

SEL 404 – ELETRICIDADE II

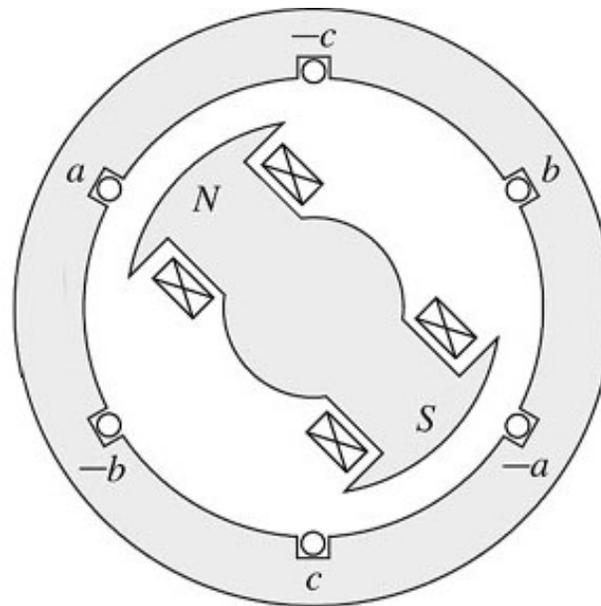
Aula 16

Aula de Hoje

- Introdução à máquina síncrona trifásica

Características Básicas de uma Máquina Síncrona

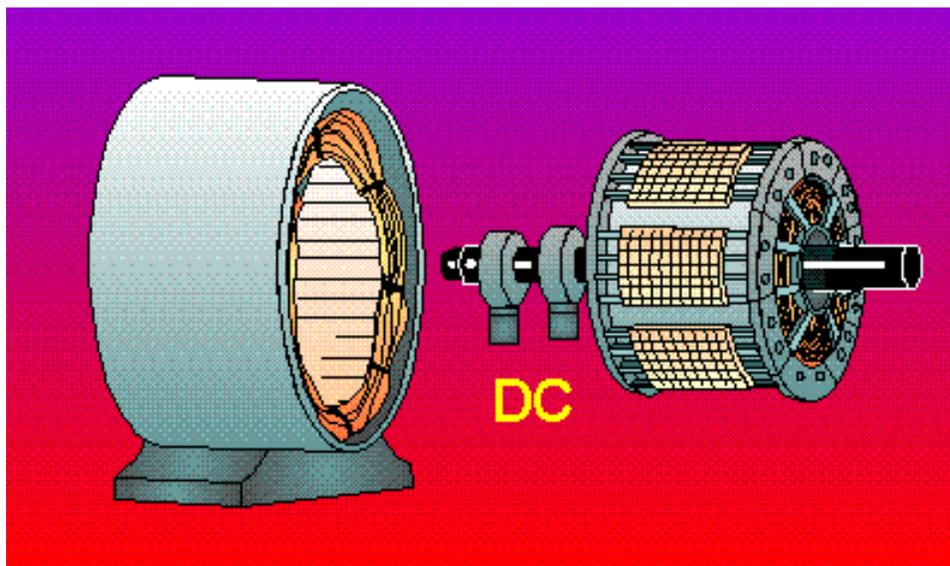
- O enrolamento de campo é posicionado no rotor;
- O enrolamento de armadura é posicionado no estator;
- O enrolamento de campo é alimentado em CC, produzindo fluxo unidirecional no entreferro e no estator;
- Quando o rotor gira, o enrolamento de armadura é atravessado por campo variável, surgindo em seus terminais tensão induzida variável;



(a)

Características Básicas de uma Máquina Síncrona

- A frequência de variação da tensão induzida é síncrona com a velocidade do eixo, daí a denominação de máquina síncrona;
- Os enrolamentos da armadura são posicionados com diferença angular de 120° , de forma que a tensão induzida nos três enrolamentos serão defasadas de 120° ;
- O enrolamento de campo é alimentado através de escovas deslizantes sobre anéis coletores, que giram com o rotor;



Emprego da máquina síncrona como Motor

- O controle da corrente de campo permite que o motor síncrono opere com fator de potência unitário, indutivo ou capacitivo;
- Usado em situações que demandem velocidade constante com carga variável;

Emprego da máquina síncrona como Gerador

- Independente da fonte primária e da capacidade, o gerador síncrono é usualmente o mais indicado;
- Com isso, um sistema interligado pode operar com uma única frequência, ou seja, em sincronismo;



Máquina Síncrona Trifásica: Gerador

- Com turbinas hidráulicas de alta inércia, a velocidade do rotor deve ser baixa; para isso o rotor deve ter muitos polos;

74 polos em 60 Hz → 97,3 RPM

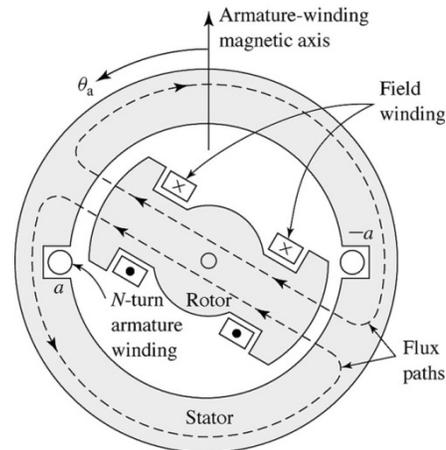
- Com turbinas térmicas (vapor ou gás) de baixa inércia, a velocidade do rotor pode ser alta; com isso o rotor pode ter poucos polos;

4 polos em 60 Hz → 1800 RPM

Máquina Síncrona Trifásica: Gerador

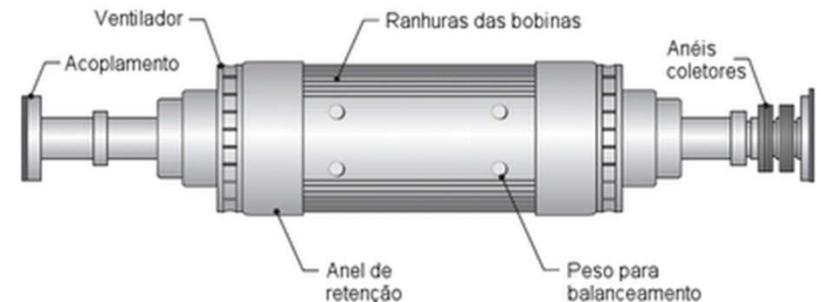
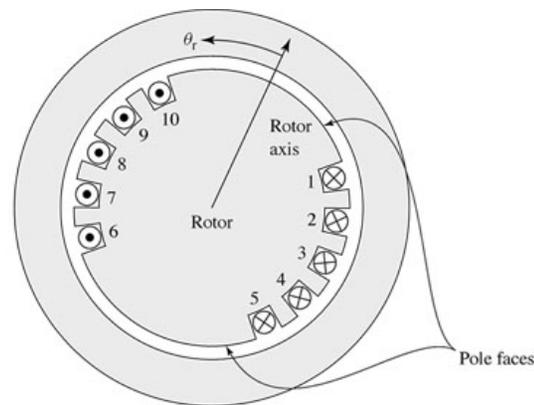
- Máquinas com muitos polos e baixa velocidade em geral têm o rotor de polos salientes;

- diâmetro grande
- comprimento pequeno
- eixo vertical



- Máquinas com poucos polos e alta velocidade em geral têm o rotor cilíndrico;

- diâmetro pequeno
- comprimento grande
- eixo horizontal



Máquina Síncrona Trifásica: Gerador

- O enrolamento do estator (armadura) é trifásico e distribuído (igual ao da máquina de indução);
- Pode ser conectado em Y ou em Δ ;
- 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;

Máquina Síncrona Trifásica: Característica de Magnetização

- O campo do rotor, produzido pela corrente de excitação I_f , torna-se um campo girante senoidal no entreferro com o acionamento da máquina primária;
- O campo girante induz tensão trifásica senoidal nos enrolamentos do estator;
- A velocidade do rotor e a frequência das tensões induzidas são relacionadas por:

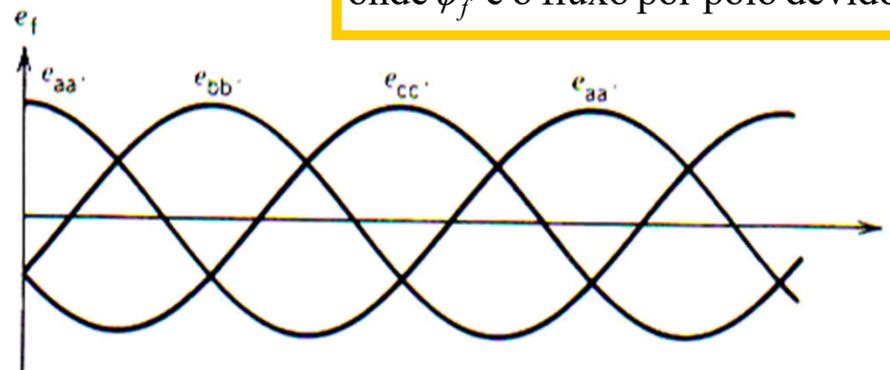
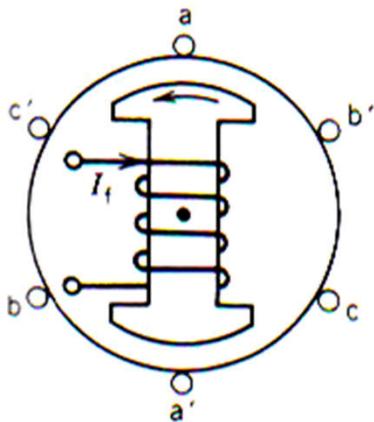
$$n = \frac{120f}{p}$$

- A tensão induzida E_f é dada por:

$$E_f^{rms} = 4,44 f N_{ph} \phi_f k_w$$

$$\text{ou seja, } E_f^{rms} \propto n \phi_f$$

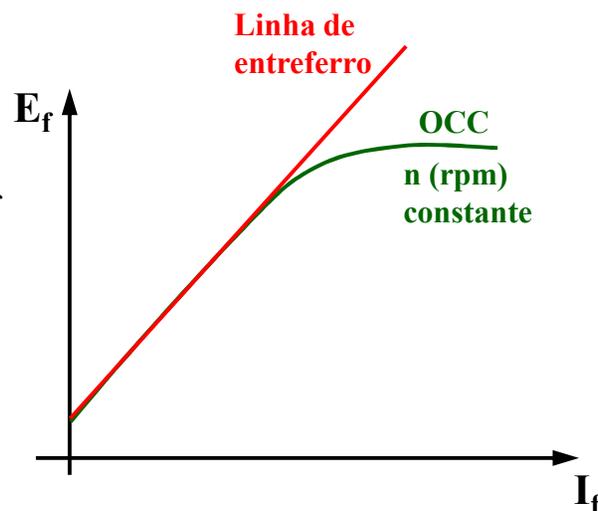
onde ϕ_f é o fluxo por pólo devido a corrente I_f



Máquina Síncrona Trifásica: Característica de Magnetização

➤ Portanto, a tensão induzida é proporcional à velocidade da máquina e ao fluxo de excitação, o qual depende da corrente I_f .

➤ A curva ao lado representa a curva de magnetização da máquina síncrona. Inicialmente, a tensão induzida E_f cresce linearmente com o aumento da corrente de campo, porém para altos valores de I_f ocorre a saturação do núcleo, e a relação tensão induzida *versus* corrente de campo deixa de ser linear;



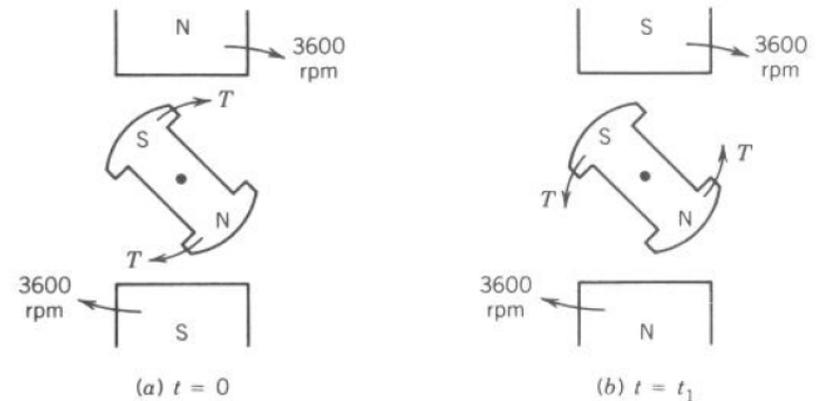
➤ Se os terminais do circuito de armadura estão em aberto, a tensão induzida E_f é igual a tensão terminal, e, portanto, pode ser medida através de um voltímetro. Essa curva é denominada “característica de circuito aberto” (OCC, *open-circuit characteristic*) ou “característica de magnetização” da máquina síncrona.

➤ A relutância do núcleo não saturado é muito menor que a relutância do entreferro, por isso, a fmm está praticamente toda concentrada no entreferro, resultando em um aumento linear do fluxo. A parte linear da curva é denominada “linha de entreferro”.

Motor Síncrono: Torque de Partida

- A máquina síncrona não tem torque de partida, devido à oscilação do campo girante do estator em alta frequência e elevada inércia do rotor.
- Se o estator de uma máquina síncrona de dois polos for conectado a uma fonte trifásica, 60 Hz, campo girante sob uma velocidade de 3600 rpm será produzido no entreferro. Na figura abaixo, o campo girante é representado por dois polos no estator girando a 3600 rpm.

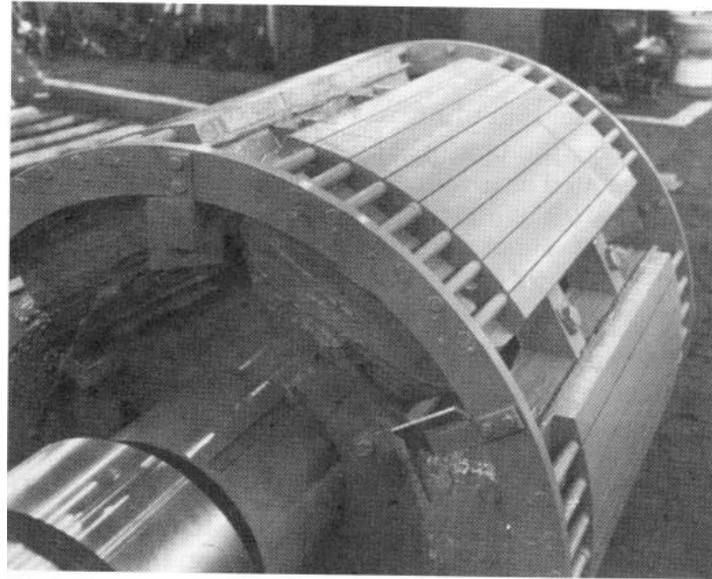
- No instante $t = 0$, torque no sentido horário é produzido sobre os polos do rotor, fazendo com que o mesmo gire no sentido dos polos do estator (campo girante).



- No instante $t = t_1$, os polos do estator giraram de 180° , porém os polos do rotor pouco moveram, devido à elevada inércia do rotor. Portanto, neste instante, um torque anti-horário age no rotor, fazendo com que o mesmo tenda a girar no sentido contrário do campo girante.
- O torque líquido no rotor em uma revolução é nulo, e o motor não desenvolve torque de partida. O motor não irá acelerar e sim, vibrar.

Motor Síncrono: Soluções para a Partida

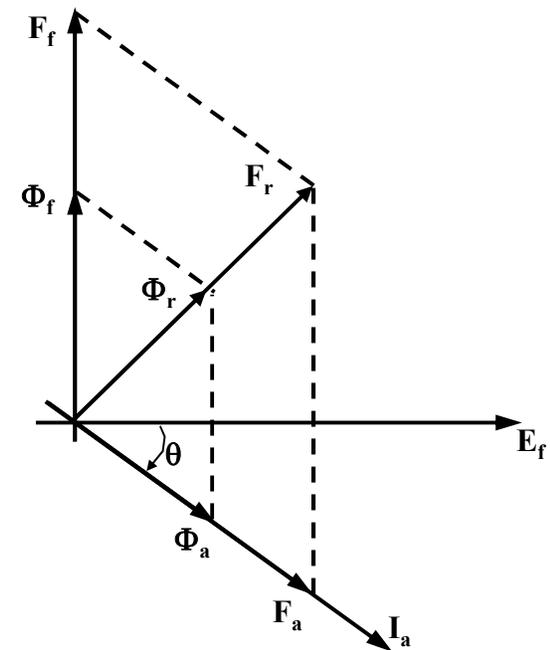
- Partir com frequência reduzida, diminuindo a velocidade do campo girante;
- Partida como motor de indução:
 1. Usa-se uma gaiola externa ao enrolamento de campo para acelerar a máquina na partida;
 2. Próximo da velocidade síncrona ($s = 2\%$ a 5%) o enrolamento de campo é alimentado em CC, o que leva a máquina ao sincronismo;
 3. A gaiola ajuda a máquina a recuperar a velocidade síncrona em caso de perturbações, sendo por isso, denominado de enrolamento amortecedor;



Reação da Armadura na Máquina Síncrona

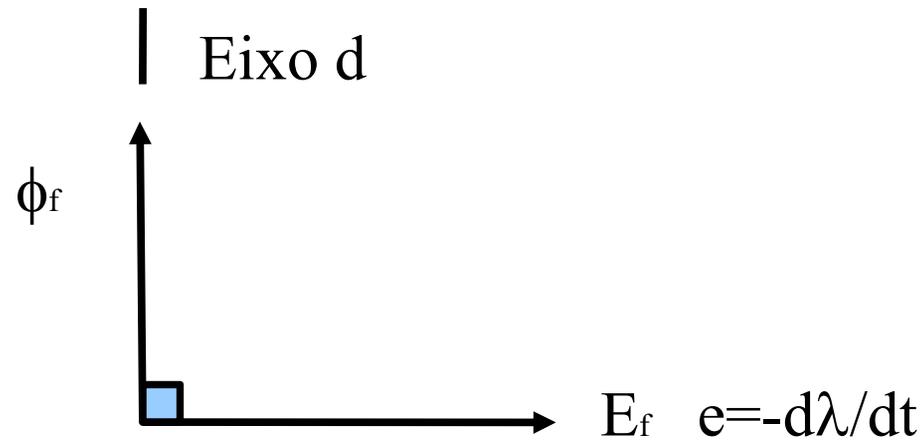
- Se os terminais do estator são conectados a uma carga trifásica, corrente circula pelo circuito de armadura I_a , que cria um segundo campo, girante, no entreferro, o qual também gira a velocidade síncrona.
- A magnitude do fluxo resultante no entreferro, assumindo que não há saturação, é a soma do fluxo Φ_a (reação da armadura) devido à corrente de armadura I_a e do fluxo Φ_f devido à corrente de campo I_f .

$$\Phi_r = \Phi_f + \Phi_a = \text{fluxo resultante no entreferro}$$



Circuito Equivalente da Máquina Síncrona

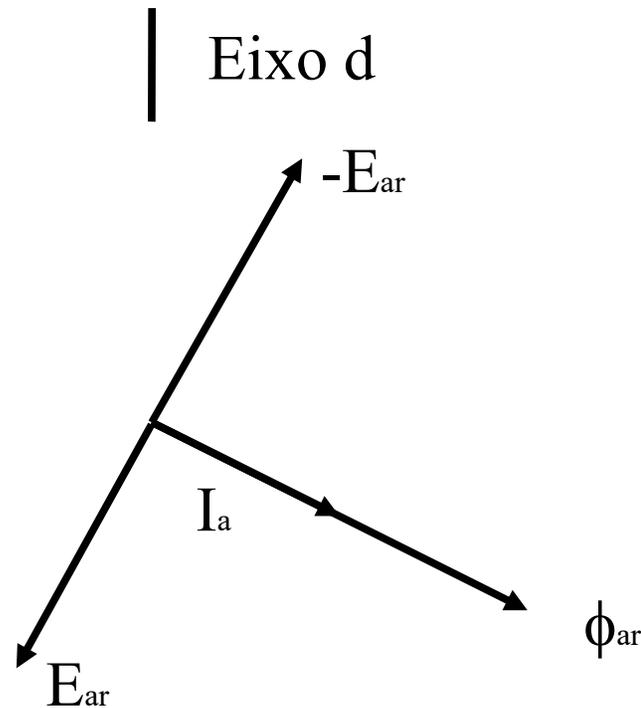
A corrente de campo I_f produz o fluxo ϕ_f no entreferro, resultando em uma tensão induzida E_f nos terminais do estator:



- A corrente de carga I_a (na armadura) produz um fluxo ϕ_a ;
- Pequena parte desse fluxo estará limitado ao estator e não atingirá o rotor, sendo denominado fluxo de dispersão (ϕ_{al});
- A maior parte será concatenado com o rotor através do entreferro, e é denominado por reação da armadura (ϕ_{ar});

Circuito Equivalente da Máquina Síncrona

ϕ_{ar} também produzirá uma tensão induzida E_{ar} nos terminais do estator, em quadratura com ϕ_{ar} :



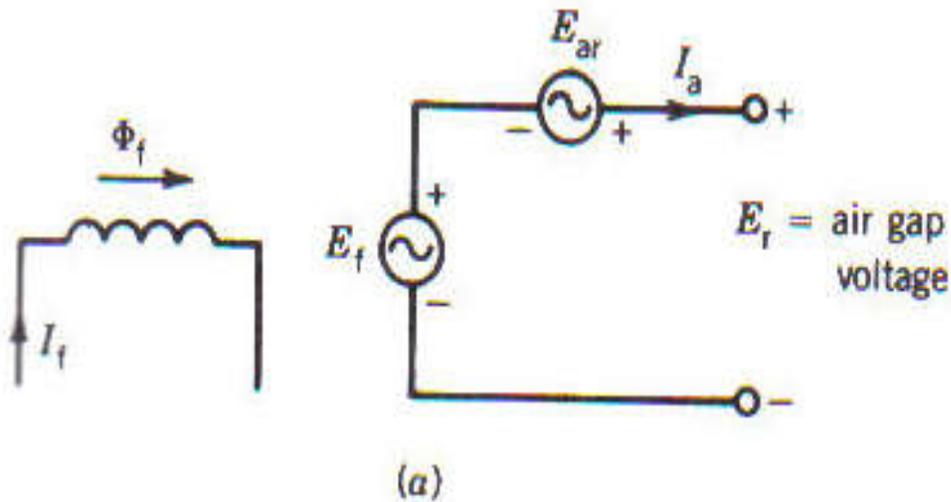
ϕ_{ar} e E_{ar} aumentam com o carregamento do gerador (I_a), sendo melhor representado através de uma reatância fixa, associada com a reação da armadura;

Circuito Equivalente da Máquina Síncrona

A tensão resultante na armadura é:

$$E_r = E_f + E_{ar}$$

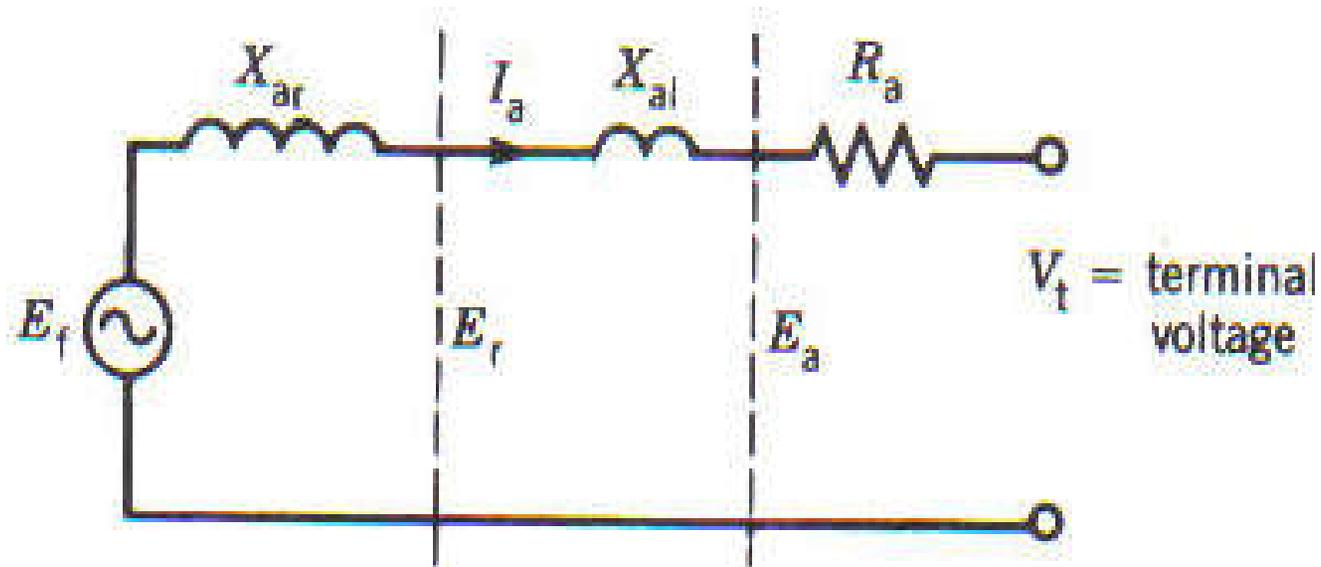
- Chega-se então ao circuito:



$$E_f = E_r - E_{ar}$$

Circuito Equivalente da Máquina Síncrona

Adicionando ao circuito a reatância de dispersão do estator (X_{al}) e a resistência do enrolamento (R_a), tem-se:



(d)

$$R_a = 1,6R_{a,cc} \text{ (efeito pelicular)}$$

Circuito Equivalente da Máquina Síncrona

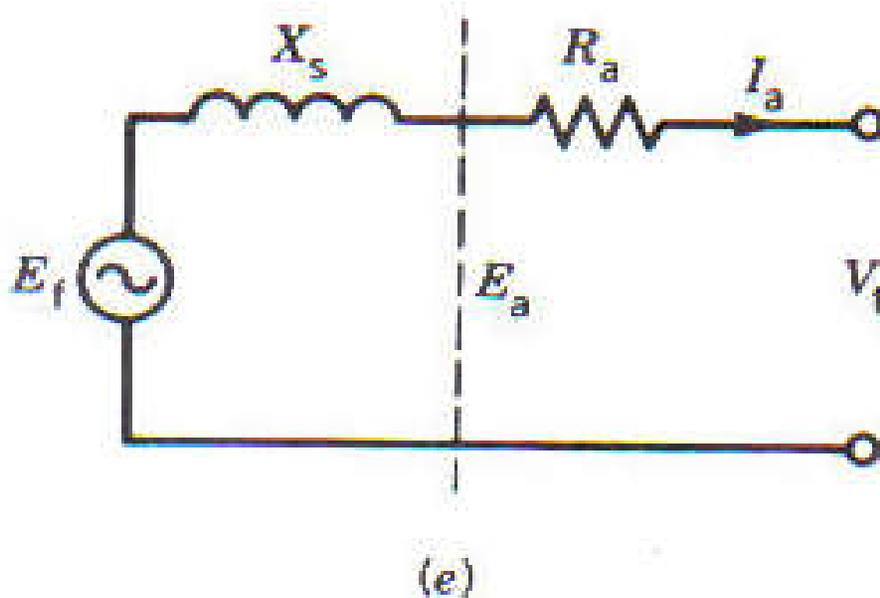
A duas reatâncias combinadas definem a reatância síncrona da máquina:

$$X_s = X_{ar} + X_{al}$$

E,

$Z_s = R_a + jX_s$ define a impedância síncrona;

Assim, tem-se o modelo equivalente da máquina síncrona em regime permanente e por fase (polos lisos):

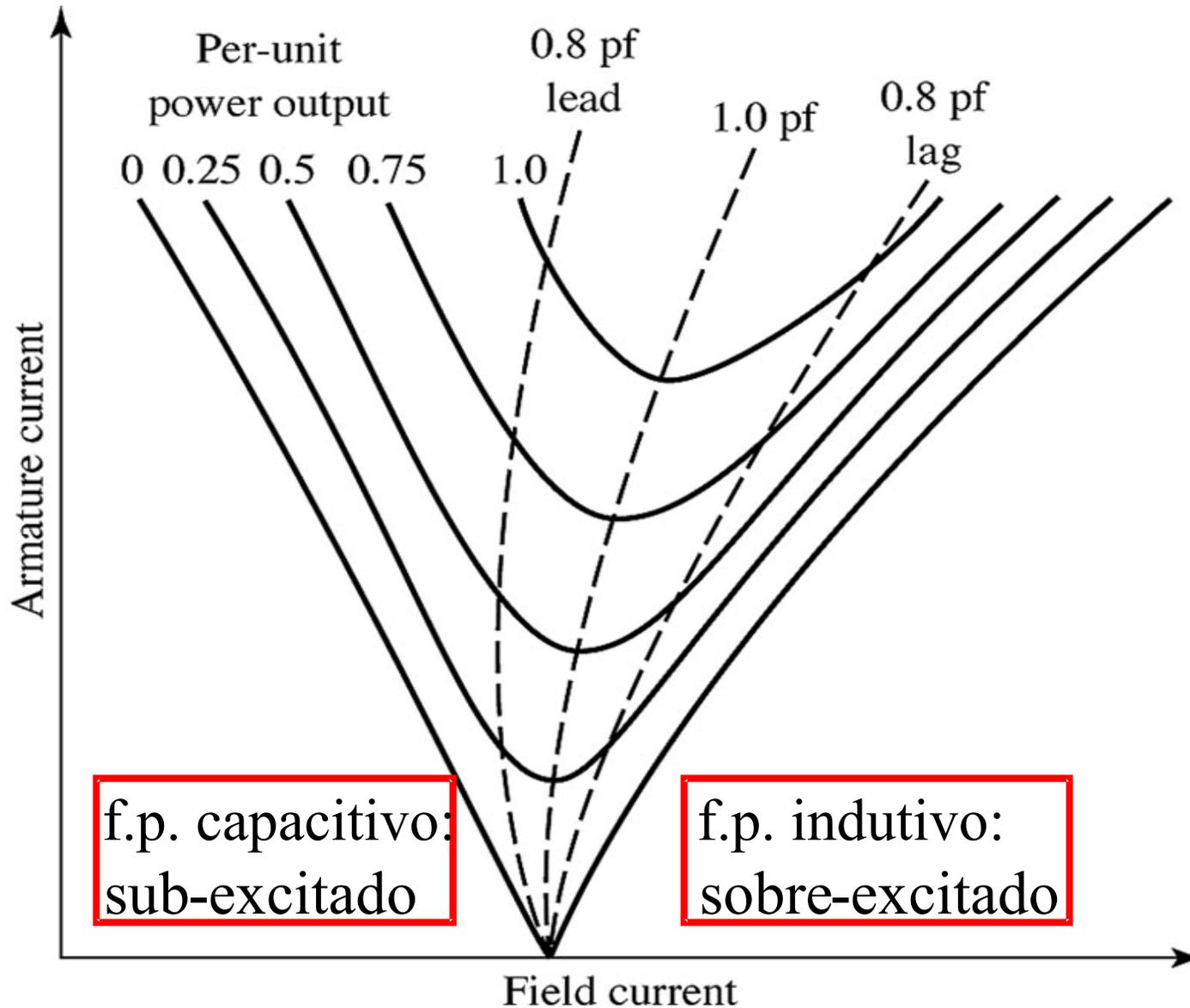


↳ Obs:

→ $R_a \ll X_s$

→ O circuito de campo é eletricamente independente do circuito de armadura;

Gerador Síncrono: Curvas V



Máquina Síncrona: Fator de Potência

- 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, consumindo corrente de armadura capacitiva, com o objetivo de compensar a corrente indutiva drenada pelos motores de indução, melhorando, assim, o fator de potência total da planta.