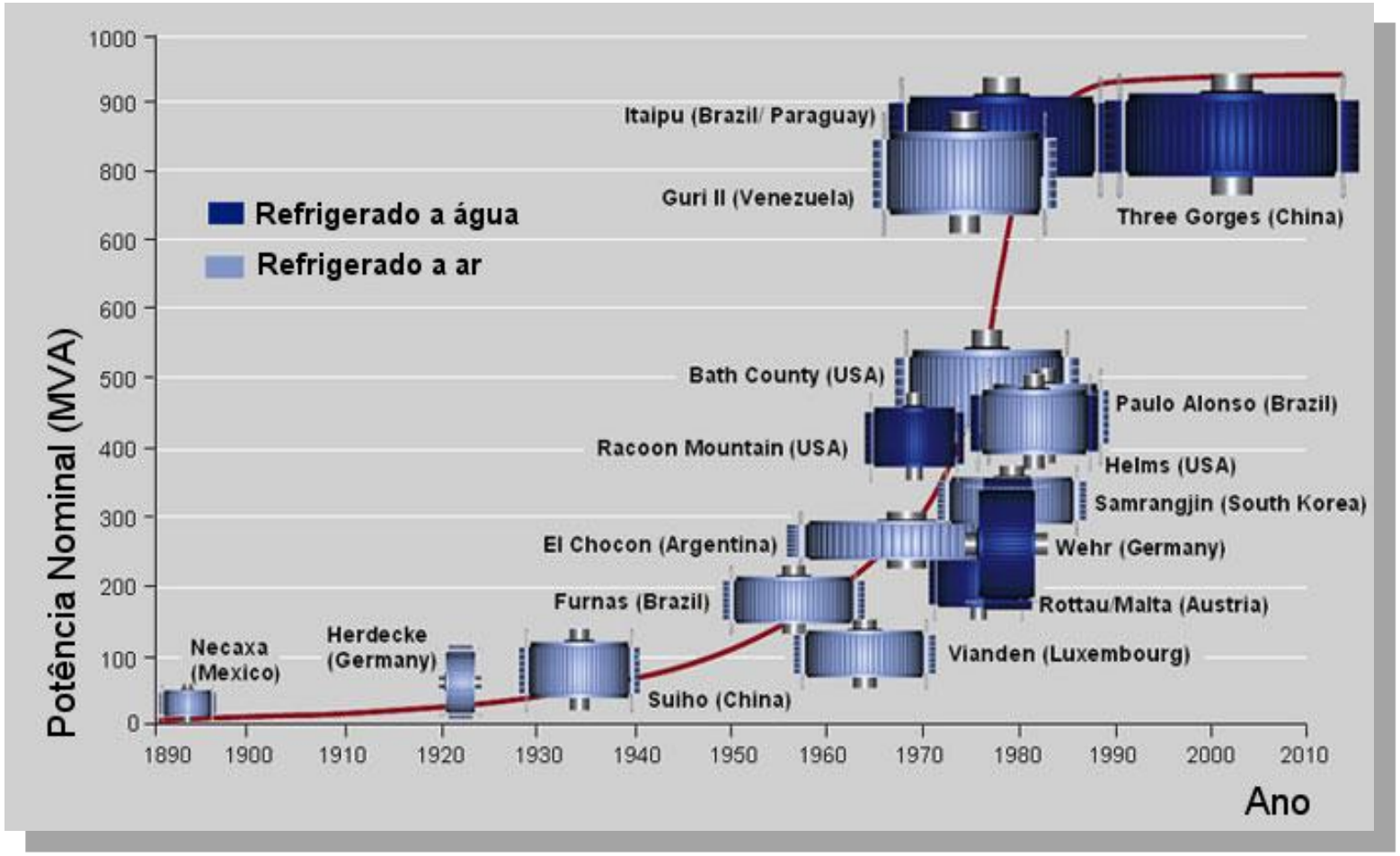
Evolução dos grandes hidrogeradores



GERADOR SÍNCRONO

Geradores síncronos ou alternadores são máquinas síncronas usadas para converter potência mecânica em potência elétrica

ASPECTOS CONSTRUTIVOS

A máquinas síncronas operando como motor ou operando como gerador possui duas partes fundamentais:

Uma parte fixa chamada de estator, onde estão alojados os enrolamentos denominados ***enrolamentos de armadura***.

Uma parte móvel chamada de rotor, onde está alojado o ***enrolamento de campo.***

OBS: Existe máquina síncrona, chamada de conversor síncrono cujo enrolamento de campo está no estator e o enrolamento de armadura no rotor. Essa configuração é menos usual. Toda explicação e modelagem será baseada na configuração anterior.

Princípio de funcionamento

No gerador síncrono, uma corrente em cc é aplicada ao enrolamento de campo localizado no rotor, a qual produz um campo magnético.

O rotor então é acionado por uma máquina primária, produzindo um campo magnético girante no interior da máquina.

Este campo girante induzirá um conjunto de tensões trifásicas nos enrolamentos do estator.

MÁQUINAS SÍNCRONAS - CARACTERIZAÇÃO E APLICAÇÃO

MÁQUINAS SÍNCRONAS :

→ OPERAÇÃO NO MODO MOTOR (MOTORES DE GRANDE POTÊNCIA)

→ OPERAÇÃO NO MODO GERADOR → MODO MAIS COMUM, COMO ALTERNADOR SÍNCRONO (TRIFÁSICO)

CARACTERIZAÇÃO QUANTO À TOPOLOGIA DO CIRCUITO MAGNÉTICO - CAMPO DE APLICAÇÃO :

→ MÁQUINA SÍNCRONA DE PÓLOS SALIENTES

EM GERAL, GRANDE NÚMERO DE PÓLOS (48 – 96 PÓLOS) – BAIXA ROTAÇÃO (150 – 75 RPM)

USO COM TURBINAS HIDRÁULICAS (HIDROGERADORES) EM POTÊNCIAS ELEVADAS (ATÉ 800 MW)

USO COMUM TAMBÉM COMO GERADORES DE POTÊNCIA PEQUENA E MÉDIA (100 kW - 5 MW) ACIONADOS A PARTIR DE MOTORES DIESEL OU PEQUENAS TURBINAS A VAPOR - REDUZIDO Nº DE PÓLOS (4 – 6 – 8 PÓLOS) - ROTAÇÕES MÉDIAS (1800 – 1200 – 900 RPM)

→ MÁQUINA SÍNCRONA DE PÓLOS LISOS (ROTOR CILÍNDRICO)

EM GERAL, REDUZIDO NÚMERO DE PÓLOS (2 – 4 PÓLOS) – ELEVADA ROTAÇÃO (3600 – 1800 RPM)

USO COM TURBINAS A VAPOR OU A GÁS (TURBOGERADORES) EM POTÊNCIAS ELEVADAS (ATÉ 1500 MW)

ASPECTOS CONSTRUTIVOS DA MÁQUINA SÍNCRONA - COMPONENTES BÁSICOS

ESTATOR (INDUZIDO)

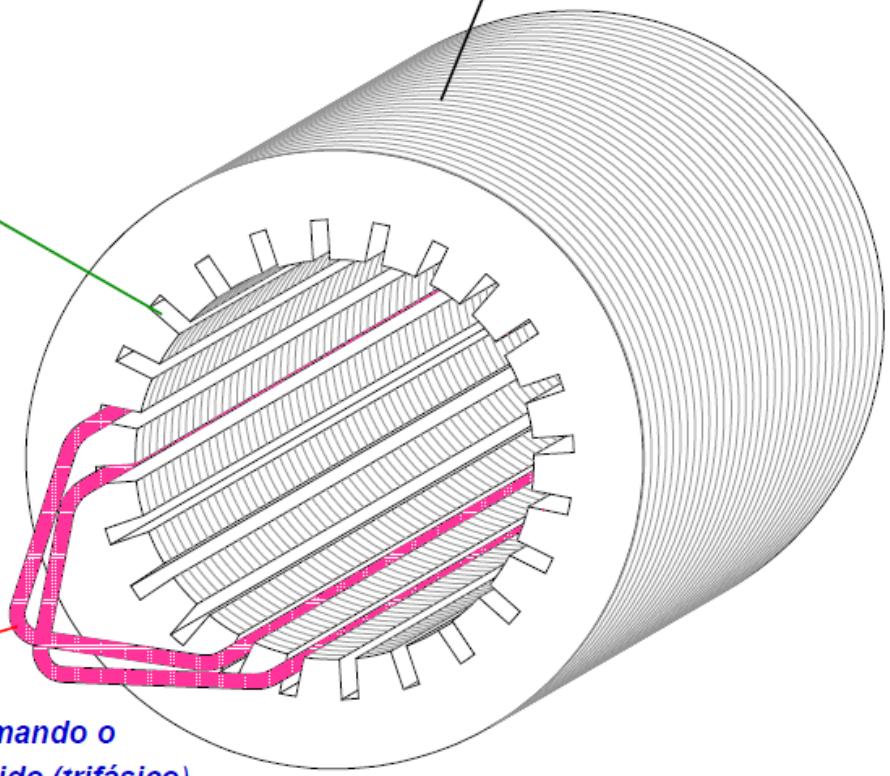
→ IDÊNTICO AO DA MÁQUINA ASSÍNCRONA

NÚCLEO DO ESTATOR:

Lâminas de material ferromagnético de alta permeabilidade (aço silício não orientado)

RANHURAS ESTATÓRICAS:

Ao longo de toda a superfície interna do cilíndro estatórico



BOBINAS DO ESTATOR:

Alojadas em todas as ranhuras, formando o enrolamento de armadura ou induzido (trifásico)

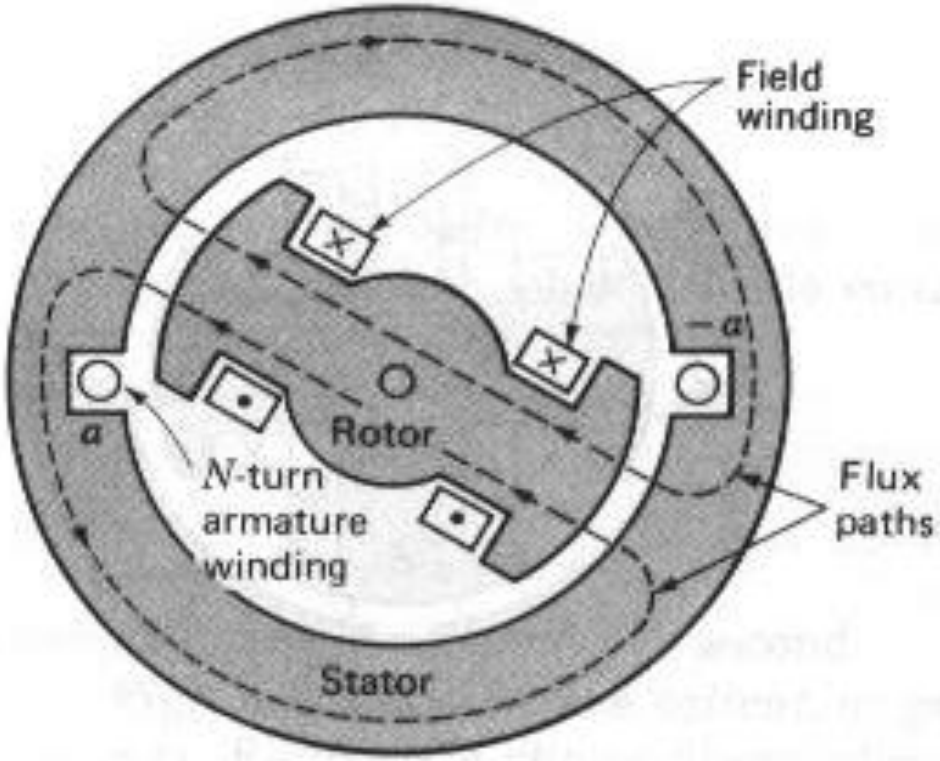
TIPOS DE ROTOR

Os rotores encontrados em máquinas síncronas são de dois tipos:

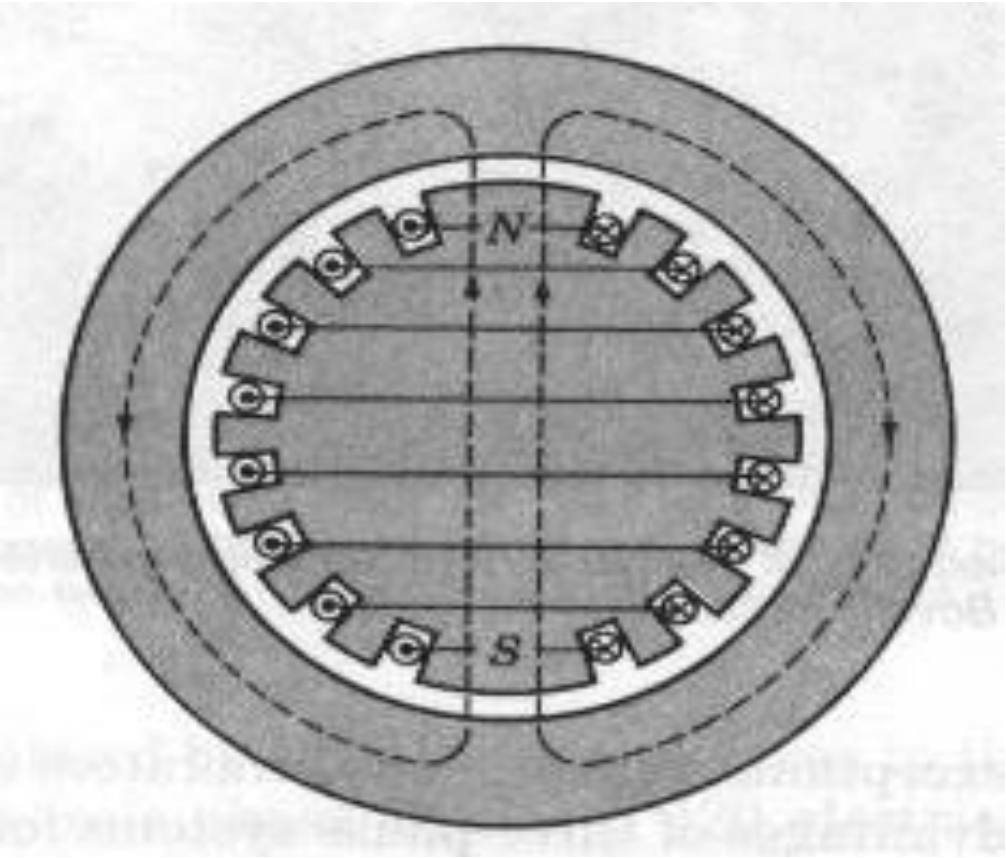
Saliente: nesse tipo de rotor, os pólos são projetados para fora da superfície do rotor.

Não saliente ou cilíndrico: pólos magnéticos são construídos de forma nivelada com a superfície do rotor.

As figuras ilustram os tipos de rotores:



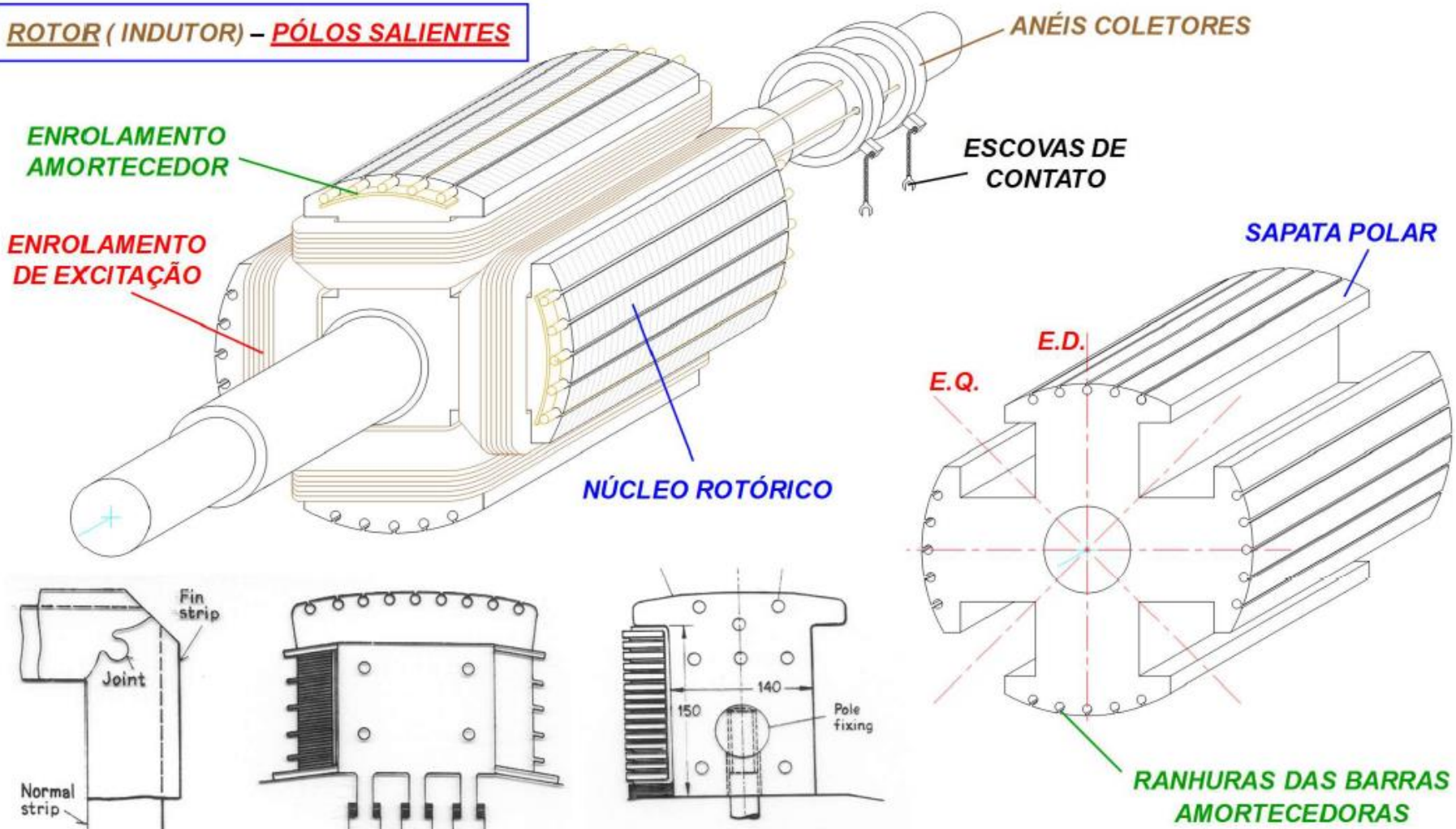
Rotor com pólos salientes

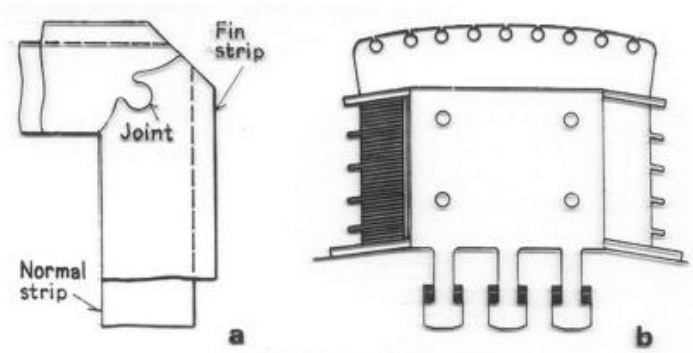


Rotor cilíndrico

ASPECTOS CONSTRUTIVOS DA MÁQUINA SÍNCRONA - COMPONENTES BÁSICOS

ROTOR (INDUTOR) – PÓLOS SALIENTES



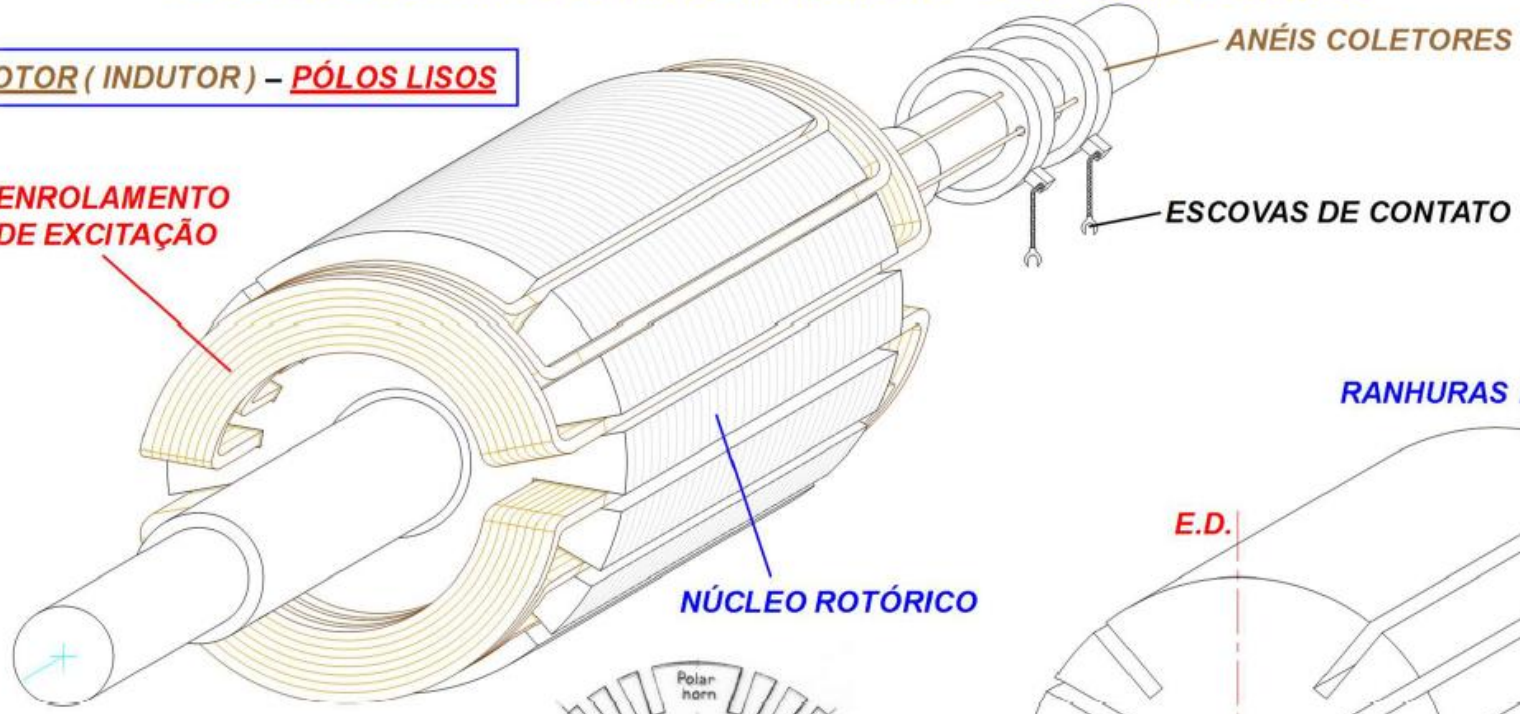


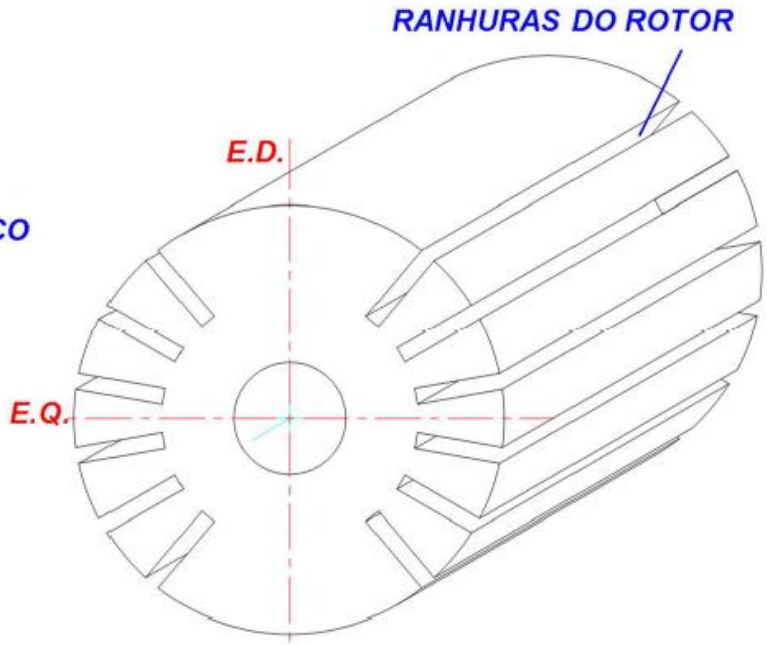
11.6 Salient-pole field windings.

3.10 Salient pole. Dimensions in mm.

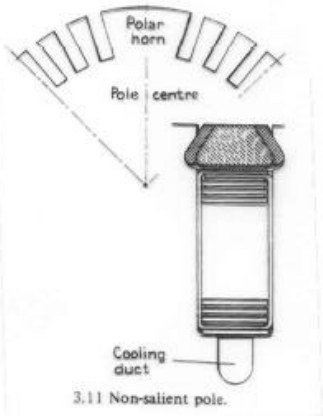
ASPECTOS CONSTRUTIVOS DA MÁQUINA SÍNCRONA - COMPONENTES BÁSICOS

ROTOR (INDUTOR) – PÓLOS LISOS



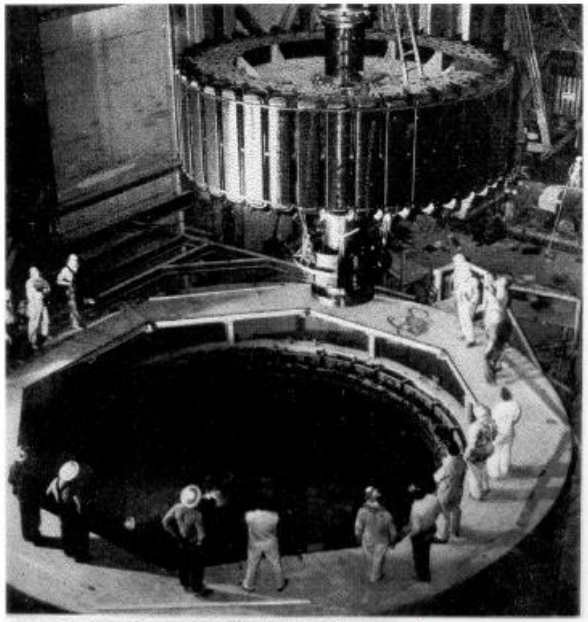


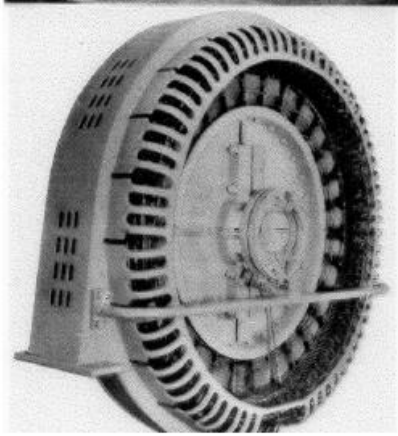
DETALHE DA RANHURA E FIXAÇÃO DA BOBINA DE CAMPO EM GERADOR DE GRANDE PORTE



3.11 Non-salient pole.

ASPECTOS CONSTRUTIVOS DAS MÁQUINAS SÍNCRONAS

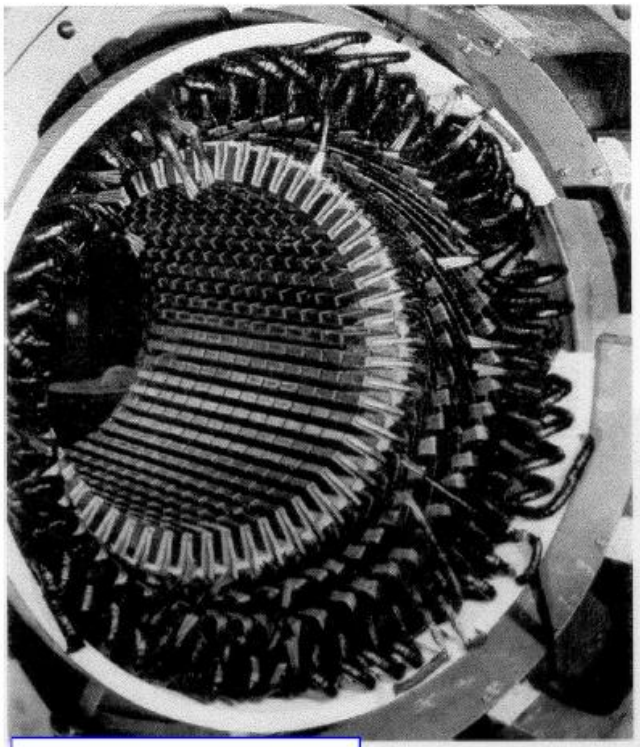




MÁQUINA SÍNCRONA DE POLOS SALIENTES

ESTATOR E ROTOR DE GRANDE PORTE

MÁQUINA COMPLETA DE MÉDIO PORTE



MÁQUINA SÍNCRONA DE POLOS LISOS

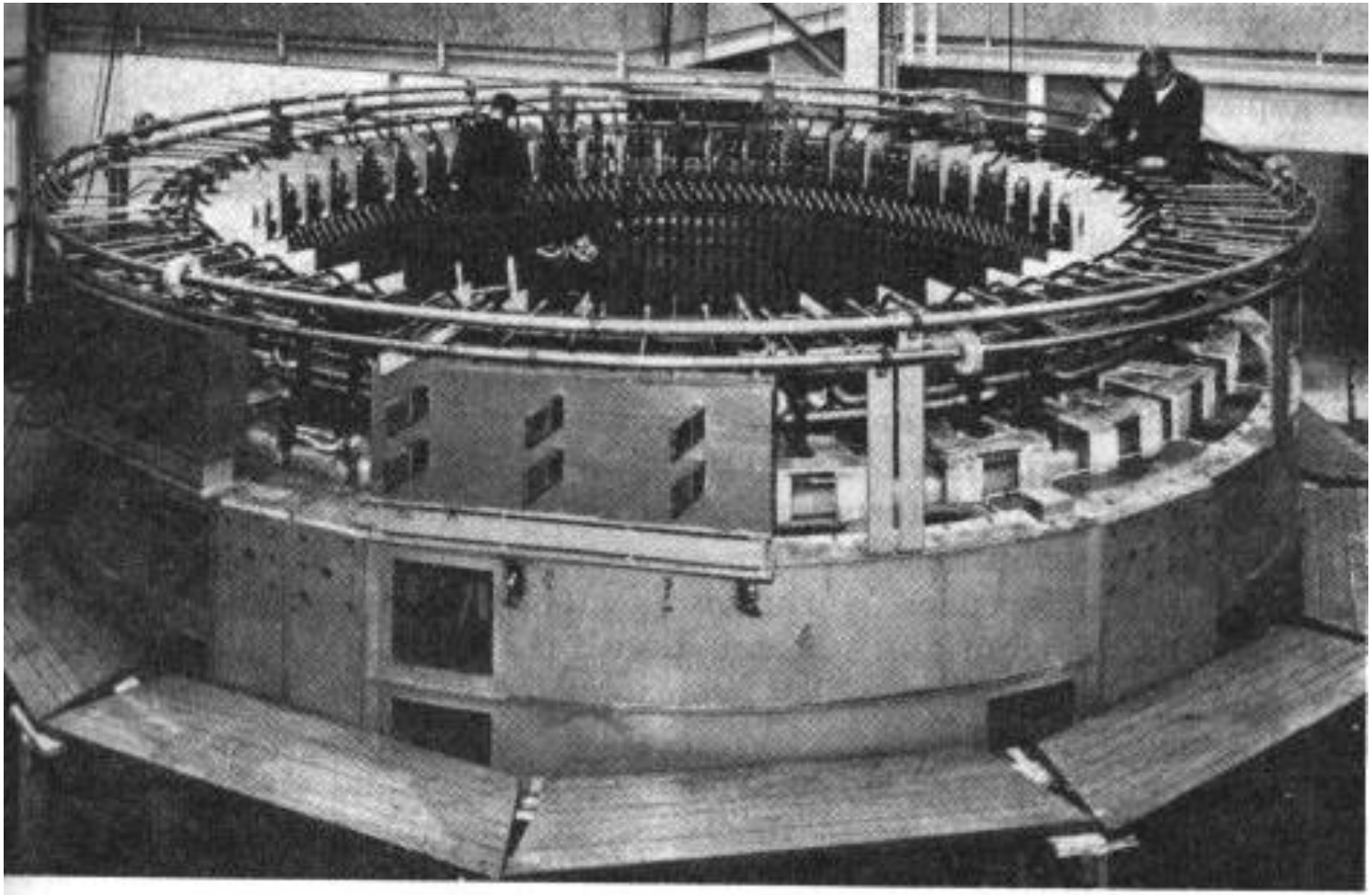
ESTATOR E ROTOR

MONTAGEM DE GRANDE HIDROGERADOR

⇦ ***ROTOR DA TURBINA (KAPLAN) E ROTOR DO GERADOR***

ESTATOR DO GERADOR

FONTE: ALSTOM POWER



Stator of a 190-MVA three-phase 12-kV 375-r/min hydroelectric generator. The conductors have hollow passages through which cooling water is circulated. (*Brown Boveri Corporation.*)

Estator de um gerador síncrono

Características básicas de máquinas síncronas - estator

- O enrolamento do estator (armadura) é trifásico e distribuído (igual ao da máquina de indução) e é ligado diretamente a uma fonte CA ou à carga;
- Os enrolamentos da armadura são posicionados com diferença angular de 120º, de forma que as tensões induzidas nos três enrolamentos serão defasadas de 120º;
- O enrolamento do estator pode ser conectado em Y ou em D.

Como é fornecida a corrente ao enrolamento de campo ?

1. O fornecimento é feito de uma fonte externa dc por meio de anéis coletores e escovas

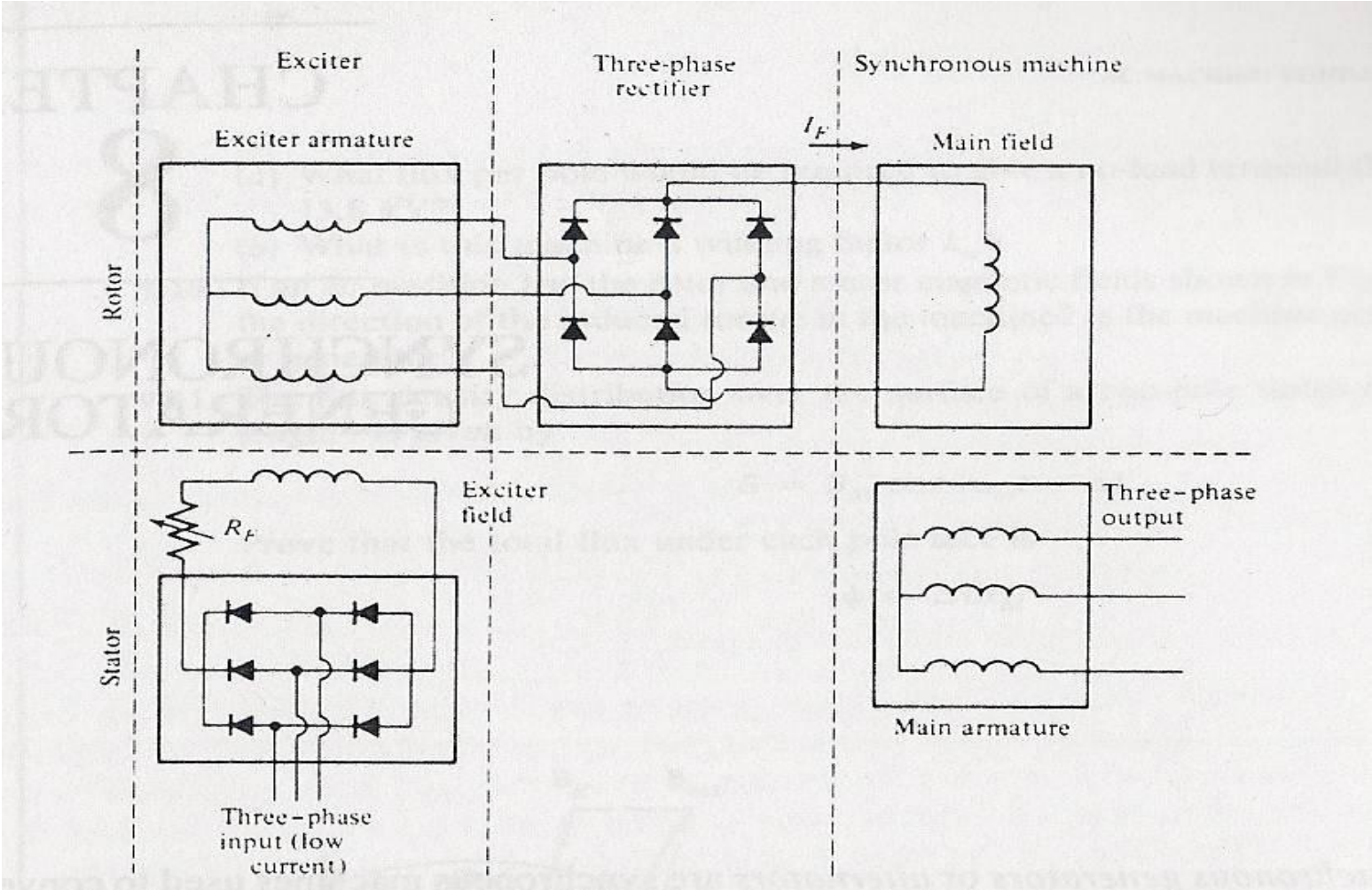
2. Fornecimento de potência dc a partir de uma fonte especial montada diretamente no eixo do gerador síncrono
3. Fornecimento por uma fonte estatica de CC (retificador controlado)

A opção 1 gera muitos problemas para operação da máquina, pois aumentam a quantidade de manutenção. Outro problema é a queda de tensão nas escovas.

Em grandes geradores e motores, excitatrizes sem escovas (brushless exciters) são usadas para corrente de campo cc para máquina.

Uma ***excitatriz sem escova*** é um pequeno gerador ac com seu circuito de campo montado no estator e o circuito de armadura montado no rotor.

A saída trifásica da excitatriz é retificada para corrente contínua, por um circuito retificador trifásico também montado no próprio gerador. Isto então alimenta o circuito de campo principal da máquina.

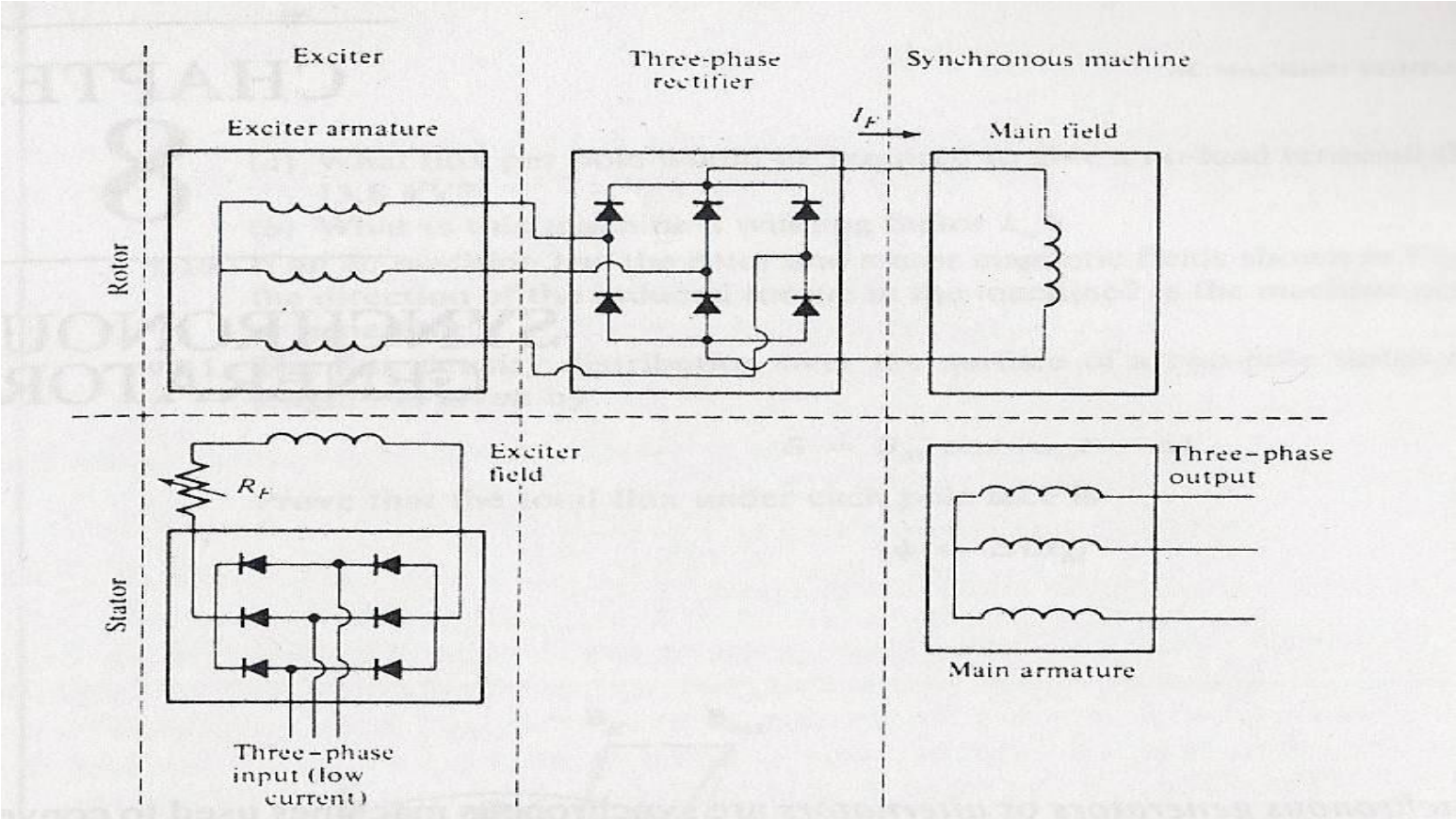


EXCITATRIZ SEM ESCOVA

Para produzir a excitação de um gerador completamente independente de qualquer fonte de potência externa, uma pequena excitatriz piloto.

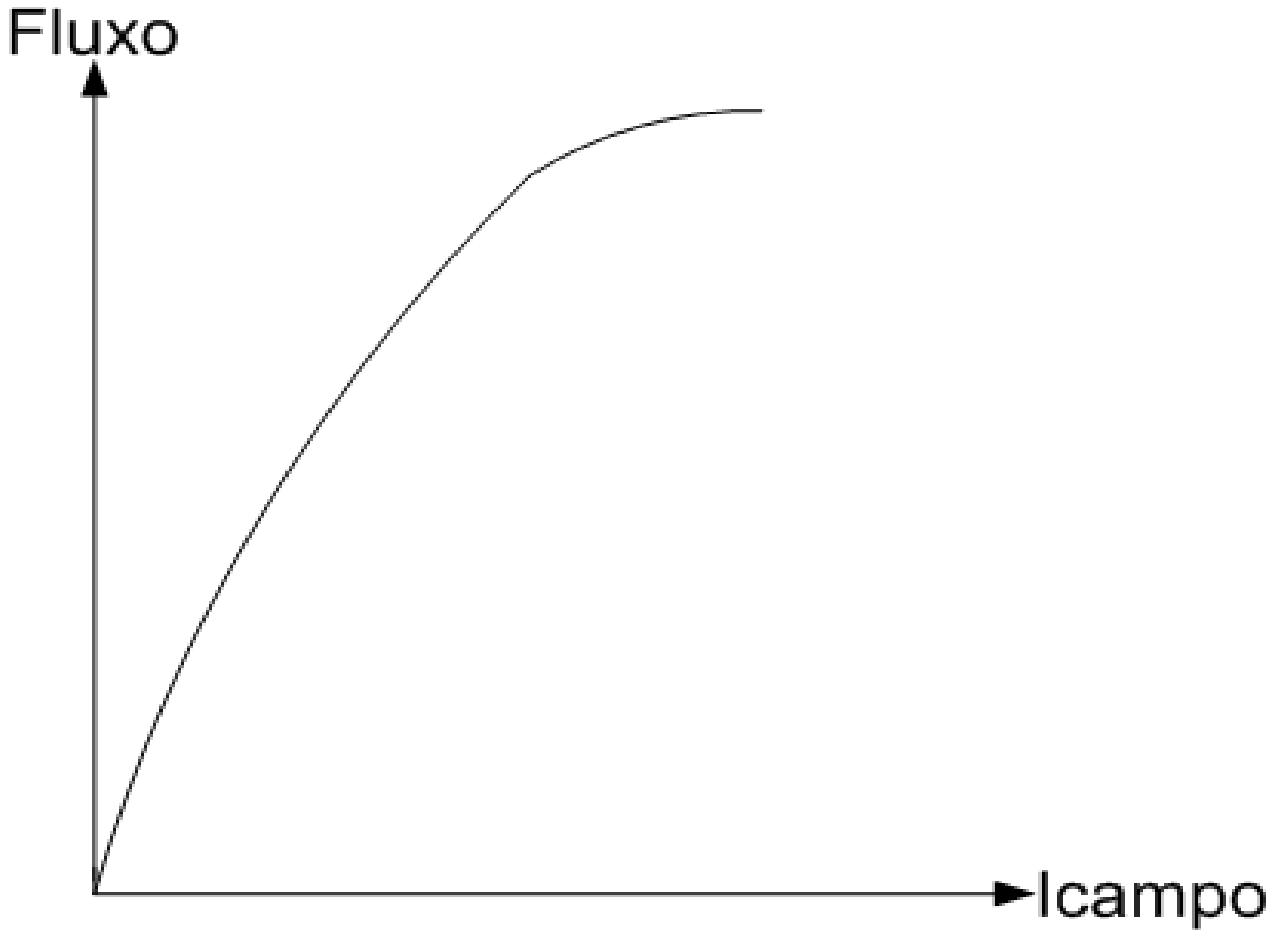
Trata-se de um gerador de CA com ímã permanente montado no rotor e um enrolamento trifásico no estator. Ela produz a potência necessária para o circuito de campo da excitatriz principal.

A figura a seguir, apresenta essa configuração.



Gerador com excitatriz piloto

Gráfico fluxo x corrente



Circuito equivalente

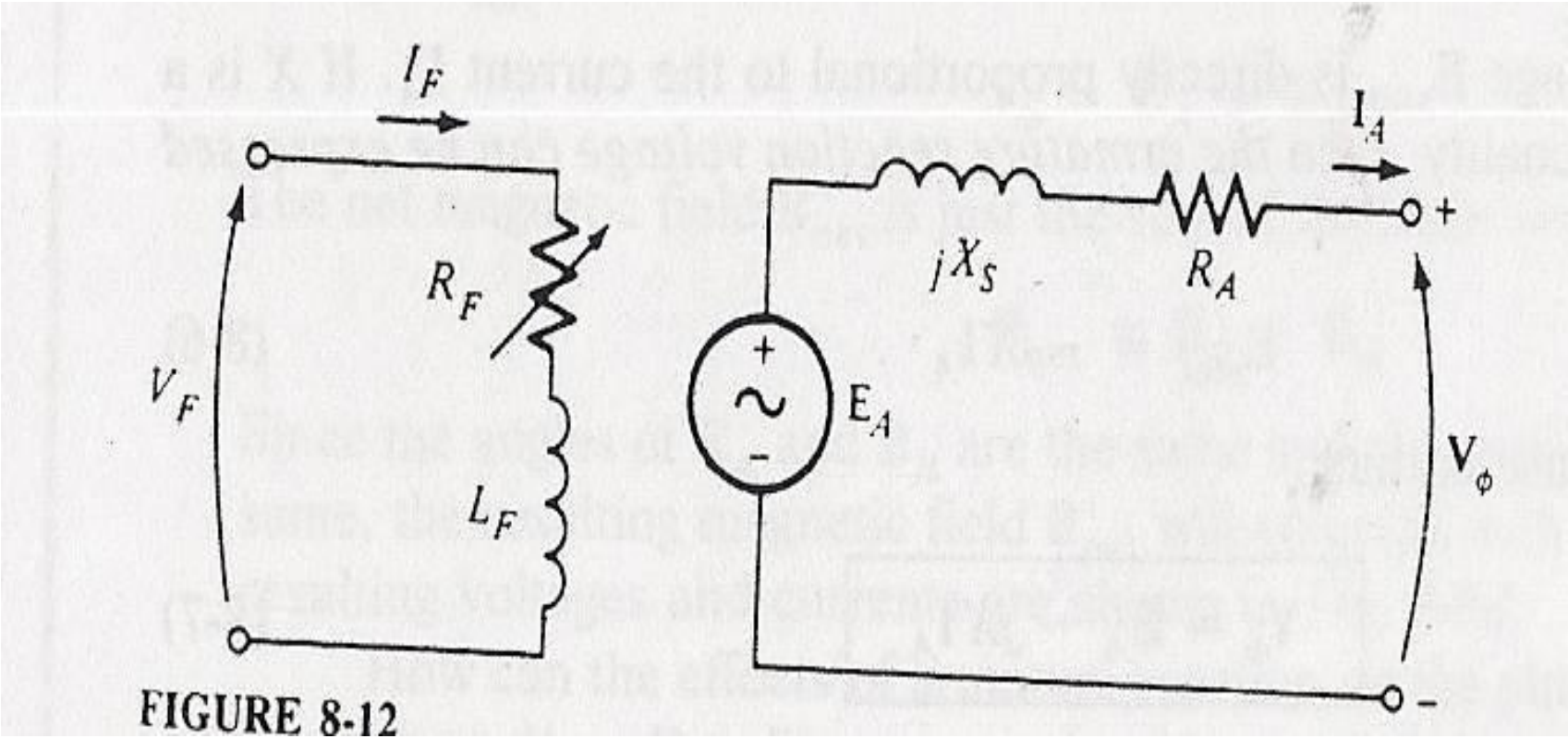


FIGURE 8-12

Diagrama fasorial do gerador síncrono

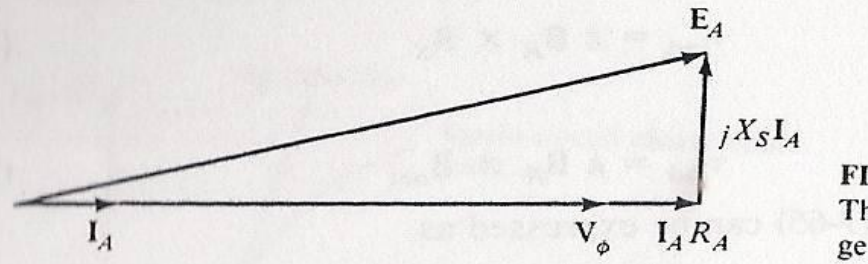
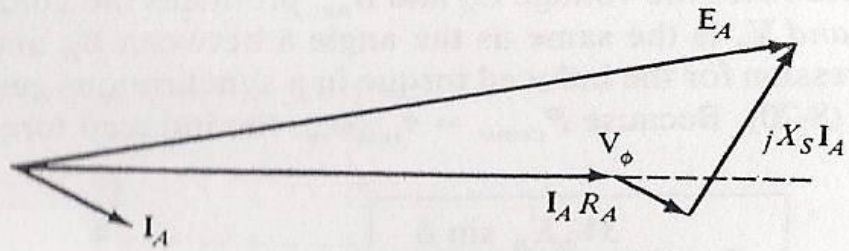
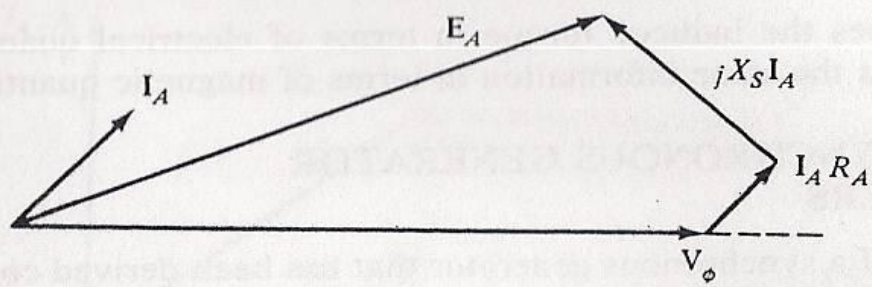


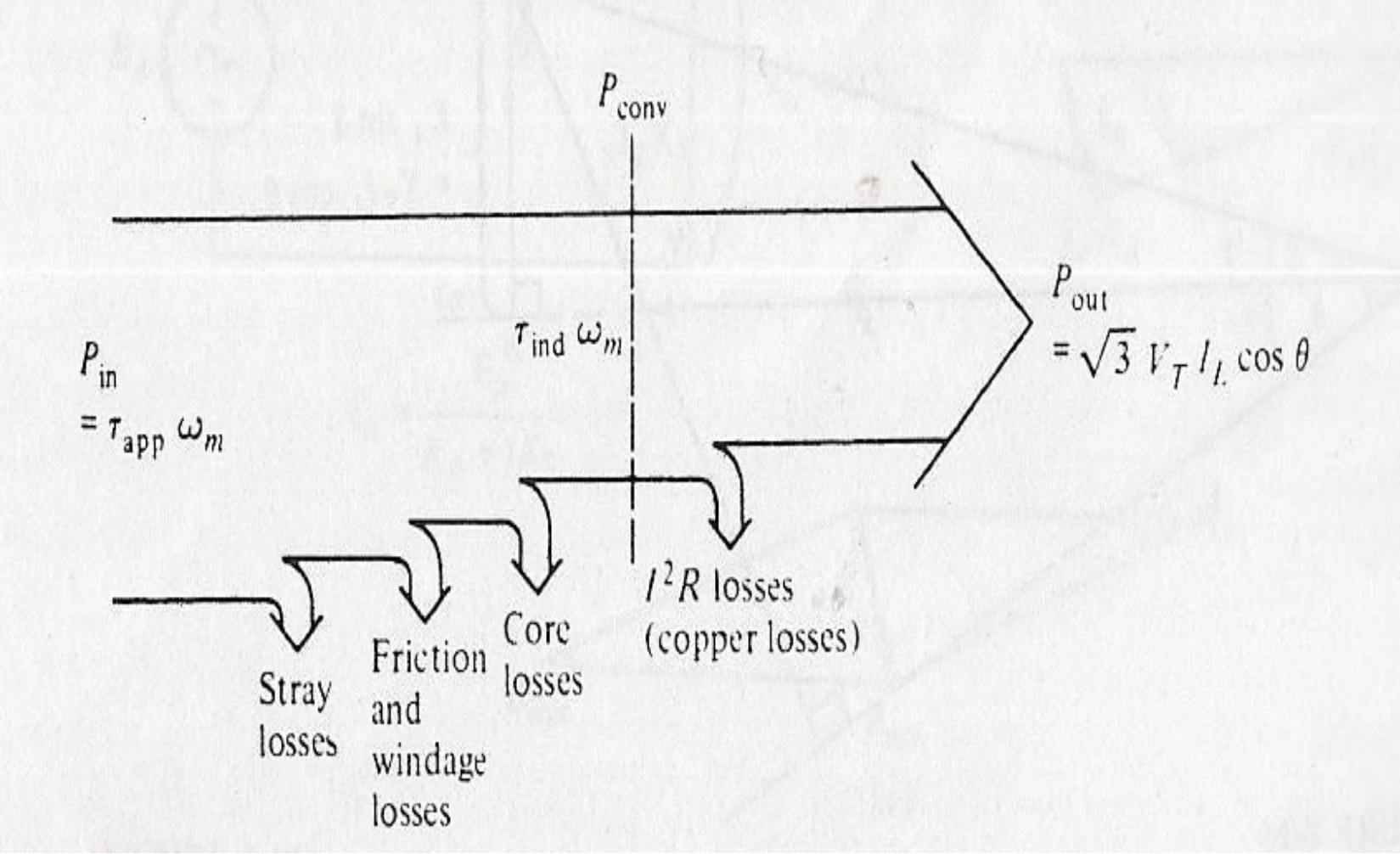
FIGURE 8-13
The phasor diagram of a synchronous generator at unity power factor.



(a)



Potência e torque em geradores síncronos



Medição dos parâmetros do modelo do gerador síncrono

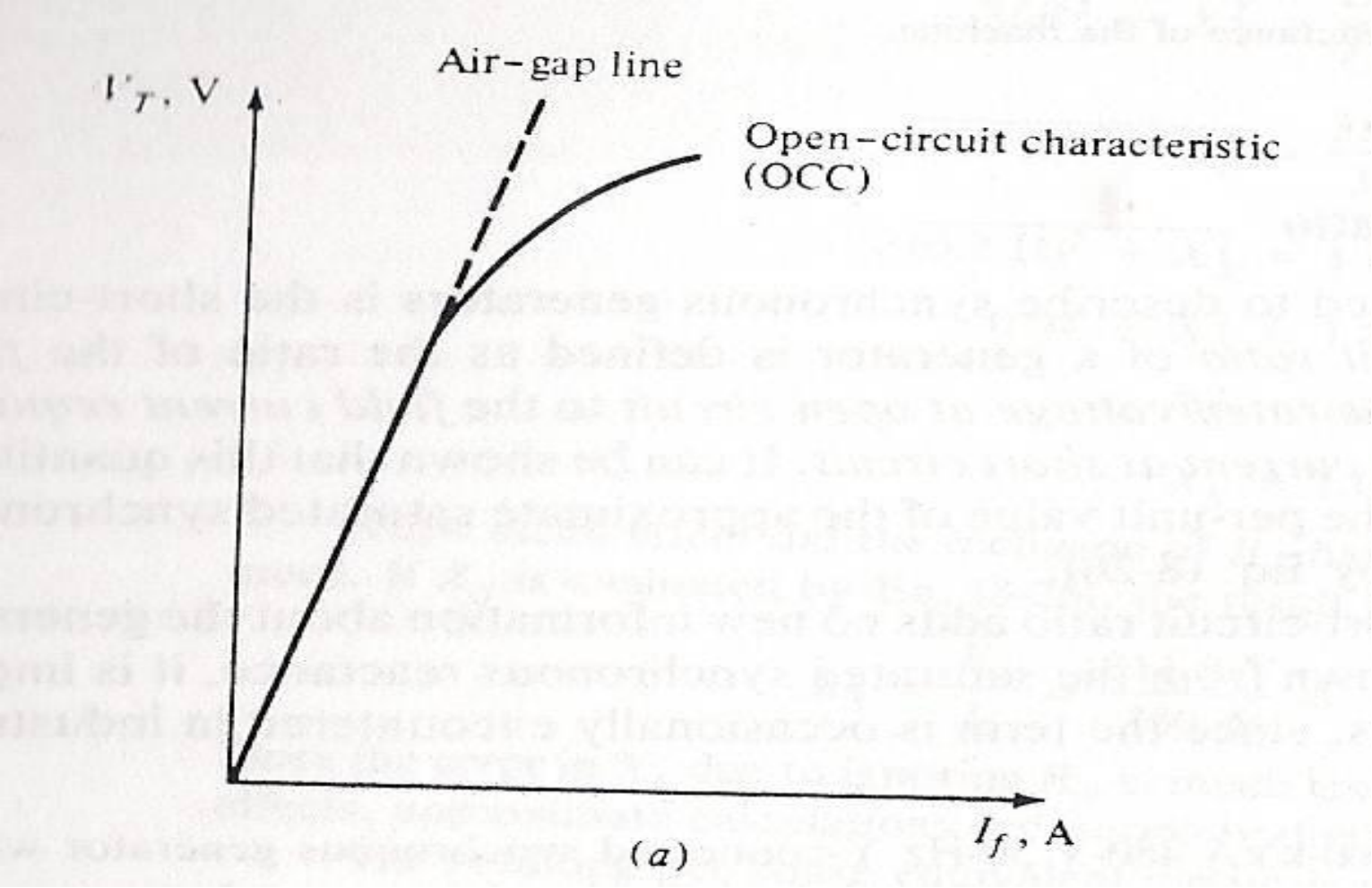
1. Relação entre a corrente de campo e o fluxo

2. Reatância síncrona

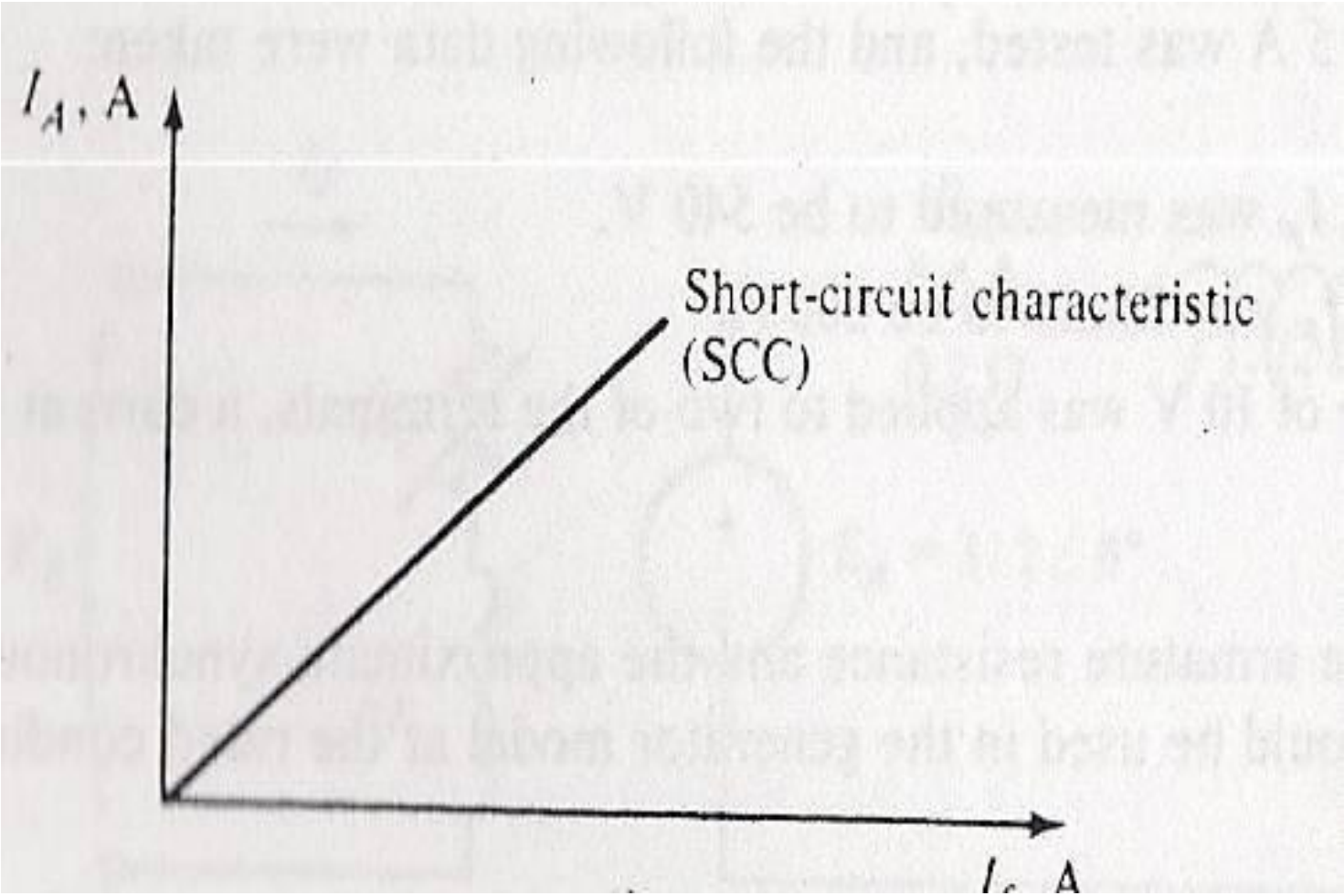
3. A resistência de armadura

Esses parâmetros são encontrados a partir de dois testes, denominados de teste de circuito aberto e teste de curto circuito

Característica de circuito aberto



Característica de curto circuito



Procedimentos para o teste de circuito aberto

1. O gerador é acionado na velocidade nominal e os terminais permanecem sem carga;

2. A corrente de campo é gradualmente aumentada e registra-se o valor da tensão terminal em cada instante

3. Com esta característica é possível achar a tensão terminal para qualquer corrente de campo

Teste de curto circuito

1. Ajusta-se a corrente de campo para zero e os terminais do gerador são ligados entre si;

2. Então a corrente de linha é medida quando a corrente de campo aumenta

Máquina síncrona trifásica – característica de magnetização

- A tensão eficaz induzida por fase E_f é dada por:

$$\boxed{E^{rms} = 4,44.f.N.\phi_{\max}.k_w}$$

onde,

$\phi_{\max}$ é o fluxo por pólo devido a corrente de campo I_f

k_w é o fator de enrolamento, devido à disposição do enrolamento

N é o número de espiras por fase

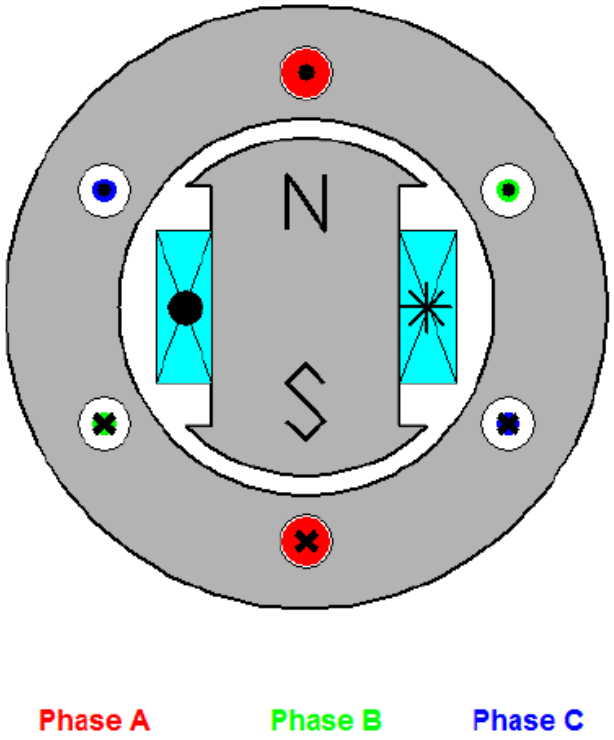
Máquina síncrona trifásica – característica de magnetização

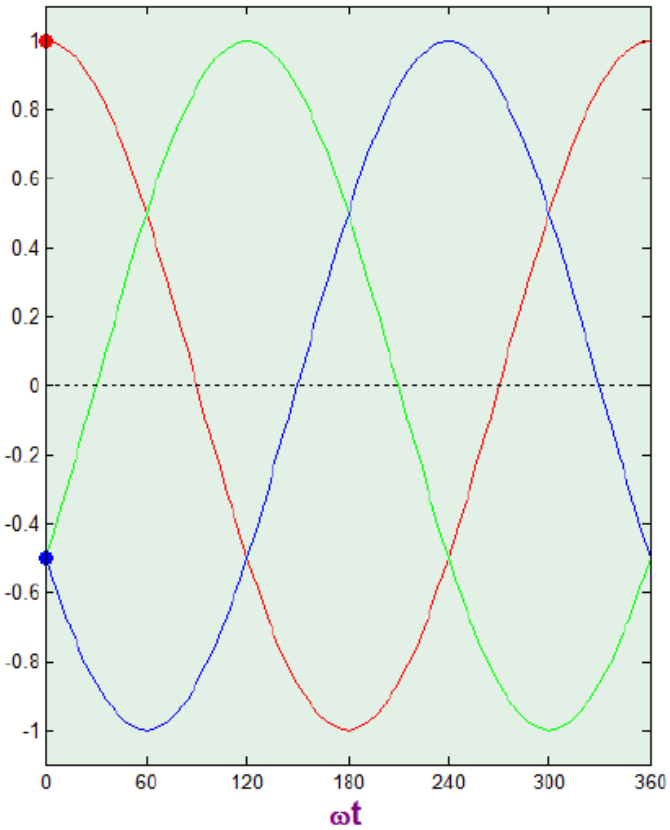
- O campo girante no entreferro, produzido pelo rotor, induz tensão trifásica senoidal nos enrolamentos do estator;
- A velocidade do rotor e a frequência das tensões induzidas são relacionadas por:

$$\boxed{n = \frac{120 f}{p}} \qquad \text{[rpm]}$$

- p = número de polos
- f = frequência elétrica

Tensão induzida no estator:

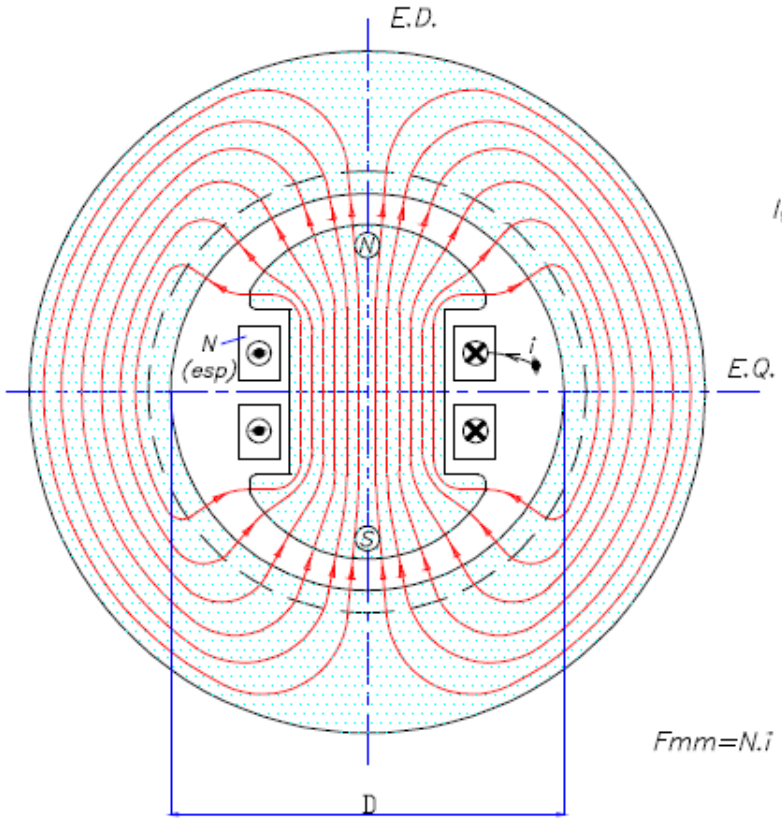




http://www.ece.umn.edu/users/riaz/animations

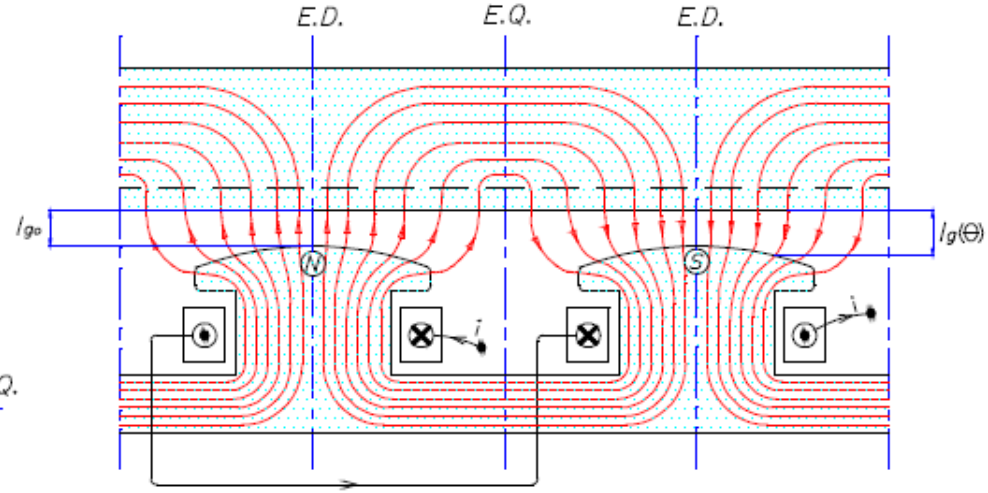
FORMAÇÃO DO CAMPO MAGNÉTICO NA MÁQUINA SÍNCRONA

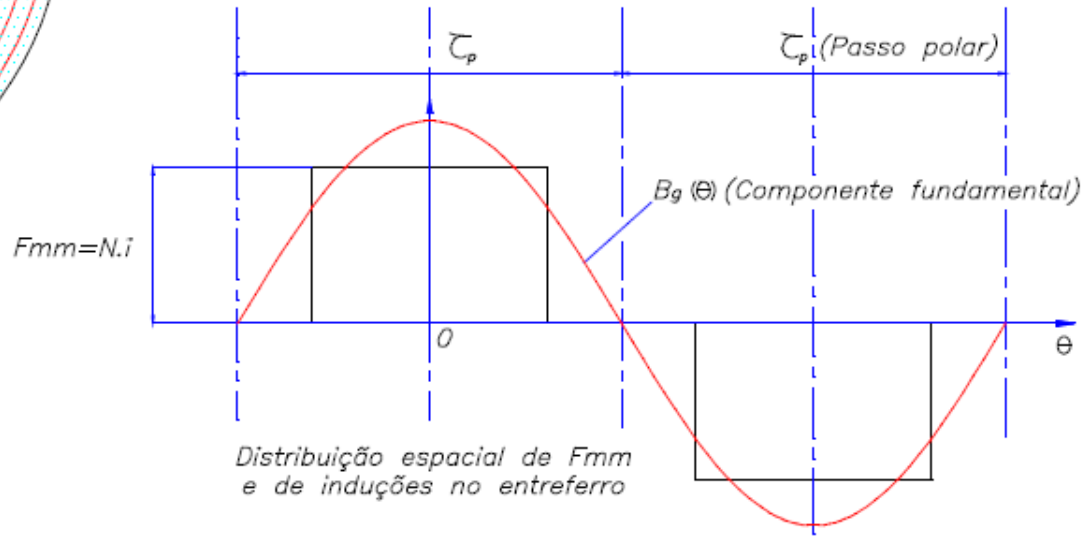
Máquina de pólos salientes – 2p=2



Vista em corte da máquina

Vista planificada da máquina



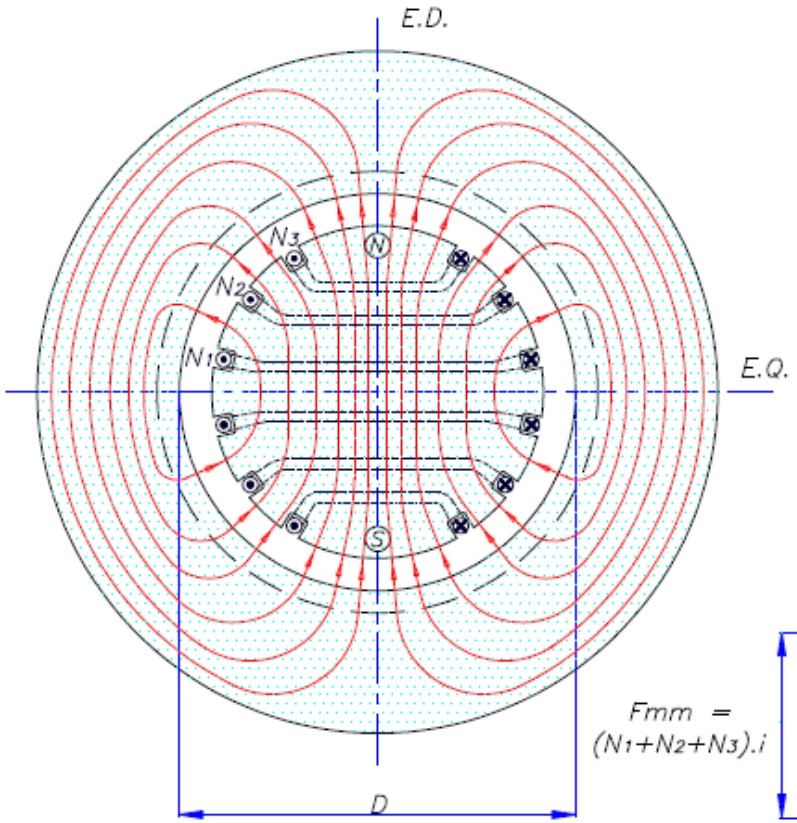


Distribuição espacial de Fmm e de induções no entreferro

CORRENTE CONTÍNUA DE EXCITAÇÃO INJETADA NO ROTOR → $N.i = Fmm$

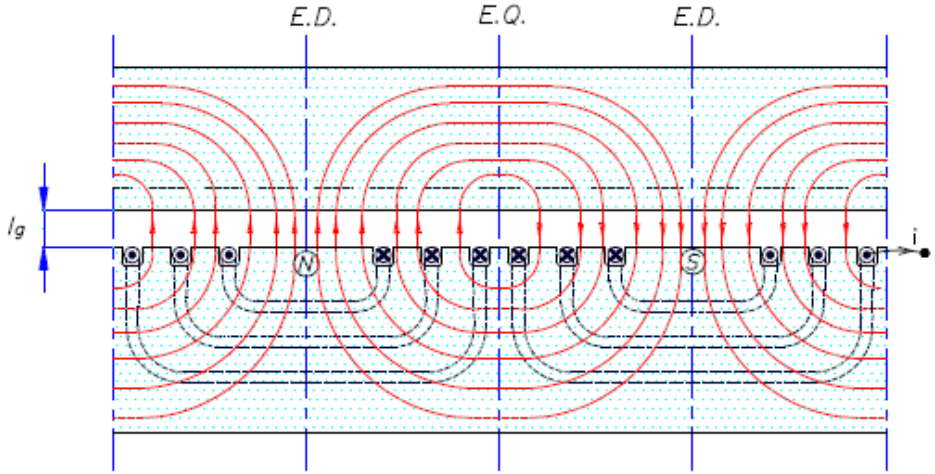
FORMAÇÃO DO CAMPO MAGNÉTICO NA MÁQUINA SÍNCRONA

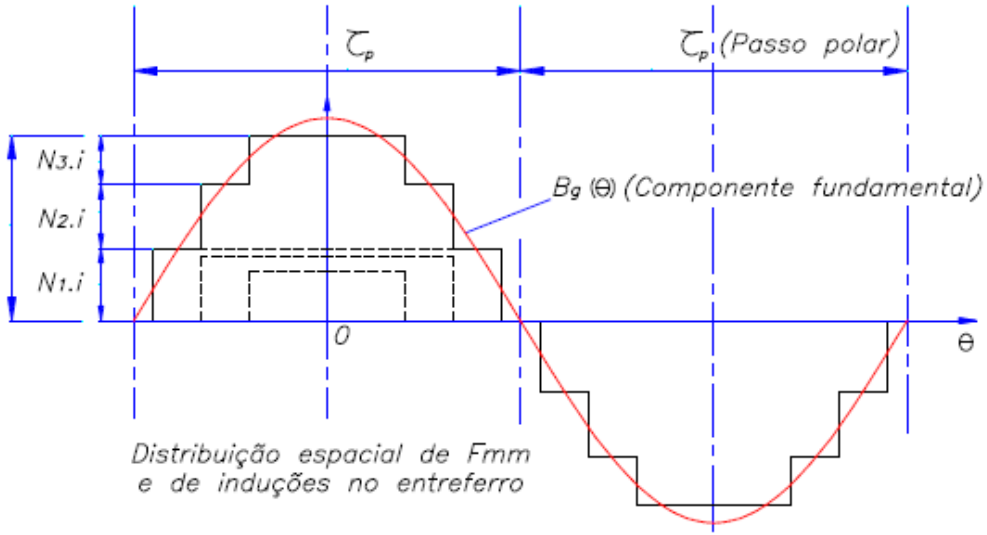
Máquina de pólos lisos – 2p=2



Vista em corte da máquina

Vista planificada da máquina



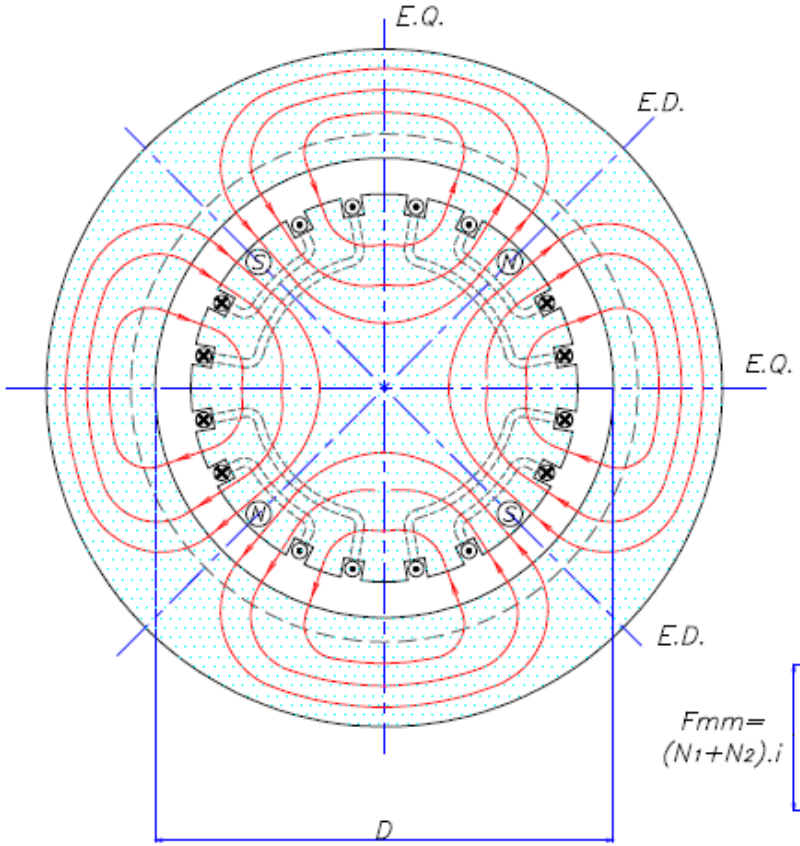


Distribuição espacial de Fmm e de induções no entreferro

CORRENTE CONTÍNUA DE EXCITAÇÃO INJETADA NO ROTOR ➔ $N.i = Fmm$

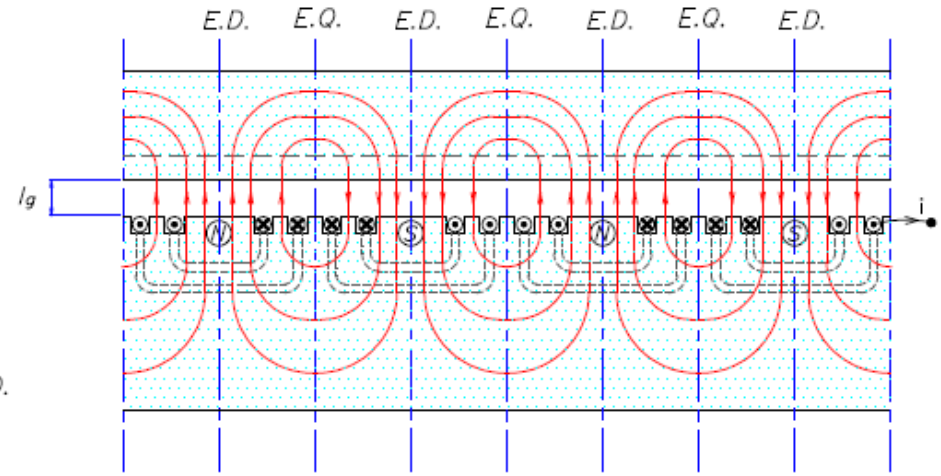
FORMAÇÃO DO CAMPO MAGNÉTICO NA MÁQUINA SÍNCRONA

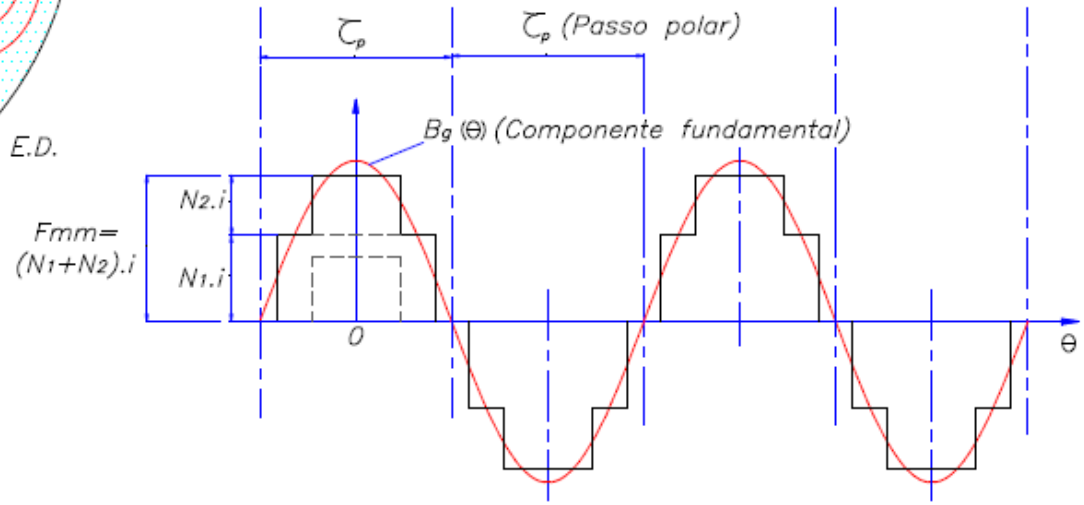
Máquina de pólos lisos – 2p=4



Vista em corte da máquina

Vista planificada da máquina

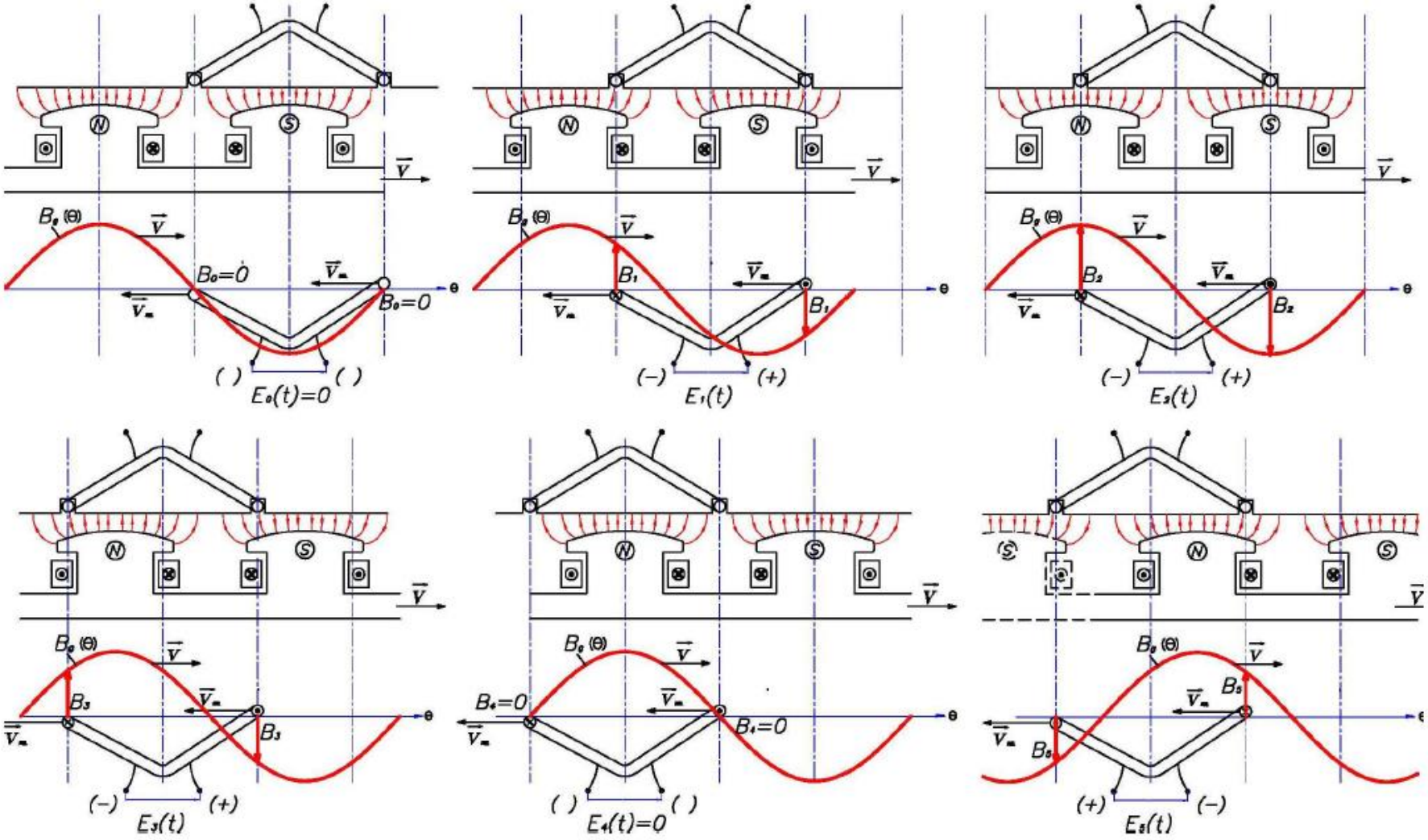




Distribuição espacial de Fmm e de induções no entreferro

CORRENTE CONTÍNUA DE EXCITAÇÃO INJETADA NO ROTOR → $N.i = Fmm$

GERAÇÃO DE TENSÃO NA MÁQUINA SÍNCRONA → Evolução da tensão induzida no tempo



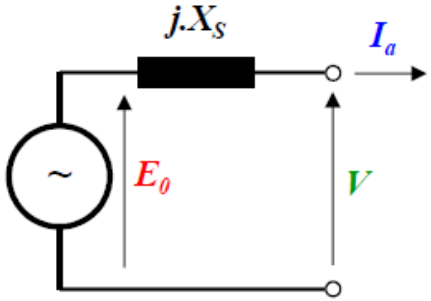
MODELO DA MÁQUINA SÍNCRONA - CIRCUITO EQUIVALENTE

COMPOSIÇÃO DE CAMPOS NO ENTREFERRO ➔ PRODUZ CAMPO RESULTANTE QUE DETERMINA A TENSÃO NOS TERMINAIS DA MÁQUINA EM CARGA ➔ NATUREZA DA CARGA DEFINE A REGULAÇÃO DE TENSÃO DE SAÍDA

- ➔ INTERAÇÃO DE CAMPOS DESMAGNETIZA A MÁQUINA COM CARGA INDUTIVA
- ➔ INTERAÇÃO DE CAMPOS MAGNETIZA A MÁQUINA COM CARGA CAPACITIVA

MODELO DO COMPORTAMENTO É REPRESENTADO ADEQUADAMENTE POR UM **CIRCUITO EQUIVALENTE**:

VARIAÇÃO DA TENSÃO DEVIDO À CORRENTE DE CARGA, RESULTANTE DA COMPOSIÇÃO DE CAMPOS NO ENTREFERRO É MODELADA POR UMA REATÂNCIA INDUTIVA ➔ **REATÂNCIA SÍNCRONA** - (X_S)



$$\dot{E}_0 = \dot{V} + j.X_S.\dot{I}_a$$

Modelo por fase da máquina

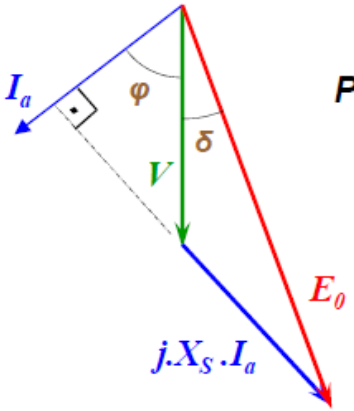


Diagrama fasorial

Potências emitidas pela máquina síncrona

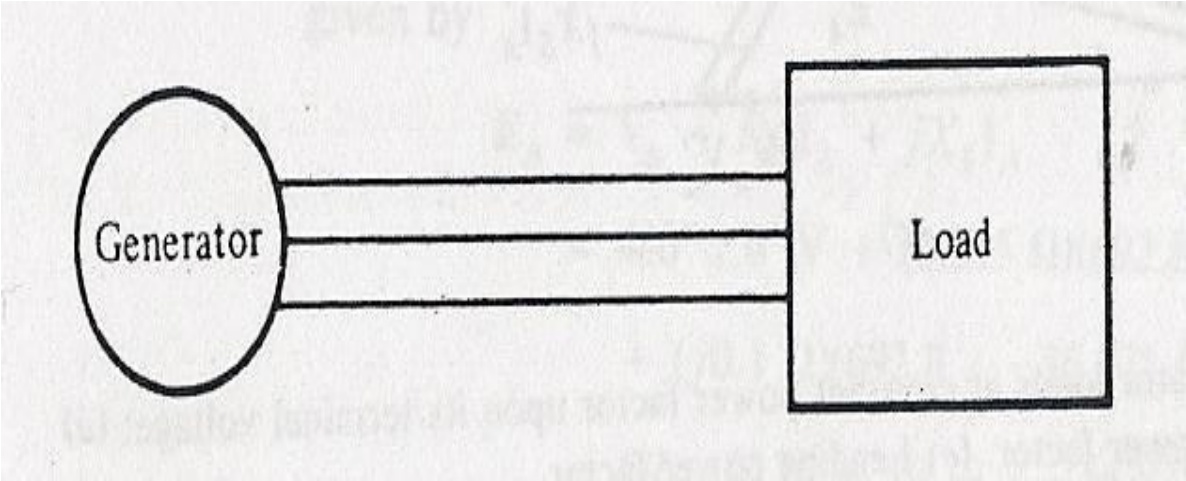
$$\begin{cases} P_{at} = 3.V.I_a.\cos\varphi \\ Q_{reat} = 3.V.I_a.sen\varphi \\ P_{at} = 3.\dfrac{V.E_0}{X_S}\cdot sen\delta \end{cases}$$

φ : Ângulo de fase da corrente

δ : Ângulo de potência da máquina

Operação isolada do
Gerador síncrono

1. Efeito da variação da carga na operação do gerador



Para essa análise, a velocidade do gerador é mantida constante, além do fluxo do rotor também é assumido constante.

Será avaliado primeiro a operação com fator de potência em atraso.

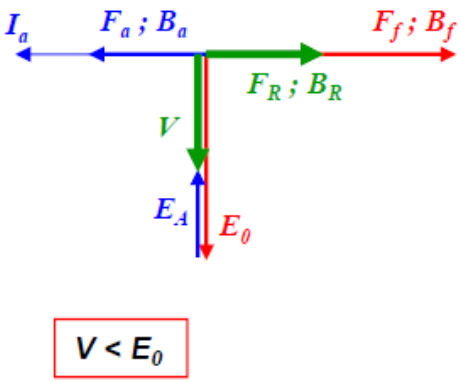
Se mais carga é adicionada no mesmo fator de potência, $|I_A|$ aumenta mas permanece com o mesmo ângulo com respeito a tensão terminal.

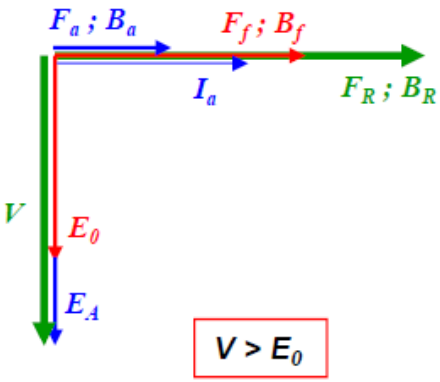
Então, a tensão terminal é reduzida pois inicialmente consideramos que a tensão interna é considerada constante.

$$\hat{V}_\phi = \hat{E}_A - jX_s \hat{I}_A$$

COMPOSIÇÃO DE VETORES DE CAMPO NO ENTREFERRO DA MÁQUINA SÍNCRONA

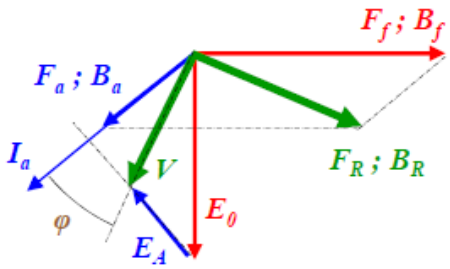
CORRENTE PURAMENTE INDUTIVA

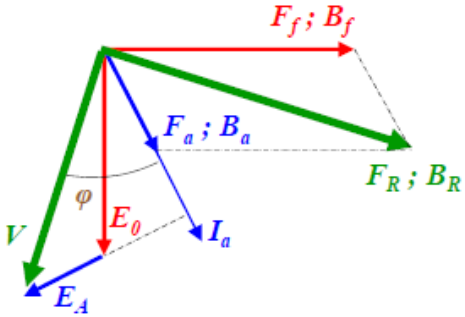




CORRENTE PURAMENTE CAPACITIVA

CORRENTE PARCIALMENTE INDUTIVA



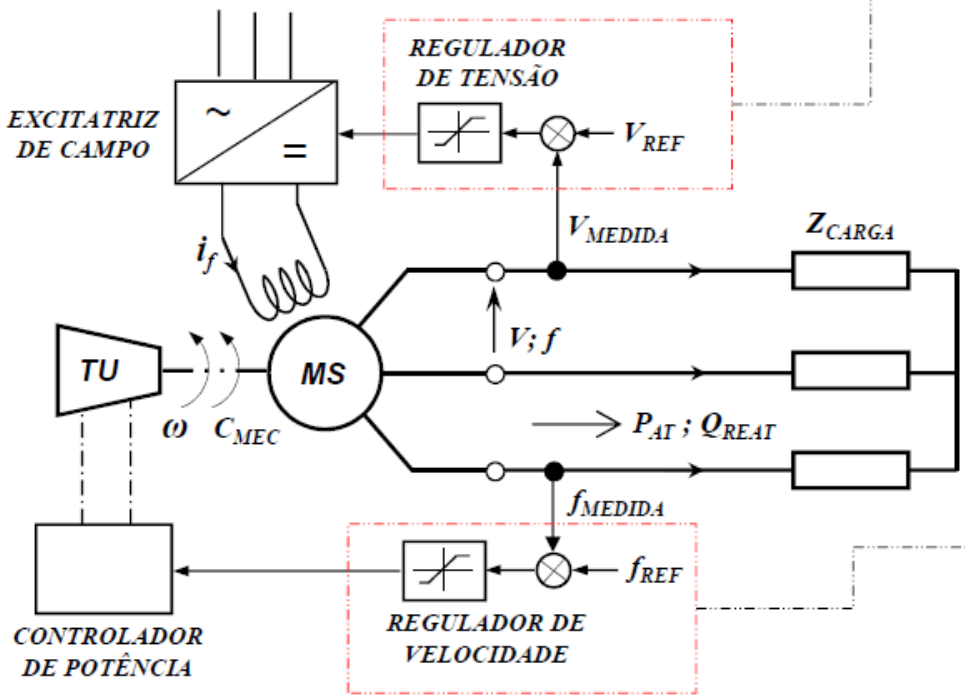


CORRENTE PARCIALMENTE CAPACITIVA

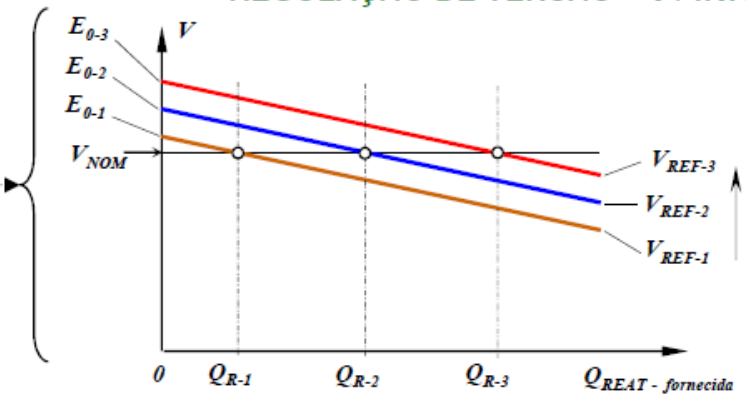
REPRESENTAÇÃO VETORIAL DAS DISTRIBUIÇÕES DE CAMPOS MAGNÉTICOS PRESENTES NO ENTREFERRO DA MÁQUINA SÍNCRONA SOB CARGA

CARACTERÍSTICAS DE REGULAÇÃO DE TENSÃO E FREQÜÊNCIA NAS MÁQUINAS SÍNCRONAS

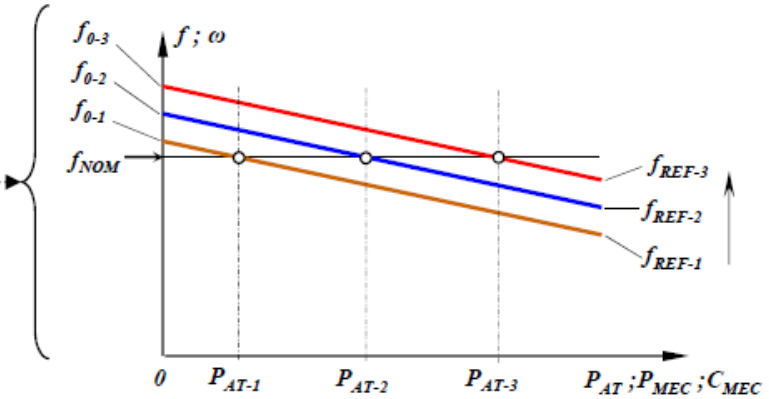
CONTROLADORES ESTABELECEM CARACTERÍSTICAS DE <u>REGULAÇÃO POSITIVA</u> DA VARIÁVEL CONTROLADA EM FUNÇÃO DA CARGA → AJUSTE TÍPICO DE REGULAÇÃO : 2 % DO VALOR NOMINAL (V ou f) PARA POTÊNCIA 1 p.u.



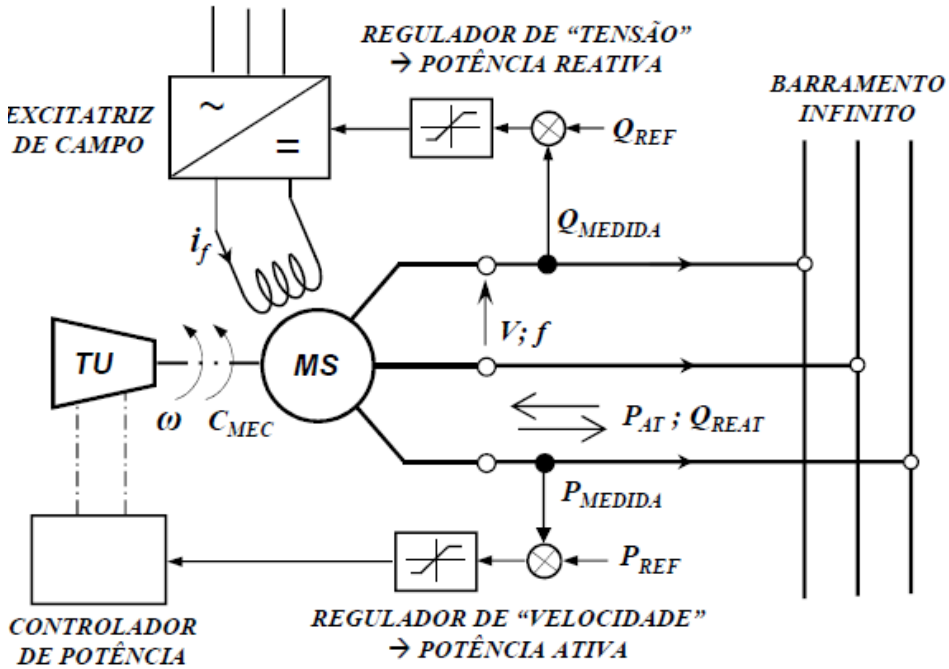
REGULAÇÃO DE TENSÃO – V / kVAr



REGULAÇÃO DE FREQÜÊNCIA – Hz / kW



CARACTERIZAÇÃO DA OPERAÇÃO DA MÁQUINA SÍNCRONA CONECTADA AO SISTEMA



TENSÃO : Definida pelo barramento

FREQÜÊNCIA : Definida pelo barramento

POTÊNCIA ATIVA : Fornecida (GERADOR) ou absorvida (MOTOR) pela máquina, controlada pelo interação no eixo

POTÊNCIA REATIVA : Fornecida (CAPACITOR) ou absorvida (INDUTOR) pela máquina, controlada pela excitação

CORRENTE, POTÊNCIAS ATIVA E REATIVA : Monitoradas pelo sistema de proteção da máquina síncrona

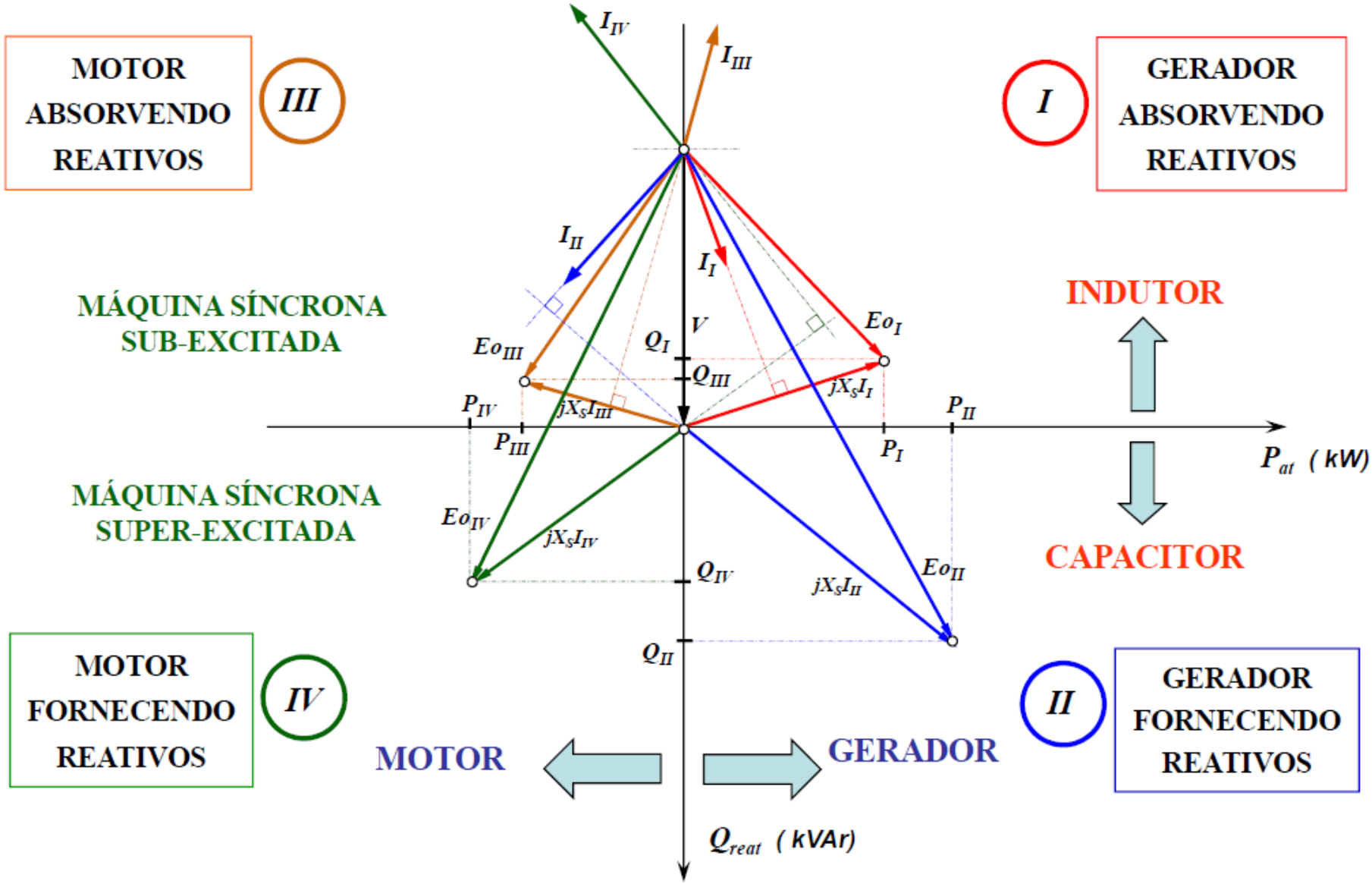
➔ **AUMENTO DA POTÊNCIA ATIVA: Até o limite eletromagnético da máquina – acima disso, a máquina perde o sincronismo com a rede → dispara no modo gerador, impulsionada pela turbina, ou estaciona no modo motor, restrita pela carga mecânica no eixo**

➔ **AUMENTO DA CARGA REATIVA: Até o limite de excitação da máquina ou da excitatriz**

➔ **PERDA DE SINCRONISMO CARACTERIZA O LIMITE DE ESTABILIDADE DA OPERAÇÃO NA REDE**

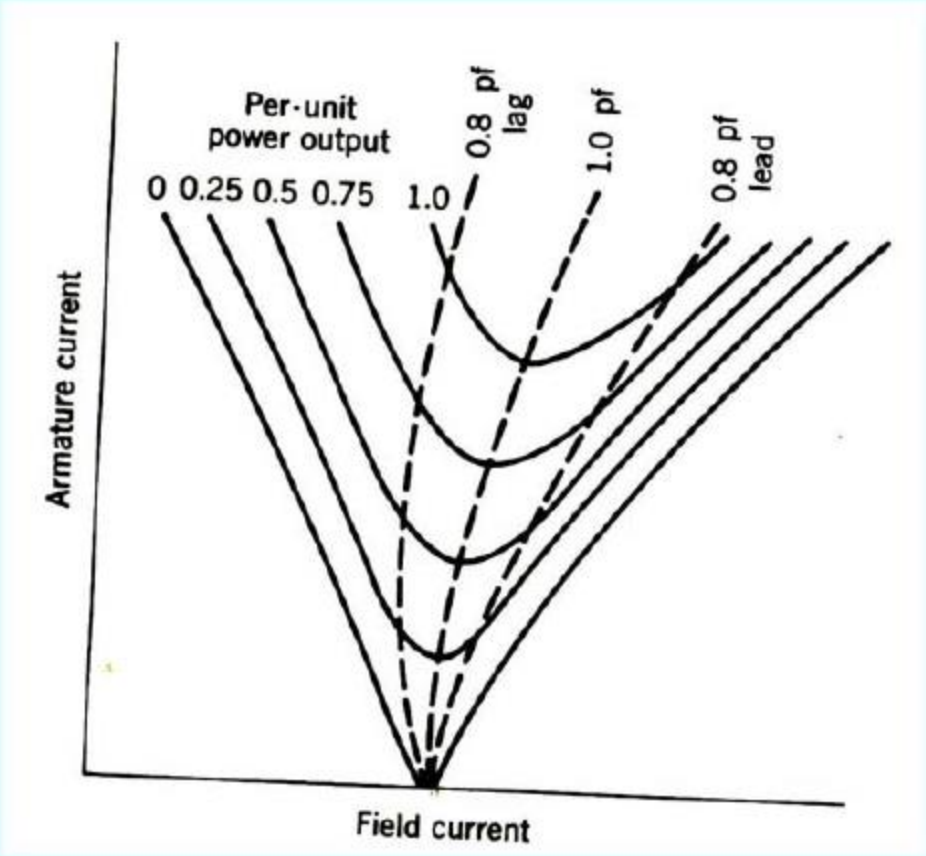
➔ **MODO DE OPERAÇÃO DA MÁQUINA NOS MODOS GERADOR, MOTOR E COMPENSADOR SÍNCRONO**

INTERAÇÃO DA MÁQUINA SÍNCRONA COM A REDE – Quadrantes de operação

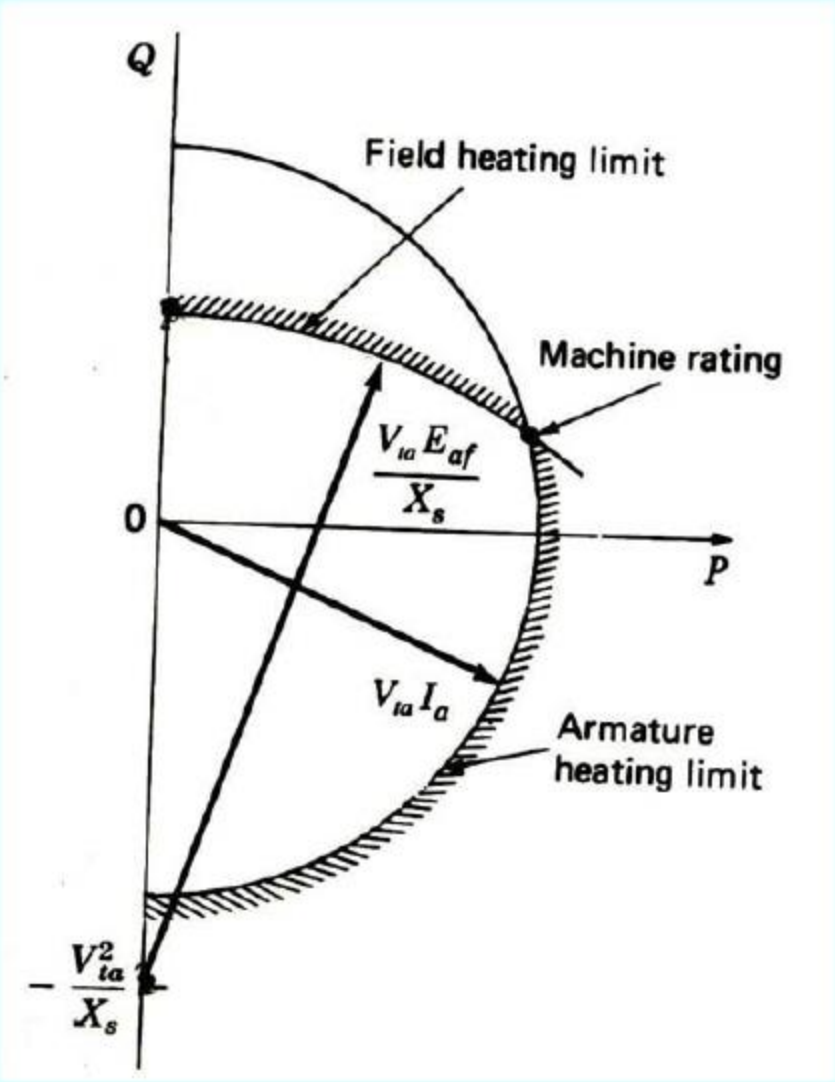


Curva V

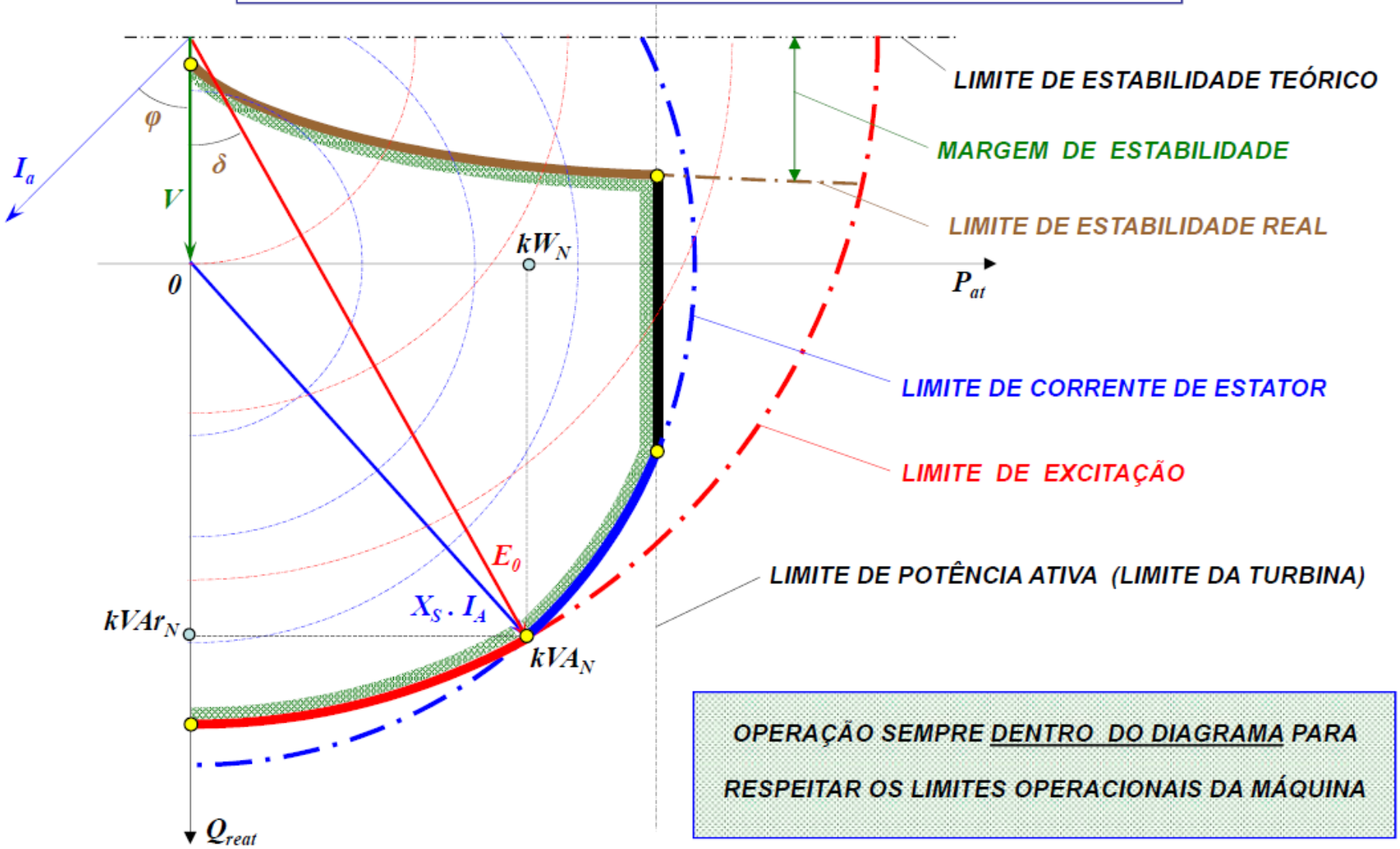
- **Motor síncrono**



Curvas de capacidade

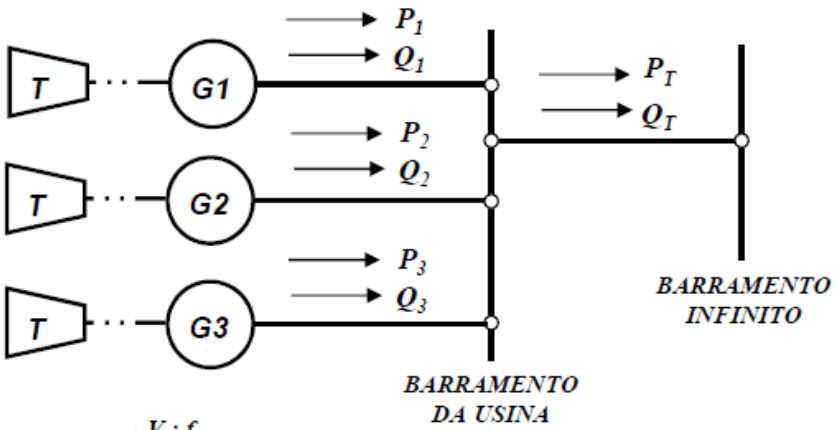


CURVA DE CAPABILIDADE DA MÁQUINA SÍNCRONA - OPERAÇÃO NA REDE



OPERAÇÃO SEMPRE DENTRO DO DIAGRAMA PARA RESPEITAR OS LIMITES OPERACIONAIS DA MÁQUINA

GERADORES OPERANDO EM PARALELO – CONECTADOS À REDE ELÉTRICA



CADA GERADOR DOTADO DE :

→ REGULADOR DE POTÊNCIA ATIVA (VELOCIDADE)

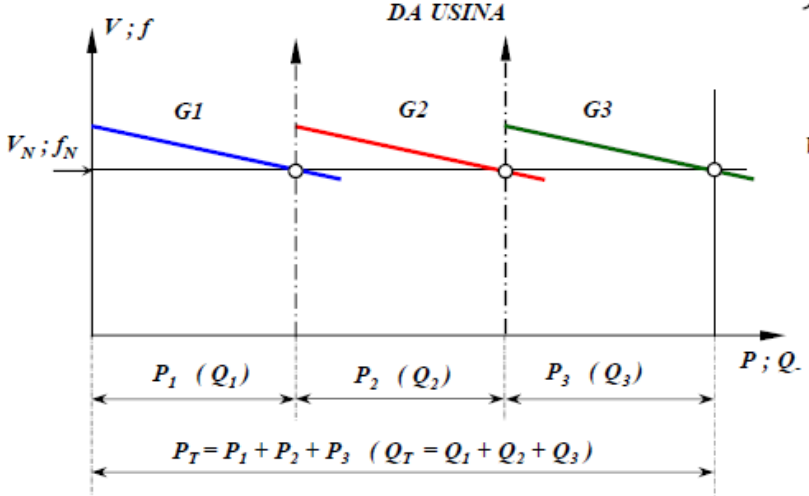
→ REGULADOR DE POTÊNCIA REATIVA (TENSÃO)

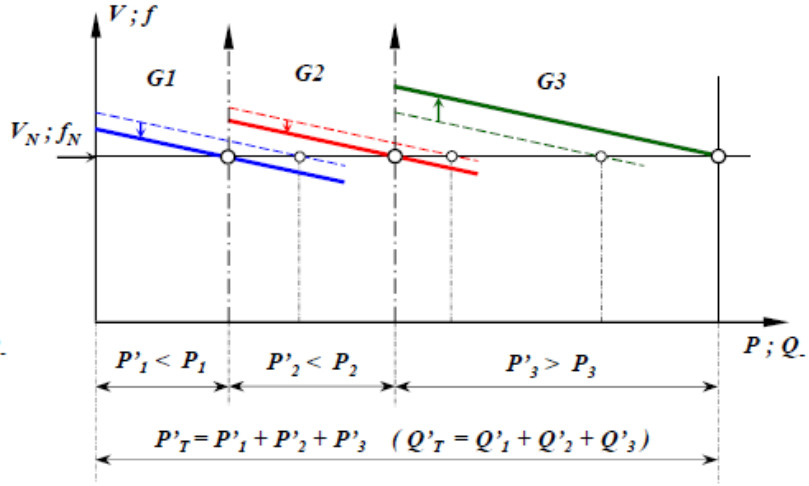
→ MEDIÇÃO DE POTÊNCIA ATIVA

→ MEDIÇÃO DE POTÊNCIA REATIVA

→ CONTROLE CENTRAL DA USINA → DIVISÃO DE CARGA ATIVA E REATIVA

→ CONTROLE DO SISTEMA ELÉTRICO → PROMOVE O CARREGAMENTO ENTRE USINAS



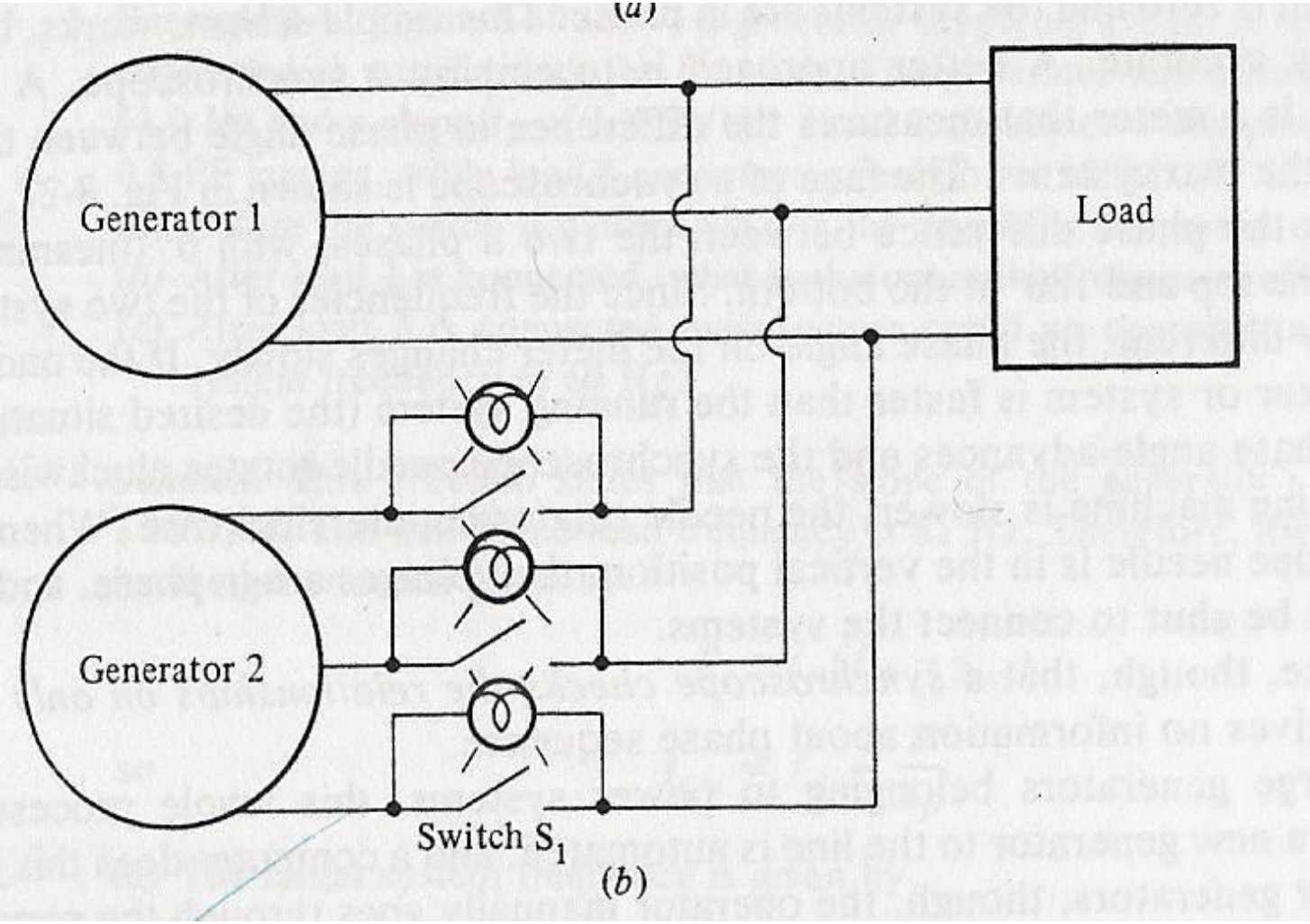


Aumento de referência de um gerador (G3) → <u>Aumenta</u> P_T e Q_T com V e f constantes

Se P_T e Q_T permanecerem constantes → obriga à <u>redução</u> de referências de G1 e G2 para se adequar à condição de V e f constantes

Se não houver adequação de referências de G1 e G2 com P_T constante → <u>circulação de potência entre máquinas</u>

Procedimentos para o paralelismo



1. Usando voltímetros, a corrente de campo do novo gerador deve ser ajustada para que sua terminal seja igual a tensão de linha do sistema

2. A seqüência de fase do novo gerador deve ser comparada com a seqüência de fase do sistema já em operação.

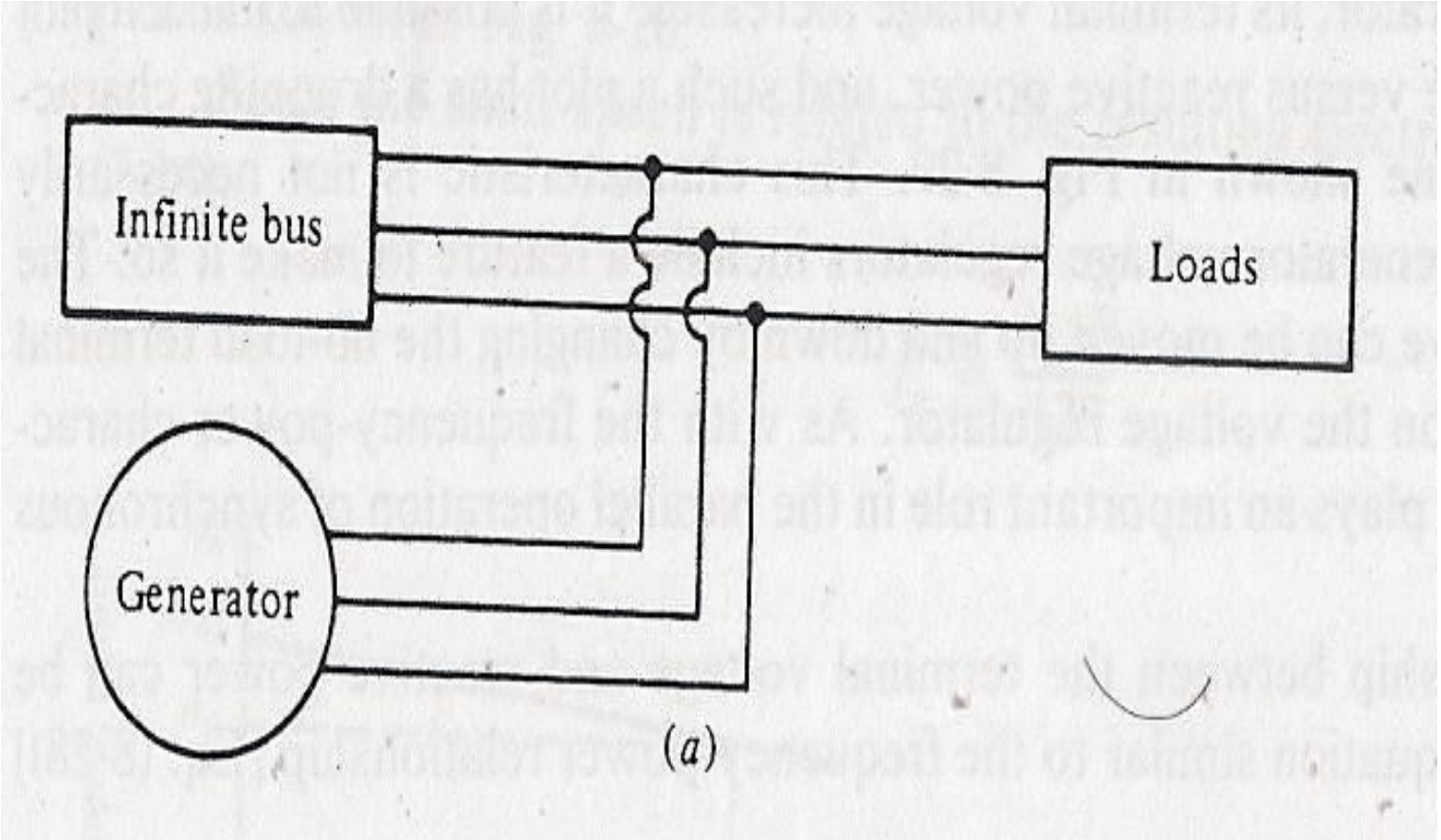
2.1. Uma maneira é conectar um pequeno motor de indução aos terminais de cada um dos geradores.

Uma forma simples de verificar a seqüência de fase através das lâmpadas é que quando estão em fase, não existe diferença de potencial nos terminais das lâmpadas.

Existem aparelhos denominados de ***sincronoscó-pios*** cujo objetivo é verificar a diferença de fase entre duas fases "a". Isto acontece porque, como as freqüências não são exatamente iguais o aparelho mostra uma deflexão no indicador.

Ele não fornece nenhuma informação sobre a seqüência de fase.

Operação de geradores em paralelo com um sistema de potência grande



Quando um gerador é conectado em um sistema de potência, esse sistema é geralmente tão grande que a operação do gerador não causará efeitos sobre o sistema.

Barra infinita é um grande sistema de potência que cuja tensão e freqüência não variam independentemente de quanta potência está sendo suprida ou consumida pelo sistema.

Referencias

- Ivan Chabu – Fundamentos de Maquinas Elétricas – Curso Energias Renováveis , Geração Distribuída e Eficiência Energética - PECE – Epusp – 2019
- Antonio Carlos Ferreira - Maquinas Sincronas Regime Permanente – UFRJ
- Alvaro Augusto – Geradores Síncronos – UTFPR - 2009
- Mauricio B C Salles - PEA3399 – Conversão Eletromecânica de Energia – Epusp