para diminuir as correntes de Foucault.

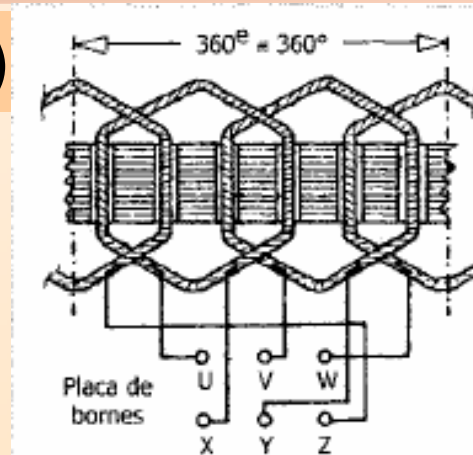


Fig. 4.57 Bobinado para un par de polos y una bobina por fase

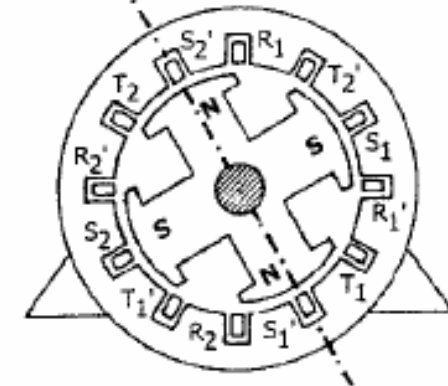


Fig. 4.58 Alternador de cuatro polos

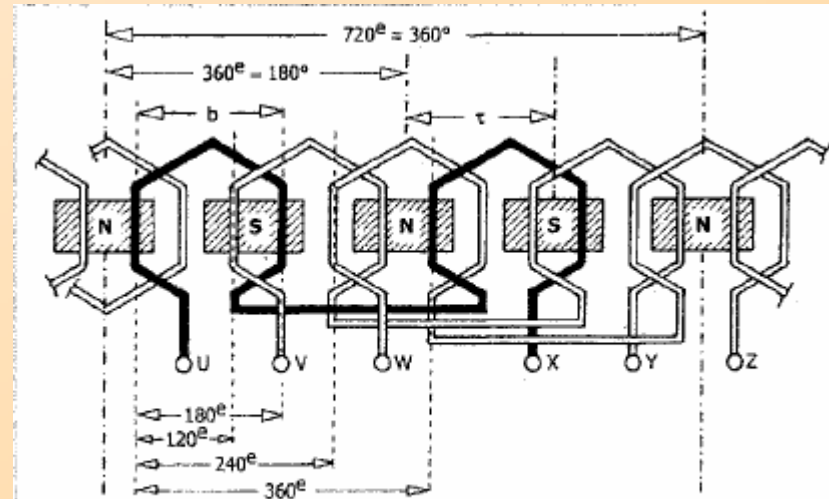


Fig. 4.59 Bobinado de un alternador de cuatro polos

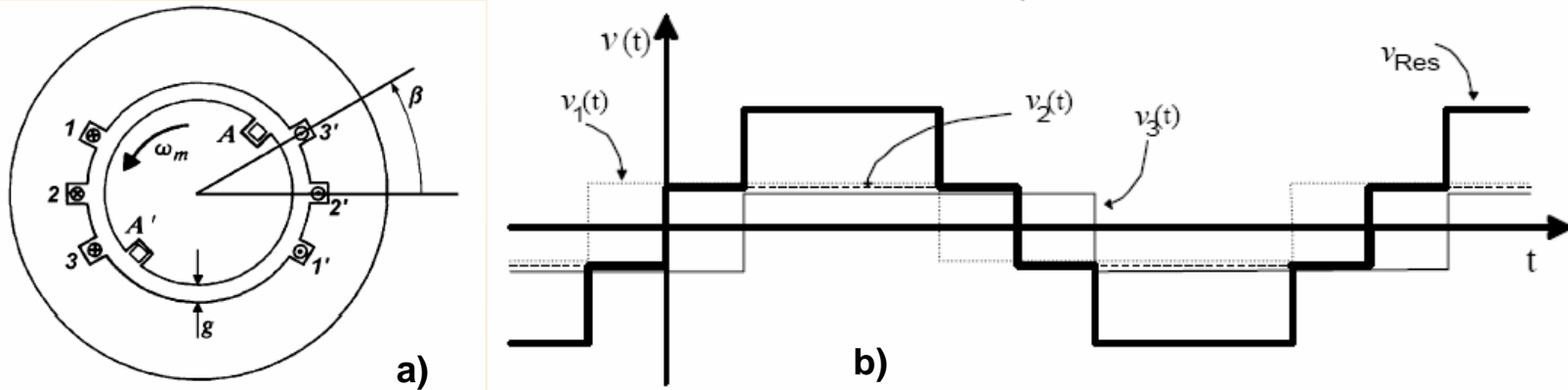
# Máquinas Síncronas

## F.E.M. Induzida

- Quando a roda polar (indutor) gira, os condutores do induzido (estátor) ficam sujeitos a um campo magnético alternado que tem uma frequência  $f = p.n$
- A f.e.m. induzida é proporcional ao fluxo útil por pólo. Isto é:  
 Para 1 alternador com  $p$  pares de pólos,  $Z$  condutores activos por fase, que roda a  $n$  rotações por segundo, com um fluxo  $\phi$  por pólo, a f.e.m.  $E$  gerada por fase será:

$$E = k.Z.p.n.\phi, \quad k - \text{coeficiente de Kapp} \cong 2.2$$

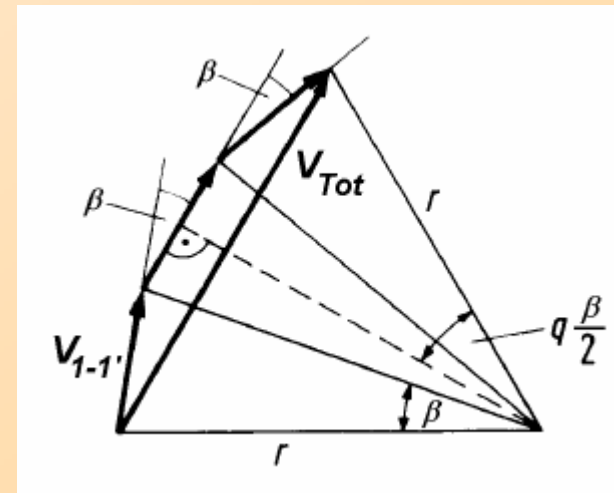
# Máquinas Síncronas



enrolamento distribuído em 6 ranhuras a) disposição b) f.e.m. induzidas

## K – Coeficiente de kapp

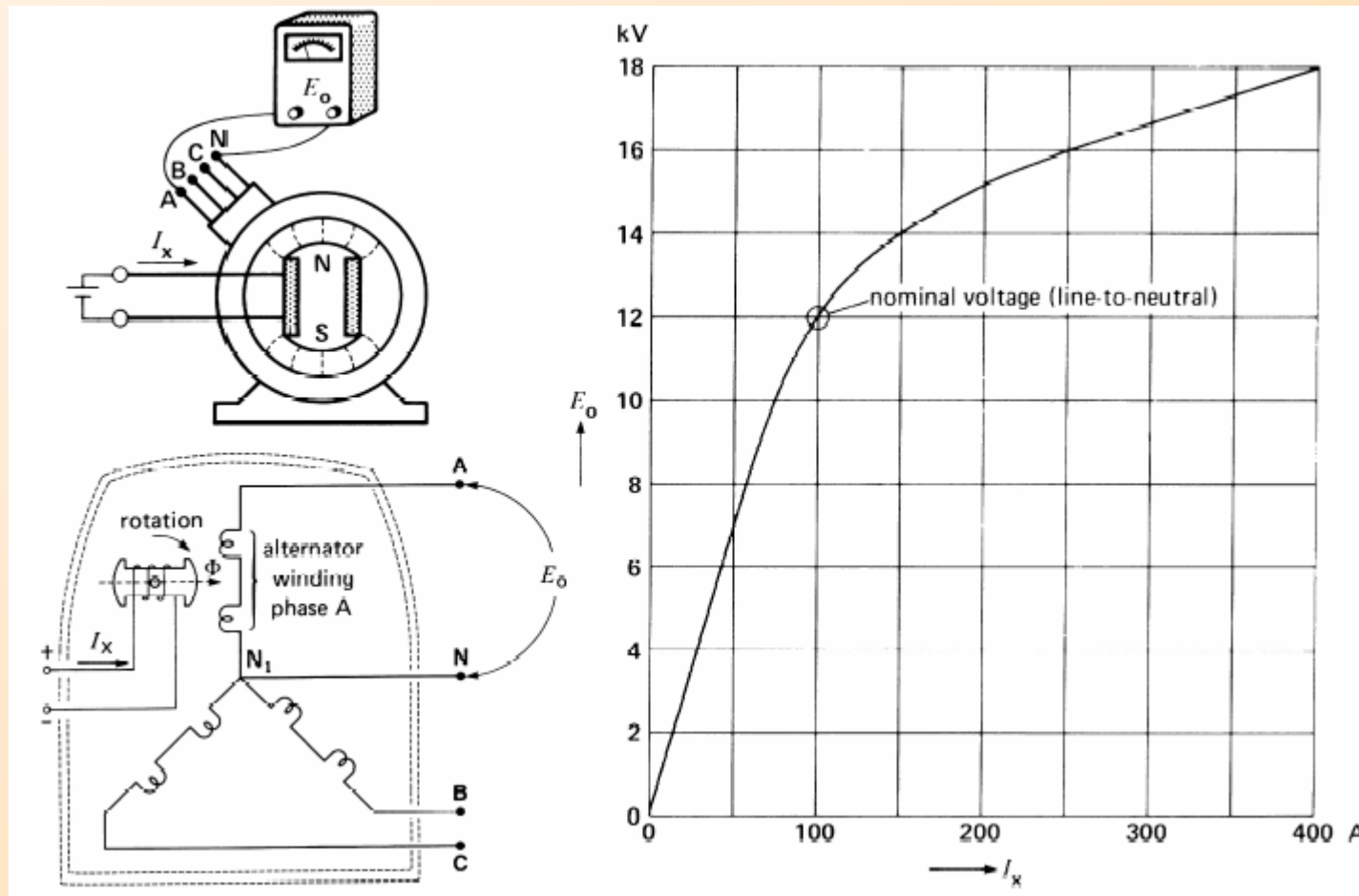
- Traduz vários factores que influenciam a f.e.m. induzida nos condutores
  - Forma do rotor
  - Entreferro
  - Disposição dos condutores no estátor (enrolamentos concentrados vs distribuídos)



F.e.m. resultante num enrolamento de 6 ranhuras

# Máquinas Síncronas

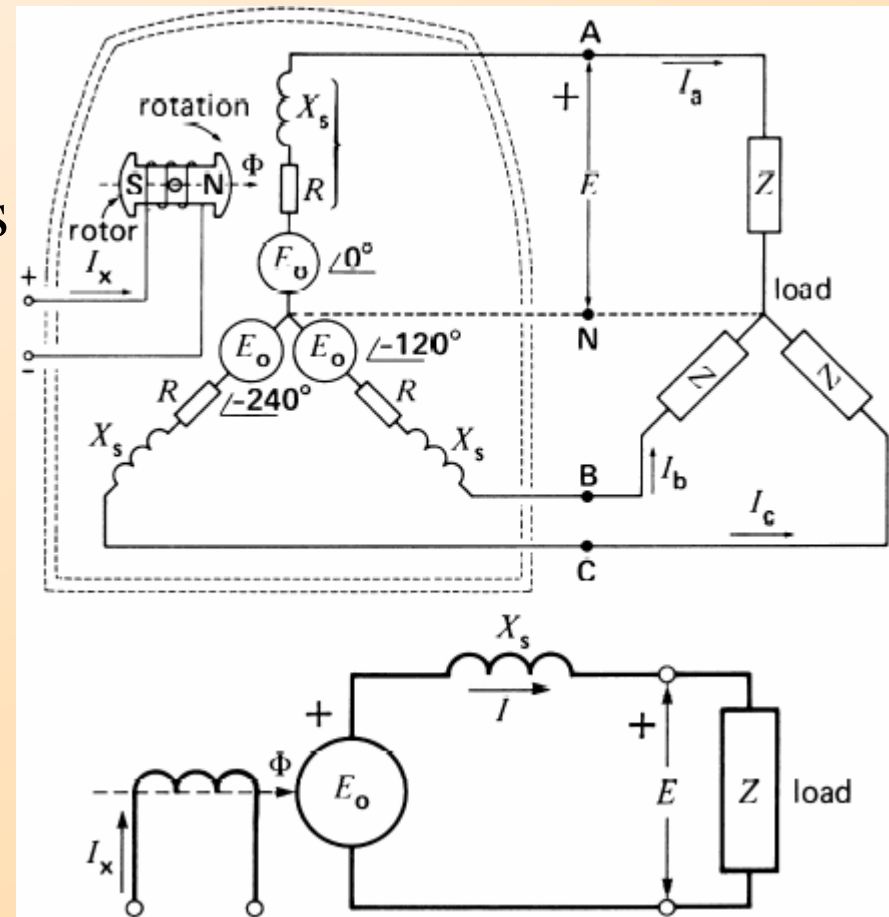
## Característica de vazio



# Máquinas Síncronas

## Circuito equivalente

- F.e.m. Induzida,  $E_0$ 
  - Proporcional ao corte das linhas de fluxo
  - Indutância do enrolamento,
    - $X_s = 2\pi f L$
  - Resistência do enrolamento,
    - Cerca de 1% de  $X_s$
    - frequentemente ignora-se no circuito equivalente =>



# Máquinas Síncronas

## Reactância Síncrona - $X_s$

- É uma reactância “combinada” que traduz o efeito de:
  - *fluxo de fugas*
  - *Reacção do induzido*

# Máquinas Síncronas

## Reactância Síncrona - $X_s$

- $X_s$  pode ser determinada pelos ensaios em vazio e em curto-circuito
  - Ensaios efectuados à velocidade nominal e sem atingir a saturação magnética
  - No ensaio em vazio a corrente de excitação  $i_x$  é ajustada até a f.e.m. atingir o valor nominal ( $i_{xn}$ ).
  - No ensaio em curto-circuito varia-se a corrente de excitação até o valor  $i_{xn}$ .
  - Mede-se o valor de  $I_{cc}$ , o que permite calcular

$$X_s = \frac{E_n}{I_{cc}}$$

## Impedância do Gerador (em pu)

- As placas dos geradores, indicam a reactância síncrona,  $X_s$ , em percentagem ou por unidade da impedância de base ( $Z_{base}$ )
- A impedância de base é determinada a partir da **potência nominal** e da **tensão nominal** de linha.

$$Z_{base} = \frac{E_n^2}{S_n} = \frac{E_{n,composta}^2}{S_{n,total}} = \frac{(\sqrt{3}E_{n,simples})^2}{3 \cdot S_{n,fase}} = \frac{E_{n,simples}^2}{S_{n,fase}}$$



# Máquinas Síncronas

## Queda de tensão

- $\varepsilon\%$  - Queda de tensão relativa

$$\varepsilon \% = \frac{E_0 - U}{E_0} \times 100\%$$

Medida directa da queda de tensão:

- Pôr o alternador a rodar à velocidade nominal  $n$  e excitar até apresentar a tensão nominal aos terminais em vazio ( $U_0 = E$ )
- Ligar ao alternador uma carga  $I$  com  $\cos \phi$  adequado (mantendo  $n$  e excitação) e medir a *tensão*  $U$  aos bornes do alternador.  $U = U(I, \phi)$

# Máquinas Síncronas

## Queda de tensão

- Problema - A medida da queda de tensão por ensaio directo, raramente é possível numa bancada ou plataforma de ensaios.
  - Em regra os alternadores são máquinas enormes.
  - Requer máquina primária (motor) de potência superior à do alternador.
  - Requer receptores capazes de absorver a totalidade da energia do alternador (à plena carga => ENORMES DIFICULDADES!!!)
- Solução – métodos indirectos

# Máquinas Síncronas

## Queda de tensão em carga – medida indirecta

- A normal impossibilidade de realização de ensaios directos evidencia o interesse de todos os métodos que permitam através de ensaios de simples execução, determinar a queda de tensão em carga. (não obrigando ao ensaio em carga...)
- Todos os métodos indirectos são baseados na análise das quedas de tensão, que são:
  - Resistência do Induzido ( $R_I \cdot I$ )
  - Reacção magnética do induzido  $\mathcal{E}$  que modifica o fluxo útil e a f.e.m. gerada  $E$ . ( $\mathcal{E}$  depende de  $I$  e de  $\phi$ )
  - Fugas magnéticas que provocam uma queda indutiva suplementar e proporcional a  $I$  (o circuito magnético de fugas fecha-se sobretudo pelo ar e não é saturável).

# Máquinas Síncronas

## Queda de tensão em carga (cont.)

- Existem basicamente 2 formas de resolver o problema de modo indirecto:
  - Encontrar  $i$  (excitação) em função de  $U, I, \phi$
  - Encontrar  $U$  (Tensão aos terminais) em função de  $i, I, \phi$
- Existem 3 métodos principais de medida indirecta, que diferem pela forma como tomam em linha de conta a reacção do induzido e as fugas magnéticas, são eles:
  - Método de Behn-Eschenburg,
  - Método de Potier
  - Método de Blondel

# Máquinas Síncronas

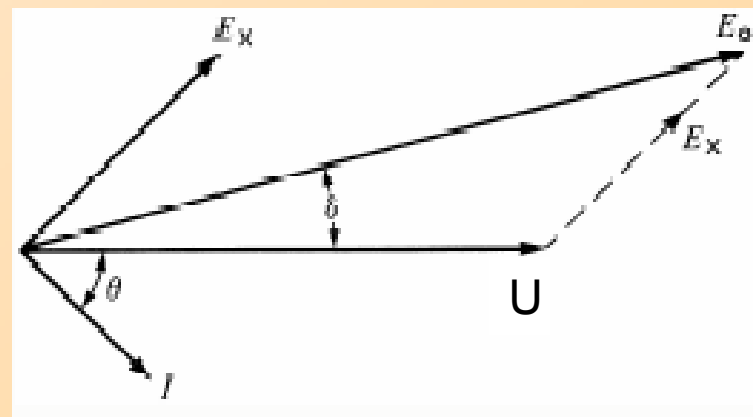
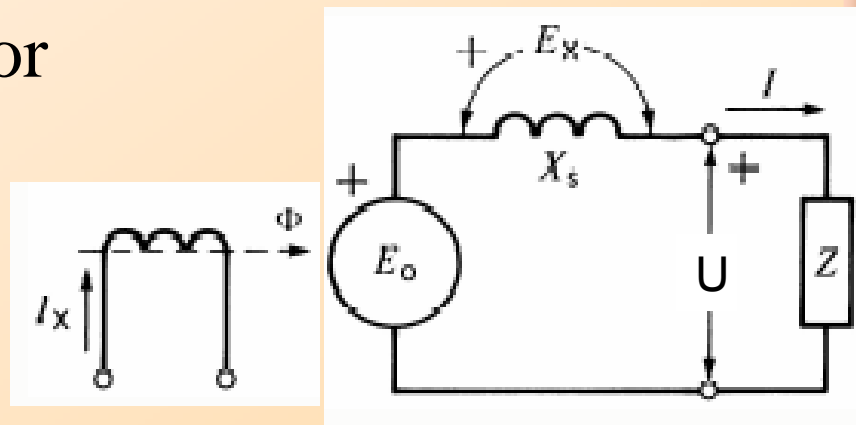
## Diagrama de Behn-Eschemburg

- *Hipótese fundamental* – o circuito magnético não está saturado.
  - Designando por  $\phi_i$  o fluxo indutor e por  $\phi_I$  o fluxo criado pela corrente  $I$  no Induzido, por hipótese temos um fluxo total em carga  $\phi_T = \phi_i + \phi_I$  (soma geométrica)
  - A F.E.M. resultante será  $E_T = E_i + E_I$ , em que  $E_I$  é uma F.E.M. de auto-indução devido a  $\phi_I$  (reacção do induzido) de oposição à causa que lhe deu origem.

# Máquinas Síncronas

## Diagrama de Behn-Eschemburg

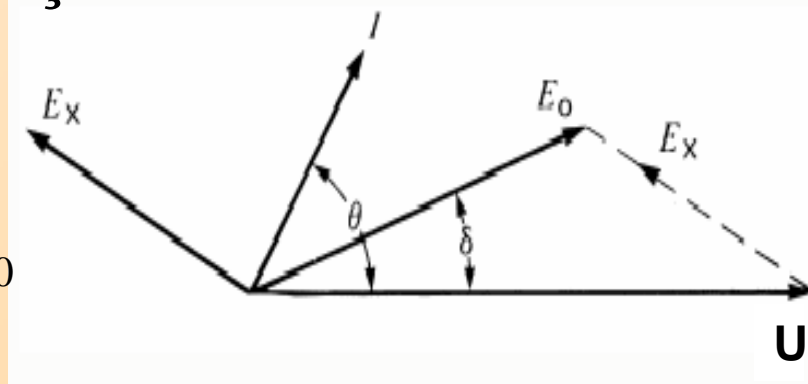
- O comportamento do gerador depende da carga
  - 2 categorias principais
    - Cargas isoladas
    - Bus de potência infinita
  - Cargas indutivas isoladas
    - $I$  está em atraso em relação a  $U$
    - $E_x$  está avançada de  $90^\circ$  relativamente a  $I$
    - $E_0$  é a soma vectorial de  $U$  com  $E_x$



# Máquinas Síncronas

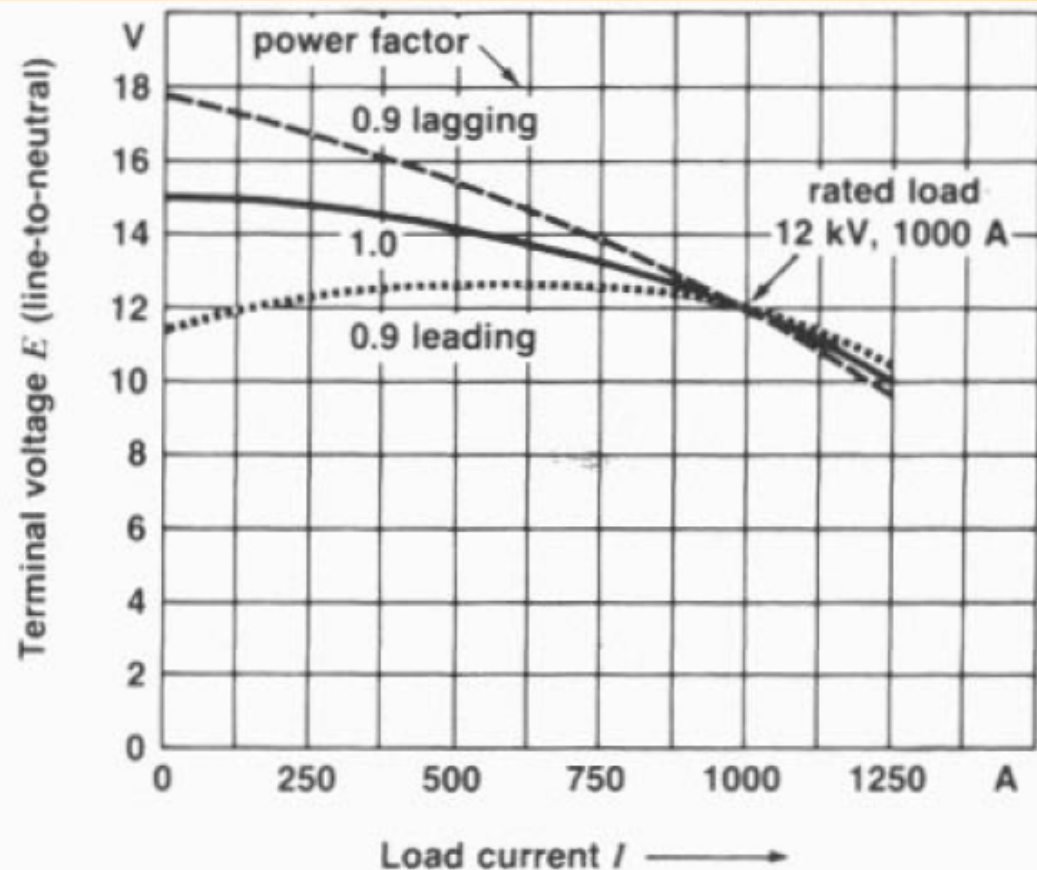
## Diagrama de Behn-Eschemburg

- Carga isolada em avanço
  - $I$  está em avanço em relação a  $U$
  - $E_x$  está em avanço de  $90^\circ$  em relação a  $I$
  - $E_0$  é a soma vectorial de  $U$  e  $E_x$
- Note que  $E_0$  está sempre avançado de  $\delta$  em relação a  $U$ 
  - Para cargas indutivas  $E_0 > U$
  - Para cargas capacitivas  $U > E_0$



# Máquinas Síncronas

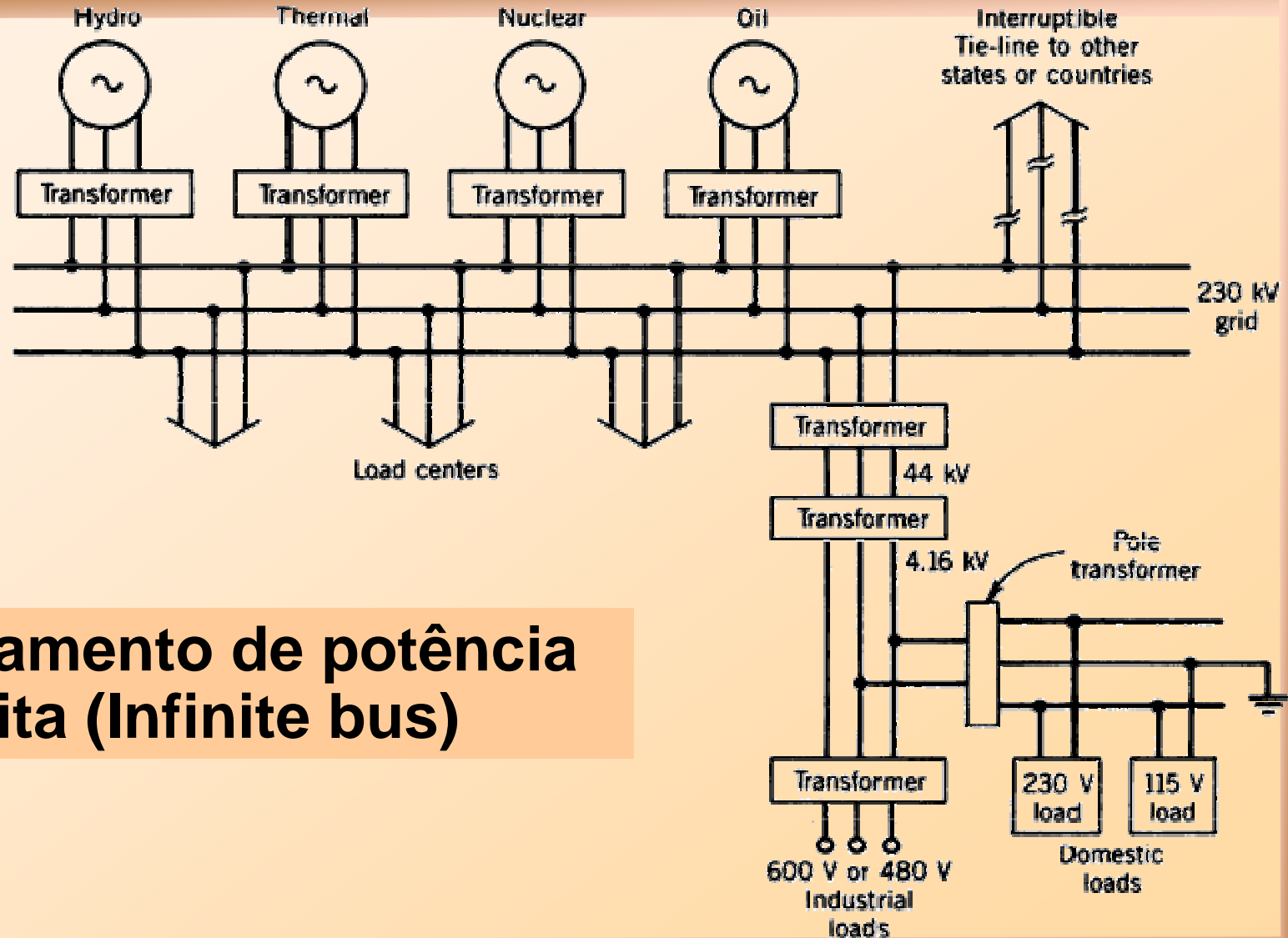
## Curvas de quedas de tensão (regulação)



**Figure 16.23**  
Regulation curves of a synchronous generator at three different load power factors.



# Máquinas Síncronas



**Barramento de potência infinita (Infinite bus)**

# Máquinas Síncronas

## Barramento de potência infinita (Infinite bus)

Conceito de barramento de potência infinita:

- Sistema que pela sua potência e dimensão impõe a qualquer aparelho que a ele se ligue, a sua própria tensão e frequência (de que é exemplo a rede eléctrica)

Para que um gerador síncrono (alternador) possa ser ligado à rede eléctrica, tem 1º de ser **SINCRONIZADO** com ela!!!

# Máquinas Síncronas

## Barramento de potência infinita (Infinite bus)

Condições de sincronismo do alternador com a rede eléctrica (ou outro alternador):

- Igual frequência
- Igual nível de tensão
- Desfasamento nulo! => Estarem ambos “em fase”
- Igual sequência de fases

# Máquinas Síncronas

## Barramento de potência infinita (Infinite bus)

Num alternador ligado a uma rede eléctrica, a frequência e a tensão são valores fixos pela rede.

O que determina então a potência entregue?

Há 2 parâmetros que é possível variar:

- Corrente de excitação
- Binário produzido pela turbina (potência mecânica)

# Máquinas Síncronas

## Barramento de potência infinita (Infinite bus)

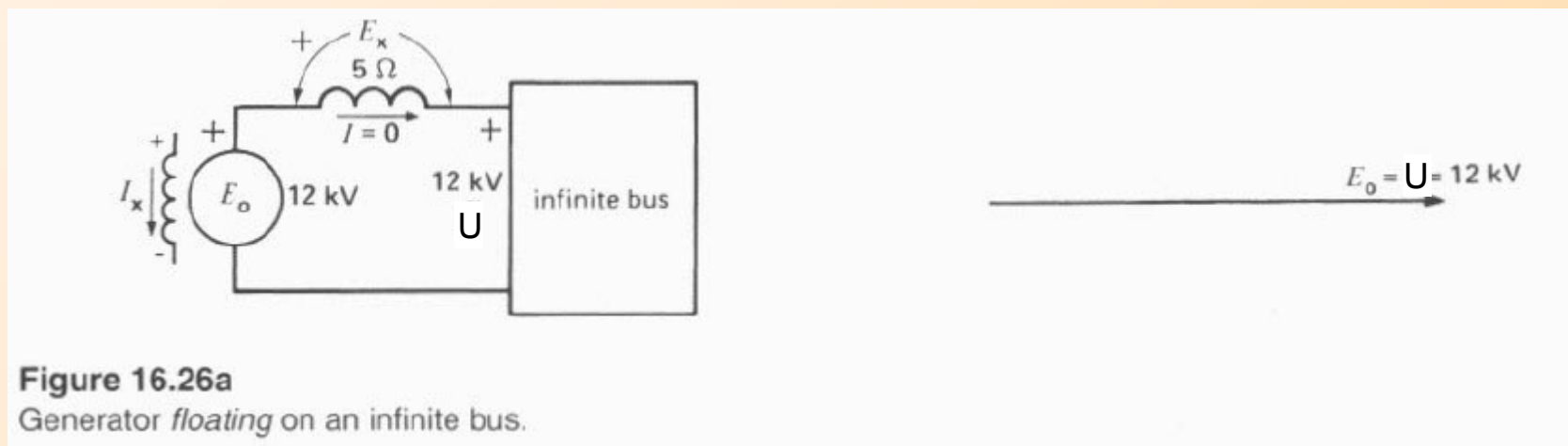


Figure 16.26a  
Generator floating on an infinite bus.

Alternador “pendurado” na rede

Não há troca de energia

# Máquinas Síncronas

## Barramento de potência infinita (Infinite bus)

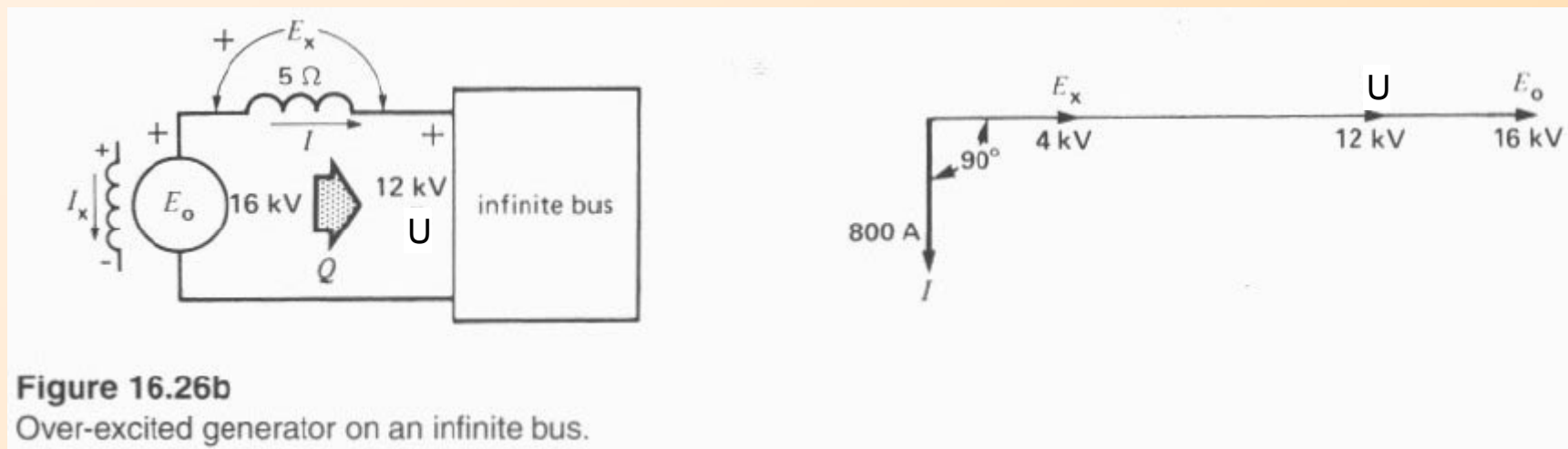
- Variar a corrente de excitação
  - Altera a fem induzida ( $E_0$ )
  - Provoca a circulação de uma corrente desfasada de  $90^\circ$ , devido à reactância síncrona  $X_s$  :

$$I = \frac{E_0 - U}{jX_s}$$

- Não altera o fluxo de energia activa
- Altera o fluxo de energia reactiva

# Máquinas Síncronas

## Barramento de potência infinita (Infinite bus)



Alternador “pendurado” na rede «sobreexcitado»

- A rede representa uma carga indutiva para o alternador

# Máquinas Síncronas

## Barramento de potência infinita (Infinite bus)

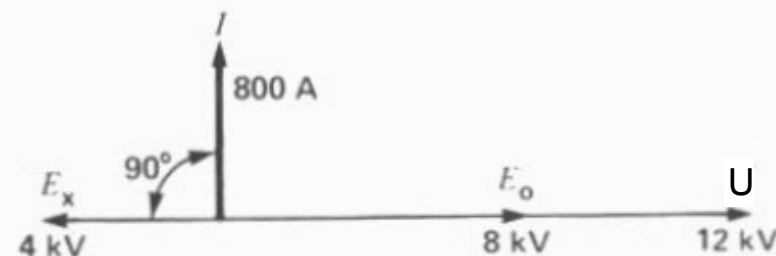
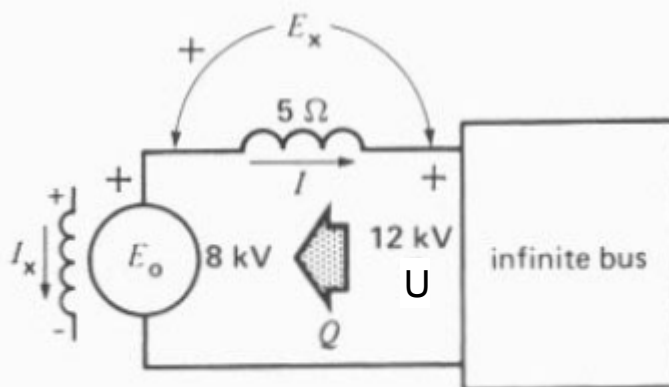


Figure 16.26c

Under-excited generator on an infinite bus.

Alternador “pendurado” na rede «subexcitado»

- A rede representa uma carga capacitiva para o alternador



# Máquinas Síncronas

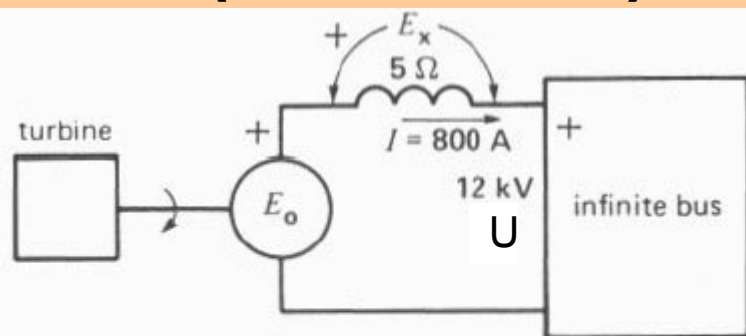
## Barramento de potência infinita (Infinite bus)

Alternador a “puxar” a rede

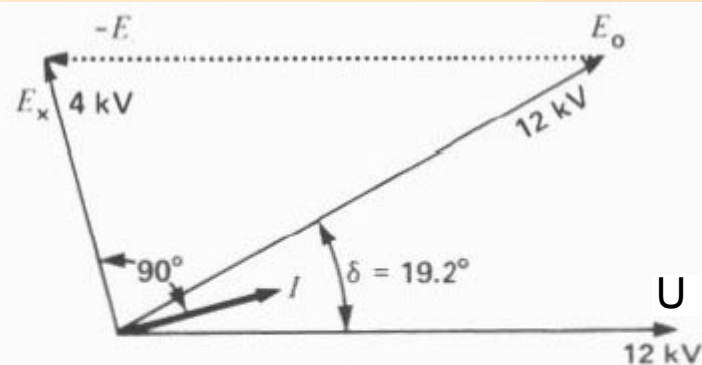
- Variação da potência mecânica
  - Aumentando a potencia entregue ao veio => maior binário produzido ( $\omega = c \cdot \underline{t_e}$ )
  - O rotor acelera,  $E_0$  aumenta de valor e adianta-se relativamente a  $U$ , de um ângulo  $\delta$
  - $E_0$  e  $U$  têm um valor similar, mas estão desfasados de  $\delta$ , o que provoca uma queda de tensão na reactância síncrona  $X_s$ 
    - Circula uma corrente quase em fase com  $U$
    - Circula energia cativa para a rede

# Máquinas Síncronas

## Barramento de potência infinita (Infinite bus)



(a)



(b)

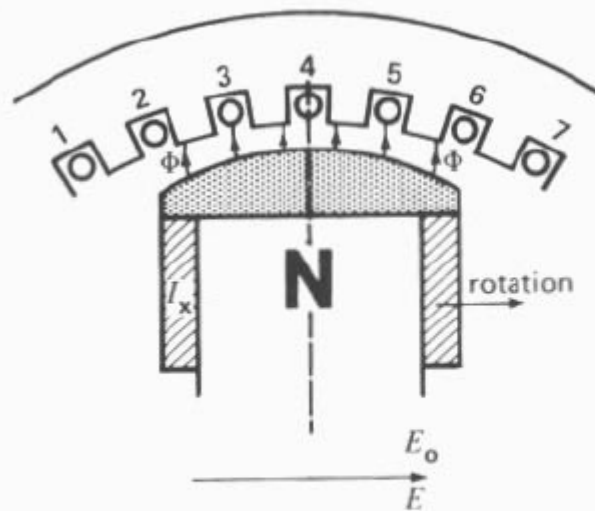
**Figure 16.27**

- a. Turbine driving the generator.
- b. Phasor diagram showing the torque angle  $\delta$ .

Turbina a “puxar” o alternador -> potência mecânica entregue ao veio no sentido de o “acelerar”

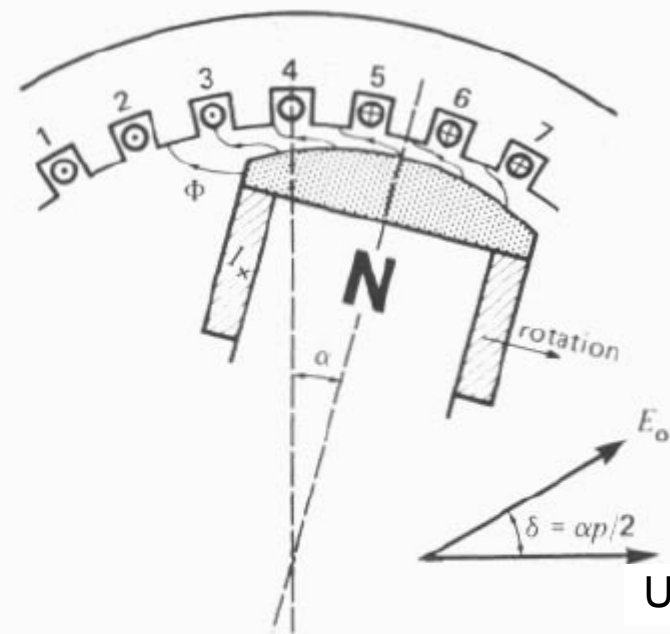
# Máquinas Síncronas

## Barramento de potência infinita (Infinite bus)



**Figure 16.28a**

The N poles of the rotor are lined up with the S poles of the stator.



**Figure 16.28b**

The N poles of the rotor are ahead of the S poles of the stator.

Turbina a "puxar" o alternador -> potencia mecanica entregue ao veio no sentido de o "acelerar"