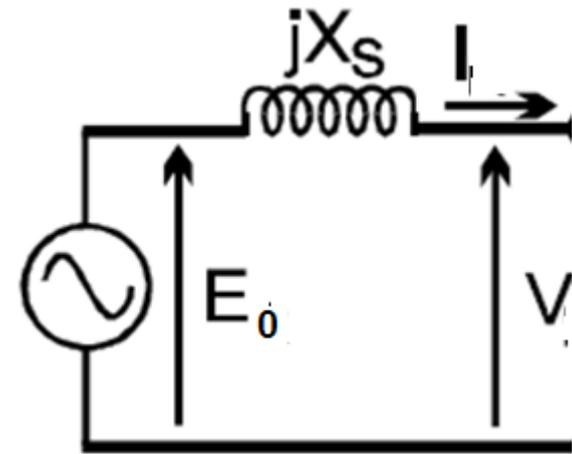


Máquinas Síncronas

- Determinação da Reatância Síncrona
- Campos Girantes
- Máquina Síncrona ligada ao Sistema de Potência
 - Gerador e Motor Síncrono

Aula Anterior

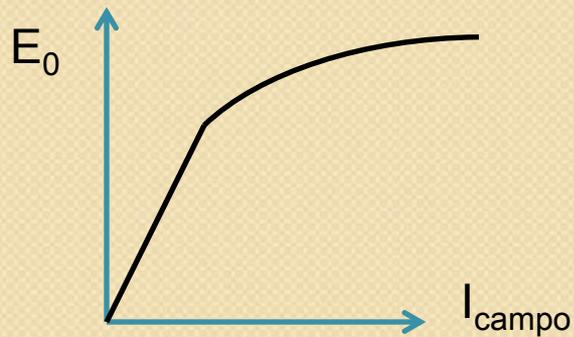
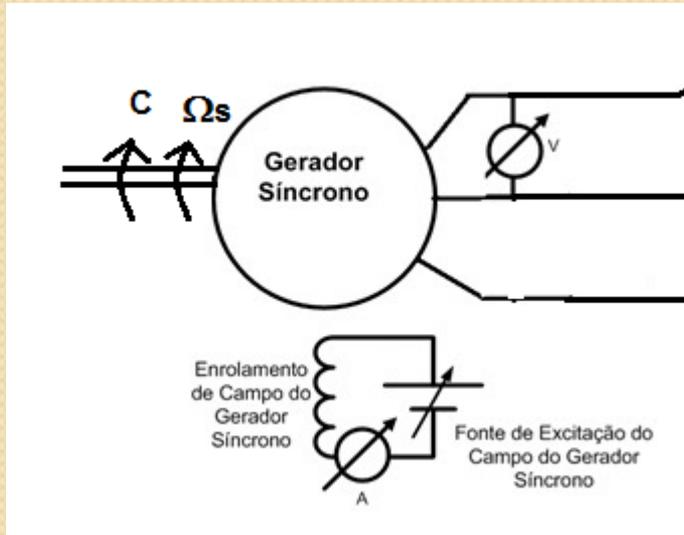
- Circuito Equivalente **por fase**
- O Alternador gerava um sistema de tensões **simétrico e equilibrado** e a carga era **equilibrada**.
- Logo, as correntes eram **trifásicas simétricas e equilibradas**.



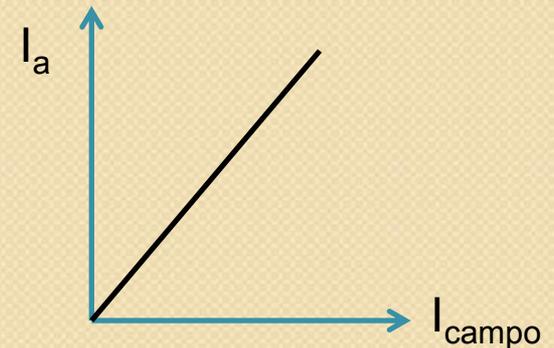
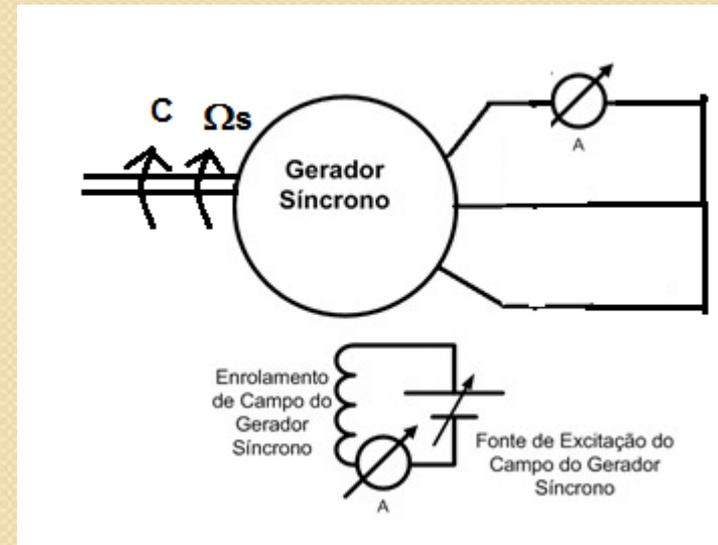
- Duas perguntas:
- Como determinar X_s ?
- Como agem estas correntes no interior da Máquina Síncrona?

Como determinar X_s ?

Ensaio em Vazio

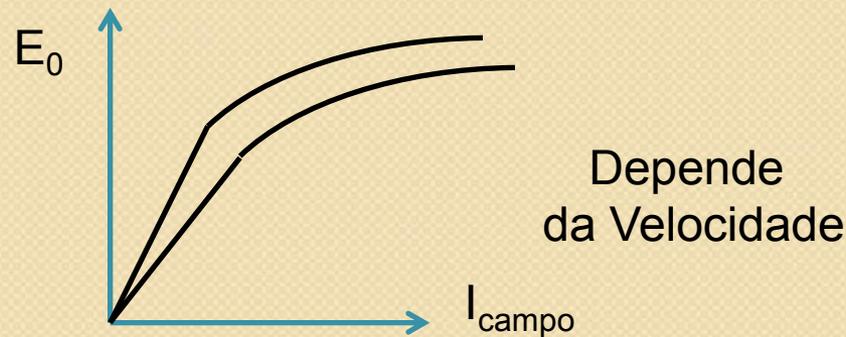
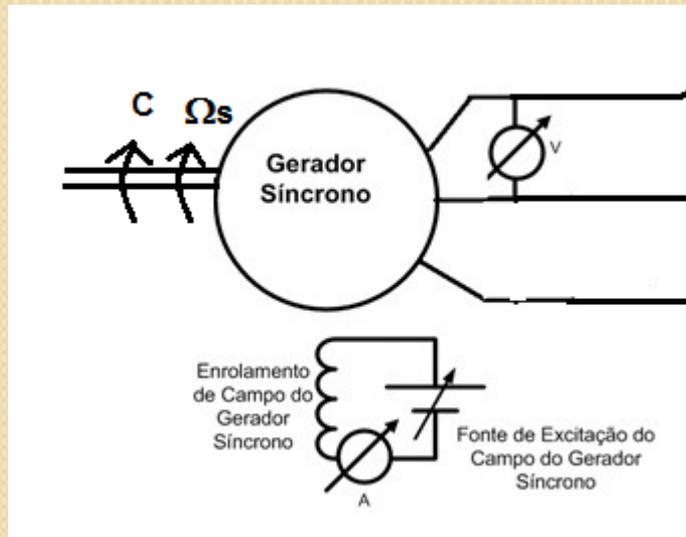


Ensaio em Curto

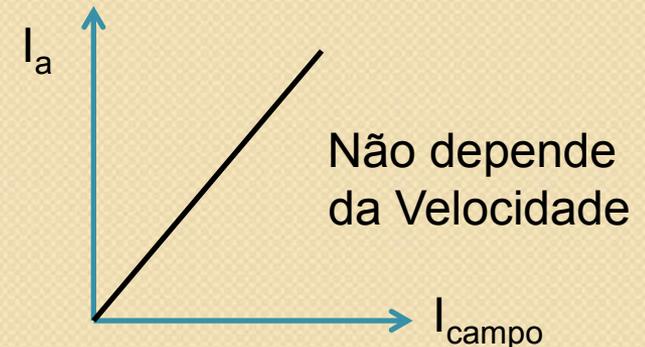
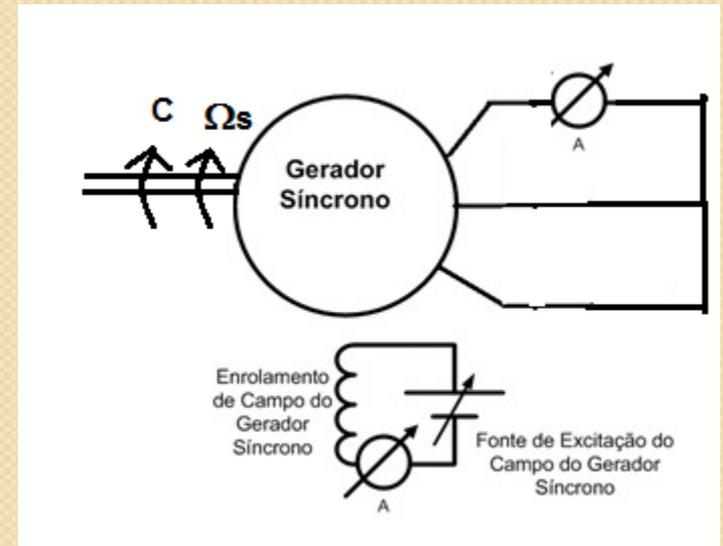


Como determinar X_s ?

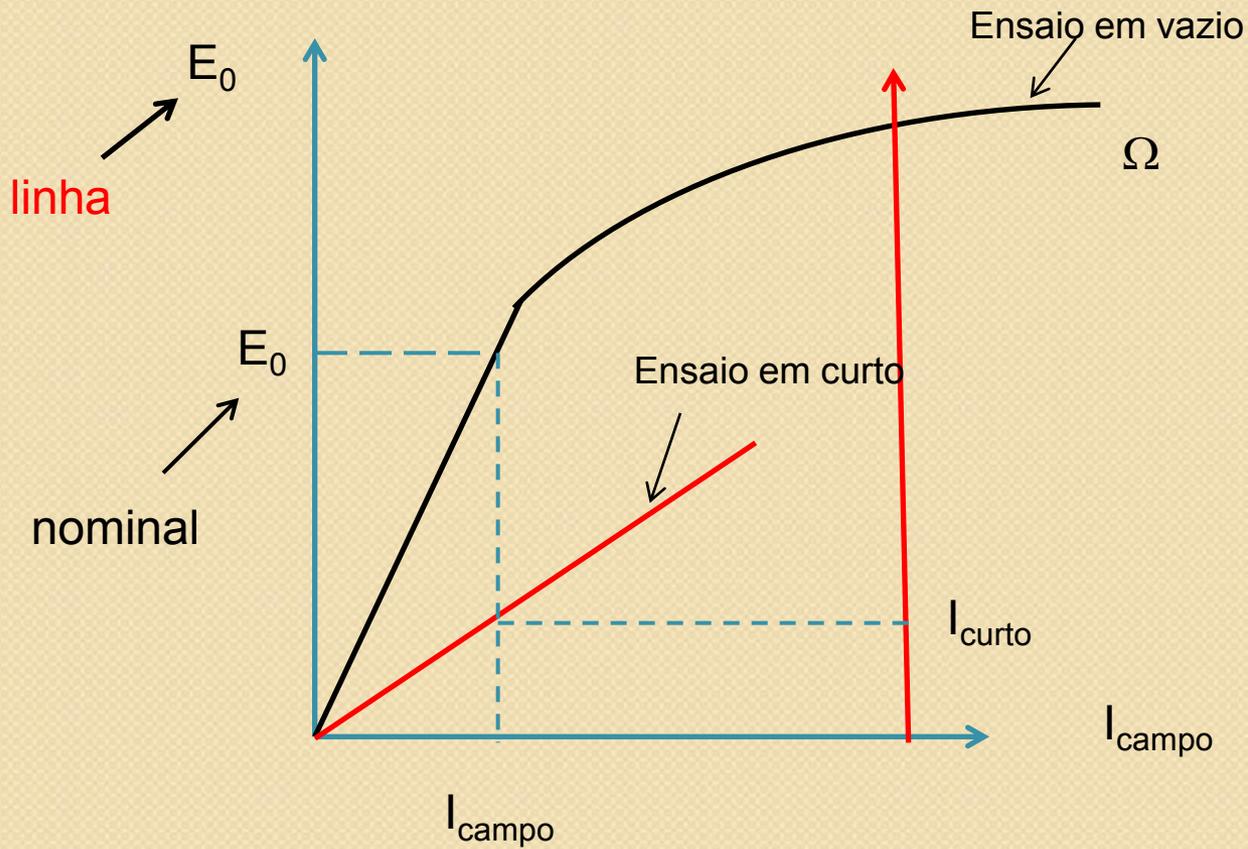
Ensaio em Vazio



Ensaio em Curto



A DETERMINAÇÃO DA REATÂNCIA SÍNCRONA

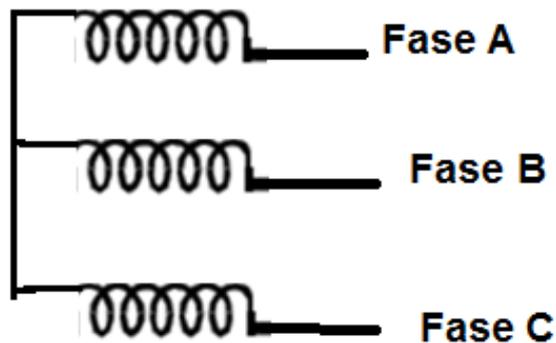


$$X_s = \frac{E_0}{\sqrt{3}I_{\text{curto}}}$$

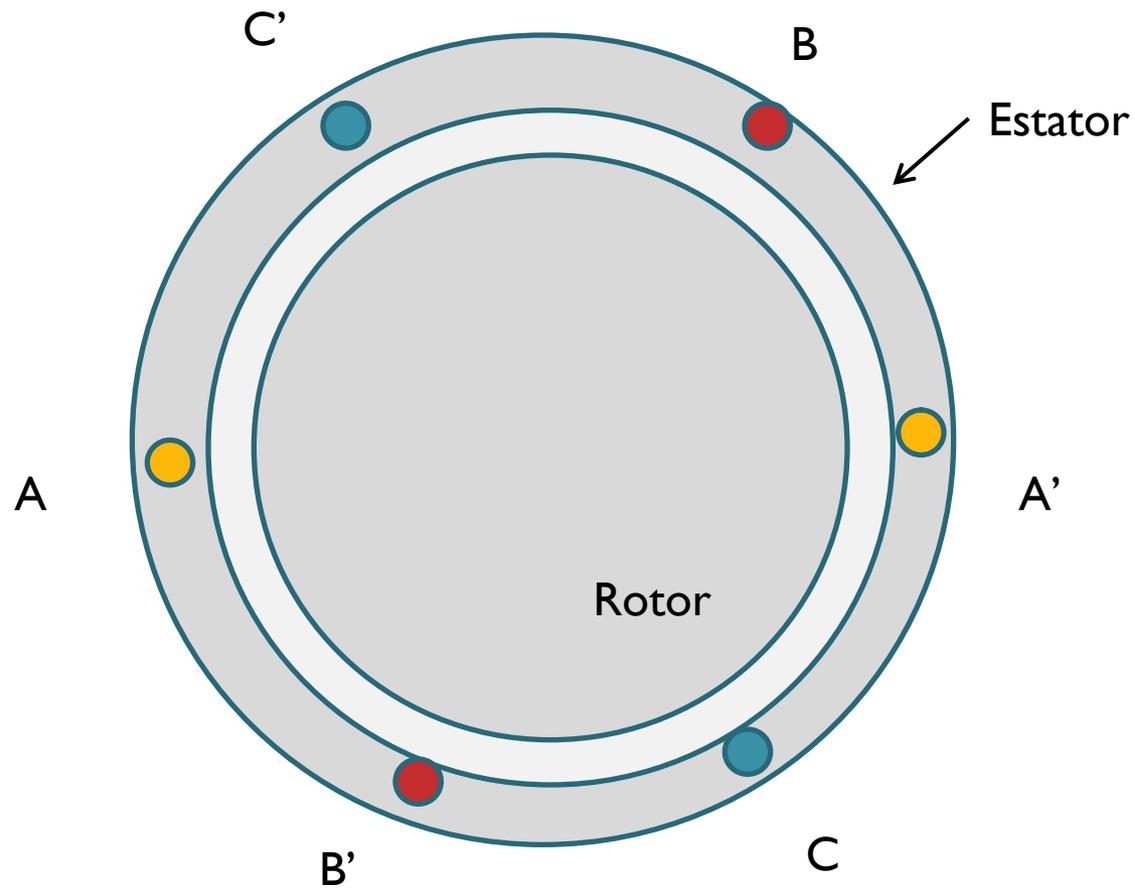
A ação das correntes do estator no interior da Máquina Síncrona

As correntes:

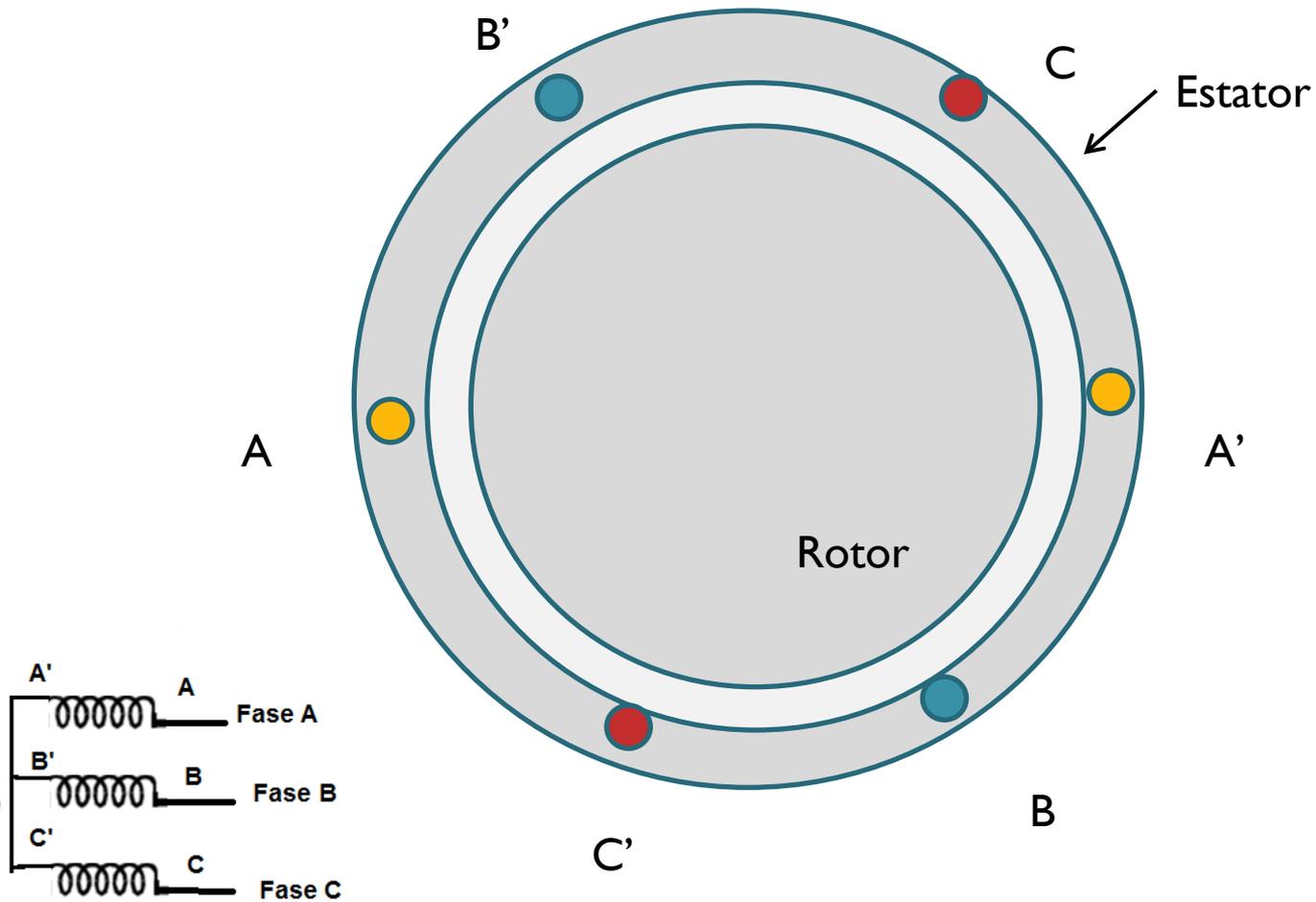
- Fase A $\rightarrow i_a(t) = I_{\max} \cos(\omega t)$
- Fase B $\rightarrow i_b(t) = I_{\max} \cos(\omega t - 120)$
- Fase C $\rightarrow i_c(t) = I_{\max} \cos(\omega t + 120)$



Máquina Síncrona: o enrolamento do estator



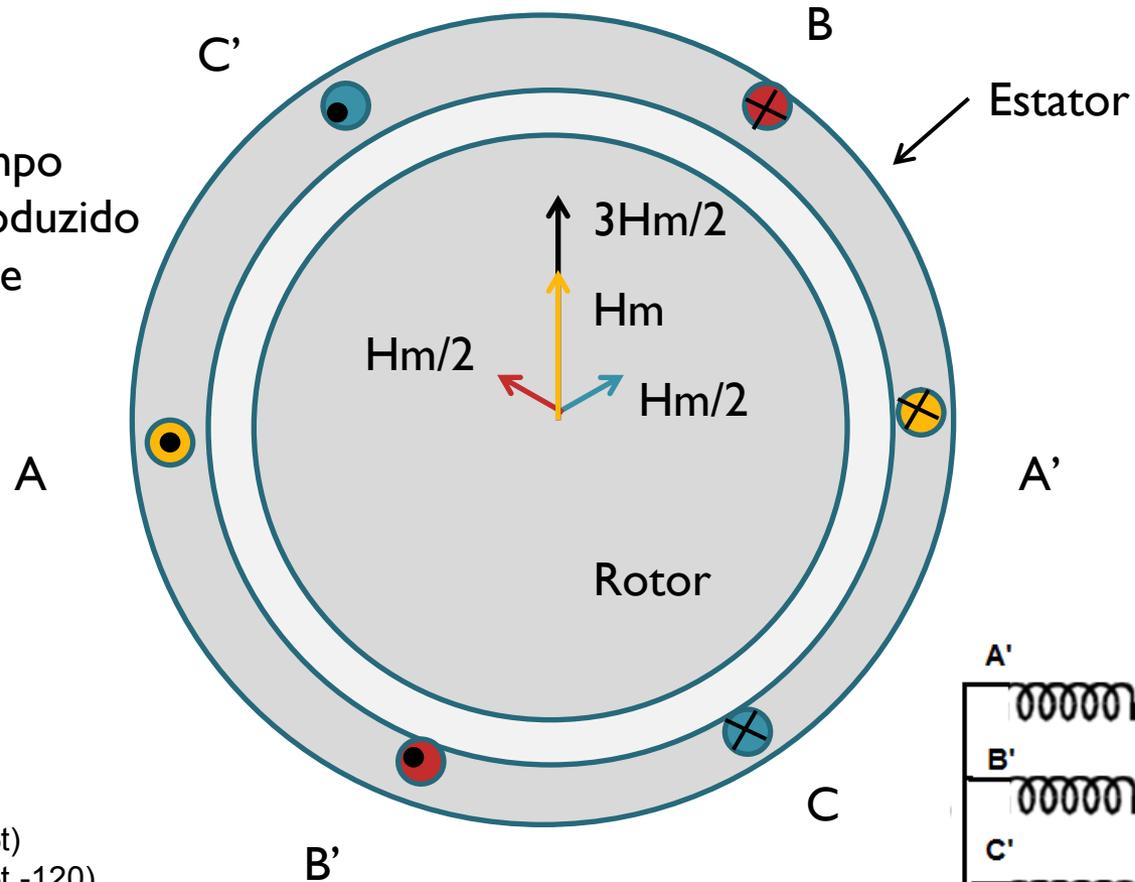
Máquina Síncrona: o enrolamento do estator



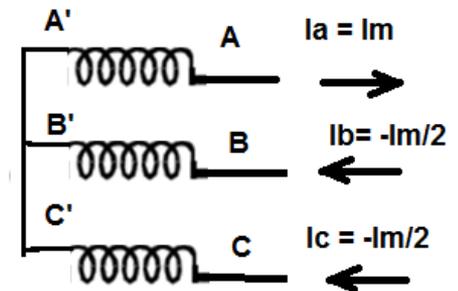
Máquina Síncrona: o campo produzido pelo enrolamento do estator

- Se $\omega t = 0$, então $i_a = I_m$; $i_b = i_c = -I_m/2$

H_m é o campo
Máximo produzido
Por uma fase



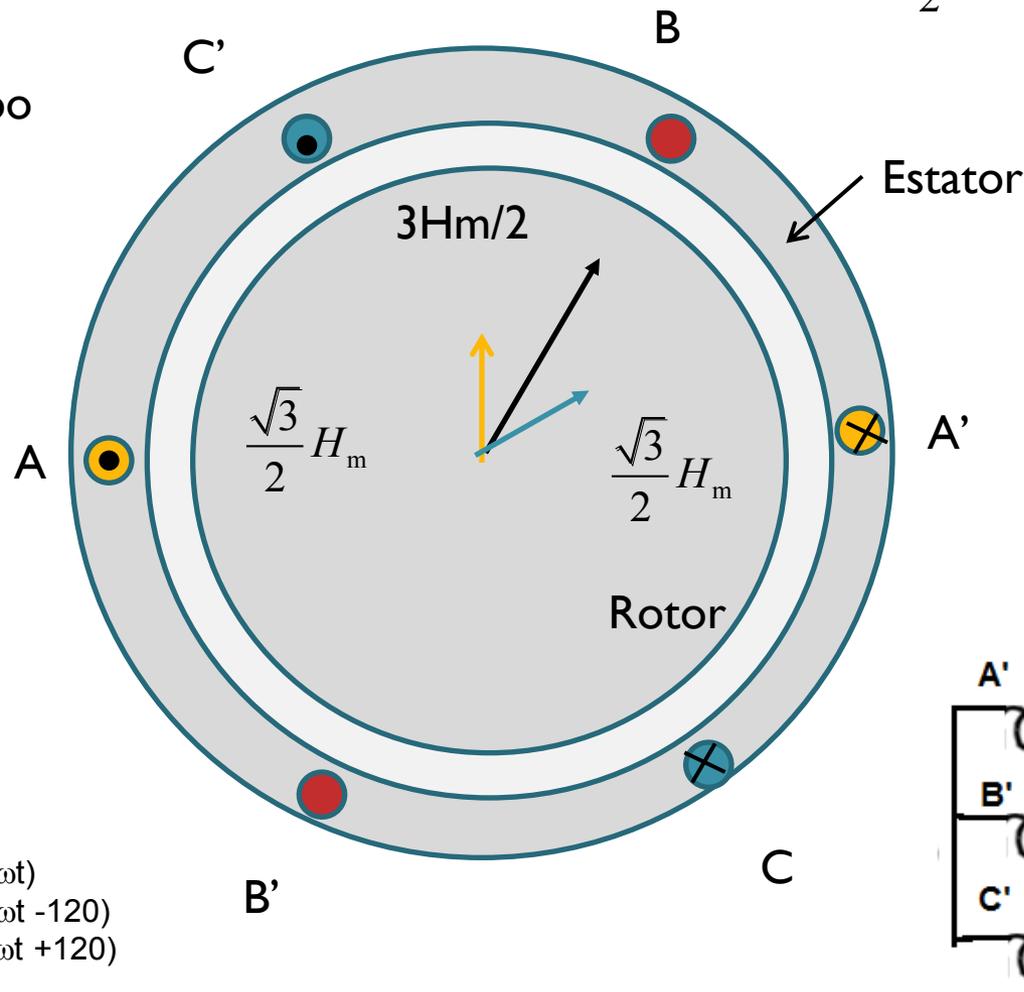
$$\begin{aligned}i_a(t) &= I_m \cos(\omega t) \\i_b(t) &= I_m \cos(\omega t - 120) \\i_c(t) &= I_m \cos(\omega t + 120)\end{aligned}$$



Máquina Síncrona: o campo produzido pelo enrolamento do estator

- Se $\omega t = 30$, então $i_a = -i_c = \frac{\sqrt{3}}{2} I_m$

H_m é o campo Máximo produzido Por uma fase



$$i_a(t) = I_m \cos(\omega t)$$

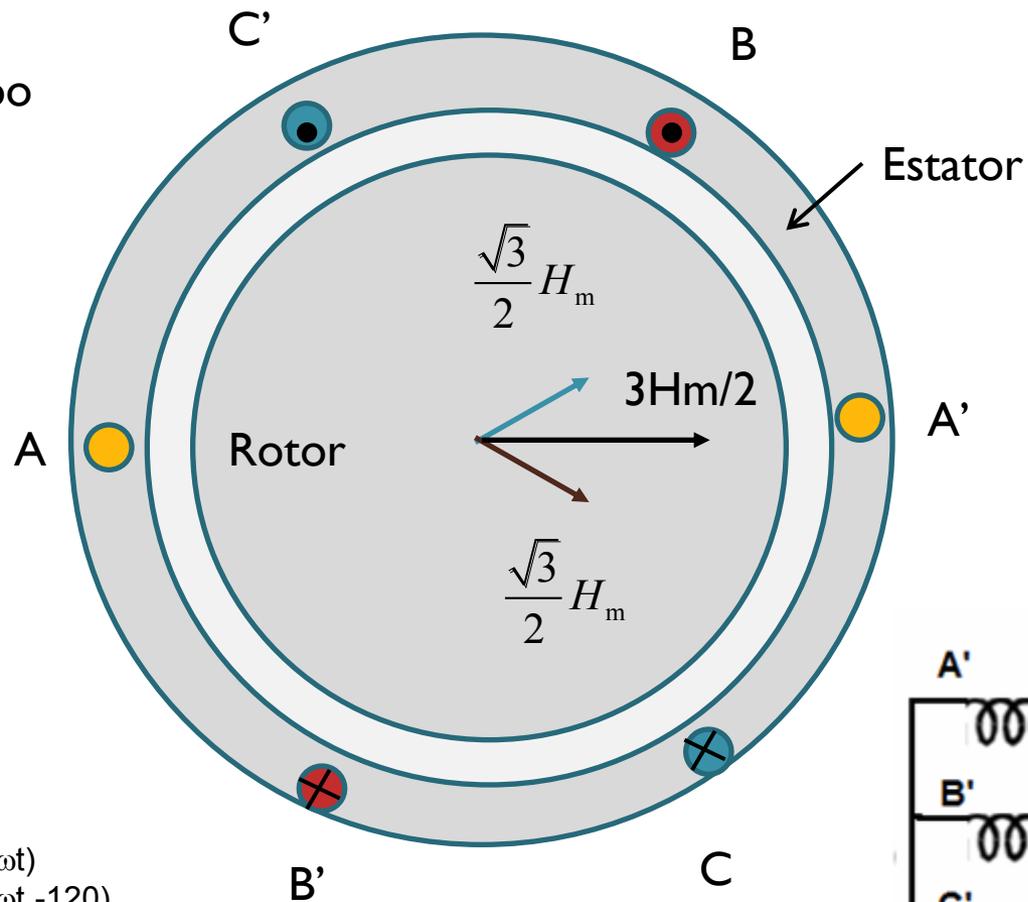
$$i_b(t) = I_m \cos(\omega t - 120)$$

$$i_c(t) = I_m \cos(\omega t + 120)$$

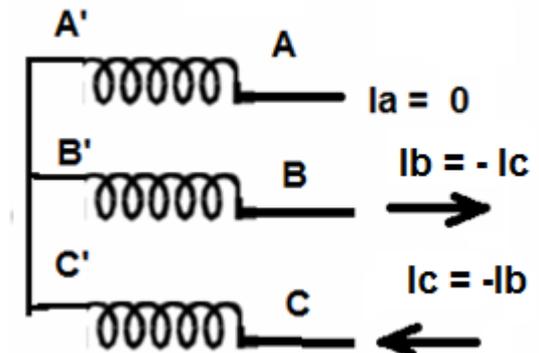
Máquina Síncrona: o campo produzido pelo enrolamento do estator

- Se $\omega t = 90$, então $i_a = 0$ e $i_b = -i_c = \frac{\sqrt{3}}{2} I_m$

H_m é o campo Máximo produzido Por uma fase



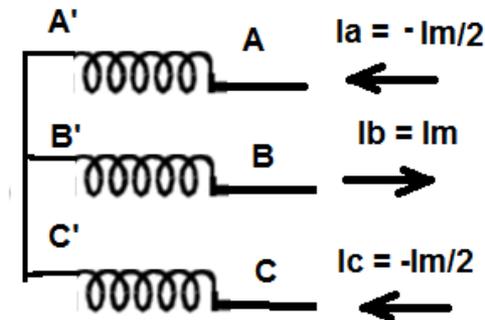
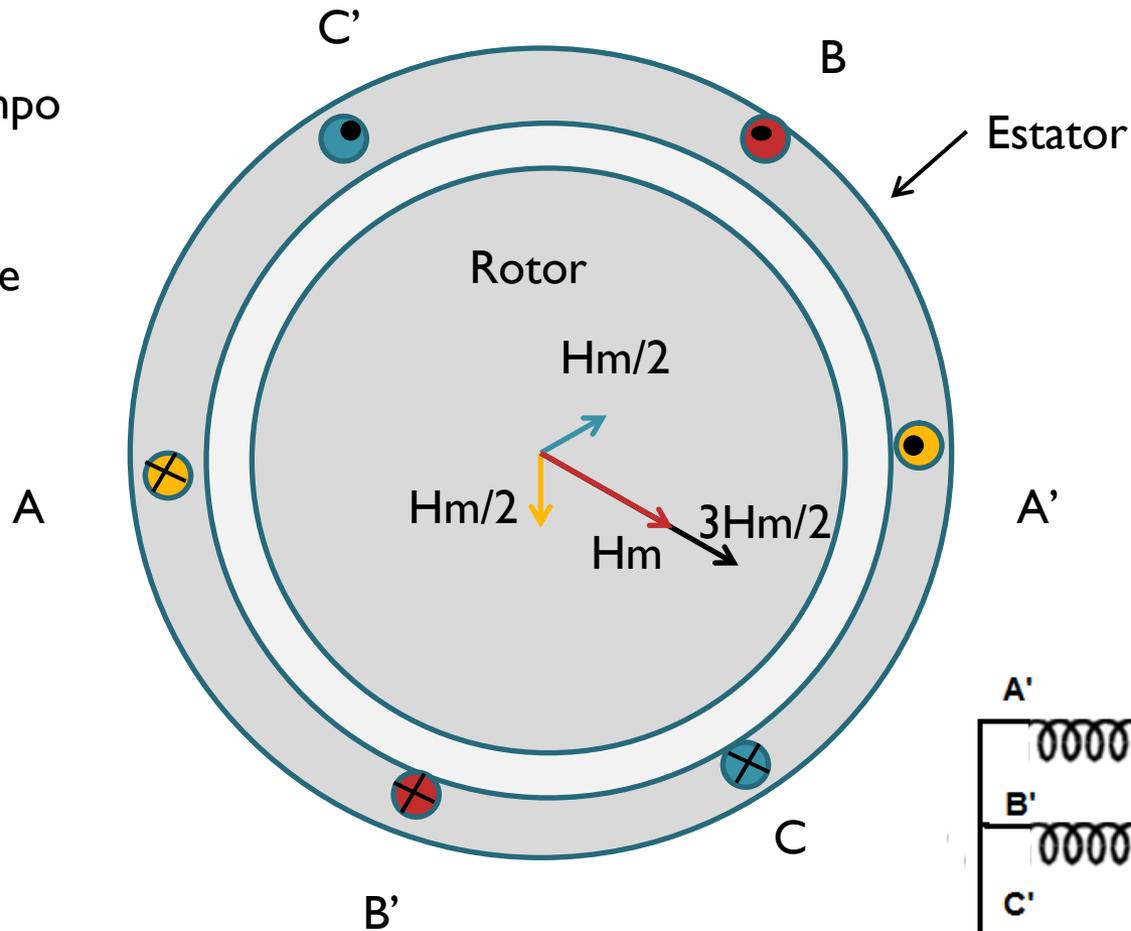
$$\begin{aligned} i_a(t) &= I_m \cos(\omega t) \\ i_b(t) &= I_m \cos(\omega t - 120) \\ i_c(t) &= I_m \cos(\omega t + 120) \end{aligned}$$



Máquina Síncrona: o campo produzido pelo enrolamento do estator

- Se $\omega t = 120^\circ$, então $I_b = I_m$; $I_a = I_c = -I_m/2$

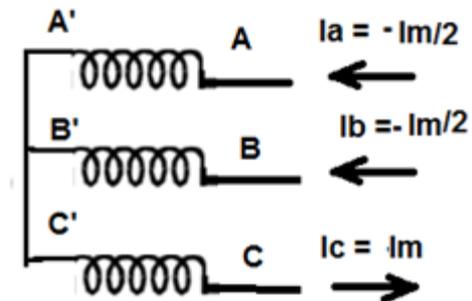
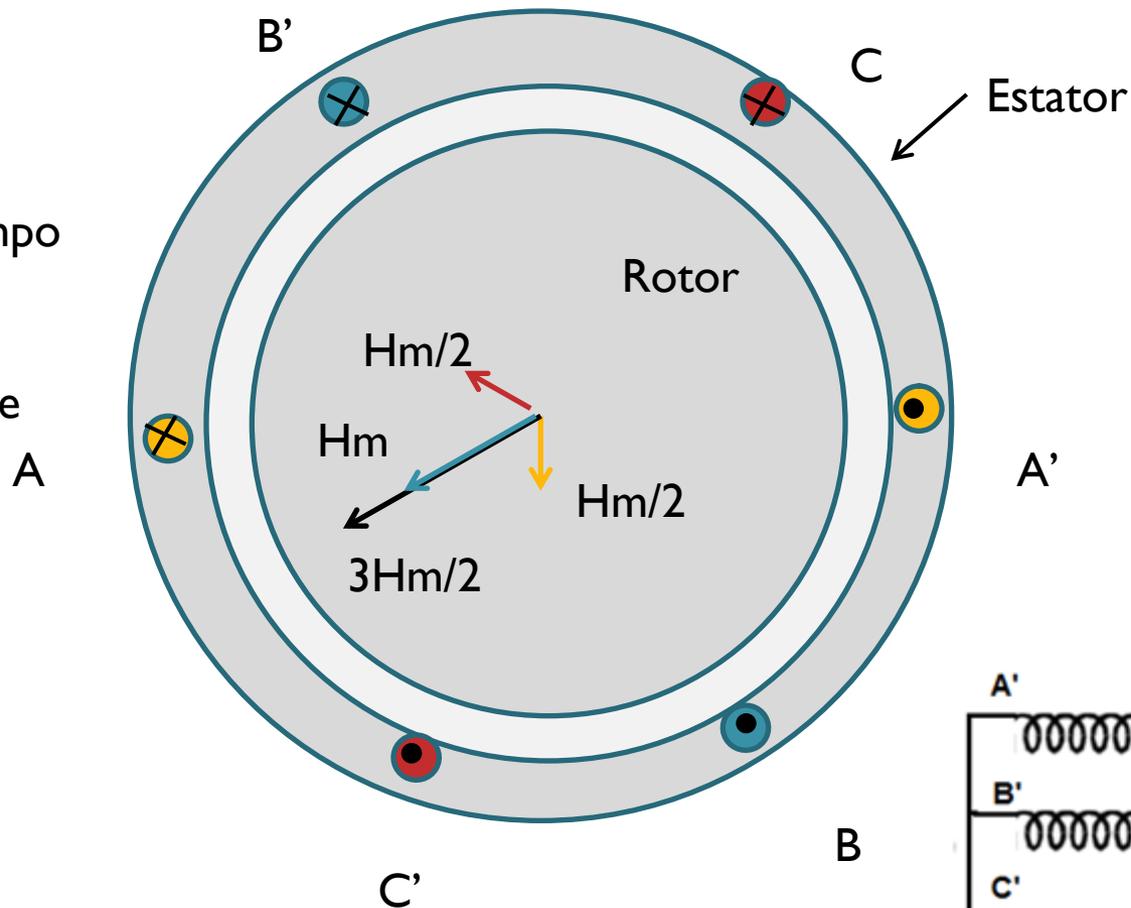
H_m é o campo Máximo produzido Por uma fase



Máquina Síncrona: o campo produzido pelo enrolamento do estator

- Se $\omega t = 240$, então $I_b = I_m$; $I_a = I_c = -I_m/2$

H_m é o campo Máximo produzido Por uma fase



Síntese:

- Observa-se que um enrolamento trifásico percorrido por correntes defasadas de 120 graus no tempo cria um campo girante de amplitude constante ($3H_m/2$).
 - Corrente Contínua em peça que gira (Rotor) cria Campo Girante. → **Mecanicamente.**
 - Correntes Alternadas em Bobinas Estacionárias (Estator) criam um Campo Girante. → **Eletricamente.**

Características do Campo Girante do Estator

- Se a máquina possui dois polos com valor máximo igual a I_m e frequência f , então:
 - O campo girante possui amplitude máxima igual a $3H_m/2$, em que H_m é amplitude máxima do campo magnético de uma fase.
 - O Campo Girante dá **uma volta mecânica completa** em um **período T** das correntes. Logo, a velocidade deste campo girante é igual a $2\pi/T = 2\pi f$

O Campo Girante do Estator

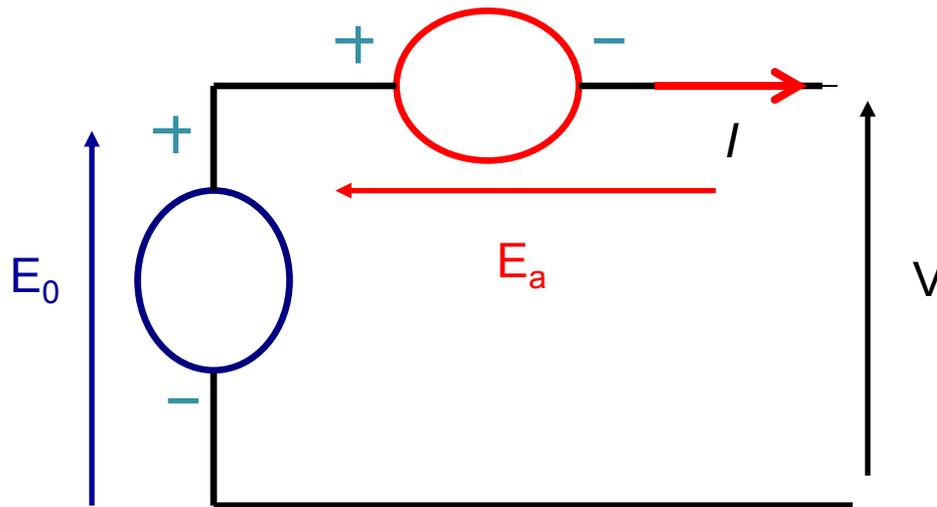
- Se ele possuir mais polos então sua velocidade será igual a:

$$\Omega_s = 2\pi \frac{f}{p}$$

- Em que:
 - f frequência
 - p número de pares de polos
- Ω_s Velocidade Síncrona (rad/s)

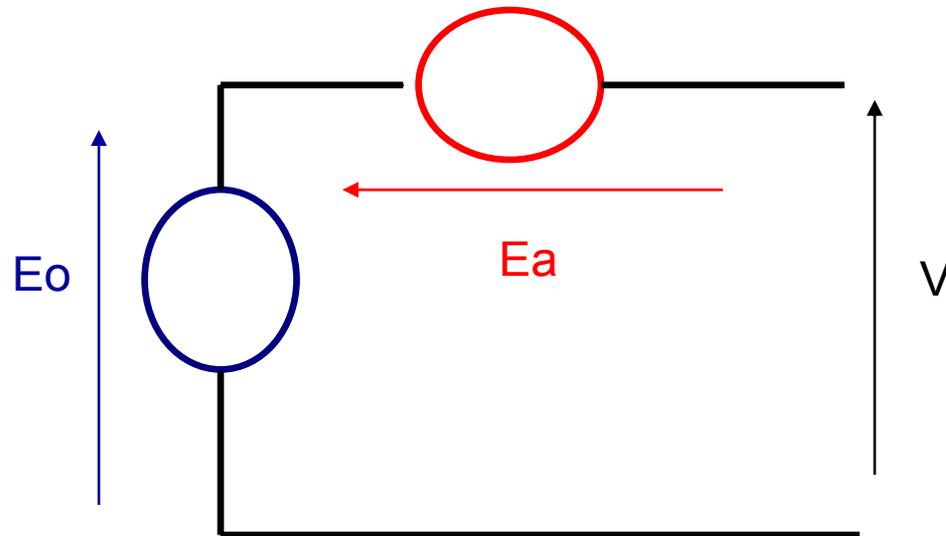
Um outra visão do Circuito Equivalente

- O **Campo Girante do Rotor** induz em cada fase uma tensão de valor E_0 .
- Já o **Campo Girante do Estator** induz em cada fase uma Tensão de Valor E_a



O circuito equivalente e os campos girantes do rotor e estator

- Mas quem produz E_a é a corrente nas 3 fases
- $E_a = j\omega N \phi_a$
- fluxo ϕ_a é produzido pelas correntes das três fases do estator. Pode-se escrever:

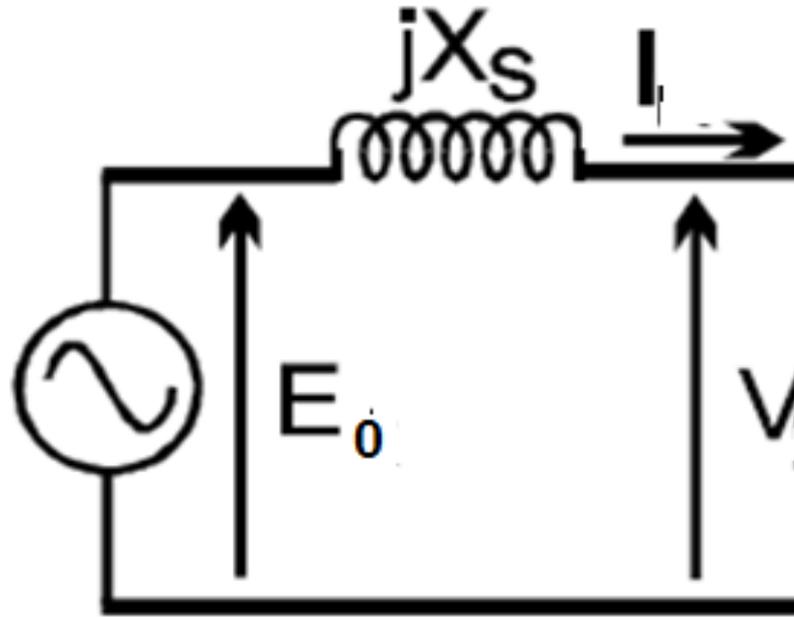


$$N\phi_a = L_s I_a$$

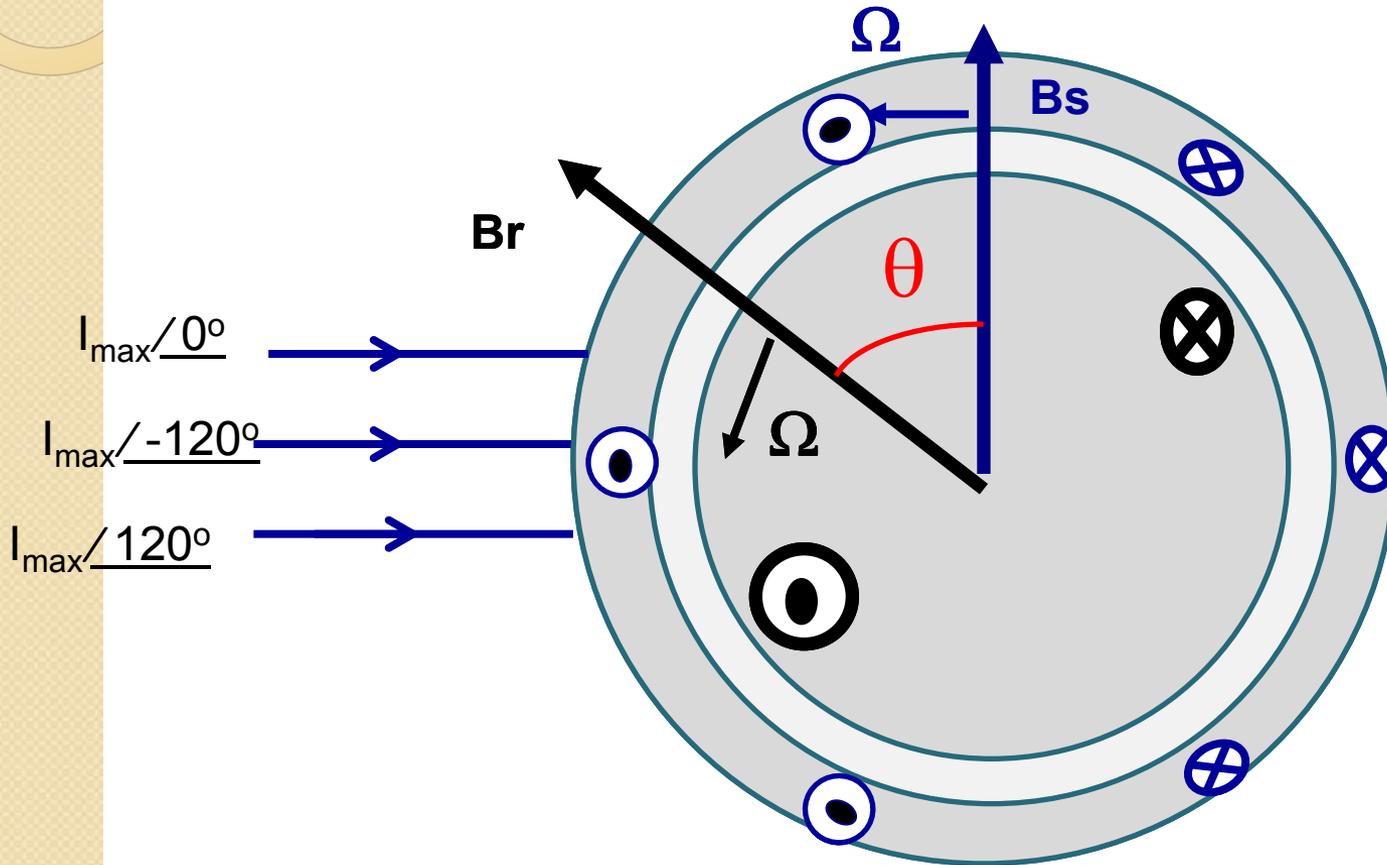
Ou seja

$$E_a = j\omega L_s I_a = jX_s I_a$$

O circuito equivalente por fase



O Conjugado Desenvolvido



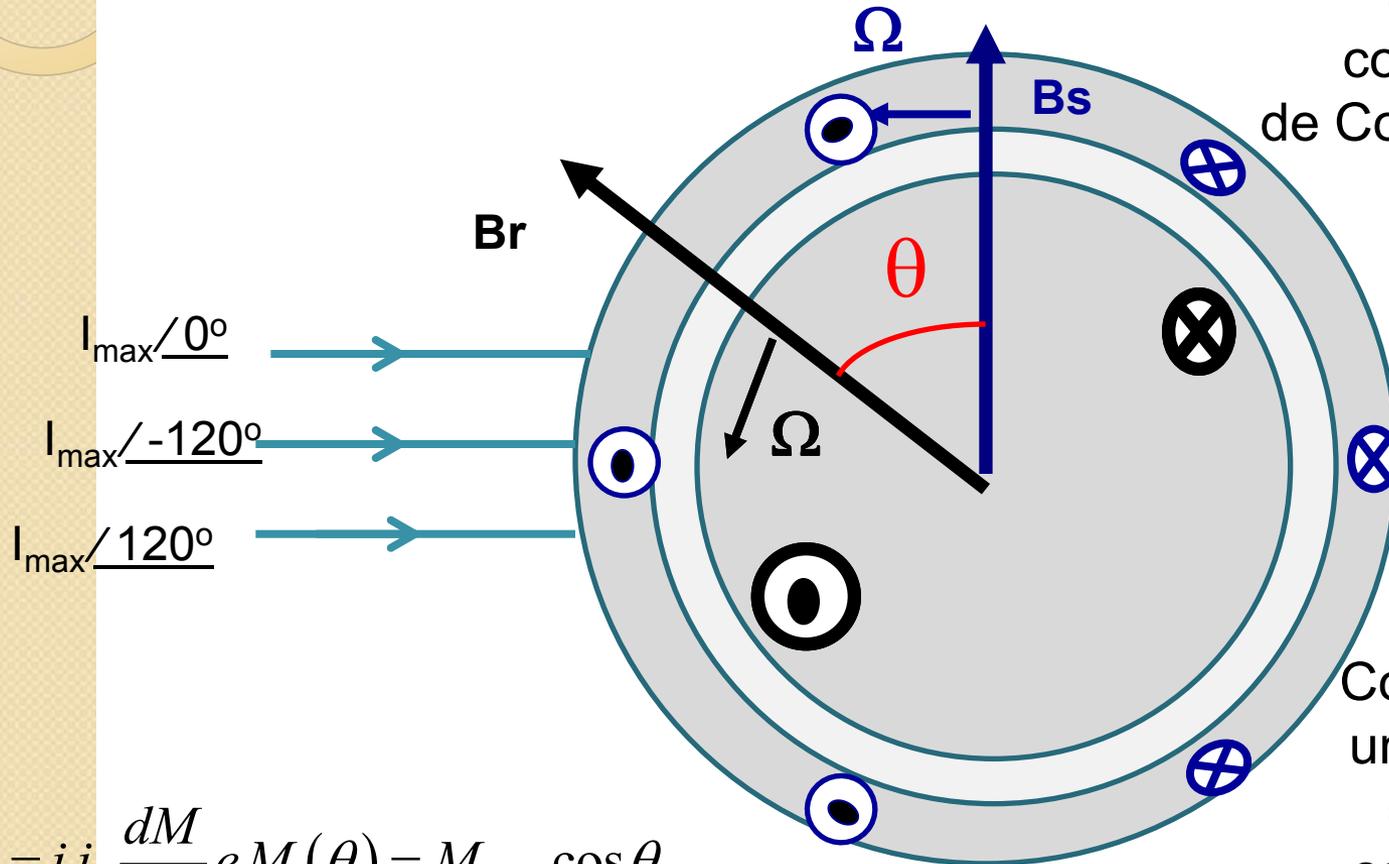
Dois campos
que giram
na mesma
velocidade!

**B_s gira
“eletricamente”
→ Trifásico**

**B_r gira
“mecanicamente”
→ Turbina**

O Conjugado Desenvolvido

Há alguma semelhança (conceitual) com a Máquina de Corrente Contínua?

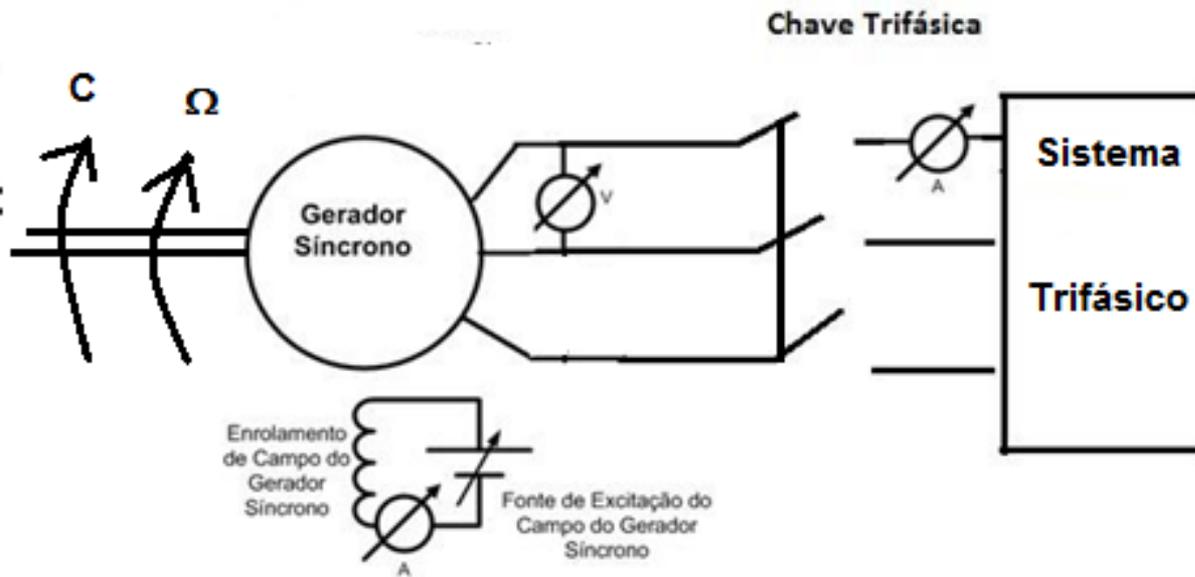


$$C = i_1 i_2 \frac{dM}{d\theta} e M(\theta) = M_{\max} \cos \theta$$

$$C = -i_1 i_2 M_{\max} \sin \theta$$

Com $\Omega \neq 0$ e com uma defasagem constante no espaço entre os dois campos (θ) então $C_{\text{médio}} \neq 0$.

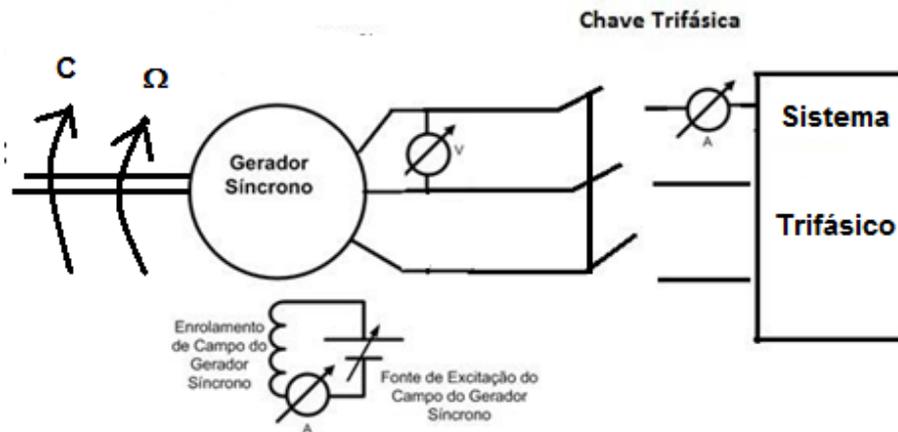
A Máquina Síncrona Ligada ao Sistema Elétrico de Potência



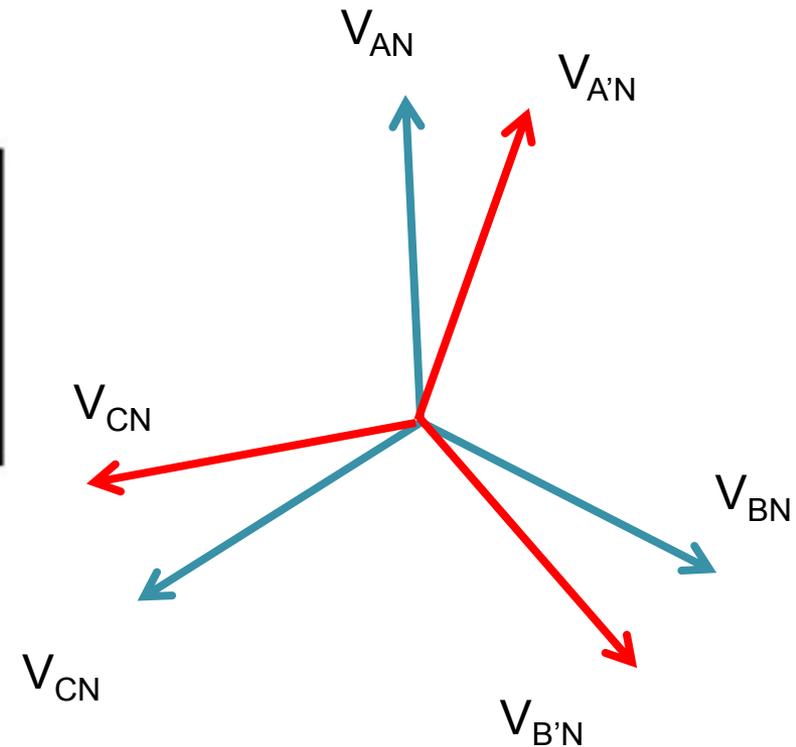
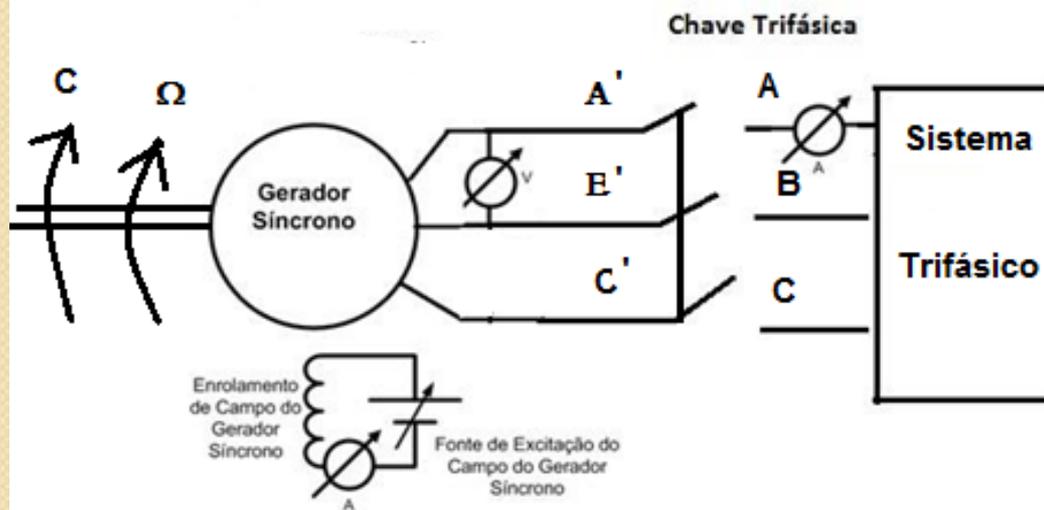
- Sistemas Trifásicos de Potência
- Possuem potência “instalada” muito maior que uma única máquina.
- O Sistema Trifásico impõe:
 - Tensão
 - Frequência
 - Sequência de Fases

A Máquina Síncrona Ligada ao Sistema Elétrico de Potência

- Condições para fechamento da chave
 - Mesma Tensão
 - Mesma Frequência
 - Mesma Sequência de Fases
 - Defasagem entre tensões nula.



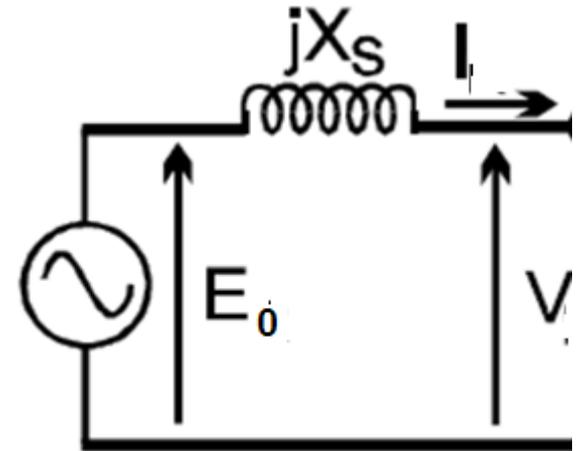
A Máquina Síncrona Ligada ao Sistema Elétrico de Potência



Como fechar a Chave?

A Máquina Síncrona Recém Ligada ao Sistema Elétrico de Potência

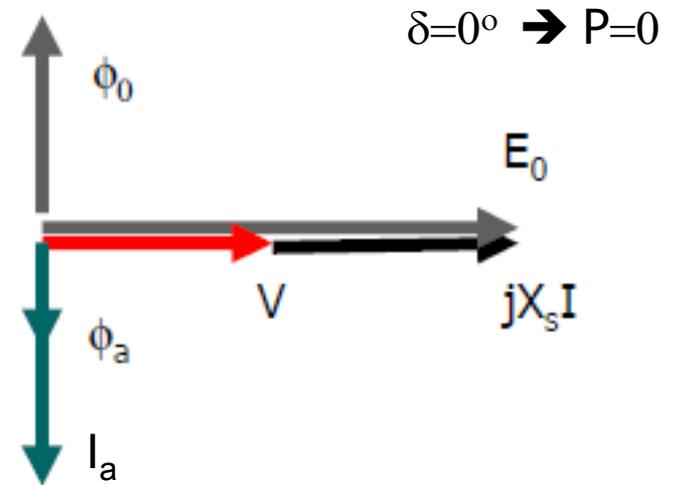
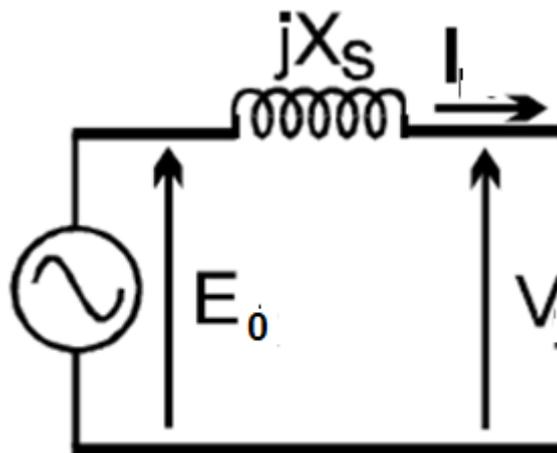
- Após o fechamento (com êxito)
- $E_0 = V$
- $I = 0$
- Por vezes denominada condição de flutuação.



A Máquina Síncrona Ligada ao Sistema Elétrico de Potência

- Sem atuar na turbina, mas **aumentando** a corrente de campo

- I_{exc} ↑
- E_0 ↑



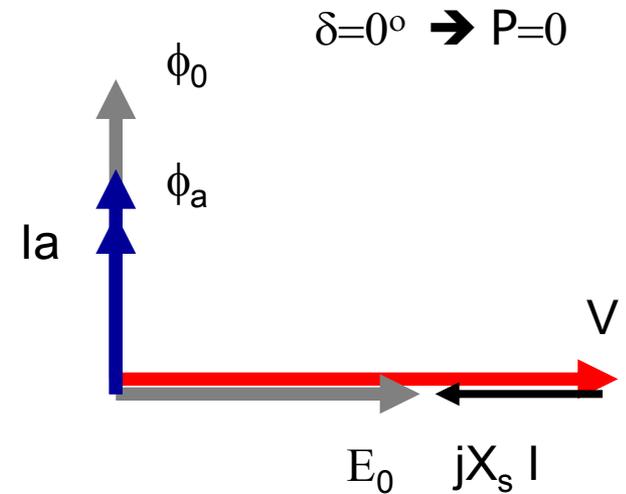
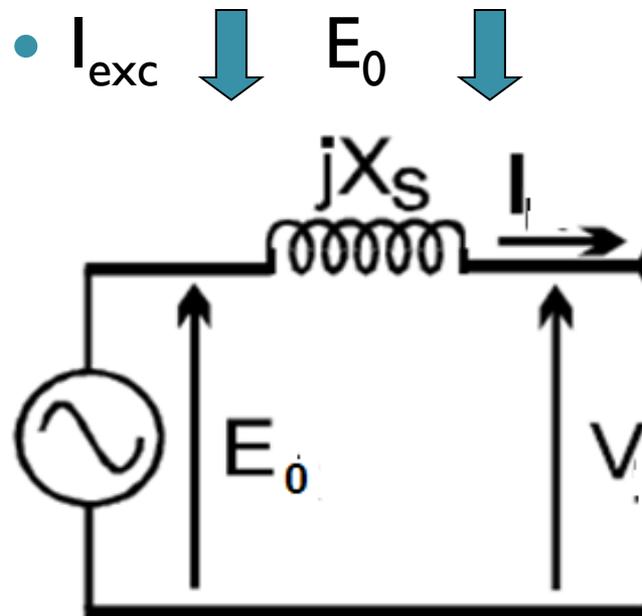
Emite Corrente de natureza Indutiva

Absorve Corrente de natureza Capacitiva

Fluxo Desmagnetizante

A Máquina Síncrona Ligada ao Sistema Elétrico de Potência

- Sem atuar na turbina, mas **diminuindo** a corrente de campo em relação à condição de flutuação

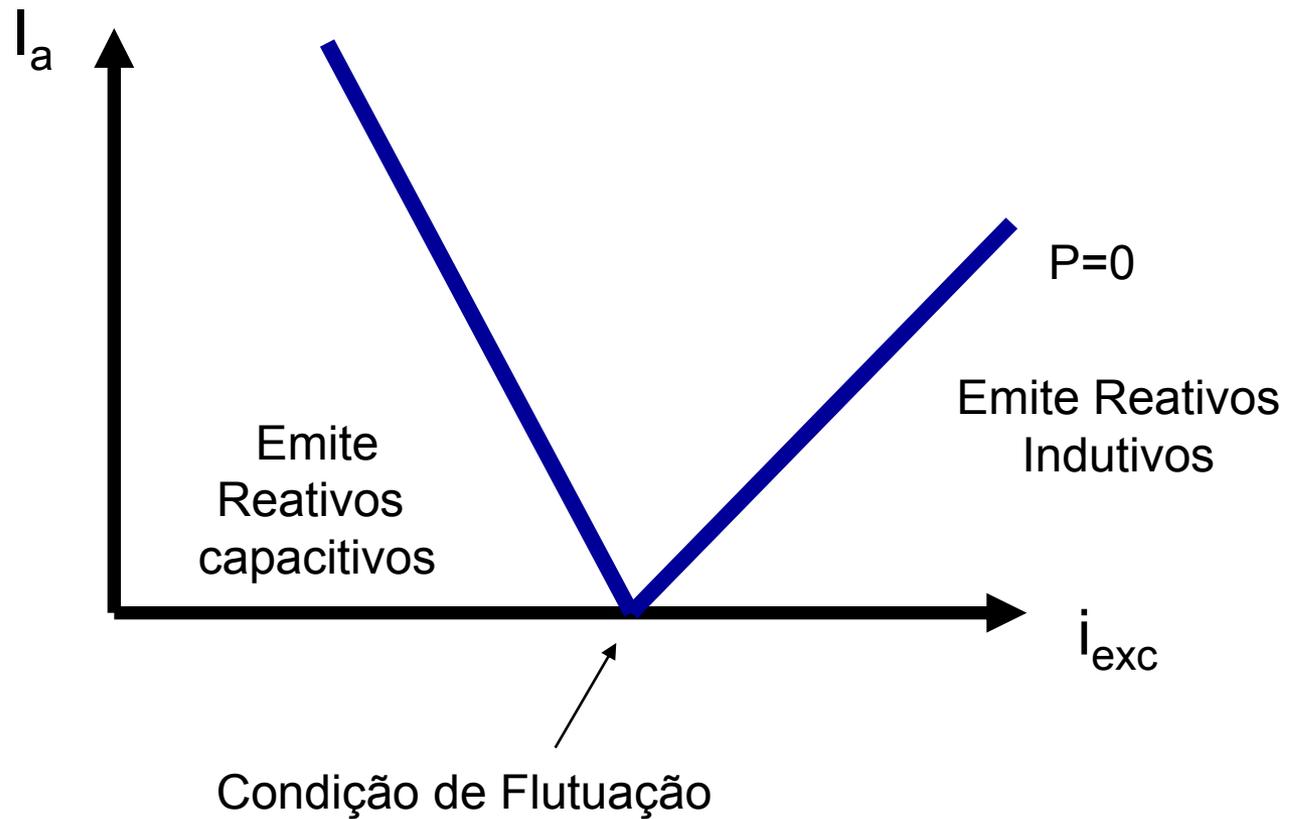


Emite Corrente de natureza capacitiva

Absorve Corrente de natureza indutiva

Fluxo Magnetizante

Uma curva interessante

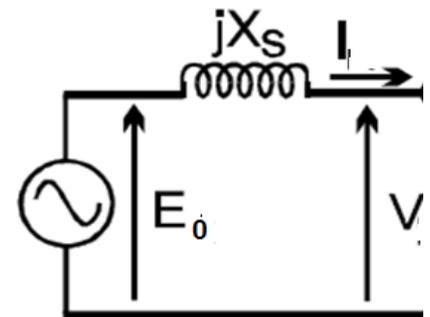
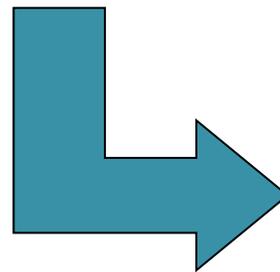


E se a turbina passa a ser acionada?

- Do ponto de vista mecânico, a turbina oferecerá um torque (ou conjugado) no eixo da Máquina Síncrona (Gerador Síncrono).
- A **velocidade** deve se manter **constante**, dado que a Máquina Síncrona está ligada a um Sistema Elétrico de Potência de **frequência f** , ou seja, a **rotação n** deve ser mantida.

E se a turbina passa a ser acionada?

- Logo há necessidade de um Regulador de Velocidade.
- Então a potência mecânica inserida na Máquina passa a valer: $P = C \times \Omega_s$
- A hipótese $R \ll X_s$ (resistância de cada fase é muito menor que a Reatância Síncrona) é válida na grande parte das Máquinas Síncronas.



E se a turbina passa a ser acionada?

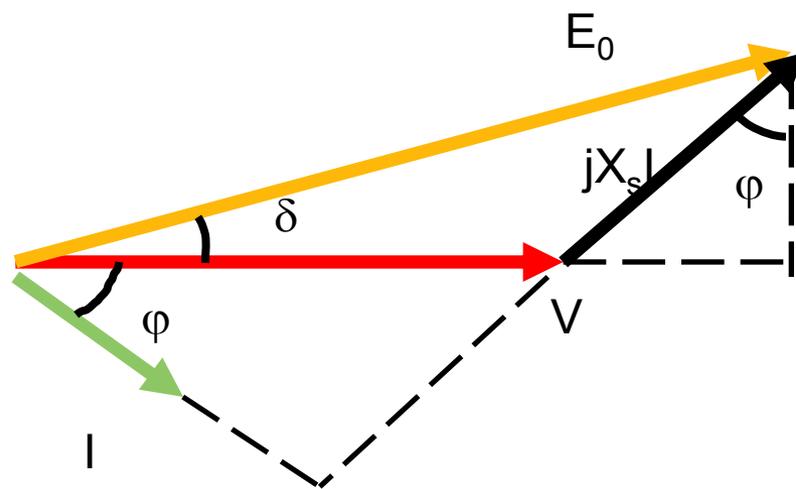
- Do ponto de vista elétrico pode-se escrever a Potência Ativa no Induzido da Máquina (Enrolamento Trifásico) em duas formas. A Potência é Trifásica. As demais grandezas são de fase.

$$\begin{cases} P = 3VI \cos \varphi \\ P = 3 \frac{VE_0}{X_s} \sin \delta \end{cases}$$

Relembrando a dedução da expressão do Ângulo de Potência (ângulo δ)

- O ângulo δ aponta a defasagem entre o fasor E e o fasor V .
- Note que $E_0 \text{ sen } \delta$ é igual a $X_s I \text{ cos } \varphi$
- Mas $P = 3VI \text{ cos } \varphi$
- Logo:

$$P = 3 \frac{VE_0}{X_s} \text{ sen } \delta$$



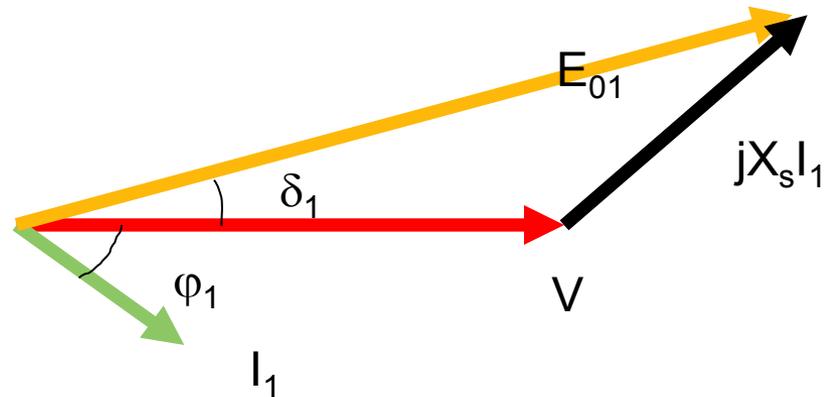
Gerador Síncrono ligado ao Sistema Elétrico de Potência

- $V =$ constante
- $f =$ constante
- Se, por hipótese, a potência ativa (P) for mantida constante \rightarrow torque constante!

$$\left\{ \begin{array}{l} P = 3VI \cos \varphi \\ P = 3 \frac{VE_0}{X_s} \sin \delta \end{array} \right. \rightarrow \left\{ \begin{array}{l} I \cos \varphi = cte_1 \\ E_0 \sin \delta = cte_2 \end{array} \right.$$

Gerador Síncrono ligado ao Sistema Elétrico de Potência

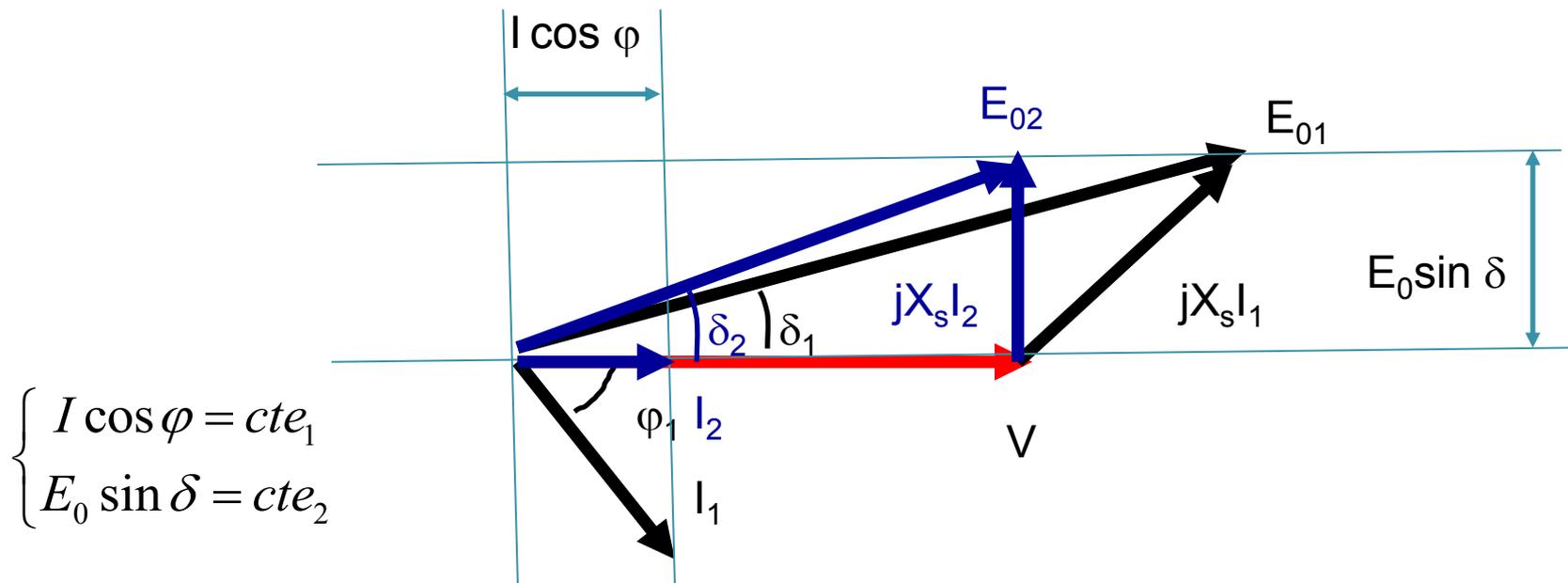
- Uma condição inicial: a máquina síncrona foi ajustada para emitir corrente indutiva, então:



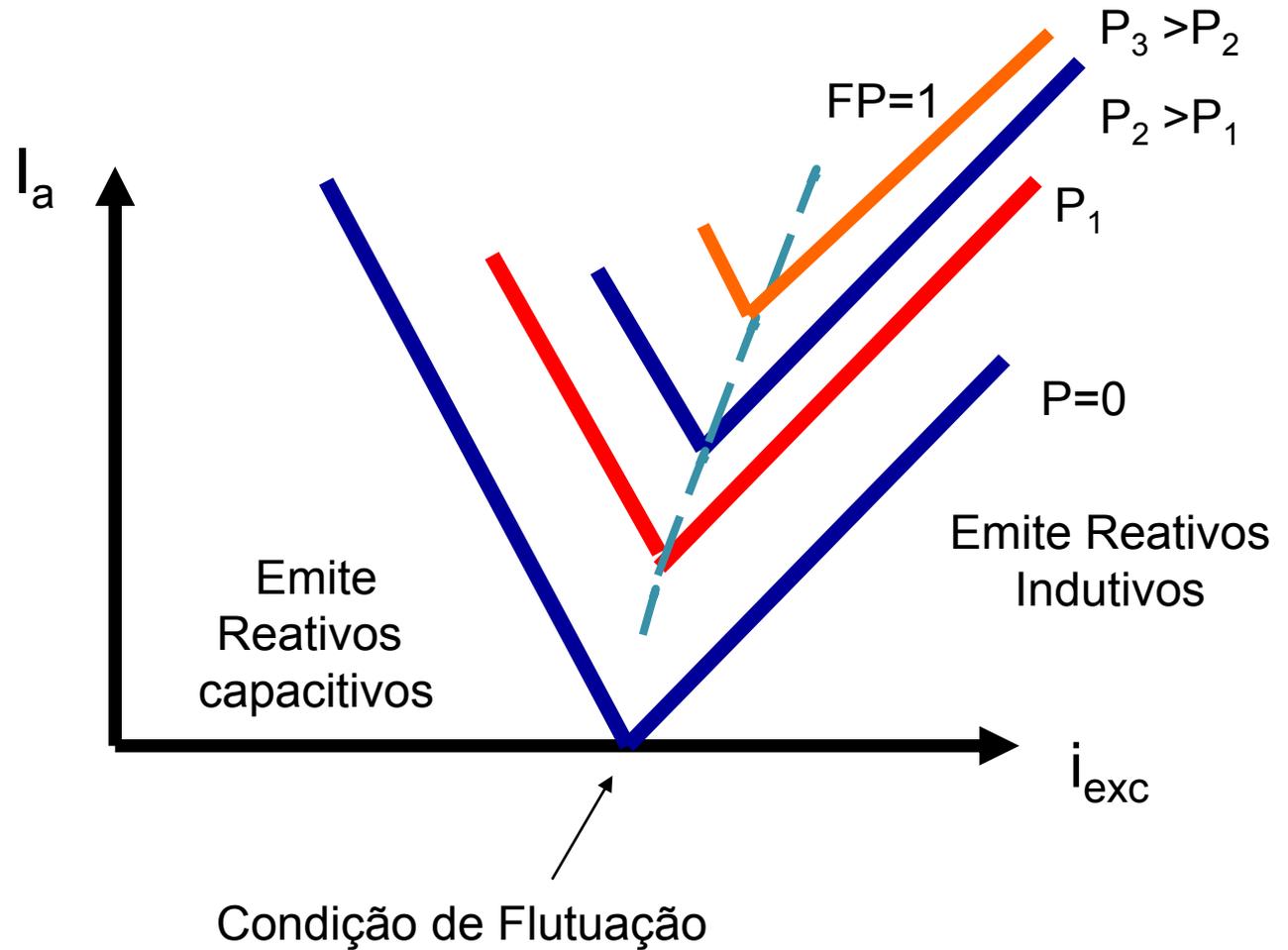
- Ajuste:
 - Escolha do valor da corrente de campo $\rightarrow E_{01}$
 - Escolha da Potência Ativa (Torque)

Gerador Síncrono ligado ao Sistema Elétrico de Potência

- Uma *segunda* condição : a máquina síncrona passa a emitir corrente em fase com a tensão, **sem que se atue na turbina, ou seja, a Potência Ativa se mantém (torque constante)**. Ação realizada: diminui-se somente a corrente de excitação (note que $E_{01} > E_{02}$).

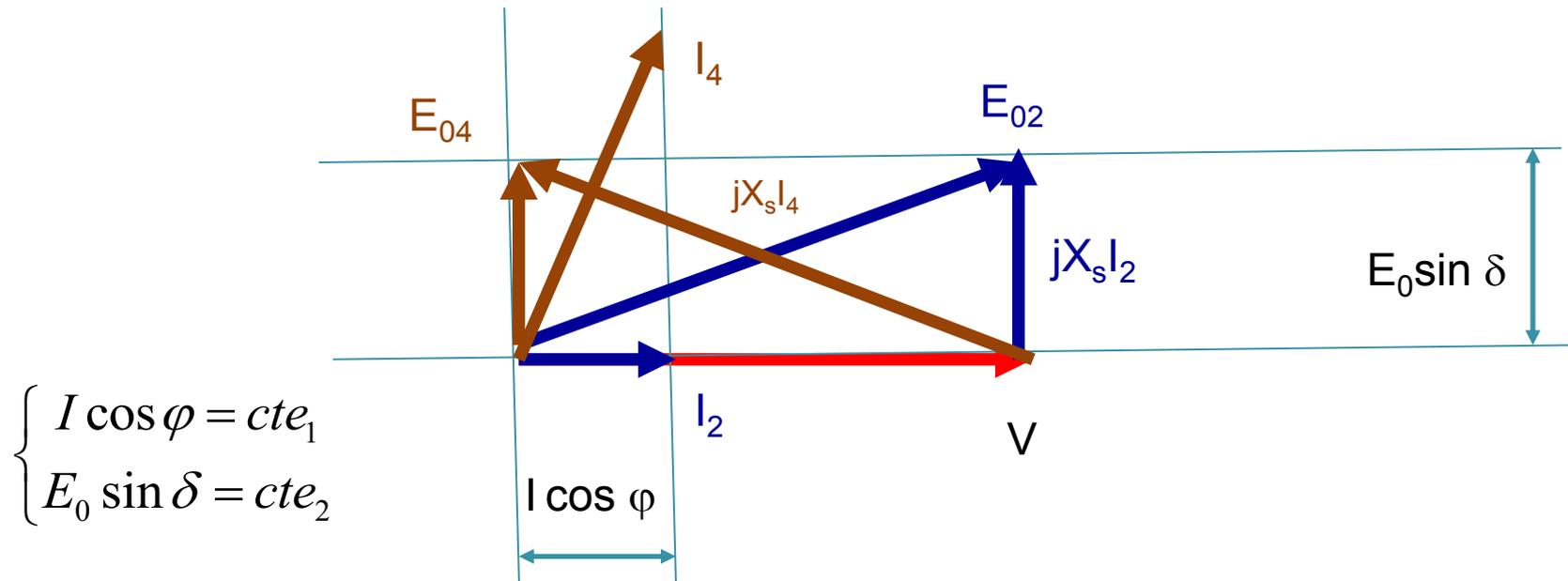


Gerador Síncrono ligado ao Sistema Elétrico de Potência- Curvas em V



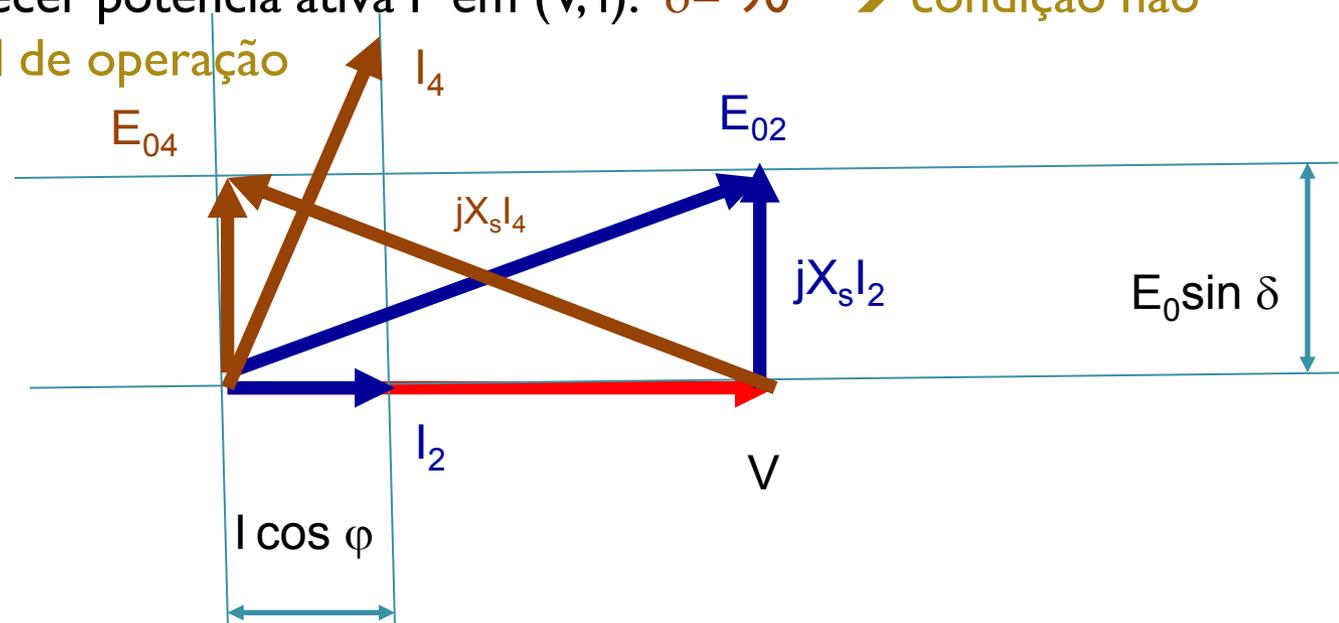
Gerador Síncrono ligado ao Sistema Elétrico de Potência: Estabilidade

- Se $\delta = 90^\circ$ alcança-se o limite de estabilidade estática. Caso se mantenha $P = \text{cte}$ com $i_{\text{exc}} \downarrow$
A máquina perde sincronismo.

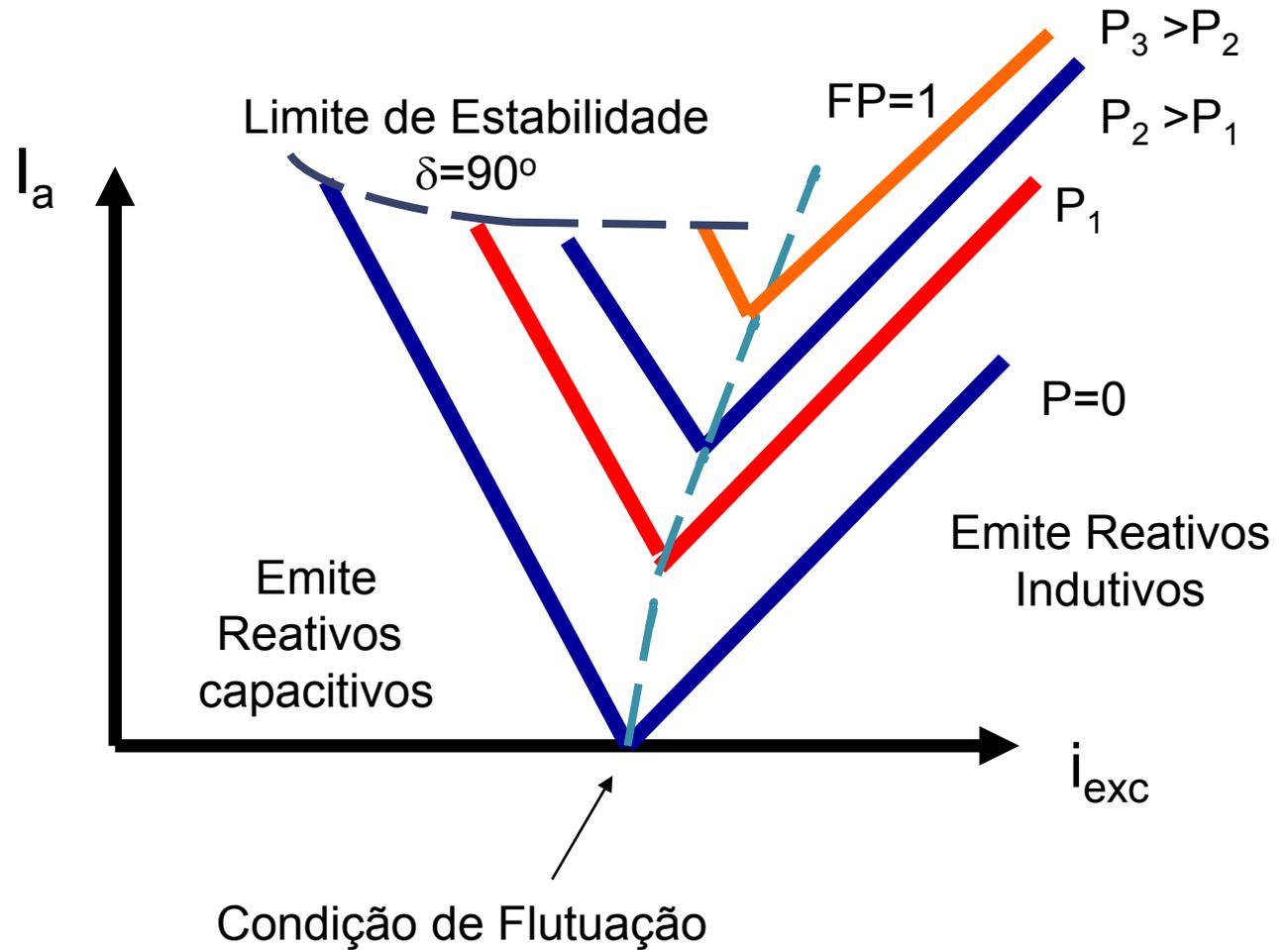


Gerador Síncrono ligado ao Sistema Elétrico de Potência

- Note que há duas condições de mínima corrente:
 - A condição (2) é a menor corrente de armadura (corrente no enrolamento trifásico) para fornecer potência ativa P em (V, f) . $\varphi=0 \rightarrow$ condição usual de operação
 - A condição (4) é a menor corrente de campo (menor E_0) para fornecer potência ativa P em (V, f) . $\delta=90^\circ \rightarrow$ condição não usual de operação



Gerador Síncrono ligado ao Sistema Elétrico de Potência- Curvas em V



Motor Síncrono Ligado ao Sistema

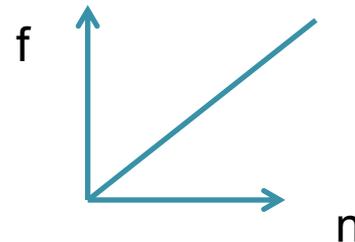
- Problema

- O Campo Girante do Estator gira a uma velocidade $n_s = f / p$
- Logo para um Motor Síncrono alimentado em uma frequência $f=60$ Hz, não terá torque de partida, porque $n_s \neq n_R$, que vale zero.

Motor Síncrono Ligado ao Sistema

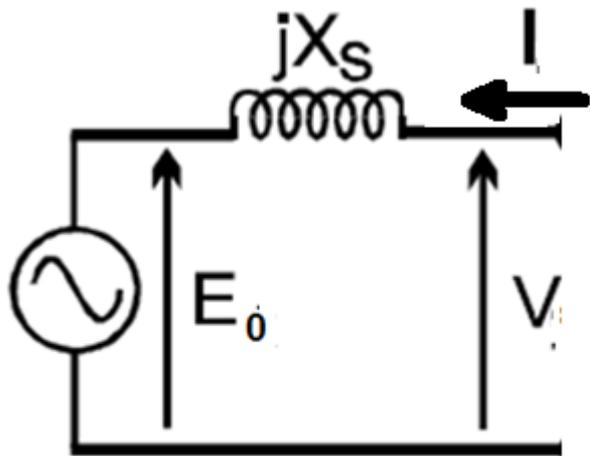
- Soluções:

- Partida com inversor, com aumento gradativo da frequência aplicada, em geral $V/f = \text{cte.}$



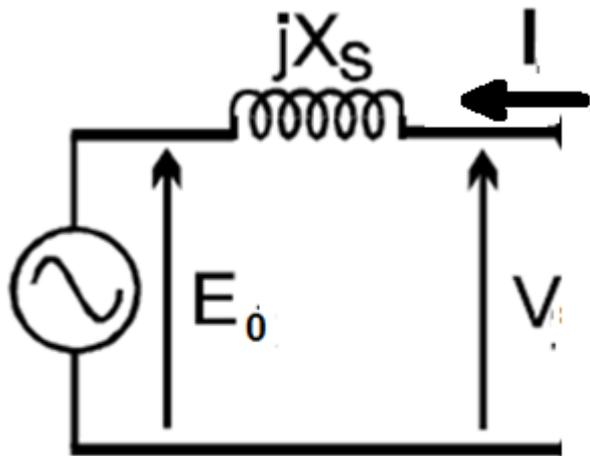
- Coloca-se um enrolamento a mais na Máquina Síncrona (gaiola), para que ela faça a partida tal qual um Motor de Indução.

Motor Síncrono Ligado ao Sistema com $P=0$



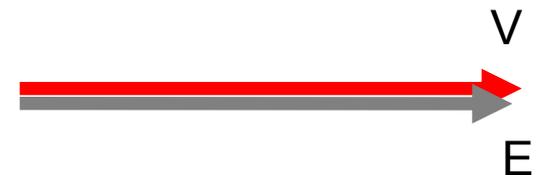
- As expressões:
- $P = 3 VI \cos\varphi$
- $P = 3 VE_0 \sin\delta / X_s$
- Continuam válidas
- Atenção é comum usar
$$E_0 = j\omega N\phi_0$$
- Ou seja, convenção receptor.

Motor Síncron Ligado ao Sistema com $P=0$

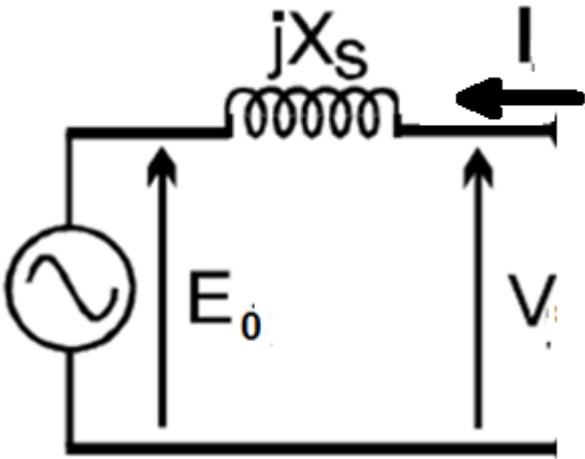


- Condição Inicial
- $E = V$ ($\delta = 0^\circ$)
- Diagrama de Fasores:

$$\delta = 0^\circ \rightarrow P = 0$$



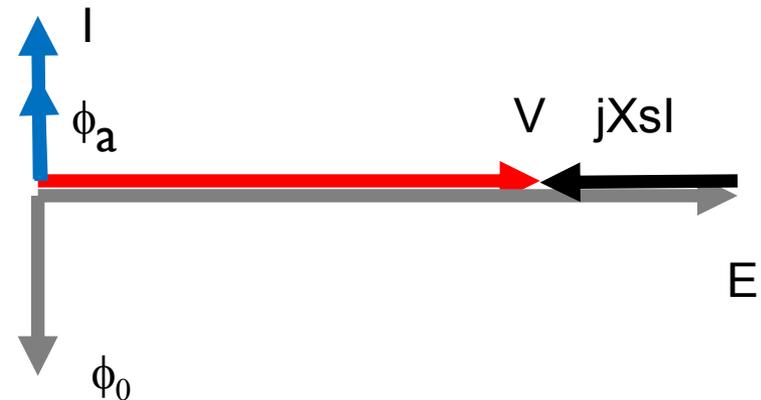
Motor Síncrono Ligado ao Sistema com $P=0$



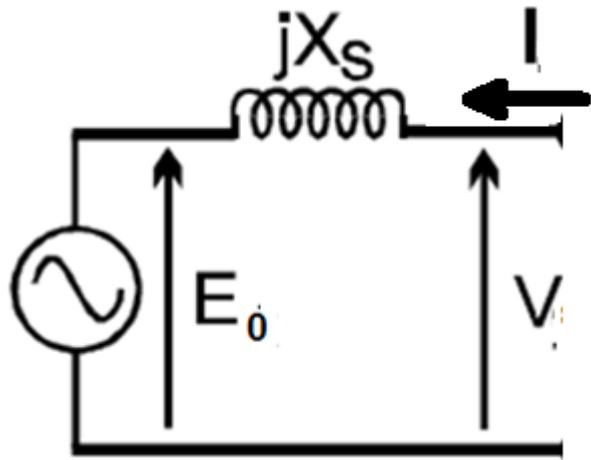
- **Aumenta-se** a corrente de excitação, sem colocar carga mecânica ($P=0 \rightarrow \delta=0^\circ$)

- $E > V$ e
$$\begin{cases} \hat{V} = \hat{E}_0 + jX_s \hat{I} \\ \hat{E}_0 = j\omega N \hat{\phi}_0 \end{cases}$$

- Absorve capacitivos
- Emite indutivos
- Fluxo de reação de Armadura desmagnetizante
- Super-excitada



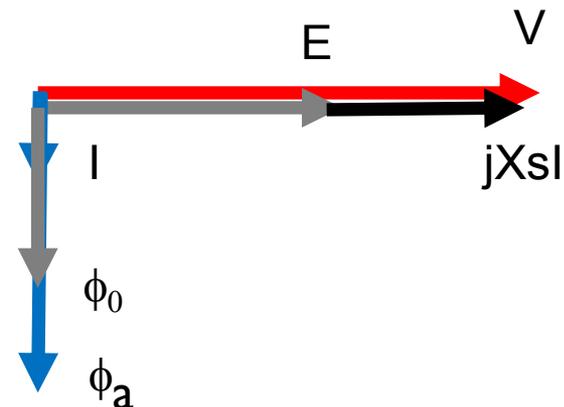
Motor Síncrono Ligado ao Sistema com $P=0$



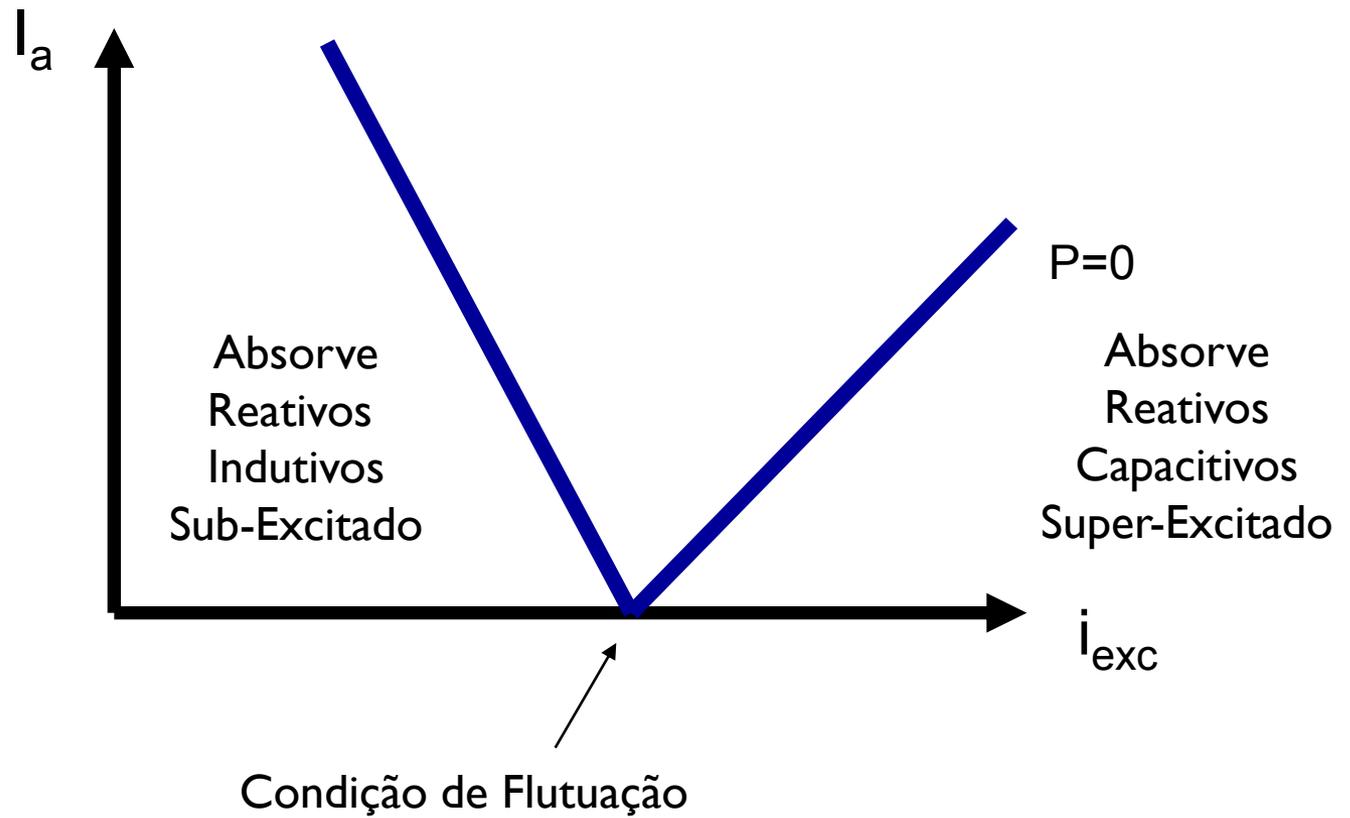
- **Diminui-se** a corrente de excitação, sem colocar carga mecânica ($P=0 \rightarrow \delta=0^\circ$)
- $E < V$ e

$$\begin{cases} \hat{V} = \hat{E}_0 + jX_s \hat{I} \\ \hat{E}_0 = j\omega N \hat{\phi}_0 \end{cases}$$

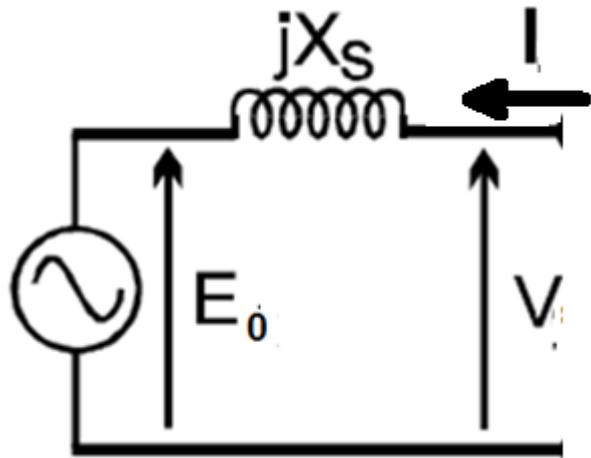
- Absorve indutivos
- Emite capacitivos
- Fluxo de reação de Armadura Magnetizante
- Sub-Excitada



Motor Síncrono ligado ao Sistema com Potência Ativa Nula



Motor Síncron Ligado ao Sistema com Potência Ativa Constante

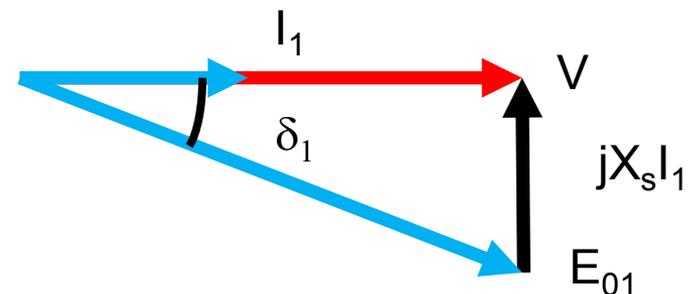


- Hipótese: a Corrente de Armadura está em fase com a Tensão.

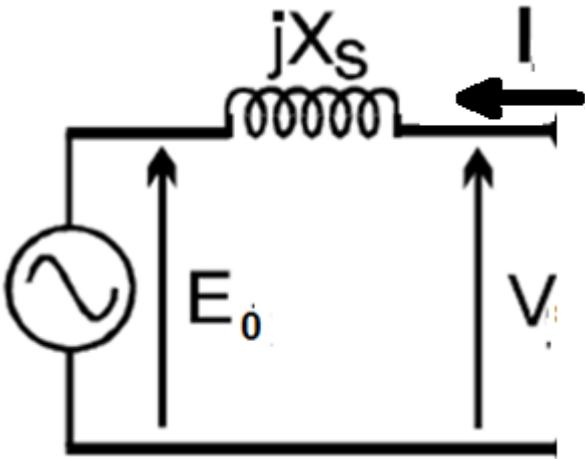
$$\begin{cases} \hat{V} = \hat{E}_0 + jX_s \hat{I} \\ \hat{E}_0 = j\omega N \hat{\phi}_0 \end{cases}$$

O ângulo δ mede o avanço de E com relação a V.

Logo, se V tem fase nula, então a fase de E é negativa.



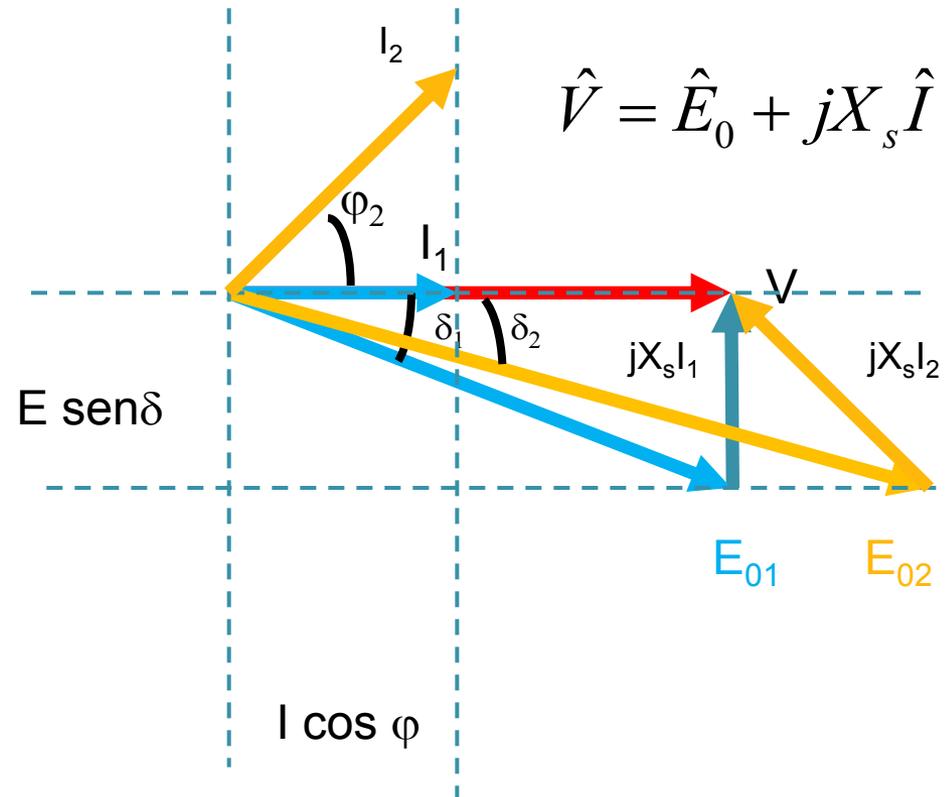
Motor Síncrono Ligado ao Sistema com Potência Ativa Constante



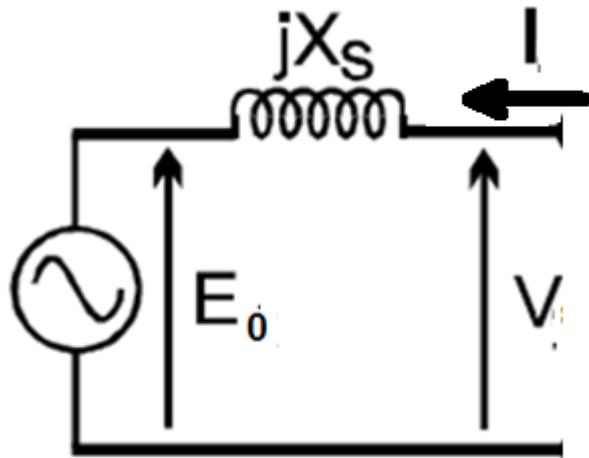
Tal qual na operação Gerador, se a Potência Ativa se mantém:

$$\begin{cases} I \cos \varphi = cte_1 \\ E_0 \sin \delta = cte_2 \end{cases}$$

- **Aumenta-se** a corrente de excitação, mas mantém-se P .



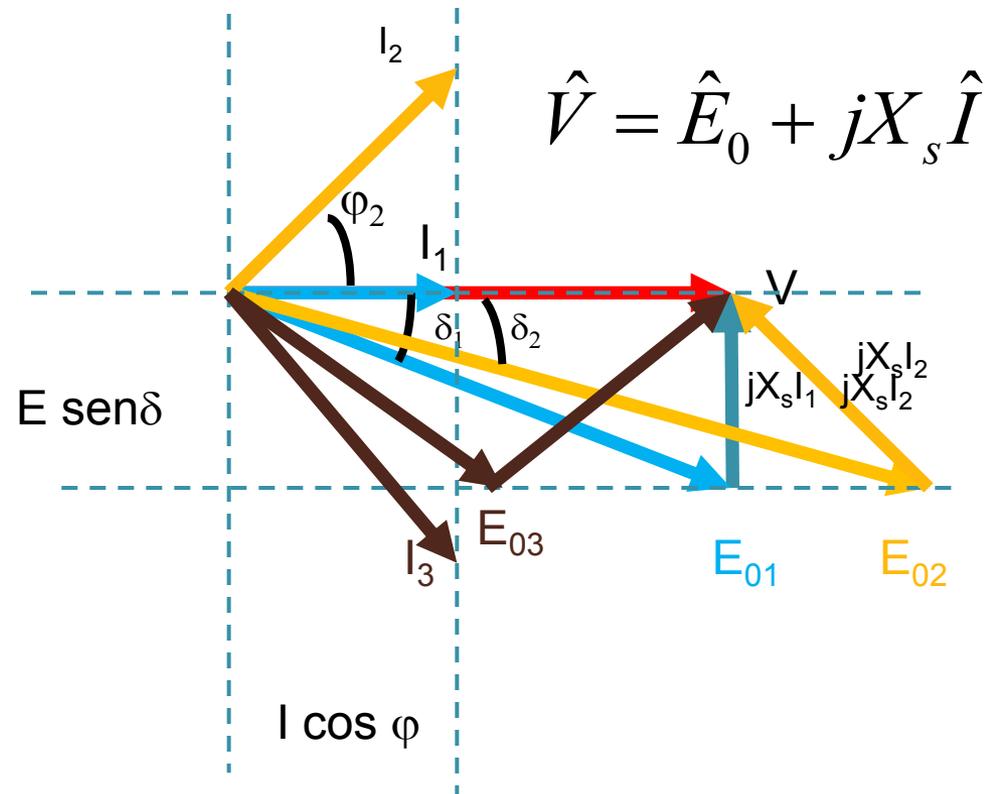
Motor Síncron Ligado ao Sistema com Potência Ativa Constante



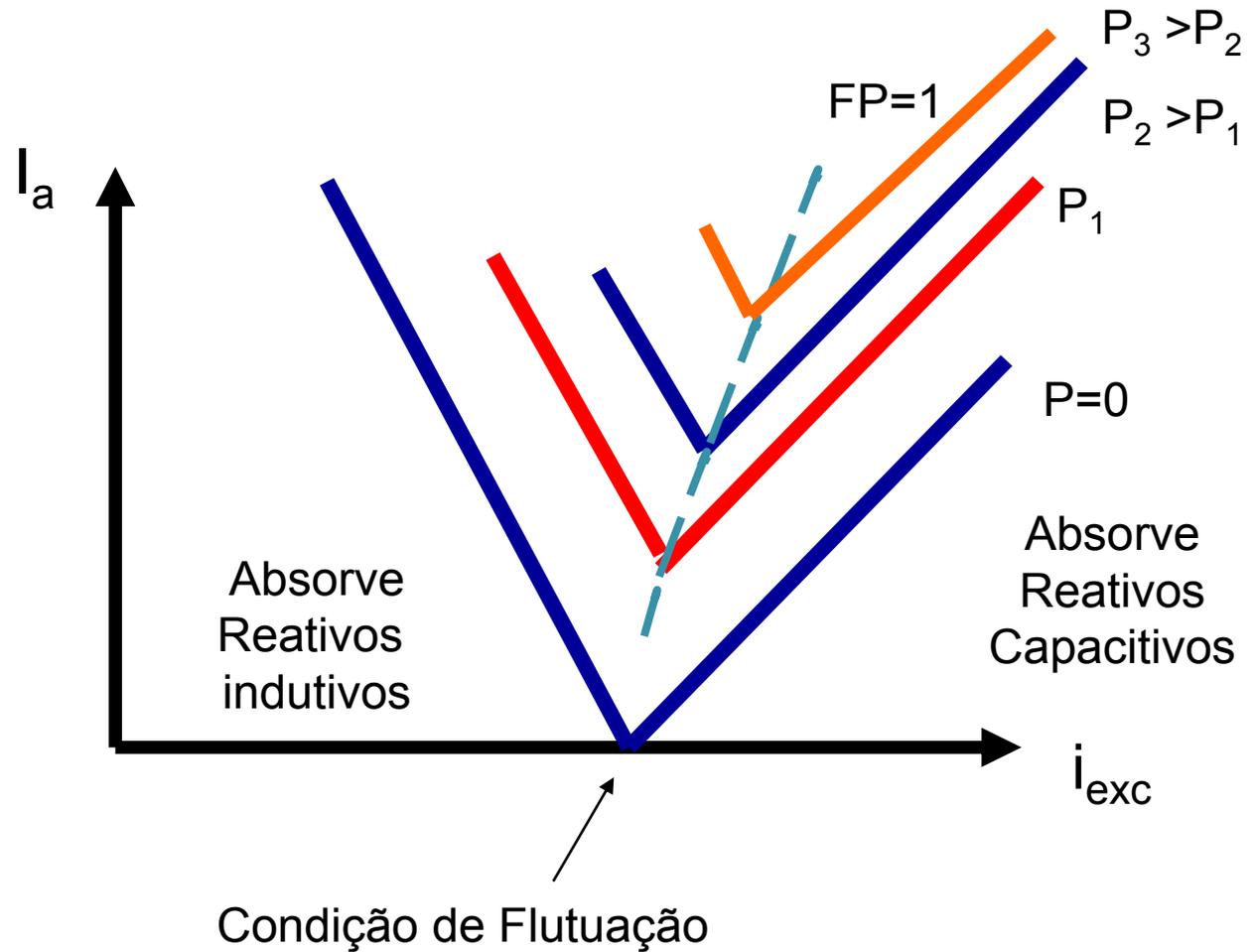
Tal qual na operação Gerador, se a Potência Ativa se mantém:

$$\begin{cases} I \cos \varphi = cte_1 \\ E_0 \sin \delta = cte_2 \end{cases}$$

- **Diminui-se** a corrente de excitação, com relação ao primeiro caso (FP=1) mas mantém-se P constante.



Motor Síncron ligado ao Sistema Elétrico de Potência- Curvas em V



Exercício

- Um gerador síncrono trifásico, ligação estrela, rotor cilíndrico, 75 MVA, 13200 V (linha), 60Hz, tem reatância síncrona igual $2,78 \Omega$ por fase e oito polos. Com a rotação igual a 900 rpm e corrente de excitação 300 A, a tensão de linha (em vazio) é igual a 13200 V. Suponha que o circuito magnético desta máquina seja linear.

Item a)

- Quais são as condições para que esta máquina seja colocada em paralelo com um Sistema de Potência (barramento infinito), que apresenta tensão de linha 13200 V em 60Hz?
- mesma tensão (módulo e fase), mesma frequência e sequência de fases idêntica

Item b

- Após ser conectado ao barramento infinito aciona-se a turbina de tal forma que a Potência Trifásica Ativa fornecida para a rede é igual a 60 MW e a corrente de campo é ajustada em 500 A. Determine o conjugado aplicado ao eixo, o ângulo de potência, a corrente de armadura e o fator de potência da corrente fornecida.

$$C = \frac{P}{\Omega_s} = 60 \times 10^6 / 2\pi \frac{900}{60} = 636,619 \text{ kNm}$$

$$P = 3 \frac{VE}{X_s} \sin(\delta)$$

$$\text{mas } V = \frac{13200}{\sqrt{3}} = 7621 \text{ V} \text{ e } E = \frac{500}{300} \frac{13200}{\sqrt{3}} = 12702 \text{ V}$$

$$\text{logo } \sin(\delta) = 0.5744.$$

$$\text{Então } \delta = 35.05^\circ$$

$$\hat{E} = \hat{V} + jX_s \hat{I}, \text{ sabe-se que o ângulo entre } \hat{E} \text{ e } \hat{V} \text{ é } \delta$$

$$12702 \angle \delta = 7621 \angle 0 + jX_s \hat{I}.$$

$$\hat{I} = 2808 \angle -20.83^\circ$$

Fator de potência 0.9346 indutivo

Item c)

- Ainda ligada ao Sistema de Potência, determine a menor corrente de armadura para que a máquina forneça potência ativa igual a 60 MW. Qual o fator de potência, a corrente de armadura e a corrente de excitação nesta condição?

Para que a corrente de armadura seja mínima, então a defasagem entre tensão e corrente de armadura deve ser zero, ou seja fator de potência unitário.

$$\text{Logo } I = 2808 \times 0.9346 = 2.624 \text{ A}$$

A tensão induzida no estator possuirá o seguinte valor:

$$\hat{E} = \hat{V} + jX_s \hat{I} = 7621 \angle 0 + j 2,78 \times 2.624 = 10.549 \text{ V.}$$

Logo a corrente de excitação valerá:

$$300 \frac{10.549}{7621} = 415 \text{ A}$$

Item d)

- Com a máquina interligada ao sistema de potência, determine a menor corrente de excitação para que a máquina forneça uma potência ativa igual a 60 MW, sem que ela perca estabilidade. Qual o fator de potência, o ângulo de potência e a corrente de armadura nesta condição?

$$P = 3 \frac{VE}{X_s} \sin(\delta)$$

Para que a corrente de campo seja mínima, o ângulo de potência valerá 90° .

$$60 \times 10^6 = 3 \frac{\frac{13.2}{\sqrt{3}} \times 10^3 E}{2.78},$$

ou seja $E = 7295 \text{ V}$

$$\hat{E} = \hat{V} + jX_s \hat{I},$$

sabe-se que o ângulo entre \hat{E} e \hat{V} é δ , ou seja, 90°

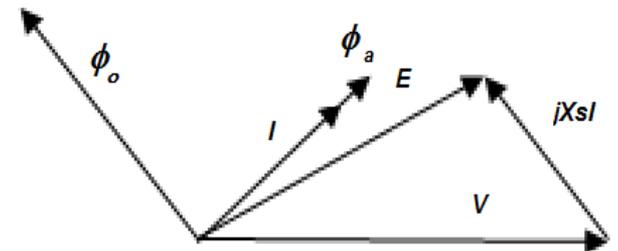
$$7295 \angle 90^\circ = 7621 \angle 0^\circ + jX_s \hat{I}.$$

$$\hat{I} = 3795 \angle 46.25^\circ$$

Em qual das quatro situações analisadas, a reação de armadura é magnetizante? Mostre através de um diagrama de fasores.

- A corrente emitida em d) tem natureza capacitiva, ou seja, o fluxo de reação de armadura é magnetizante. V seja pelo diagrama de fasores da figura. O fluxo de reação de armadura ϕ_a ao se somar com ϕ_0 tende a aumentá-lo.

- Outra forma de se entender o fenômeno de magnetização: o módulo de E é inferior a V .



- Em b e c $E > V \rightarrow$ desmagnetizante